

鋼構造のインターフェースストラクチャの
有限要素モデル化に関する調査研究

報告書

令和元年9月

土木学会 鋼構造委員会

鋼構造のインターフェースストラクチャの
有限要素モデル化に関する調査研究小委員会

まえがき

人口減少の時代を迎えようとしている我が国において、社会資本の整備・維持管理は今後ますます合理化が望まれている。橋梁においては、特に構造そのものの合理化に加え、維持管理の合理化に向けた様々な工夫・ブレイクスルーが求められている。既設構造物においても、現地の様々な環境・制約の中で補修・補強を効率よく行うことが求められる。

構造物の合理化・効率化のための技術開発において、数値シミュレーション、とりわけ有限要素法の果たす役割は近年ますます大きくなっている。有限要素法は、20世紀半ばに Courant や Clough らによって提案され、半世紀以上経過した今なお構造解析の主要な方法である。これは、要素と呼ばれる小領域における区分近似を導入したことで、任意形状を取り扱うことができたことが一つの要因である。計算機の能力の向上、CAD データからの解析モデル作成および解析結果の可視化のためのプリポストプロセッサを含む商用・非商用の汎用コードの開発により、有限要素解析は技術開発・設計の現場に広く浸透した。

線形の有限要素解析においては、形状データを準備し境界条件を適切に設定すれば必ず解が得られる。ただし、この解はあくまでも離散化された問題の解、すなわち元の連続体の問題の近似解である。したがって、元の連続体の問題に角点や集中荷重作用点のような特異点を含むような場合でも、有界なひずみや応力が唯一解として得られるために解析者が特異点を見逃す可能性がある。本報告書は鋼構造のインターフェースストラクチャ、すなわち、異なる部材の接合部や異種材料の界面のような、力の伝達の複雑な問題を対象としているため、解析モデルの作成と解析結果の評価にはより一層の注意が必要な場合が多い。さらに、複数部材や異種材料の付着・接触・摩擦といった現象は、基本的に非線形性を有することに加え、標準的な有限要素法では再現できないため、利用している汎用コード特有の機能を用いることになる。接触問題の有限要素解析については技術者向けの平易な成書もなかなかないために、汎用コードのマニュアルを頼りに利用されるのではないかと想像する。

鋼構造物は、非常に多くの材料・材片を接合して作られるものであり、そのような意味では多くのインターフェースを内在する。解析の目的・範囲によって、一体化されたものとしてモデル化してよいインターフェースと、そうでないインターフェースを判断しなくてはならない。さらに、一体化を前提としないインターフェースストラクチャの挙動を正しく解析し理解するためには、モデル化する必要がある現象を正しく選択し、それを正しくモデル化する必要がある。それだけに、解析者の裁量によるところが大きくなるわけであるが、技術者や研究者によってこれまで培われてきたノウハウが大いに参考になると考えた。そこで、土木学会鋼構造委員会の「鋼構造のインターフェースストラクチャの有限要素モデル化に関する調査研究小委員会」で国内外においてインターフェースストラクチャがどのようにモデル化・解析され、どのような結果・知見が得られたかについて文献調査を行った。本書は当該委員会による2年間の調査・議論を通じた活動の成果を取りまとめたものである。

一体化を前提とできないインターフェースストラクチャを扱うことになった技術者・研究者が、モデル化すべき現象を選択し、そのモデル化の方法を検討する際に、本書がその一助となれば幸いである。その結果、鋼構造物の設計・維持管理・補修補強の合理化のための技術革新を後押しすることができれば望外の喜びである。

最後になりましたが、本務にご多忙な中で本小委員会において熱心にご活動いただき、本書の執筆にご尽力いただきました委員の皆様がこの場をお借りして心より御礼申し上げます。さらに、委員会運営および本書のとりまとめに献身的にご協力いただきました石井博典幹事長と荒川淳平氏に重ねて厚く御礼申し上げます。

平成31年2月

土木学会鋼構造委員会

鋼構造のインターフェースストラクチャの有限要素モデル化に関する調査研究小委員会

委員長 齊木 功 (東北大学)

土木学会 鋼構造委員会 鋼構造のインターフェースストラクチャの有限要素モデル化に関する調査研究小委員会
委員構成 (50 音順, 敬称略)

委員長	斉木 功	東北大学
幹事長	石井 博典	(株) 横河ブリッジホールディングス
委員	荒川 淳平	(株) 横河ブリッジホールディングス
	岩坪 要	熊本高等専門学校
	北村 耕一	(株) IHI インフラシステム
	木下 幸治	岐阜大学
	柴藤 勝也	(一社) 日本建設機械施工協会
	下峠 康宏	(株) 建設技術研究所
	高橋 雅裕	(株) 長大
	田島 文彦	伊藤忠テクノソリューションズ (株)
	田村 洋	横浜国立大学
	藤原 慎二	(株) オリエンタルコンサルタンツ
	八木 和也	(株) 横河技術情報
	山田 真幸	東北工業大学
	旧委員	葛西 昭
北川 慶祐		東京都
内藤 英樹		東北大学
連絡幹事	松本晋太郎	(株) ドーコン
	刑部 清次	(株) 長大

令和元年 9 月時点

目次

1. はじめに.....	1
2. 鋼構造のインターフェースストラクチャの概要.....	2
3. 鋼構造のインターフェースストラクチャの FEM モデル化.....	7
3.1 鋼とコンクリートの接合部.....	7
3.2 高力ボルト継手部.....	47
3.3 支承部, 落橋防止構造.....	58
3.4 接着接合.....	69
事例編 1 : 鋼とコンクリートの接合部.....	80
事例編 2 : 高力ボルト継手部.....	176
事例編 3 : 支承部, 落橋防止構造.....	200
事例編 4 : 接着接合.....	222

1. はじめに

コンピュータハードウェアの処理速度の著しい向上，解析技術の進歩から，鋼橋をはじめとする鋼構造物や鋼・コンクリート合成構造物の設計，製作，架設，維持管理に至る各場面において，FEM 解析を用いた設計や検討を行うケースが増えている．FEM 解析では，梁計算や格子解析では算出できない局部応力の評価，複雑な立体挙動や弾塑性挙動を比較的簡易かつ精緻に評価できるという長所を持つ反面，適切なモデル化がされていない場合，一見，正しそうに見えながら実挙動とは大きく異なる結果が出力されるという危険を併せ持つことが問題として指摘されている．例えば，米国ミネアポリスのトラス橋落橋事故以後，高い関心が寄せられ，FEM 解析による検討が数多く行われた鋼トラス橋のリダンダンシー解析においては，コンクリート床版が構造物のリダンダンシーに大きく寄与することが示されたが，結果に大きな影響を与えると考えられるコンクリートと鋼構造の接合のモデル化について，その手法は確立されているとは言い難い．その他，支承部などの境界部の条件，高力ボルト継手部など挙動が複雑な部位についても，各機関，各ケースで個別にモデル化が検討されているのが実情であり，FEM 解析の信頼度向上，さらなる普及の障害となっているものと考えられる．ここでは，溶接で組み立てられた鋼部材と鋼部材，鋼部材とその他の部材を繋ぐ構造を「鋼構造のインターフェースストラクチャ」と定義し，鋼構造を対象とした FEM 解析を実施する際のモデル化方法について調査，整理することとした．

本報告書では，設計応力の照査，終局耐力の確認，リダンダンシーの評価などを対象として行われた過去の FEM 解析の事例を整理し，それらの FEM 解析でモデル化された鋼とコンクリートの接合部，支承部，高力ボルト継手部など挙動が複雑な鋼構造のインターフェースストラクチャのモデル化方法をまとめた．

2. 鋼構造のインターフェースストラクチャの概要

本報告書では、土木鋼構造物の代表的な構造物である鋼橋を主な対象として、FEM 解析のモデル化や FEM 解析結果に影響を与える可能性のあるインターフェースストラクチャに着目し、既往のモデル化の事例を定型のフォーマットに従って整理するとともに、その考え方についてまとめ、解説を加えた。事例の抽出にあたっては、実験結果との比較によりモデル化の整合性を確認した事例を数多く抽出した。本報告書で対象とした鋼構造のインターフェースストラクチャを図 2.1 に示す。

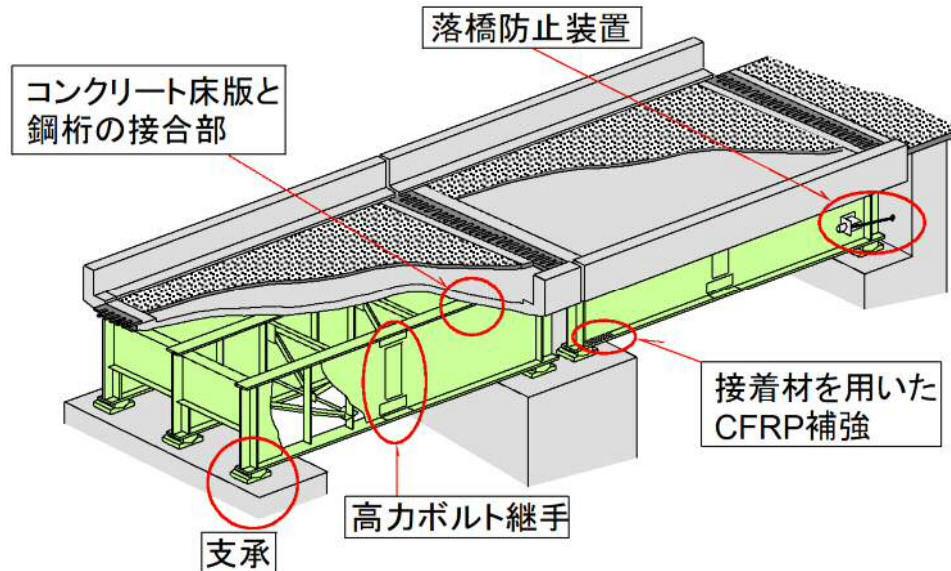


図 2.1 鋼構造のインターフェースストラクチャ

(1) 鋼とコンクリートの接合部

鋼橋の最も一般的な構造である鋼桁橋や鋼箱桁橋では、鋼床版桁を除き、主構造を鋼桁、床版をコンクリート床版とした構造が大多数を占めている。これらの構造は、大きく鋼とコンクリートの合成効果を見込んだ合成桁と、合成効果を見込まない非合成桁に分類されるが、それぞれコンクリート床版と鋼桁の接合部の挙動が、全体挙動に大きく影響することが知られている。そのため、合成桁、非合成桁を対象とした FEM 解析を実施する場合、その接合部のモデル化が大きな問題となる。一方、維持管理性の向上や耐震性の向上を目的として採用実績が増えている鋼コンクリート複合ラーメン橋の鋼桁と RC 橋脚の剛結部や、現場施工の省力化や耐久性向上を目的として採用実績が増えている合成床版において、孔明き鋼板ジベルが使われる場合があるが、この孔明き鋼板ジベルをモデル化した FEM 解析も数多く行われている。ここでは、このコンクリートと鋼桁の接合部のモデル化方法について、スタッドジベルを用いた合成構造の接合部、孔明き鋼板ジベルを用いた合成構造の接合部、非合成桁の接合部において事例を調査し、それぞれについてまとめた。

1) スタッドジベルを用いた合成構造の接合部

合成桁のコンクリート床版と鋼桁のずれ止めとして、最も一般的に用いられているのが頭付きスタッドジベルである(写真 2.1)。3.1.1 節では、頭付きスタッドジベルをモデル化した FEM 解析の事例を調査し、まとめた。



写真 2.1 合成桁の頭付きスタッドジベルの例

2) 孔明き鋼板ジベルを用いた合成構造の接合部

複合ラーメン橋や合成床版の鋼とコンクリートのずれ止めとして、孔明き鋼板ジベル（写真 2.2）が用いられるケースが増えている。3.1.2 節では、孔明き鋼板ジベルをモデル化した FEM 解析の事例を調査し、まとめた。



写真 2.2 合成床版の孔明き鋼板ジベルの例

3) 非合成桁の接合部

非合成桁の設計では、鋼桁とコンクリート床版の合成効果は考慮されず、主方向の荷重に対しては鋼桁のみで抵抗すると仮定して設計される。しかし、既往の実橋の実測結果などで、非合成桁でも活荷重レベルにおいては合成桁として挙動することが確認されている。非合成桁では、合成効果を期待しないまでも、車両の制動荷重や地震時の水平力に対して所定の位置を確保できるように鋼桁の上にスラブ止め（スラブアンカー）が設置される（写真 2.3）。このスラブアンカーや鋼材とコンクリートの付着が非合成桁の挙動に影響を与えられとされており、スラブアンカーのモデル化を考慮した FEM 解析も行われている。3.1.3 節では、スラブアンカーのモデル化を含んだ非合成桁の FEM 解析事例、3.1.4 節では、鋼コンクリート界面の付着に関する FEM 解析事例を調査し、まとめた。



写真 2.3 非合成桁のスラブアンカーの例

(2) 高力ボルト継手

鋼橋は工場で鋼板同士を溶接して架設現場まで輸送可能な大きさの部材が製作されたのち、架設現場までトレーラーなどで輸送され、現地に架設される。この際、部材同士の接合に最も一般的な継手として、高力ボルト継手が用いられる。高力ボルト継手はその接合方式により、摩擦接合、支圧接合、引張接合に分類されるが、摩擦接合が用いられるケースが多い。高力ボルト摩擦接合継手は、鋼板同士を摩擦接合用高力ボルトで締め付け、その締め付け力に直交する鋼板同士の合い面（摩擦面）に作用する摩擦力により鋼材を接合する継手である。かつては、鋼板同士の接触条件や多数のボルトの相互作用など複雑な挙動を示す高力ボルト継手を、数値解析により評価することは困難であったが、ハードウェアやソフトウェアの進化により、近年では複雑な挙動を示すこの高力ボルト継手を対象とした FEM 解析も数多く行われるようになってきた。3.2 節では、高力ボルト継手を対象とした FEM 解析事例を調査し、まとめた。



写真 2.4 高力ボルト継手

(3) 支承・落橋防止構造

ラーメン構造を除けば、鋼橋の上部構造は温度伸縮や活荷重による変形の影響を避けるため、コンクリートの橋台やコンクリート橋脚、鋼製橋脚などの下部構造の上に、支承を介して設置される。この支承は、水平方向の移動の制限方法により、可動支承、固定支承、分散支承などに分類されるが、例えば可動支承は基本思想として回転、水平方向の移動には抵抗しないものとして設計される。ただし、実際には鋼桁の水平移動、回転移動に対して、鋼製支承の場合は摩擦力などによる、ゴム支承の場合はゴムのせん断剛性や回転剛性による抵抗が発生する(写真2.5)。さらに、鋼製支承が経年劣化により腐食した場合などでは、この抵抗力は無視できないほどとなり、鋼桁の挙動に大きな影響を与えることになるほか、桁端に疲労き裂などの重大な損傷を発生させることもある。そのため、鋼橋の実挙動を FEM 解析で把握するにあたっては、この支承部のモデル化が非常に重要である。

上部構造と下部構造の間に設置される構造として、支承のほか、大地震時の上部構造の落橋を防止するための落橋防止構造がある。落橋防止構造は、常時は作用せず、大地震時に上部構造と下部構造の間に想定を超える大きな相対変位が生じようとしたときにはじめて作用する構造であり、衝撃や速度の影響があるほか、ゴムなどの緩衝材を有し大変形を伴う複雑な挙動を示す。近年では、この落橋防止装置を対象とした FEM 解析も実施されている。

3.3 節では、鋼上部構造と下部構造間に設置される支承、落橋防止装置を対象とした FEM 解析事例を調査し、まとめた。



写真 2.5 鋼製支承(左)とゴム支承(右)の例



写真 2.6 落橋防止装置

(4) 接着接合

鋼材同士の継手や、鋼材に補強材を取り付ける際の接合方法としては、溶接継手や前出した高力ボルト継手が一般的であるが、近年では、鋼部材の補強としてFRPシートやFRP板を接合するケースを中心として、接着材を用いた接合も使われるようになってきた(写真2.7)。この接着材を用いた補強構造においては、端部の応力集中や剥離が問題となるが、これらを評価するためのFEM解析も行われている。3.4節では、接着接合を対象としたFEM解析事例を調査し、まとめた。



写真2.7 接着材継手(新日鉄住金マテリアルズHPより)

3. 鋼構造のインターフェースストラクチャの概要

3.1 鋼とコンクリートの接合部

3.1.1 スタッドジベルを用いた合成構造の接合部

第2章で述べたように、合成桁のコンクリート床版と鋼桁のずれ止めとして、最も一般的に用いられているのが頭付きスタッドジベルであり、合成床版やインテグラルアバット構造のような複合ラーメン構造の剛結部にも使われる場合が多い。スタッドジベルを用いた合成構造接合部の耐荷特性や破壊性状に関する載荷試験や有限要素解析は、これまでに数多く実施されてきているが、その接合部の有限要素解析のモデル化においては、スタッドジベルとRC構造との接触部での付着や支圧挙動を如何に考慮するかが重要である。そのうえ、対象とする構造物によっては、有限要素解析の効率化が必要となる場合がある。本節では、1997年以降の土木学会の査読付論文集、並びに日本鋼構造協会の鋼構造論文集の原著論文等を収集し、有限要素解析の目的ごと、すなわち、対象とするスタッドジベルを用いた合成構造、複合構造の接合部ごとに、その接合部のモデル化の方法とその結果や留意点を示した。収集した文献を表3.1.1.1に示す。

表 3.1.1.1 収集した文献一覧

文献No.	分類	論文名	著者	年	出典名
3.1.1.1	合成桁	連続合成 2 主桁橋のずれ止め設計に関する一考察	大垣賀津雄 他	1997	鋼構造論文集
3.1.1.2	合成桁	スタッドの非線形特性を考慮した 2 主鋼桁と鉄筋コンクリート橋脚の剛結部の有限要素解析	劉玉摯 他	1998	応用力学論文集
3.1.1.3	合成桁	橋軸直角方向力による合成桁のずれ止めの挙動の把握に関する研究	中島章典 他	2000	構造工学論文集
3.1.1.4	合成桁	PC 床版連続合成 2 主桁橋の合理的設計・施工法	大垣賀津雄 他	2001	土木学会論文集
3.1.1.5	合成桁 (グループ配置)	スタッドをグループ配置した合成桁の力学性状に関する解析的研究	大久保宣人 他	2002	鋼構造論文集
3.1.1.6	合成桁	連続合成桁の弾塑性挙動についての実験と数値解析の比較	中島章典 他	2003	鋼構造論文集
3.1.1.7	合成桁 (グループ配置)	密にグループ配列した頭付きスタッドの寸法および強度のせん断耐荷性能に及ぼす影響と床版断面のせん断耐荷力評価	岡田淳・依田照彦	2006	土木学会論文集
3.1.1.8	合成床版	鋼・コンクリート合成床版の張出し部の輪荷重走行試験および 3 次元有限要素による疲労耐久性評価	街道浩 他	2007	構造工学論文集
3.1.1.9	合成桁	合成桁ずれ止めの FEM モデル化と曲げ部材の弾塑性挙動	森田哲夫 他	2007	土木学会年次学術講演会
3.1.1.10	合成床版	鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のスタッドの疲労強度評価	街道浩・松井繁之	2008	土木学会論文集
3.1.1.11	複合ラーメン構造・混合構造の接合部	開断面箱桁複合ラーメン橋の剛結部における構造性能と設計法に関する検討	伊藤 始 他	2011	構造工学論文集
3.1.1.12	合成桁	合成床版合成桁の負曲げ部ひび割れ幅に関する実験と解析	上條 崇 他	2012	構造工学論文集
3.1.1.13	合成桁	プレキャスト床版連続合成桁のずれ止めに関する	大城壮司	2012	土木学会論文

		る実験および解析	他		集
3.1.1.14	複合ラーメン構造・混合構造の接合部	少数主桁形式の鋼合成桁と PC 桁のずれ止め方式による接合構造の研究	篠崎裕生 他	2014	構造工学論文集
3.1.1.15	合成床版	3次元非線形 FEM 解析に基づく移動荷重下の鋼・コンクリート合成床版破壊過程の考察	藤山知加子 他	2014	土木学会論文集
3.1.1.16	複合ラーメン構造・混合構造の接合部	鋼-コンクリート接合部の耐力評価に関する解析的研究	岑山友紀 他	2016	構造工学論文集
3.1.1.17	合成桁	鋼上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検討可能な縮小試験体と解析手法の構築	木下幸治 他	2017	土木学会論文集
3.1.1.18	合成床版	鋼・コンクリート合成床版内のスタッドの疲労耐久性と疲労強度向上に関する研究	古田賢二 他	2018	土木学会論文集
3.1.1.19	合成桁	合成はりの諸因子がその耐荷挙動に及ぼす影響に関する解析検討	溝江慶久・中島章典	2018	土木学会論文集

本節では、スタッドジベルを用いた接合部を次の(1)~(3)のように分類し、具体的な各モデル例を示す。

- (1) 合成桁の接合部
- (2) 合成床版の接合部
- (3) 複合ラーメン構造・混合構造の接合部

(1) 合成桁の接合部

① 通常配置されたスタッドジベル (文献 3.1.1.1~4, 3.1.1.6, 3.1.1.9, 3.1.1.12~13, 3.1.1.17, 3.1.1.19)

スタッドジベルを用いた合成桁の接合部の有限要素解析においては、スタッドジベルとコンクリート境界部との付着や支圧挙動をソリッド要素と接触要素などを用いた精微なモデル化を行うことが最良と考えられる。しかし、実橋梁を対象とする、すなわち、相対的に数十メートルの鋼桁長さに対して、数十ミリメートルのスタッド径とその変位との差異が生じる有限要素解析においては、解析における十分な収束性を得るためにばね要素を用いたスタッドジベル挙動のモデル化が有効となる。一方、スタッドジベルのモデル化を行う上では、単独配置の場合とグループ配置の場合に分けられる。ここでは、グループ化されていないスタッドジベルを対象として、合成桁の接合部の有限要素解析事例として、文献 3.1.1.3, 3.1.1.12, 3.1.1.13 における解析の目的とモデル化の特徴を表 3.1.1.2 に示す。これらの事例における代表的な例と考えられる有限要素解析モデルを図 3.1.1.1, 解析結果を図 3.1.1.2 に示す。

表 3.1.1.2 合成桁接合部に関する解析事例の解析の目的とモデル化の特徴

文献 No.	解析の目的	使用要素			解析のその他の設定
		桁	床版	スタッド	
3.1.1.3	合成桁橋の橋軸直角面内応力伝達がずれ止めとしてのスタッドに与える影響の解明	剛体 (剛体要素間に軸ばね・せん断ばね設定)		ばね (鉛直および水平)	<ul style="list-style-type: none"> 各ばねには材料の構成則を設定 ずれ止めを表すばねの水平方向の挙動は、静的押し抜き試験結果を反映
3.1.1.12	合成床版の底鋼板が桁断面の一部としてコンクリートとの合成作用によりテンションステイフィングとしての効果を定量化	シェル要素	ソリッド要素	非線形ばね (鋼桁-床版間にスタッドのせん断ばね)	<ul style="list-style-type: none"> 複合構造標準示方書 (2009 年, 土木学会) を参考にスタッドのせん断力-ずれ関係を多直線近似 スタッド根元部のコンクリートの局所的な変形を含んだせん断力-ずれ関係のため, スタッドせん断ばねと接するコンクリート要素の弾性係数は低減しない
3.1.1.13	スタッド押し抜き実験, ならびに合成桁正曲げ実験で得られた結果を再現できる解析手法や解析モデルの構築	シェル要素	ソリッド要素	合成桁 梁要素 (押し抜き実験では, ソリッド要素)	<ul style="list-style-type: none"> 全要素において材料非線形性を考慮. コンクリートは, 分散ひび割れモデル

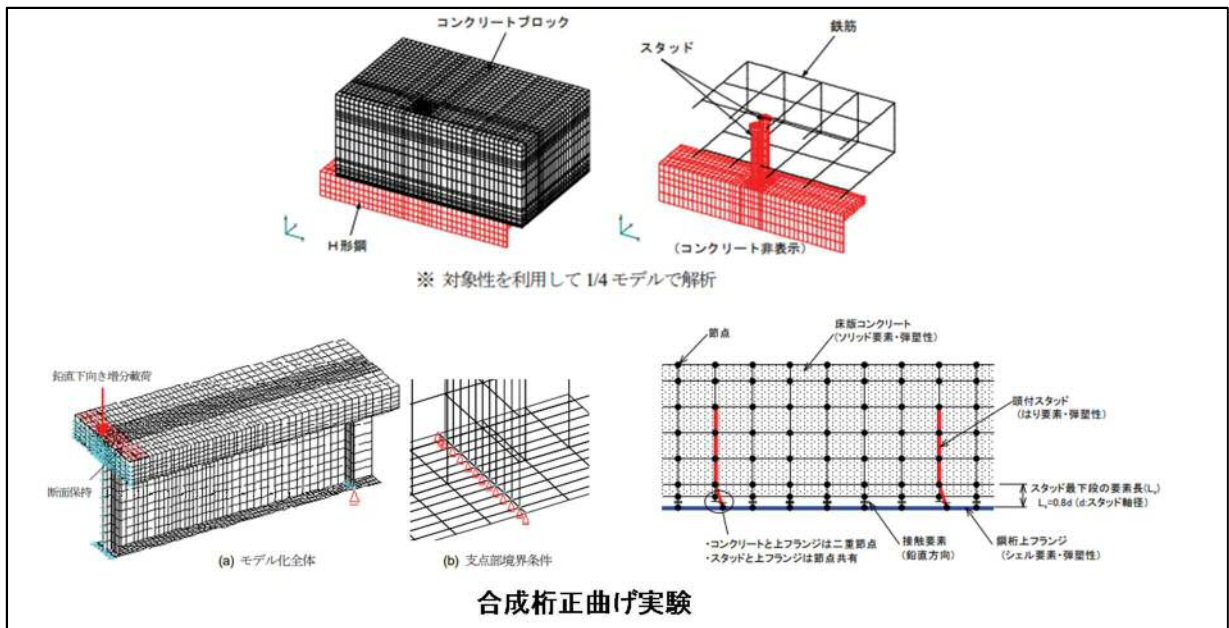
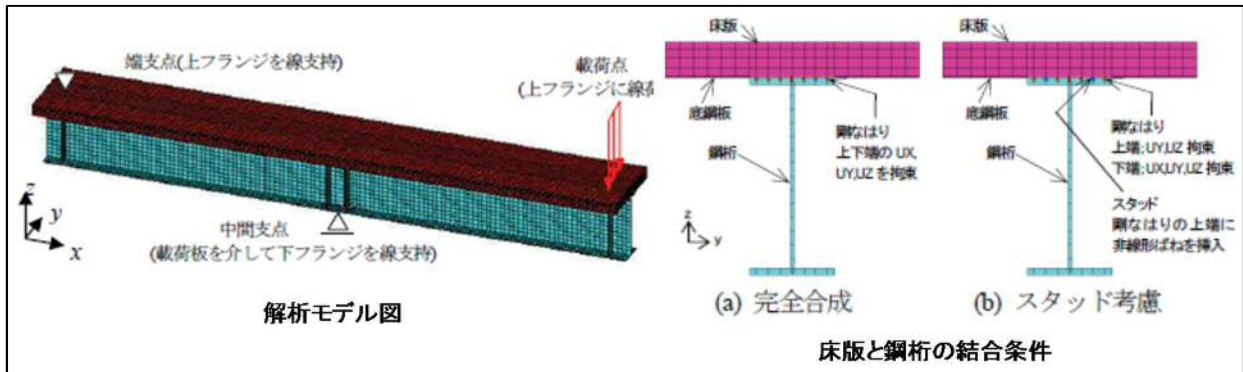
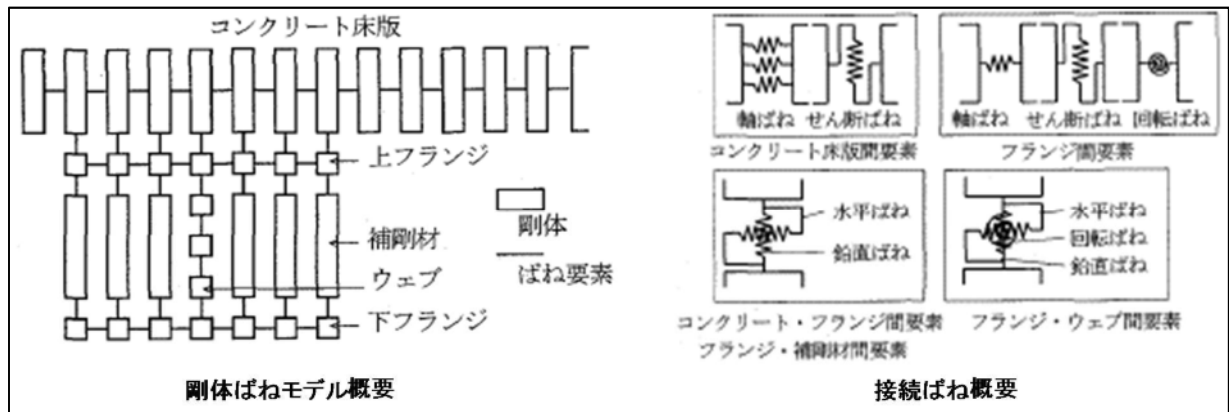
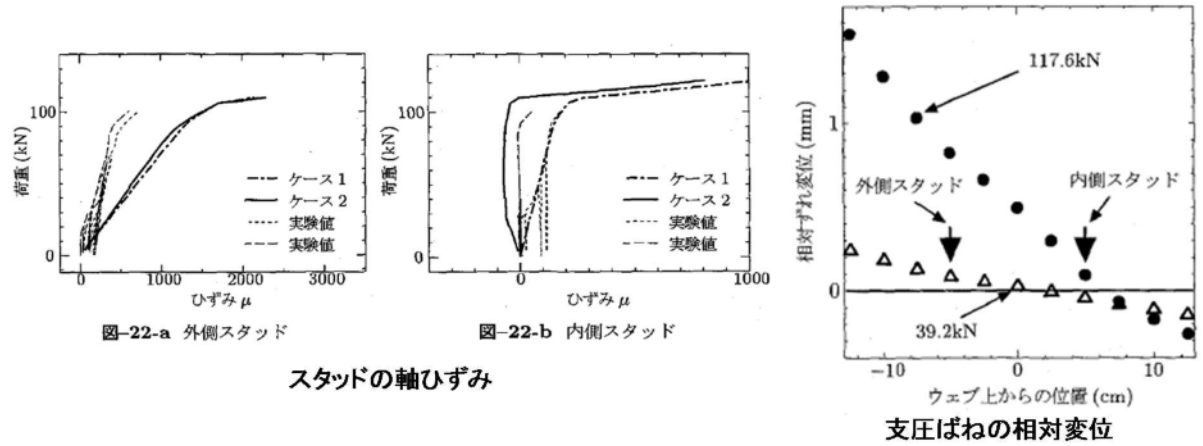
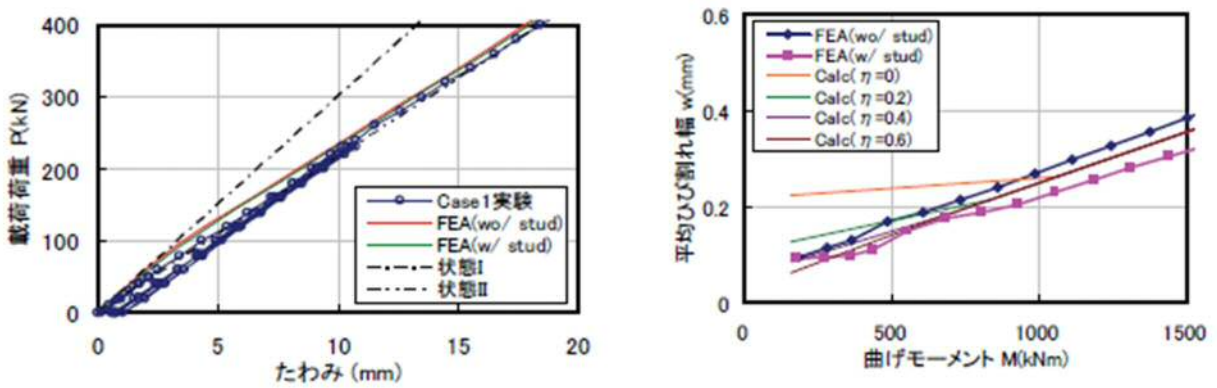


図 3. 1. 1. 1 合成桁接合部に関する解析事例の有限要素解析モデル (文献 3. 1. 1. 3, 3. 1. 1. 12, 3. 1. 1. 13)

【文献 3.1.1.3】対象試験体の載荷実験の解析値



【文献 3.1.1.12】対象試験体の載荷実験の解析値（たわみと曲げモーメント）



【文献 3.1.1.13】押し抜き実験結果，ならびに合成桁正曲げ実験の解析値

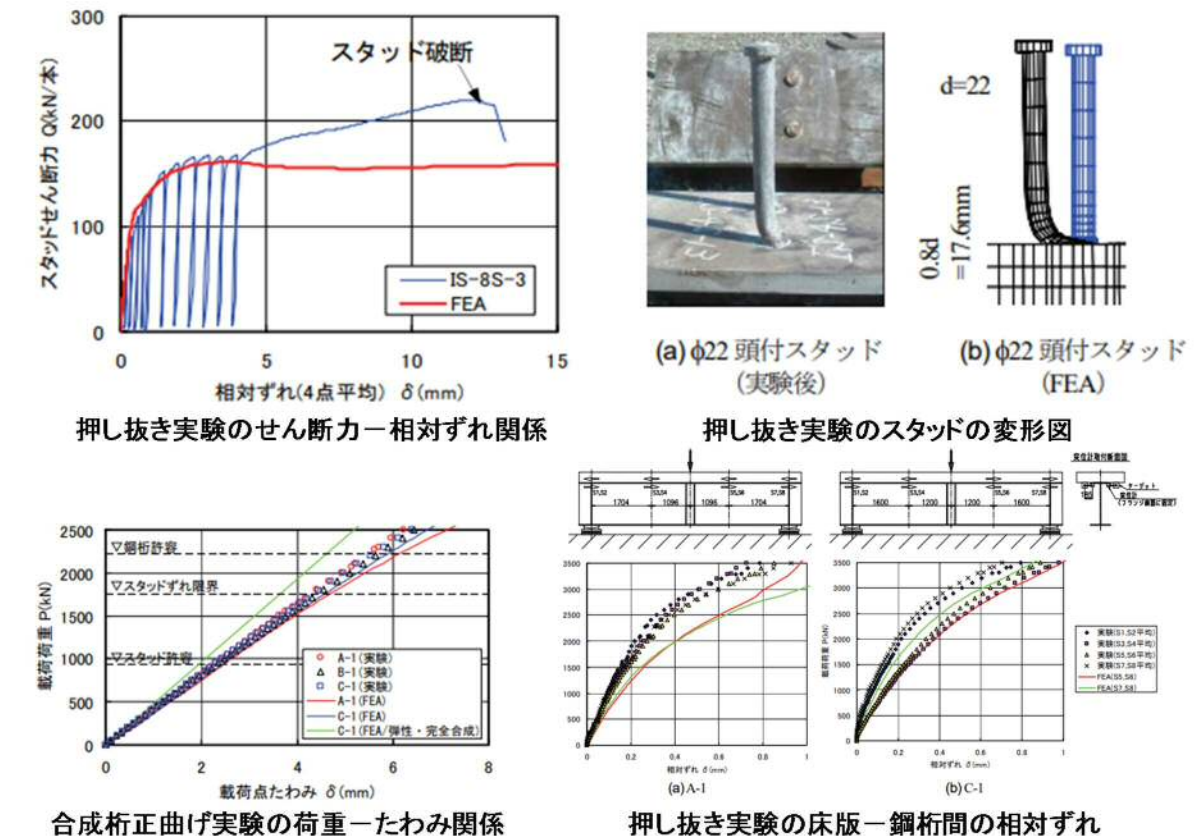


図 3.1.1.2 各解析事例のスタッドジベルのモデル化に関する解析結果 (文献 3.1.1.3, 3.1.1.12, 3.1.1.13)

各解析結果により、以下の結論が導かれている。

- 解析精度に改善の余地を残すものの、初期荷重段階における橋軸直角方向力を受けるスタッドの挙動の定性的傾向を把握できた。要素試験で得られた実験式を用いることによって、軸引張力を受けるスタッドの実験結果をより良く追跡可能である（文献 3.1.1.3）。
- 合成床版を有する合成桁のひび割れ幅、鉄筋応力を精度良く求めるには、テンションスティフニングおよびひび割れ状態の考慮が不可欠である。合成床版の底鋼板は、桁断面の一部として曲げモーメントに抵抗するだけでなく、鉄筋と同様にひび割れ発生直後のひび割れ幅を抑制する効果がある（文献 3.1.1.12）。
- 押し抜き実験では、実験と解析の対応は良好である。合成桁正曲げ実験では、実験初期から鋼桁下フランジが許容応力度に到達する荷重レベルまでほぼ一致。スタッドの配置間隔、ならびに、床版形式が合成桁としての全体的な挙動に影響していない（文献 3.1.1.13）。

以上の解析結果を統合すると、合成桁の接合部の解析を実施する上では、次のことが言える。

- 合成桁の接合部においては、橋軸方向、ならびに橋軸直角方向のいずれのスタッドの挙動を、ばね要素であっても良く追跡可能であり、実橋を対象とした解析へのばね要素の活用は効果的である。このため、近年の研究の解析事例においても、ばね要素を用いた解析が実施されてきている（文献 3.1.1.17、文献 3.1.1.19）。
- しかし、解析精度には未だ改善の余地が残されている。今後もより実挙動を反映可能な高度な要素試験に基づいた実験式の高度化を進め、解析精度向上を目指すといった取り組みが必要である。さらには、ばね要素に用いる要素試験より求めたせん断カーズれ変位関係にはスタッド根元部のコンクリートの局所的な変形をも含まれており（文献 3.1.1.12）、スタッド周辺のコンクリートの弾性係数を低減されるモデル化を反映させないような配慮も必要である。

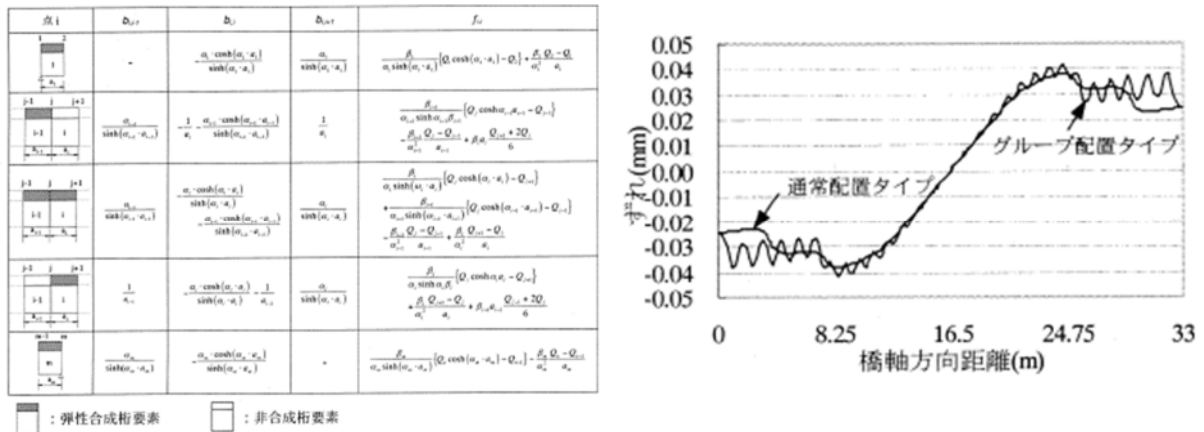
② グループ配置されたスタッドジベル（文献 3.1.1.5, 3.1.1.7）

合成桁の接合部の合理化に向けた取り組みとして、グループ配置されたスタッドジベルが施工されてきている。スタッドジベルのグループ配置においては、密に配置することに起因した接合部のせん断耐荷力の低下が懸念されることから、有限要素解析においてもスタッドジベルが密に配置されたことによる挙動が再現可能かに留意する必要がある。ここでは、グループ配置されたスタッドジベルを対象とした有限要素解析事例として、文献 3.1.1.5, 3.1.1.7 を示す。

表 3.1.1.3 スタッドジベルがグループ配置された接合部に関する解析事例の解析の目的とモデル化の特徴

文献 No.	解析の目的	使用要素			解析のその他の設定
		桁	床版	スタッド	
3.1.1.5	スタッドをグループ配置した単純合成桁とスタッドを通常配置した単純合成桁を対象とし、スタッド配置による力学的性状の違いを把握	梁要素（桁要素）		ばね（桁要素ごとにばね定数を与える）	<ul style="list-style-type: none"> ・スタッドが配置された要素を合成、スタッドが配置されていない要素を非合成として取り扱う断続弾性合成理論 ・弾性合成は、鋼桁とコンクリート床版を柔なずれ止めにより結合したものとし、ばね定数はスタッドの配置間隔や1列あたりのスタッド本数によって決める。
3.1.1.7	スタッドの寸法および強度の影響に着目した解析的検討を実施し、破壊モードと関連付けてこれらのパラメータがせん断耐荷性能に及ぼす影響について考察	ソリッド要素		ソリッド要素	<ul style="list-style-type: none"> ・非線形モデルを使用しており、コンクリートの破壊基準は Drucker-Prager の破壊基準を採用。 ・スタッドおよび鉄筋の降伏判定には、von Mises の降伏基準を採用。

【文献 3.1.1.5】 解析対象の合成桁の解析モデルと解析結果



【文献 3.1.1.7】 グループスタッドを有する押し抜き実験の解析モデルと解析値

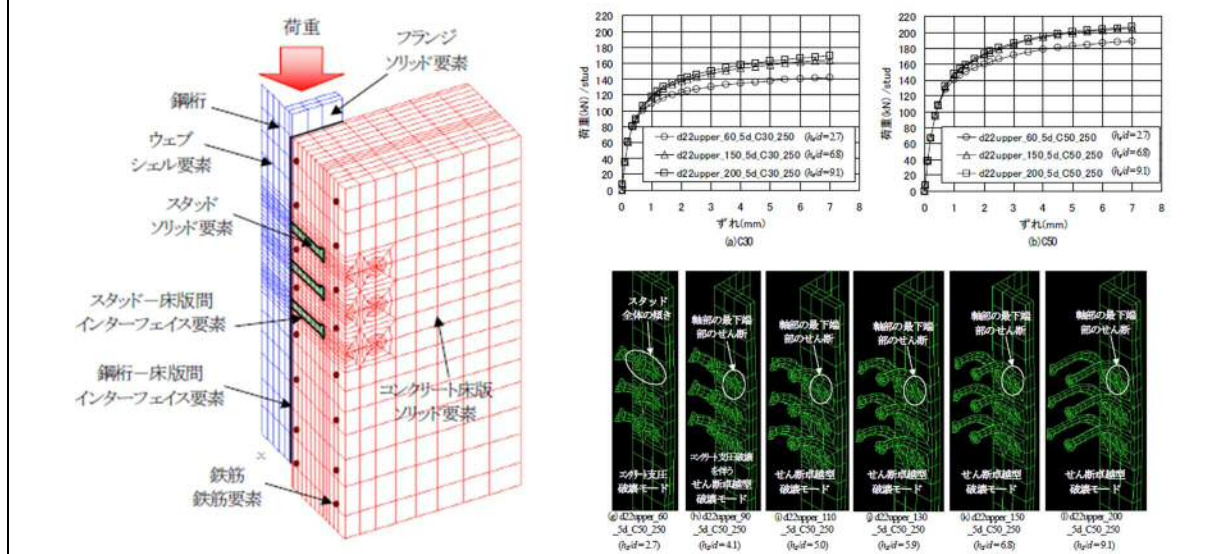


図 3.1.1.3 各解析事例のモデル化と解析結果 (文献 3.1.1.5, 3.1.1.7)

各解析結果により、以下の結論が導かれている。

- 断続弾性合成理論を用いることにより、桁要素ごとにばね定数を与え、ずれ変形などが個々のスタッドをモデル化せずとも詳細に解析可能である (文献 3.1.1.5)。
- 各パラメータの差異によるコンクリートおよびスタッドの破壊モードを明らかとし、グループ配列したスタッド群による床版の終局的なせん断破壊に対する照査が可能である (文献 3.1.1.7)。

以上の結果より、スタッドジベルがグループ化した合成桁の解析を実施する上では、次の留意点が考えられる。

- 断続弾性合成理論を用いた数値解析のような定式化の十分な理解が必要な解析手法では、技術者の専門性が要求されるため、汎用的な解析方法としては推奨し難い。このため、グループ化したスタッドジベルに対しても、グループ化を考慮したばね要素の活用方法が考えられる。
- スタッドジベルを複雑なソリッド要素で詳細にモデル化することにより、スタッドの強度や長さなどのパラメータの違いによる変形モードの差異の再現が行えるが、やはり橋梁全体などの解析に用いることは計算コスト等の問題からは推奨できない。このため、ソルバーの機能にもよるが、全体解析と連携した部分解析 (具体的には、例えば、ABAQUS ではズーム解析) の実施に活用されるのが良い。

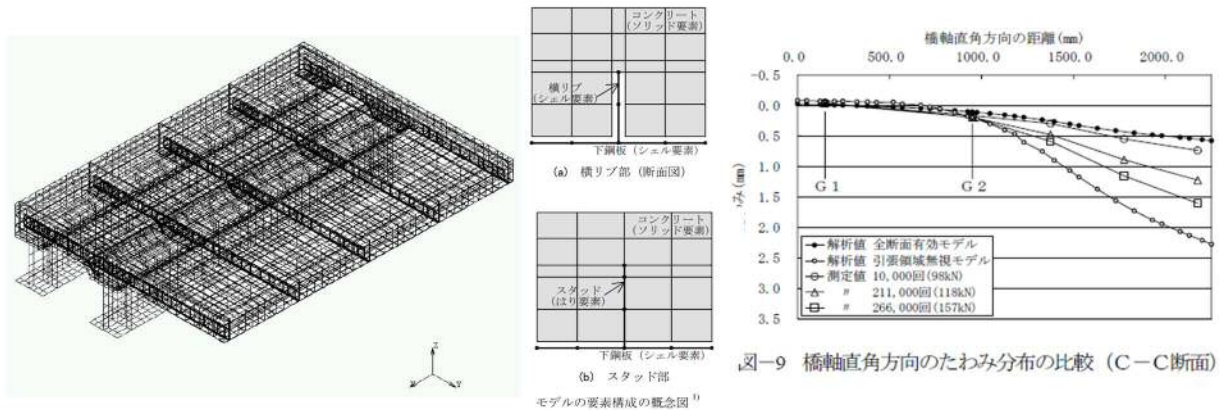
(2) 合成床版の接合部 (文献 3.1.1.8, 3.1.1.10, 3.1.1.15, 3.1.1.18)

スタッドジベルを用いた合成床版の接合部の有限要素解析においては、スタッドジベルとコンクリート境界部との付着や支圧挙動をソリッド要素と接触要素などを用いた精微なモデル化が行われている既往の文献が多い。これは、上述の実橋の合成桁接合部のばね要素を用いた有限要素解析と比較して、サイズの小さい模型試験体を用いた合成床版の実験的な研究を対象とした解析的な検討が多いことに起因していると思われる。ここでは、主にソリッド要素を用いた合成床版接合部の有限要素解析事例として、文献 3.1.1.8, 3.1.1.18 を示す。

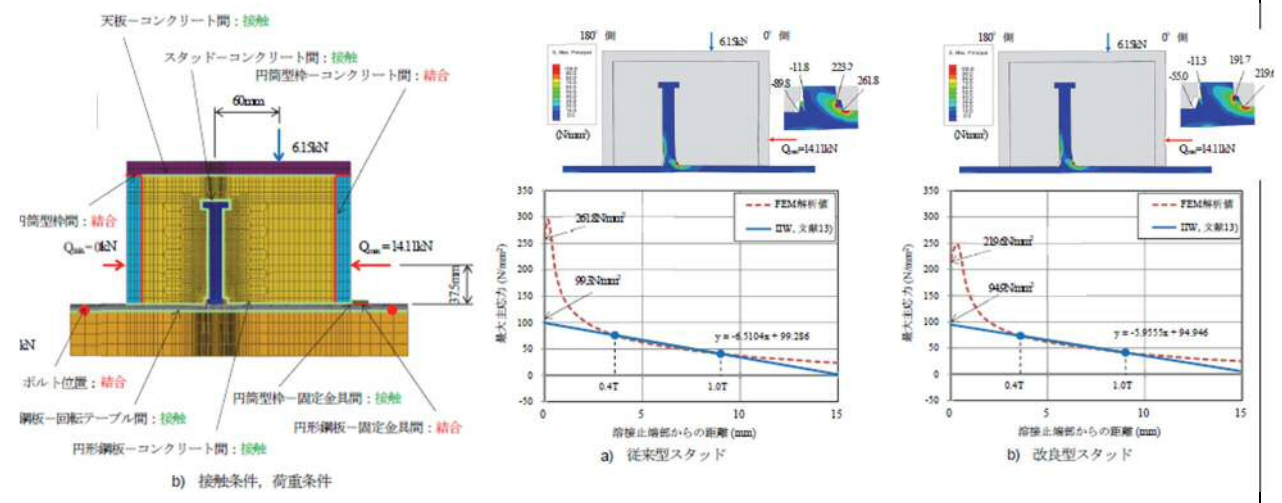
表 3.1.1.4 合成床版の接合部に関する解析事例の解析の目的とモデル化の特徴

文献 No.	解析の目的	使用要素			解析のその他の設定
		鋼板	床版	スタッド	
3.1.1.8	細部まで忠実に再現した 3 次元モデルを用いた FEM 解析により、走行試験における各部位のたわみやひずみ等の挙動解明	シェル要素	ソリッド要素	梁要素	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートは全断面有効モデルと引張領域無視モデルの 2 種で検討。また、横リブや下鋼板との接触判定も行う
3.1.1.18	合成床版に適用する改良型スタッドの疲労寿命向上について、回転せん断試験体の詳細 FEM 解析により、スタッドの溶接止端部に発生する応力集中を把握	ソリッド要素			<ul style="list-style-type: none"> ・円形鋼板・スタッド・天板-コンクリートおよび円筒型枠-円形鋼板には、垂直・水平力の接触を考慮し、せん断力付着・摩擦力を無視 ・円形鋼板-回転テーブル、円筒型枠-天板ボルト接合部では接点共有 ・円筒型枠-コンクリートは結合

【文献 3.1.1.8】 解析対象の合成床板試験体の解析モデルと解析結果



【文献 3.1.1.18】 合成床版に適用する改良型スタッドの解析モデルと解析値



各解析結果により、以下の結論が導かれている。

- 走行試験を実施した結果と解析の比較を通して、合成床版の試験体のたわみ分布を解析的にも把握できることが示されている (文献 3.1.1.8)。
- 公称せん断応力振幅および輪荷重の等価繰返し回数を用いることで、回転せん断試験の従来型スタッドの疲労 S-N 曲線の近傍にプロットすることができ、かつ、スタッドの溶接止端部周辺の応力集中を良く再現できていると言える (文献 3.1.1.18)。

以上の結果より、合成床版の接合部の解析を実施する上では、次のことが考えられる。

- 合成床版の接合部の解析において、特に疲労を対象とした検討が必要となる場合が多く見受けられる。これまでもソリッド要素、梁要素、ばね要素が用いられているが、疲労に関する検討、すなわち局部応力評価なども含めた解析的な検討を行うためには、ソリッド要素を用いた精微な解析の実施が不可欠となる。このため、実橋を対象とした解析的な検討などの場合、全体解析と連携したソリッド要素を活用した部分解析の実施が有効と考えられる。
- 一方、合成床版の全体の変形や終局強度、さらには、実橋梁全体を対象とした解析を行う場合には、計算コストを抑えるためにも、梁要素やばね要素を用いたモデル化が今後も必要となるため、それらの要素を用いた解析モデルの高度化も継続する必要がある。

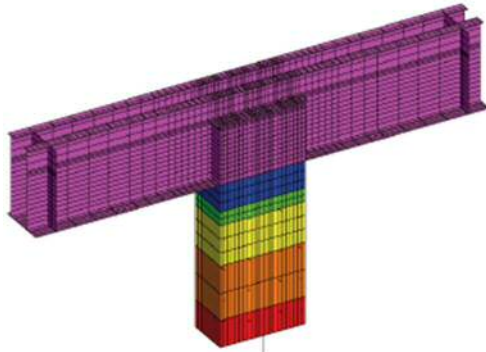
(3) 複合ラーメン構造・混合構造の接合部 (文献3.1.1.11, 3.1.1.14, 3.1.1.16)

近年、上部構造である鋼桁を RC 橋脚または橋台と剛結する複合ラーメン構造や、鋼桁と RC または PC 桁を接合する混合構造が提案・施工されてきている。それらの構造における鋼桁と RC または PC 構造との接合部にはスタッドジベルが使用される場合があり、有限要素解析におけるスタッドジベルのモデル化が検討されてきている。ここでは、それらの構造を対象としたソリッド要素を用いた有限要素解析事例として、文献3.1.1.11, 3.1.1.16 を示す。

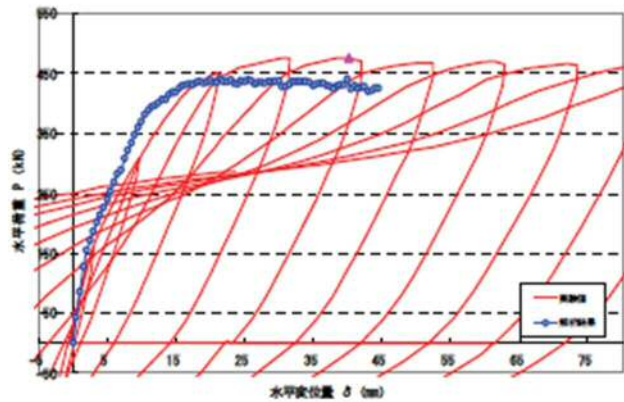
表 3.1.1.5 複合ラーメン構造・混合構造の接合部に関する解析事例の解析の目的とモデル化の特徴

文献 No.	解析の目的	使用要素			解析のその他の設定
		鋼板	床版	スタッド	
3.1.1.11	剛結部の縮小モデル実験供試体の 3 次元再現解析を実施し、解析的手法の適用性検証	シェル要素	ソリッド要素	埋め込み鉄筋要素	<ul style="list-style-type: none"> 突起付き形鋼とコンクリート界面にはクーロン摩擦モデルを採用 各部位により要素を使い分け
3.1.1.16	損傷を受けた場合の鋼-コンクリート接合部の耐力が最も小さくなる部位を解析的に検証	シェル要素	ソリッド要素	ソリッド要素とばね要素	<ul style="list-style-type: none"> 鋼桁フランジとコンクリート間の摩擦を考慮。既往文献より摩擦係数 0.5、せん断付着強度 0.5 N/mm^2 とし、最大せん断応力に達した以降は摩擦作用なしと設定 鉄筋は、解析計算の収束性を考え、シェル要素にてモデル化 スタッドの要素分割は、円周方向に 30° ピッチ、鉛直方向に 8 分割

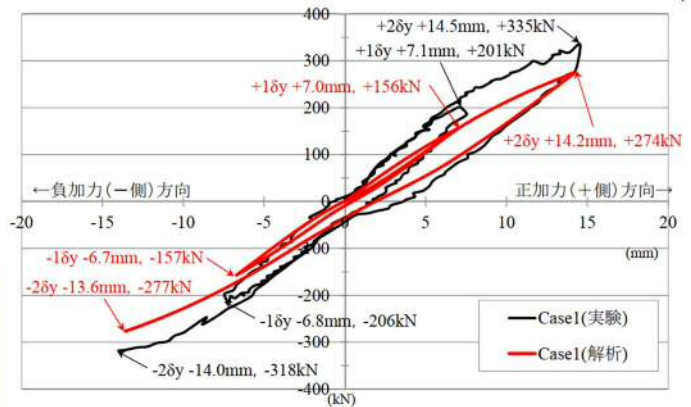
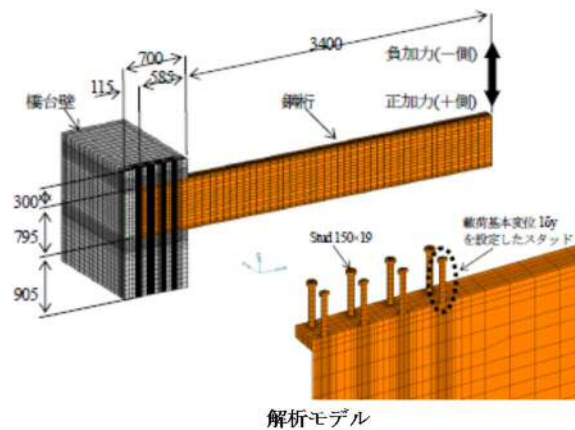
【文献 3.1.1.11】 複合ラーメン橋の剛結部（実橋の 1/4 スケール）の解析モデルと解析結果



部位	モデル	初期剛性 (N/mm ² /mm)	粘着力 (N/mm ²)	内部摩擦角 φ(摩擦係数 tan φ)	ダイランシー 角 ψ(tan ψ)
突起部	ク-0摩擦	1.0×10 ⁷	1.1327	43.62度 (0.9528)	45.79度 (1.0281)
その他	ク-0摩擦	1.0×10 ⁷	0.01	21.80度 (0.40)	0.00度 (0.00)



【文献 3.1.1.16】 複合ラーメン構造・混合構造の解析モデルと解析値



載荷荷重-鉛直変位履歴曲線(Case1)

図 3.1.1.5 複合ラーメン構造・混合構造の接合部の解析モデルと解析結果（文献 3.1.1.11, 3.1.1.16）

各解析結果により、以下の結論が導かれている。

- 剛結部の設計に解析を用いることで、柱脚部の耐荷力に応じたストライプ H の定着長さを、安全側に評価することが可能となる（文献 3.1.1.11）。
- 鋼-コンクリート接合部を詳細にモデル化することにより、スタッド・コバ面の分担率まで詳細に検討することが可能となるが、一方で詳細なモデル化による計算コストが増加し、個々の条件での検討には不向きである（文献 3.1.1.18）。

以上の結果より、複合ラーメン構造・混合構造の接合部の解析を実施する上では、次のことが考えられる。

- 複合ラーメン構造・混合構造においても、合成桁、ならびに合成床板の接合部の解析のように、部分的なモデルにおいて、スタッドジベルのソリッド要素を用いた精緻な解析の実施が必要と考えられる。一方、構造物の全体解析を行う上では、ばね要素を用いた解析が有効となるため、複合ラーメン構造・混合構造特有の挙動を反映可能なばね要素をせん断耐力-ずれ変位関係の定式化が必要であると考えられ、今後も継続した研究蓄積が望まれる。
- 一方、複合ラーメン構造・混合構造が上記解析のようにコンクリート橋脚と鋼桁との接合部であることから、例えば、地震力により作用するモーメントも大きくなることが考えられ、当該構造の降伏強度以降の挙動に関する検討が必要になると考えられる。このため、複雑な精緻な解析モデルを用いた非線形解析よりも汎用的、すなわち計算コストが抑えられる梁要素やばね要素を用いた解析モデルが必要である。

3.1.2 孔明き鋼板ジベル

鋼とコンクリートの複合構造では、鋼とコンクリートの接合方法として、スタッドジベルや孔明き鋼板ジベルなどがある。近年では、スタッドジベルに比べ疲労強度が高い孔明き鋼板ジベルの適用が増加している⁹⁾。また、孔明き鋼板ジベルの耐荷特性や破壊性状を把握するため、載荷試験やFEMによるシミュレーションも数多く実施されている。

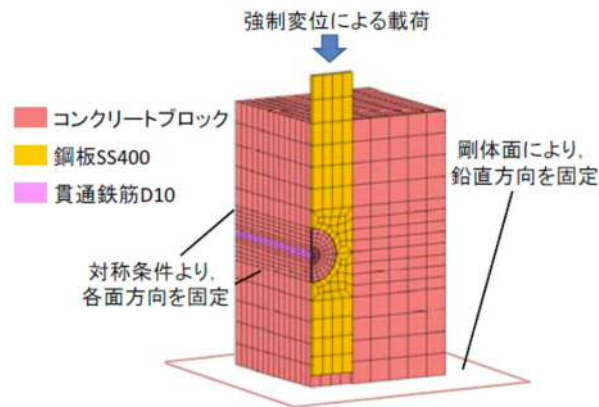
論文で紹介されているFEM解析のモデルは、2次元モデル、3次元モデルとあるが、鋼とコンクリートの接合部の孔明き鋼板ジベルのモデル化は、ほとんどが2種類の方法でモデル化されている。1つは、ソリッド要素を用い鋼板、鋼板孔、コンクリートを形状とおりにモデル化する方法である。もう1つは鋼材とコンクリートの接合をばね要素で行えばねの諸元は、実験で得られた構成則を適用した方法である。

(1) ソリッド要素モデル

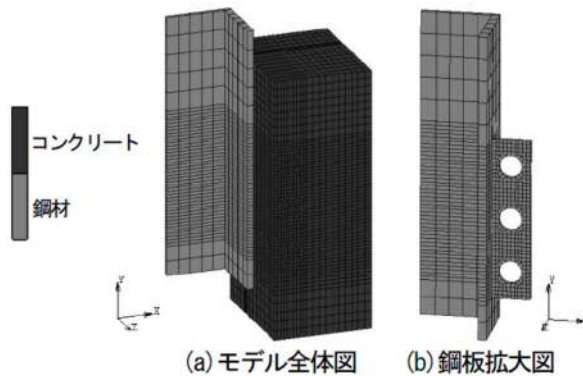
鋼板、コンクリートをソリッド要素でモデル化したモデル図例を図3.1.2.1に示す(文献3.1.2.1)。ソリッド要素を用いたモデルでは、要素数や解析時間を低減させるため、1/4モデルや1/2モデルを用いる場合が多い。また、図3.1.2.2に示すような平面ひずみ要素を用いて、2次元モデルで簡略化したモデルの例もある(文献3.1.2.10)。着目部としては、図3.1.2.3に示すような、鋼と孔内コンクリートの局部が多く、孔内のコンクリートおよび鋼板のせん断破壊の検証に用いられている(文献3.1.2.5)。

鋼とコンクリートの要素間の接合については、付着を考慮している例、付着を考慮せず圧縮のみ伝達する接触を設定している例などがあり、検証の精度や影響度により使い分けられている。

コンクリートおよび鋼材の材料力学特性は、図3.1.2.4に示すように、コンクリートは、圧縮側は圧縮限界で降伏、引張側は引張限界後に線形軟化する非線形モデル、鋼材は、降伏後の剛性を初期剛性の1/100とする非線形バイリニアモデルを用いる場合が多い(文献3.1.2.6)。コンクリートに関しては、孔内のコンクリート圧壊を考慮するため、引張破壊面と圧縮破壊面を考慮した修正Drucker-Pragerモデルを用いた解析事例もみられる(文献3.1.2.1)。



(a) 解析モデル (3次元ソリッド要素) (文献3.1.2.1)



(b) 解析モデル (3次元ソリッド要素) (文献3.1.2.6)

図3.1.2.1 ソリッド要素でモデル化した3次元FEMモデル

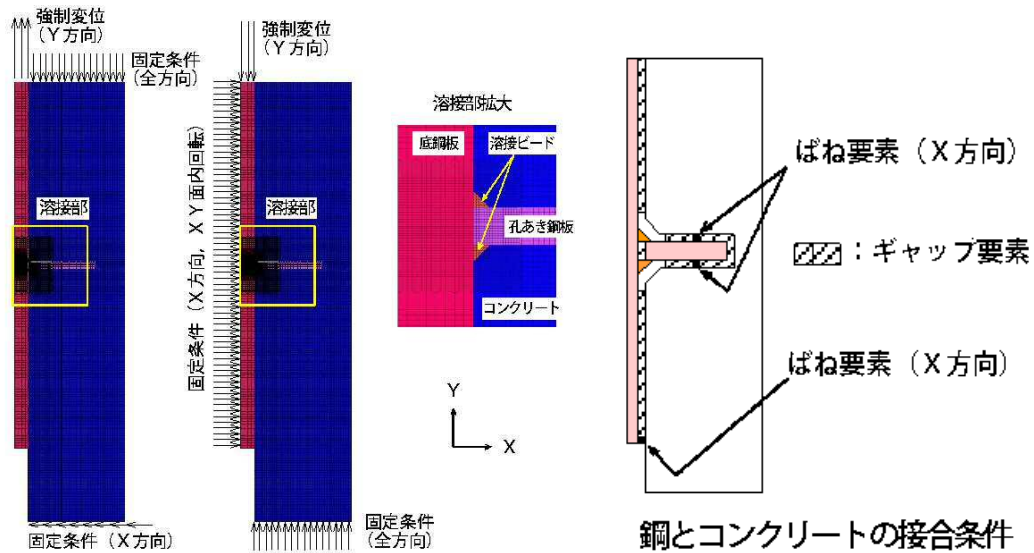


図 3. 1. 2. 2 平面ひずみ要素および PBL をばねでモデル化した 2 次元 FEM モデル (文献 3. 1. 2. 10)

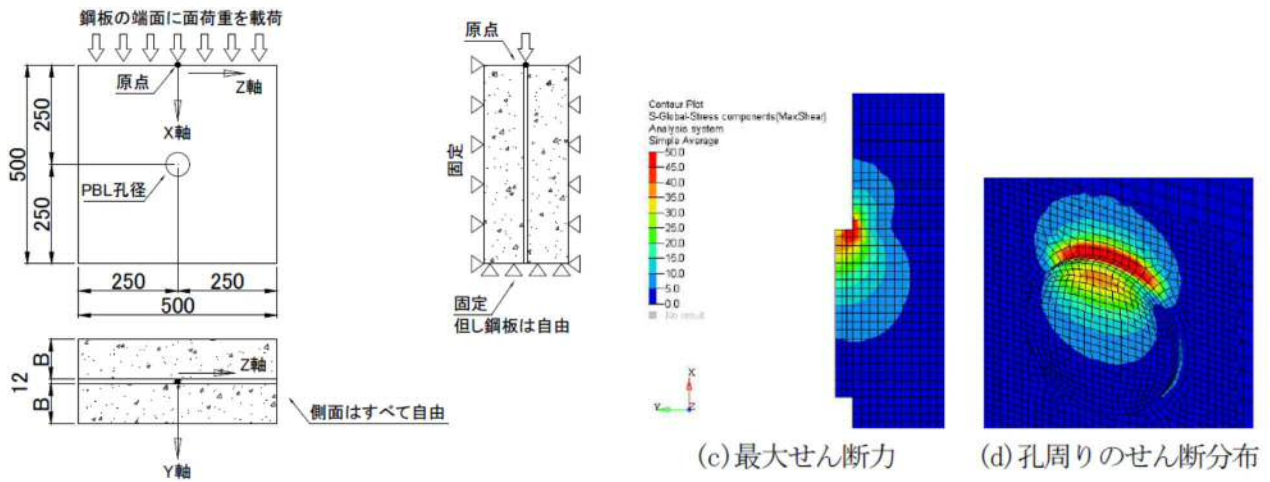


図 3. 1. 2. 3 孔内コンクリートのせん断分布 (3次元ソリッド要素モデル) (文献 3. 1. 2. 5)

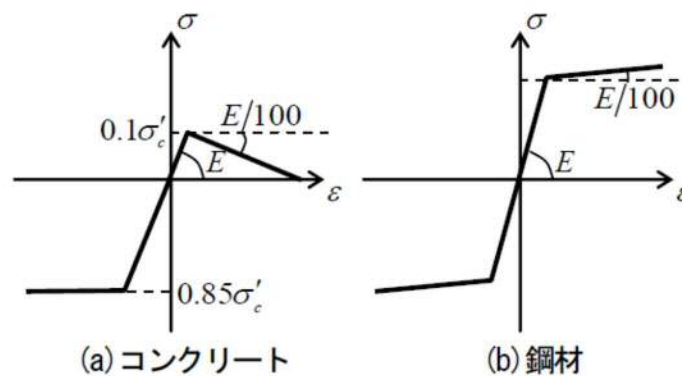
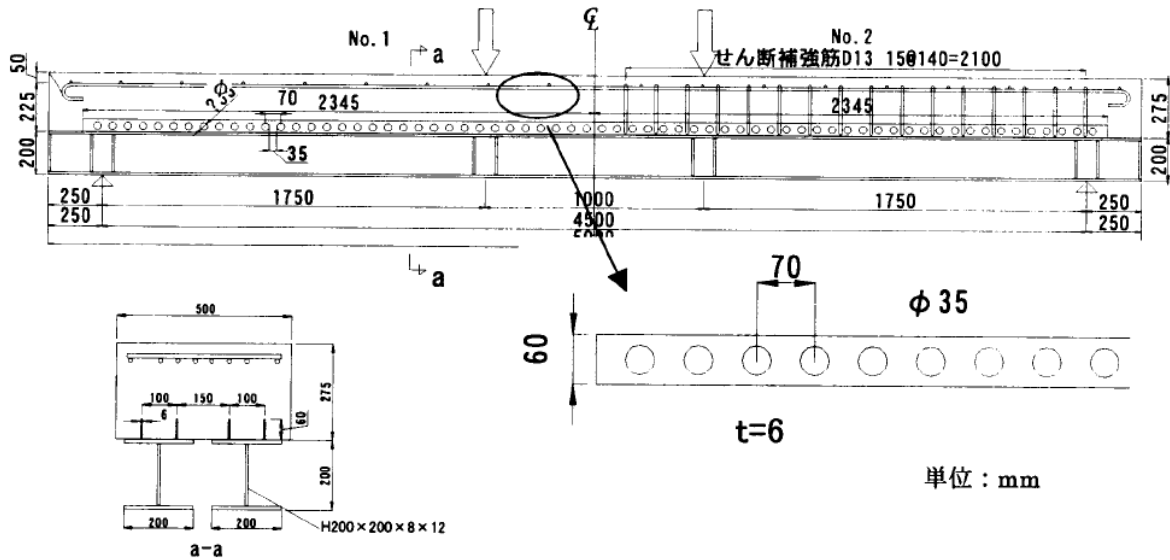


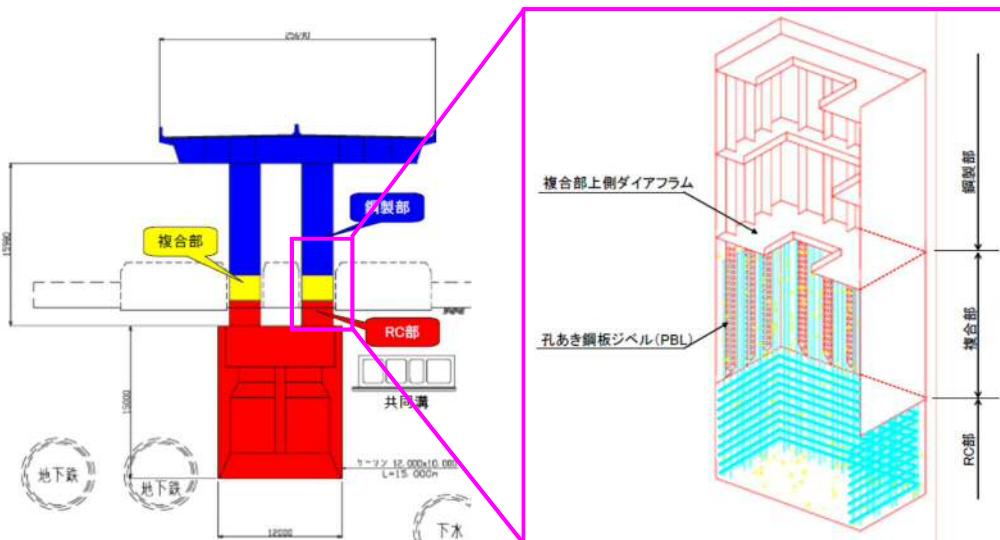
図 3. 1. 2. 4 コンクリートおよび鋼材の材料力学特性例 (文献 3. 1. 2. 6)

(2) シェル要素モデル

ずれ止めとして孔明け鋼板ジベルを用いた合成桁，合成床版や鋼・コンクリート複合橋梁，複合剛結橋脚などの構造全体，または接合部を対象範囲とした FEM 解析を行う場合，計算機能力や解析時間の制約上，モデルの簡素化や要素数削減のため鋼板部分をシェル要素とした 2 次元または 3 次元モデルとする場合が多い (図 3.1.2.5)．この時，コンクリートは解析モデルが 2 次元の場合は平面応力要素を用い，3 次元の場合はソリッド要素が用いられる．その他の要素として，鉄筋やスタッドジベルをトラス要素でモデル化している事例もある．



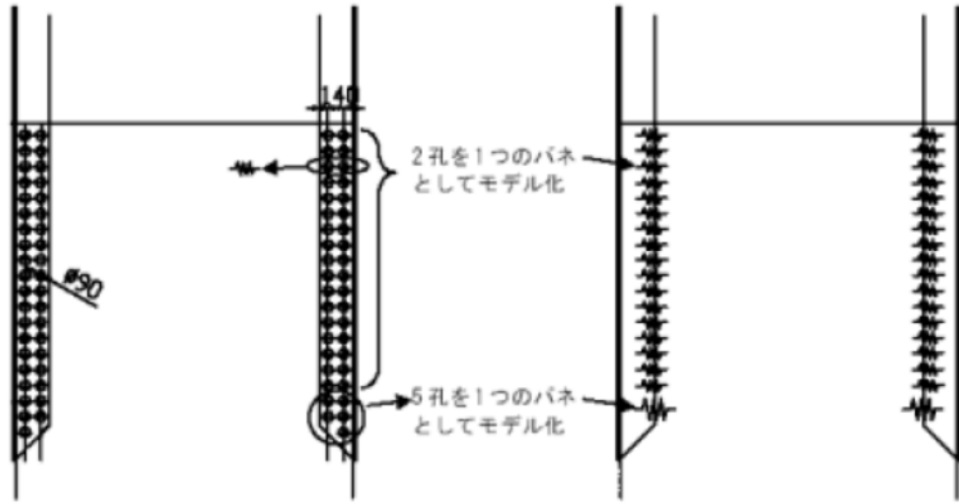
(a) 合成桁のモデル化事例 (文献 3.1.2.2)



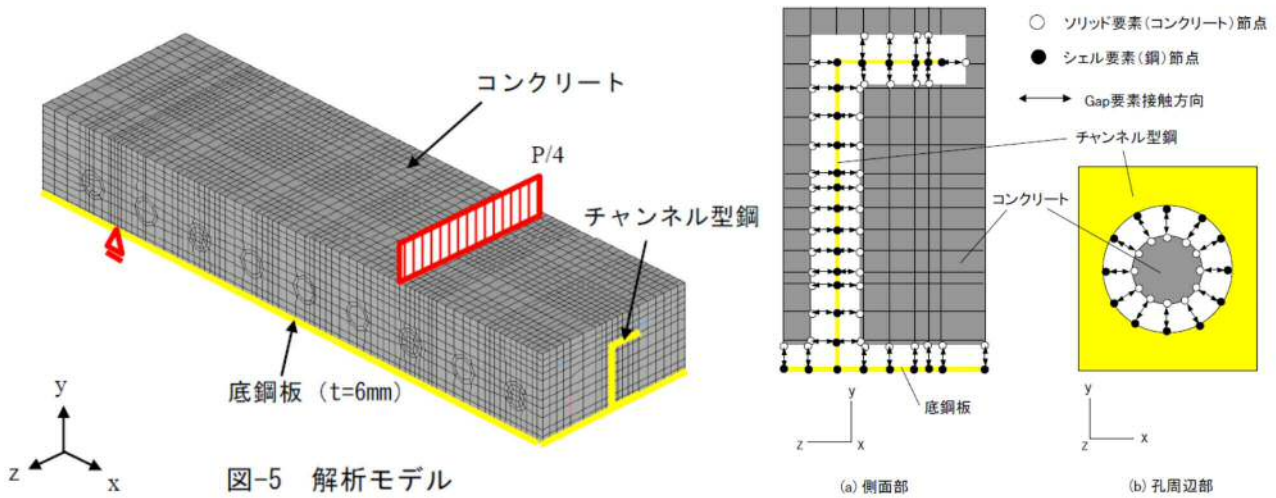
(b) 複合剛結脚のモデル化事例 (文献 3.1.2.7)

図 3.1.2.5 孔明け鋼板ジベルを用いた構造の解析事例

孔明き鋼板ジベルのモデル化は、複数の手法が用いられており、①単一または複数の孔のせん断抵抗を、対象部位の挙動に応じて1方向または2方向のばね要素で再現する手法（図3.1.2.6）（文献3.1.2.7）、②孔明き鋼板ジベルの抵抗特性を鋼板の剛性に置き換える手法、③ソリッド要素と同様にコンクリート要素と鋼板要素の格点間を圧縮力のみ伝達する要素で連結する手法（図3.1.2.6）（文献3.1.2.12）などが用いられる。



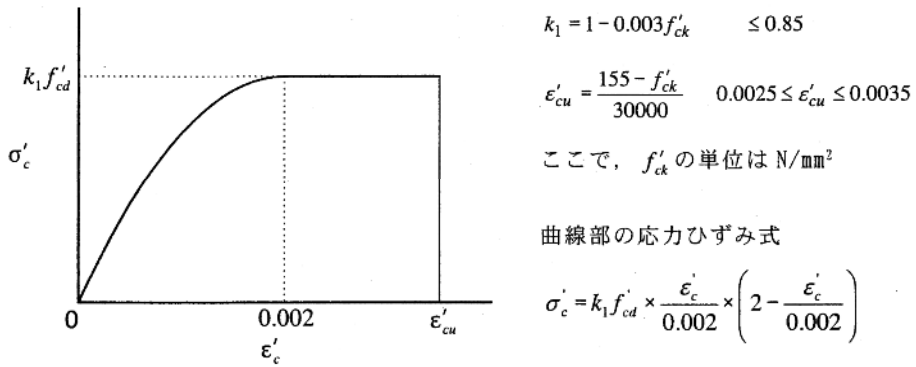
(a) 孔のせん断抵抗をばね要素でモデル化 (①)



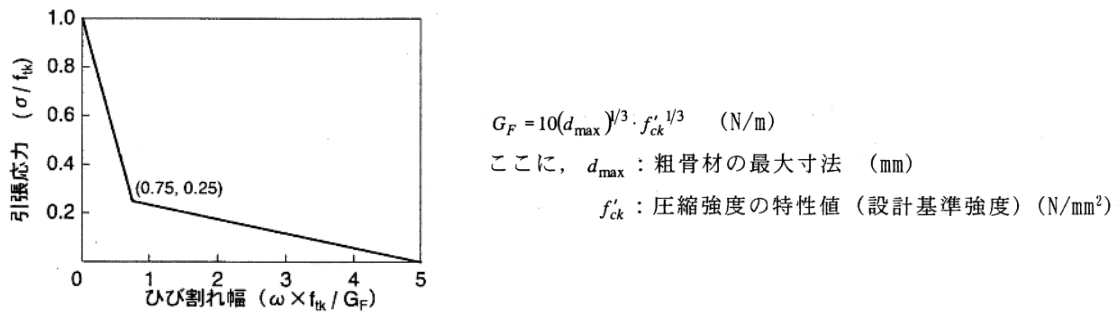
(b) コンクリート要素と鋼板要素間の接触条件を Gap 要素でモデル化 (③)

図3.1.2.6 孔明き鋼板ジベルのモデル化事例

コンクリートの材料力学特性は、コンクリート標準示方書（文献 3.1.2.13）の応力-ひずみ曲線と引張軟化特性（図 3.1.2.7）を用いることが多い。鋼材は、降伏後の剛性を初期剛性の 1/100 とする非線形バイリニアモデル（図 3.1.2.8）を用いることが多い。孔明き鋼板ジベルのばね要素の材料力学特性は、孔明き鋼板ジベルの押し抜きせん断試験の結果から得られる非線形特性や、複合構造標準示方書（文献 3.1.2.14）に記載されるせん断力-ずれ変位関係（図 3.1.2.9）を用いることが多い。



(a) 応力-ひずみ曲線



(b) 引張軟化特性

図 3.1.2.7 コンクリートの材料力学特性²⁾

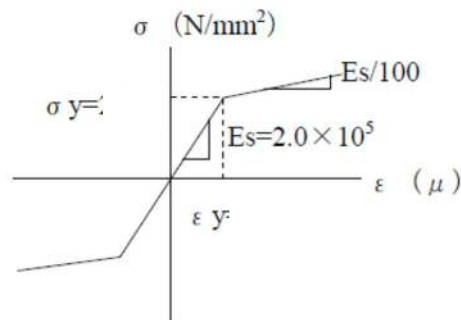
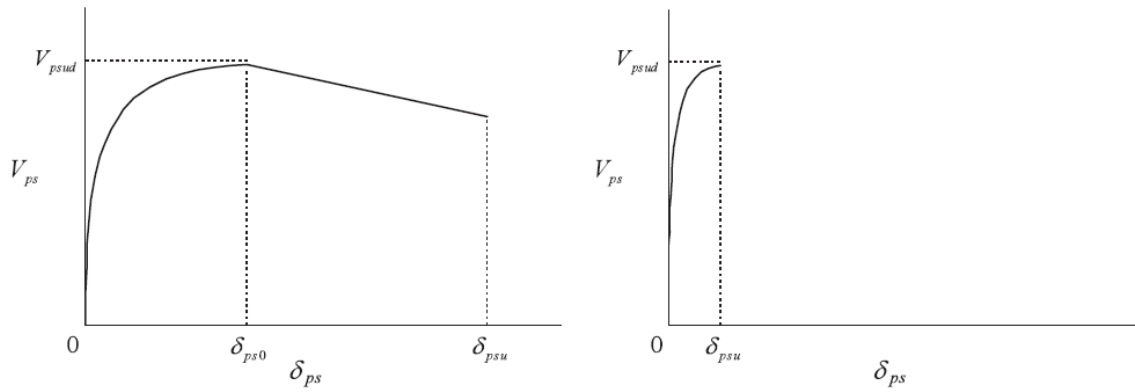


図 3.1.2.8 鋼材の材料力学特性



$$\begin{aligned}
 0 \leq \delta_{ps} \leq \delta_{ps0} & \quad V_{ps} = V_{psud} \left(1 - e^{-\alpha \delta_{ps} / \phi}\right)^\beta \\
 \delta_{ps0} < \delta_{ps} \leq \delta_{psu} & \quad V_{ps} = V_{psud} \left(1 - e^{-\alpha \delta_{ps0} / \phi}\right)^\beta \\
 & \quad + V_{psud} \left\{ \frac{2}{15} \left(1 - \frac{\delta_{ps}}{\delta_{ps0}}\right) \right\} \\
 0 \leq \delta_{ps} \leq \delta_{psu} & \quad V_{ps} = V_{psud} \left(1 - e^{-\alpha \delta_{ps} / d}\right)^\beta
 \end{aligned}$$

(a) 貫通鉄筋を有する場合

(b) 貫通鉄筋の無い場合

- V_{ps} : 孔あき鋼板ジベルの孔 1 個あたりのせん断力
- V_{psud} : 孔あき鋼板ジベルの孔 1 個あたりの設計せん断耐力
- δ_{ps} : 相対ずれ変位
- δ_{ps0} : 最大せん断力時のずれ変位
- δ_{psu} : 終局ずれ変位
- ϕ : 貫通鉄筋径
- d : 孔径
- α, β : 係数

図 3. 1. 2. 9 孔あき鋼板ジベルの荷重-ずれ関係³⁾

参考文献

- 1) 平陽兵, 天野玲子, 大塚一雄: 孔あき鋼板ジベルの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1503-1508, 1997
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2017
- 3) 土木学会: 複合構造標準示方書, 2014

収集した文献 事例編1: 鋼とコンクリートの接合部に記載 (文献3.1.2.1~3.1.2.12)

- 文献3.1.2.1 宗本理, 園田佳巨, 輿石正己: 3次元弾塑性 FEM を用いた孔あき鋼板ジベルの耐力評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, 2013
- 文献3.1.2.2 平陽兵, 古市耕輔, 吉田健太郎, 河野哲也: 孔あき鋼板ジベルを用いた合成梁に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 2011
- 文献3.1.2.3 田中良弘, 福浦尚之, 三桶達夫: 孔あき鋼板ジベルを用いた超高強度繊維補強コンクリート桁間の接合構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 2004
- 文献3.1.2.4 下菌征史, 彦坂熙: 孔明き鋼板ジベルを用いた複合ラーメン橋剛結部の水平耐荷力, コンクリート工学年次論文集, 2003
- 文献3.1.2.5 道管裕一, 藤井堅, 民家洋輔, 藤井大成: 孔あき鋼板ジベルの荷重伝達メカニズムに関する一考察, 構造工学論文集, 2014
- 文献3.1.2.6 園田佳巨, 手嶋康博: 3次元弾塑性 FEM による孔あき鋼板ジベルの設計式に関する基礎的考察, 応用力学論文集, 2008
- 文献3.1.2.7 志村敦, 内田諭, 眞嶋隆行: 孔あき鋼板ジベルを用いた鋼-コンクリート複合橋脚の設計, 土木学会第59回年次学術講演会, 2004
- 文献3.1.2.8 篠原聖二, 加藤祥久: 鋼・コンクリート複合橋脚接合部の構造合理化, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010
- 文献3.1.2.9 磯部龍太郎, 副島直史, 水口知樹, 志治謙一, 大嶋雄: 弾塑性有限変位 FEM 解析を用いた複合橋脚の終局限界状態に関する1考察, 土木学会第72回年次学術講演会, 2017
- 文献3.1.2.10 谷中聡久, 平嶋健太郎, 春日井俊博, 森下泰光: 孔あき鋼板リブの直交方向ずれ止め特性に関する実験的研究, 第6回複合構造の活用に関するシンポジウム
- 文献3.1.2.11 久保典之, 酒井武志, 大口真司, 梅原郁弘, 中島章典: 複数配置した孔明き鋼板ジベルのせん断分担特性に関する解析検討, 土木学会論文集 A2, Vol.69, No.2, 2013
- 文献3.1.2.12 松村達也, 倉田幸宏, 鈴木統, 古内仁, 上田多門: 複数配置した孔明き鋼板ジベルのせん断分担特性に関する解析検討, 構造工学論文集, Vol.54A, 2008

3.1.3 非合成桁

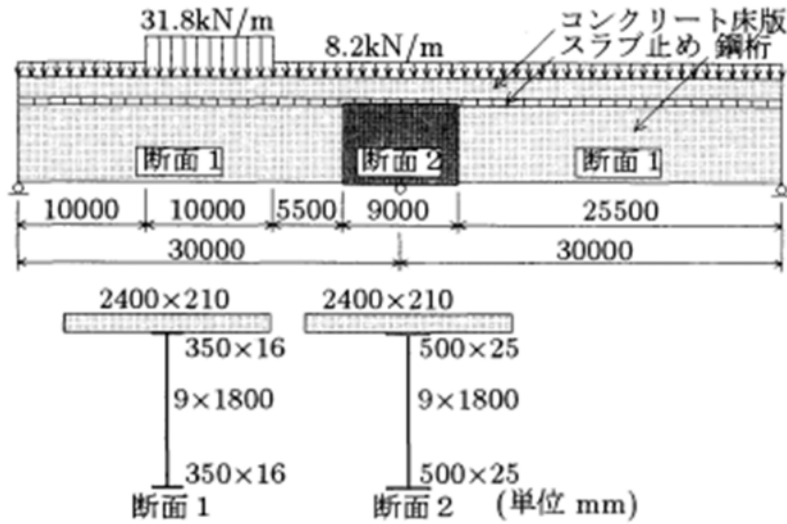
桁橋において、コンクリート床版と主桁の接合に関しては、設計上、両者の合成効果を期待する合成桁と床版との合成効果を考慮しない非合成桁に分別できる。非合成桁では、一般的にスラブアンカーにより床版と主桁を接続する。桁橋以外の橋梁においても、コンクリート床版と鋼部材（床組）は主にスラブ止めにより一体化される。設計上、スラブ止めの合成効果は無視されるが、有限要素解析においてスラブ止めの合成効果を無視すると実挙動を精度よく再現できないことが指摘されている。そのため、有限要素解析においてはスラブアンカーの合成効果は様々な手法・モデルによって考慮されている。それらのモデル化の妥当性や効率性は、有限要素解析の目的によって異なることが予想される。そこで本節では、土木学会の査読付論文集を中心に原著論文を収集し、有限要素解析の目的ごとに、用いられている合成効果のモデル化の方法とその結果や留意点をまとめた。収集した文献を表 3.1.3.1 に示す。

表 3.1.3.1 収集した文献一覧

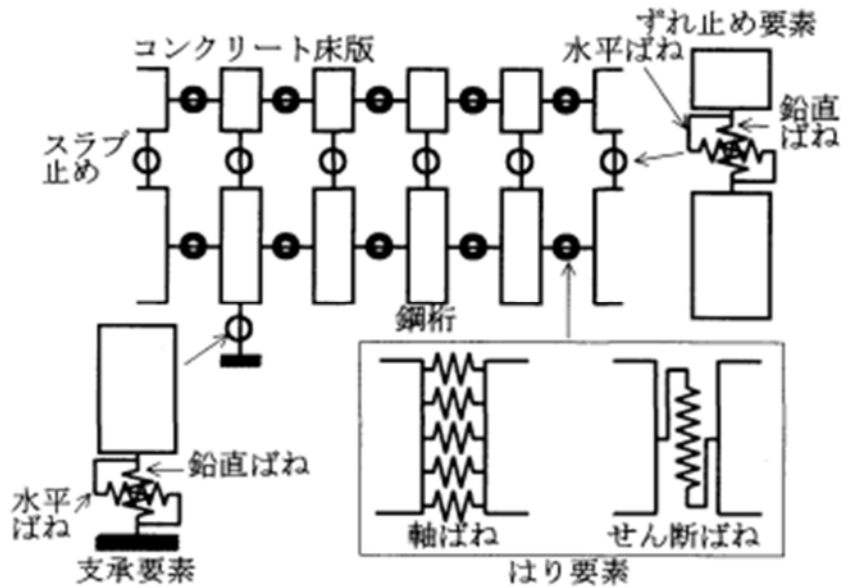
文献 No.	分類	論文名	著者	年	出典名
3.1.3.1	耐震・耐荷力解析	ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析	中島章典 他	1996	土木学会論文集
3.1.3.2	活荷重レベルでの合成効果検討	活荷重レベルにおける連続非合成桁橋の挙動に関する一考察	中島章典 他	1999	土木学会論文集
3.1.3.3	活荷重レベルでの合成効果検討	既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価	三木千壽 他	2000	土木学会論文集
3.1.3.4	活荷重レベルでの合成効果検討	RC 床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価	山田真幸 他	2001	構造工学論文集
3.1.3.5	活荷重レベルでの合成効果検討	スラブアンカーの静的ずれ耐荷力特性に関する実験的研究	梶田智子 他	2001	構造工学論文集
3.1.3.6	耐震・耐荷力解析	上路式鋼アーチ橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究	野中哲也 他	2003	土木学会論文集
3.1.3.7	耐震・耐荷力解析	上路式鋼トラス橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究	野中哲也 他	2003	構造工学論文集
3.1.3.8	リダンダンシー解析	主桁損傷を受けた 2 主桁橋の残存耐力に関する考察	橋吉宏 他	2000	土木学会論文集
3.1.3.9	リダンダンシー解析	我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討	永谷秀樹 他	2009	土木学会論文集 A
3.1.3.10	リダンダンシー解析	大きなき裂損傷が発生した鋼桁橋の全体残存耐荷力に関する解析的検討	山口隆司 他	2009	鋼構造論文集
3.1.3.11	リダンダンシー解析	連鎖的な部材破壊を考慮した鋼橋のリダンダンシー解析法の提案	野中哲也 他	2010	構造工学論文集
3.1.3.12	活荷重レベルでの合成効果検討	約 50 年間供用された床版目地を有する連続非合成鋼 I 桁橋の損傷状況と現地載荷試験	村越潤 他	2010	構造工学論文集
3.1.3.13	リダンダンシー解析	少数主桁連続橋でのリダンダンシー解析の試み	岩坪要 他	2015	鋼構造年次論文報告集
3.1.3.14	リダンダンシー解析	疲労き裂を有する連続鋼桁橋の残存性能に関する解析的研究	橋本国太郎 他	2015	鋼構造論文集
3.1.3.15	リダンダンシー解析	非線形有限要素解析による連続非合成多主桁橋の冗長性に関する考察	斉木功 他	2018	構造工学論文集
3.1.3.16	リダンダンシー解析	非合成連続多主桁橋の冗長性評価に及ぼすスラブアンカーの合成効果の影響	竹田翼 他	2018	土木学会論文集 A2

具体的な事例を紹介する前に、桁と床版の接合部の有限要素解析モデルの例を図 3.1.3.1～3.1.3.5 に示す。桁と床版の接合部では、主にばね要素（水平・鉛直）、梁要素、トラス要素、トリリニア非線形ばね要素、剛結が使用されている。

有限要素解析モデルの中で桁と床版の接合部に最も多く用いられていたのは、ばね要素である。ずれ止めを表現するばね要素では、押抜きせん断試験で求められた荷重-ずれ関係が設定されている（図 3.1.3.1）。



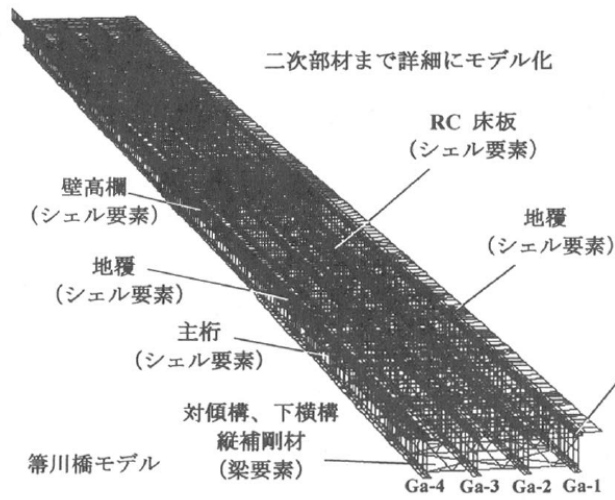
(a) 全体モデル



(b) 要素間の剛体ばねモデル

図 3.1.3.1 ばね要素を用いたモデル（文献 3.1.3.2）

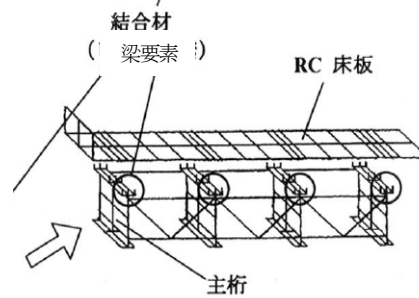
桁と床版の接合部に梁要素を用いたモデルでは、梁要素の断面二次モーメントの大きさをモデルの合成、非合成を設定していた。合成モデルの場合は断面二次モーメントを ∞ とし、非合成モデル場合は0としていた（図3.1.3.2）。



(a) 全体モデル

結合要素の断面2次モーメントを変化させ
合成・非合成を表現する

合成モデル	$I = \infty$
非合成モデル	$I = 0$



(b) 桁と床版の接合部モデル

図3.1.3.2 梁要素を用いたモデル（文献3.1.3.3）

トリリニア非線形ばねを用いたモデルでは、橋軸方向を非線形ばねとし、橋軸直角方向を剛結としている。これにより、非合成桁として設計された橋梁に対し、合成構造として挙動する床版と補剛桁のモデル化を行っている(図 3.1.3.3)。剛結は、有限要素解析モデルの中でばね要素の次に多く用いられている(図 3.1.3.4)。

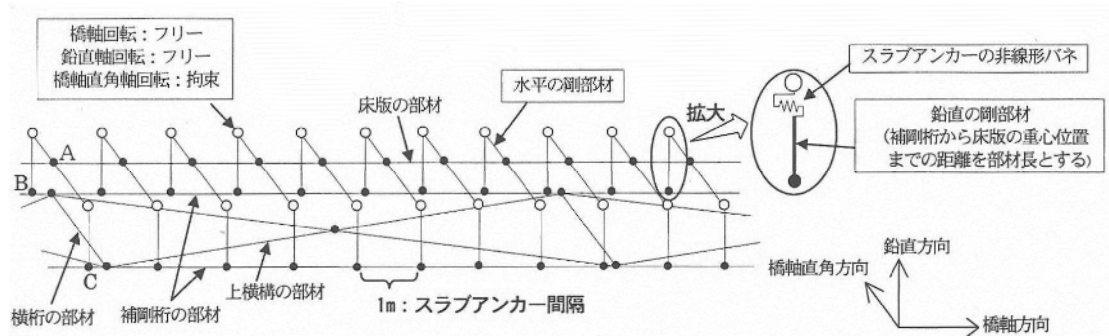


図 3.1.3.3 トリリニア非線形ばねを用いたモデル (文献 3.1.3.6)

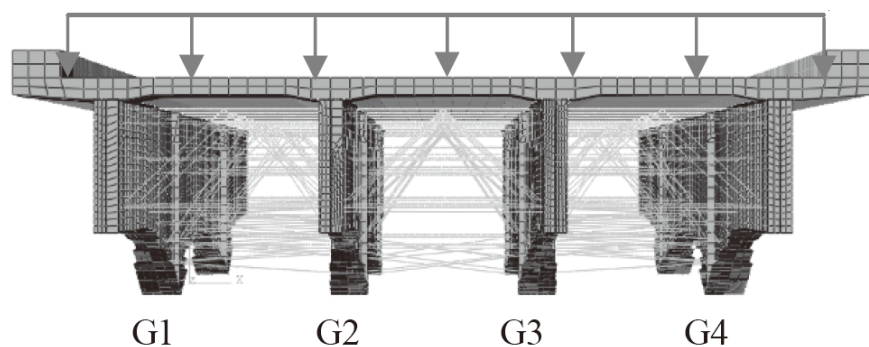


図 3.1.3.4 剛結 (文献 3.1.3.14)

その他として、床版と主桁の合成作用を考慮しない場合の鋼多主桁橋の冗長性の発揮メカニズムを明らかにすることを目的として、冗長性に及ぼす床版の寄与を無視するために床版-主桁間の荷重伝達を計算後、床版モデルを消去する方法もあった(図 3.1.3.5)。

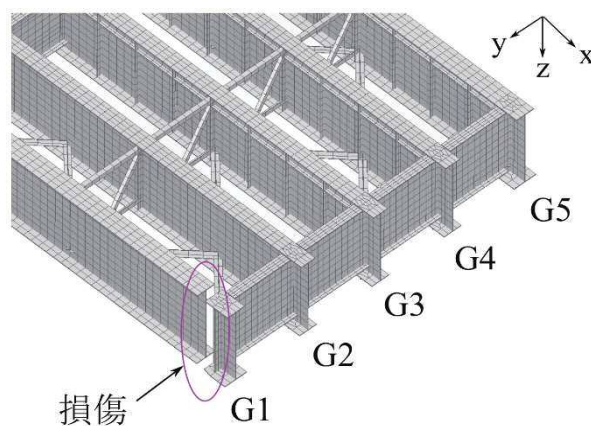


図 3.1.3.5 床版を消去したモデル (文献 3.1.3.15)

以上が非合成桁で用いられている桁と床版の接合部のモデル例である。次に、下記(1)～(3)の解析の目的別に解析事例を整理した。

- (1) 活荷重レベルでの合成効果の検討
- (2) 耐震解析・耐荷力解析
- (3) リダンダンシー解析

(1) 活荷重レベルでの合成効果の検討

① 非合成連続桁橋における合成効果の計測・数値解析（文献3.1.3.2, 3.1.3.3, 3.1.3.12）

非合成桁橋に合成効果が見られることについて、その利点や課題として次のようなものが挙げられている。

【利点】

- ・ 既設桁橋の疲労照査等で合成効果を見込むことができれば、構造補強が過大にならずコストを低減できる。

【課題】

- ・ スラブアンカーに作用する繰返しの水平せん断力による疲労の問題
- ・ 連続桁の負曲げ領域におけるコンクリート床版のひび割れの問題
- ・ 連続桁橋の上部工の温度膨張・収縮によって下部工（橋脚）に、「非合成」を前提とした場合よりも過大な曲げが発生する問題

したがって非合成桁橋であっても、その合成効果をより正確に把握することが、橋の耐荷性能や耐久性能を評価する上で重要となる。以下に、実橋の計測や想定モデルに基づく数値解析により非合成桁橋の合成効果を評価した事例を示し、有限要素解析を実施する上での留意点を示す。

文献3.1.3.2, 3.1.3.3, 3.1.3.12 は、いずれも実橋梁の活荷重レベルでの挙動を精度良く再現するための数値モデルについて検討している。

【文献3.1.3.2】

- ・ コンクリート床版をスラブ止めにより鋼桁に接合した連続桁橋を対象として、たわみや床版ひび割れ幅などを設計値と比較
- ・ 数値解析には剛体ばねモデルを用い、桁および床版には剛体ばね梁要素（剛体間にせん断ばねと高さ方向に複数の軸方向ばねを配置した要素）、スラブ止めとして、押抜き試験により得られた荷重-ずれ関係を直接モデル化したばね要素を床版および桁の剛体間に配置
- ・ 比較のためにスタッドを用いた合成桁の解析も実施
- ・ （結論1）解析から得られたたわみは、スラブ止めの合成効果を考慮することにより、非合成桁としての設計計算よりもかなり低減される。
- ・ （結論2）合成効果を考慮することで、連続桁中間支点付近のコンクリート床版にひび割れが生じるが、ひび割れの許容値を超えるものではない。
- ・ （結論3）設計で考慮していないスラブ止め作用するせん断力に着目し、非合成連続桁および断続合成桁は、合成桁に比べて疲労の観点から好ましくない。

【文献3.1.3.3】

- ・ 供用中の非合成連続桁橋に設計荷重相当の荷重を載荷し、たわみ・ひずみ・床版桁間のずれ等を計測することで、有限要素解析による再現性を確認
- ・ 対象橋梁は4径間連続4主桁非合成桁橋（支間長47m程度、主桁高さ2200mm）で、床版と鋼桁は直径16mmの丸鋼のスラブアンカーにより接合
- ・ 有限要素解析で、主桁・RC床版・壁高欄をシェル要素、対傾構・下横構を梁要素、スラブアンカーは梁要素によりモデル化
- ・ スラブアンカーを表す梁要素の曲げ剛性を変化させることで、合成効果を無視した設計上の非合成桁モデルや、完全に一体化している設計上の合成桁モデルを再現

- ・(結論1) 計測されたたわみは合成効果を考慮しないモデルのたわみの半分以下である。
- ・(結論2) 計測されたひずみ分布から推定される中立軸は、合成効果を考慮しないモデルの中立軸よりもかなり上である。
- ・(結論3) 以上のことから、非合成桁として設計され、スラブアンカーで床版と桁を接合された桁橋において、活荷重レベルでは合成効果が生じていると結論付けられる。

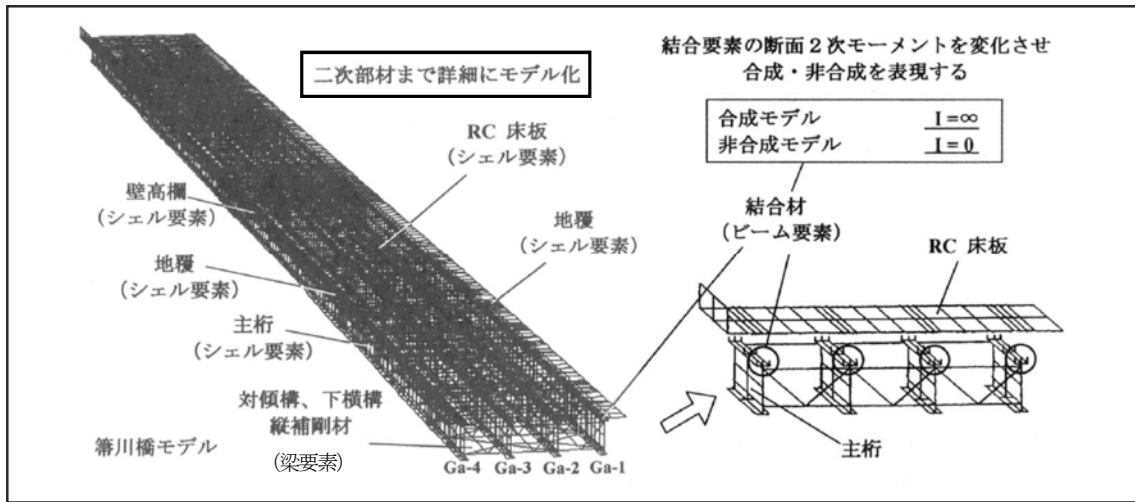
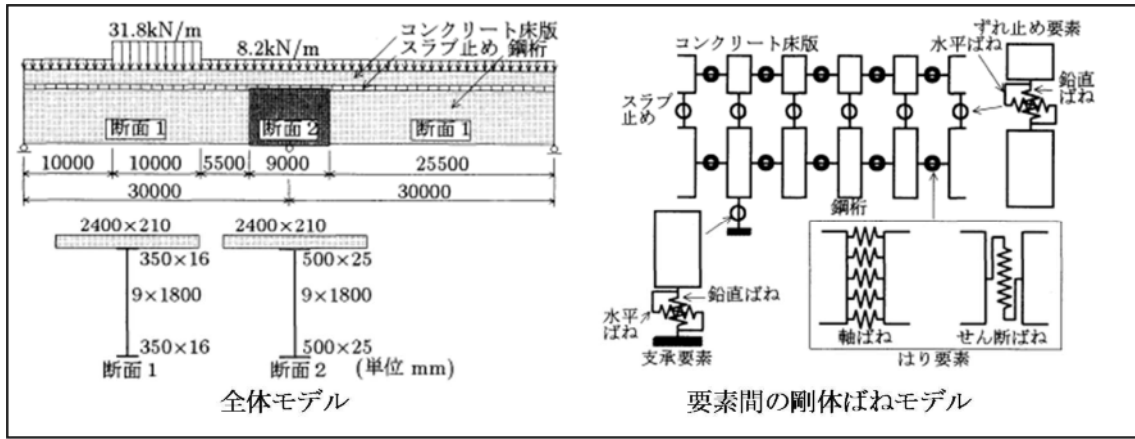
【文献3.1.3.12】

- ・約50年間供用された連続非合成桁橋を対象として、活荷重に対する全体挙動の把握と数値解析手法の適用性を検討
- ・対象橋梁は2主桁3径間連続非合成桁橋であり、張出床版部に凍害による損傷
- ・数値解析は、2種類の格子桁モデル(床版の考慮なしと有効幅を桁に考慮したモデル)と床版をシェル要素、その他を梁要素によりモデル化した有限要素モデル
- ・床版とフランジ間はばねによって結合し、実験結果を参照してばね剛性を変化
- ・(結論1) 完全合成ではないものの、合成に近いばね定数のモデルによる桁内の応力が実験結果を最もよく近似している。
- ・(結論2) 床版と桁の相対変位は弾性的な挙動を示すものの、そのずれ剛性はスラブアンカーから想定されるずれ剛性に対して非常に大きい。

以上の検討事例(文献3.1.3.2, 3.1.3.3, 3.1.3.12)での解析の目的とモデル化の特徴を表3.1.3.2に示す。これらの事例での実橋あるいは想定モデルでの有限要素解析モデルを図3.1.3.6に示す。

表3.1.3.2 非合成桁橋の合成効果に関する検討事例の解析の目的とモデル化の特徴

文献No.	解析の目的	使用要素			解析のその他の設定
		桁	床版	ずれ止め	
3.1.3.2	連続非合成桁橋の活荷重レベルでの実挙動の解明のため一般的な諸元の想定モデルでの解析結果を設計値と比較	剛体(剛体要素間に軸ばね・せん断ばねを設定)		ばね(鉛直及び水平)	<ul style="list-style-type: none"> ・各ばねにはその材料の構成則を設定 ・ずれ止めを表すばねの水平方向の挙動は、静的押抜き試験結果を反映
3.1.3.3	既設の実橋に生じる応力と非合成桁の合成挙動の限界を調べた載荷試験と解析結果を比較し、差異が生じる要因を検討	シェル		梁	<ul style="list-style-type: none"> ・桁と床版の間の梁要素の断面二次モーメント $I = \infty$ で合成モデル, $I = 0$ で非合成モデル ・合成モデルでは床版の剛性は2方向直交異方性を持つとして設定
3.1.3.12	約50年供用された実橋の活荷重に対する全体挙動の把握と、各種解析手法の適用性の検討	梁	シェル	梁(せん断ばね定数で合成の程度を設定)	<ul style="list-style-type: none"> ・床版目地はシェル要素の不連続部として設定 ・地覆とコンクリート舗装は床版との一体性が不明のため断面剛性として考慮しない



- (1) 格子桁モデル：床版を考慮しないモデルと、有効幅を考慮して桁断面に組み込んだモデル。
 (2) 有限要素モデル：主桁・縦桁・横桁を梁要素、床版をシェル要素としてモデル化。

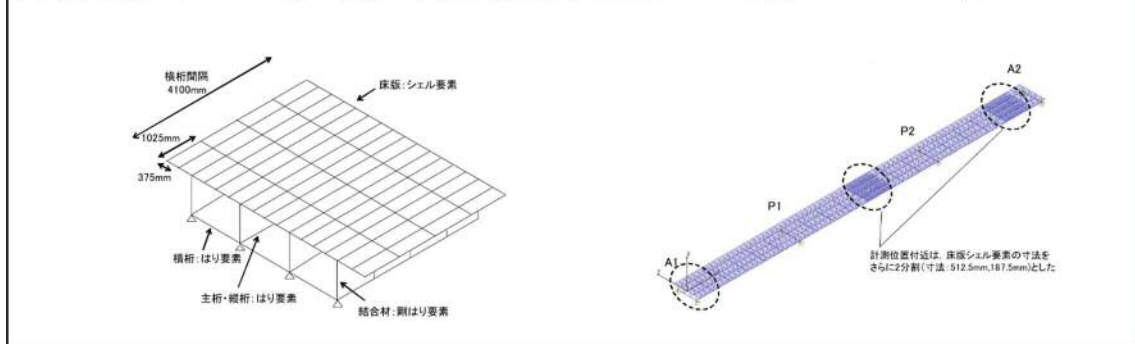


図 3.1.3.6 検討事例 (文献 3.1.3.2, 3.1.3.3, 3.1.3.12) での実橋や想定モデルでの有限要素解析モデル

これらの解析による非合成桁橋の合成効果に着目した結果を図 3.1.3.7 に示す。

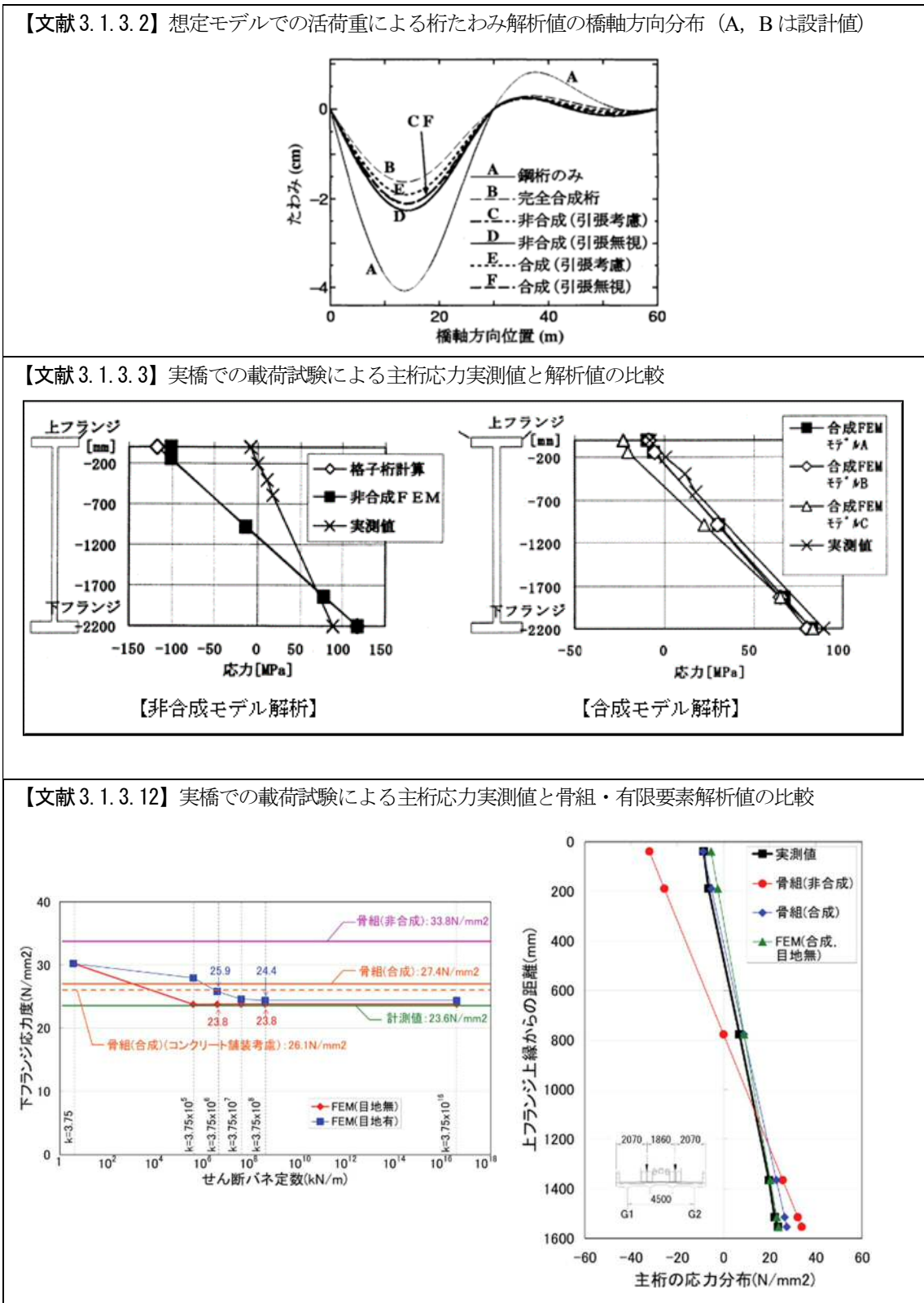


図 3.1.3.7 各検討事例における合成効果に着目した解析結果

これらの解析結果を総合すると、次のことが言える。

- 非合成桁橋を想定したモデルの有限要素解析値や非合成桁橋の載荷試験による実測値を、格子桁解析等による設計計算値と比較すると、非合成の設計値よりも合成の設計値に近いものになった(文献3.1.3.2, 3.1.3.3, 3.1.3.12)。
- 合成効果を考慮した有限要素解析を行う場合、床版の剛性に2方向直交異方性を考慮すると、より実測値に近い結果が得られた(文献3.1.3.3)。
- スラブアンカーの水平せん断試験結果に基づいて設定したせん断ばね定数を1オーダー大きく(10倍)した解析のほうが、載荷試験による実測値によく合う傾向があり、有限要素解析に考慮していない要因(桁と床版の付着、リベットの頭部やフランジ厚変化部による変位拘束)が影響していた可能性がある(文献3.1.3.12)。

以上の検討事例のような解析を実施するにあたっての留意点として、次のことが考えられる。

- 文献3.1.3.3のように、桁と床版の結合要素の断面二次モーメント I を変化させて合成の程度を設定する場合、 $I = \alpha I_0$ は通常値の3桁上(1000倍)、 $I = 0$ は極めて小さい数値とすれば、支障なく計算できると考えられる。解析モデルの剛体変位が発生しない条件であれば、本当に $I = 0$ と入力しても問題ない。
- 桁と床版の合成効果には、両者の付着や摩擦も影響していると考えられる。これを有限要素解析に考慮する方法は難しいと考えられるが、適切なモデル化には次(②)に示すような実験事例を参考にするとよい。実験事例では、付着の破壊後にスラブアンカーのひずみが発生し始めることから、桁と床版の間に大きなずれを生じさせるような解析では、スラブアンカーと付着を別々にモデル化するのがよいと考えられる。

② スラブアンカーの性能評価(実験・数値解析)(文献3.1.3.4, 3.1.3.5)

前述①で示したとおり、非合成桁橋として設計されていても、実際には合成桁橋に近い挙動を示しており、その要因として床版のずれ止めのために設置されたスラブアンカー等が大きく影響しているものと考えられる。ここでは、有限要素解析における桁・床版間のせん断剛性の設定に参考にできるような、スラブアンカーの実験等による性能評価の事例を示す。

【文献3.1.3.4】

- ・ 既設のRC床版非合成桁橋を対象として、スラブアンカーおよび付着による床版と桁との一体化のメカニズムやスラブアンカーと付着の耐荷力・疲労特性等を明らかにするため、スラブアンカーの要素試験およびその有限要素解析を実施
- ・ 要素試験は、直径13mm丸鋼のスラブアンカーと付着面積500mm×200mmの押抜き試験(パラメータ:スラブアンカーの有無および3種類の付着面積)
- ・ (結論1) 要素試験を対象とした有限要素解析の結果、付着面の端部でせん断力が大きくなるため、端部が付着破壊の起点になる可能性がある。このことから、端部のない実際の桁橋の付着面では今回の押抜き試験による付着強度(0.5MPa程度)よりも付着強度が大きくなる可能性がある。
- ・ (結論2) 要素試験の結果、初期ずれ剛性が30~40MPa/mm程度と大きく、付着が破壊するまではスラブアンカーは荷重を受け持たない。疲労に関しては、静的強度の半分の荷重振幅では200万回で疲労破壊しなかった。
- ・ (結論3) 付着の破壊後も、桁と床版間のせん断剛性は比較的大きく、摩擦の影響が考えられる。

【文献3.1.3.5】

- ・ RC床版非合成箱桁橋(3BOX)を想定して、スラブアンカーおよび付着に着目した静的押抜きせん断試験(パラメータ:スラブアンカーの直径、曲げ上げ角度、3種類の付着面積、死荷重相当の拘束力の有無、繰返し荷重の有無)を実施
- ・ 実橋により近い状態の試験となるよう、床版と舗装の死荷重に相当する拘束力を、PC鋼棒により載荷
- ・ 供用荷重レベルでの繰返し荷重を作用させ、桁と床版との付着・せん断耐力に及ぼす影響も確認
- ・ (結論1) スラブアンカーの径は、最大せん断耐力とずれ発生後のずれ剛性への影響が大きいが、折り曲げ角度はあまり影響しない。

- ・(結論2) 付着の影響で最大せん断耐力は大きくなるが、付着がある場合のずれ発生後のずれ剛性は、付着がない場合よりも小さくなる。ずれが発生した後は付着が切れて一気にずれが進行し、せん断力がスラブアンカーに集中して相対ずれ変位量が大きくなるためである。
- ・(結論3) 疲労設計荷重レベルで繰返し载荷を200万回作用させると、桁と床版面の付着は切れやすくなるが、せん断耐力は大きくなる。繰返し载荷により、作用せん断力がスラブアンカーに均等に作用するためと考えられる。

検討事例(文献3.1.3.4, 3.1.3.5)での実験(静的押抜き試験)の目的と特徴を表3.1.3.3に示す。試験装置と試験ケースを図3.1.3.8に示す。

表3.1.3.3 実験(静的押抜き試験)の目的と特徴

文献No.	実験の目的	特徴(摩擦の考慮, 数値解析等)
3.1.3.4	スラブアンカーおよび付着による床版と上フランジとの結合のメカニズム, 耐荷力, 疲労特性等を明らかにする。	<ul style="list-style-type: none"> ・桁と床版間のせん断面に対して鉛直方向の力は導入していない。 ・押抜き試験を模擬する有限要素解析を行い, せん断面での局所的なせん断応力集中の状態を把握した。
3.1.3.5	床版と上フランジ面の付着に対する静的押抜き試験を行い, せん断耐力, ずれ定数, 破壊形状を確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ずれ止めに影響する死荷重(床版+舗装)を考慮するためのPC鋼棒による拘束圧を加えた。

文献No.	試験装置	試験ケース																																																														
3.1.3.4																																																																
3.1.3.5		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="6">試験体タイプ</th> </tr> <tr> <th>SLP1</th> <th>SLP2</th> <th>SLP3</th> <th>SLH1</th> <th>SLH2</th> <th>SLH3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>平面図</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>断面図</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>付着</td> <td>なし</td> <td>なし</td> <td>あり</td> <td>なし</td> <td>なし</td> <td>あり</td> </tr> <tr> <td>曲げ上り角度</td> <td>45°</td> <td>22.5°</td> <td>45°</td> <td>なし</td> <td>なし</td> <td>45°</td> </tr> <tr> <td>鉄筋径</td> <td>φ16</td> <td>φ13</td> <td>φ16</td> <td>なし</td> <td>なし</td> <td>なし</td> </tr> <tr> <td>繰り返し</td> <td>なし</td> <td>なし</td> <td>あり</td> <td>なし</td> <td>なし</td> <td>なし</td> </tr> <tr> <td>締め込み</td> <td>あり</td> <td>なし</td> <td>なし</td> <td>あり</td> <td>なし</td> <td>なし</td> </tr> </tbody> </table>		試験体タイプ						SLP1	SLP2	SLP3	SLH1	SLH2	SLH3	平面図							断面図							付着	なし	なし	あり	なし	なし	あり	曲げ上り角度	45°	22.5°	45°	なし	なし	45°	鉄筋径	φ16	φ13	φ16	なし	なし	なし	繰り返し	なし	なし	あり	なし	なし	なし	締め込み	あり	なし	なし	あり	なし	なし
	試験体タイプ																																																															
	SLP1	SLP2	SLP3	SLH1	SLH2	SLH3																																																										
平面図																																																																
断面図																																																																
付着	なし	なし	あり	なし	なし	あり																																																										
曲げ上り角度	45°	22.5°	45°	なし	なし	45°																																																										
鉄筋径	φ16	φ13	φ16	なし	なし	なし																																																										
繰り返し	なし	なし	あり	なし	なし	なし																																																										
締め込み	あり	なし	なし	あり	なし	なし																																																										

図3.1.3.8 試験装置と試験ケース

文献3.1.3.4では、局所的なせん断応力集中の状態を把握するため、押抜き試験を模擬する有限要素解析を行い、せん断面の先端部と下端部で大きな応力の発生が確認されている（図3.1.3.9）。実橋ではこのような極端な応力集中が発生することはなく、桁と床版間の付着の強度はより大きくなる可能性があると考えられている。

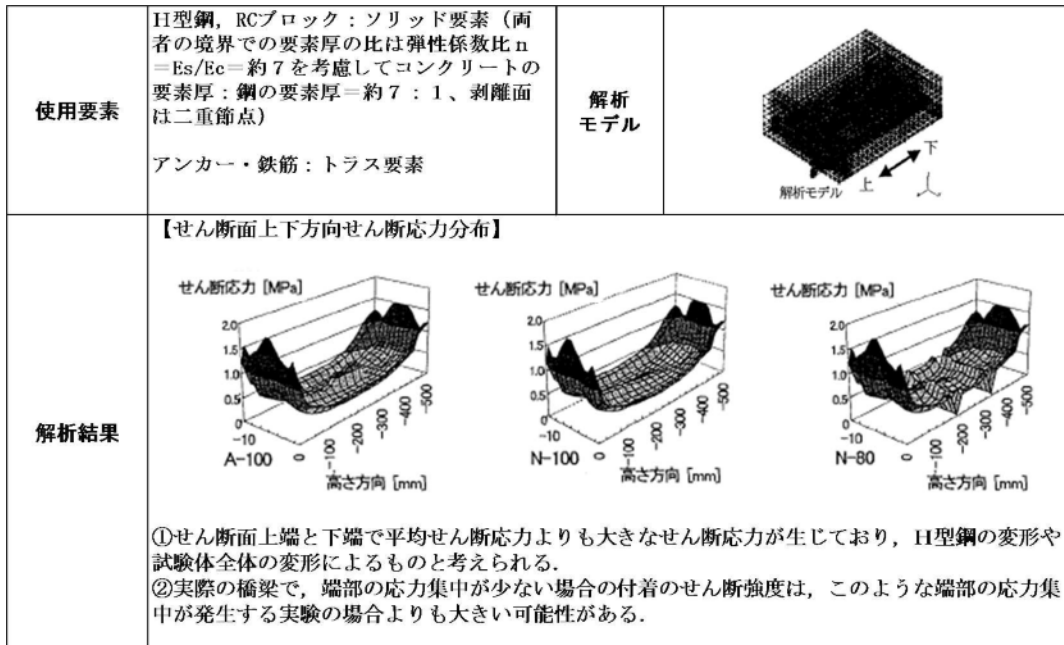


図3.1.3.9 押抜き試験を模擬する有限要素解析の解析モデルと結果（文献3.1.3.4）

(2) 耐震解析，耐荷力解析

ここでは、主に耐震解析，耐荷力解析について、発表されている文献3.1.3.1, 3.1.3.6, 3.1.3.7について整理した。下記に、各文献の概要を記述する。

・アーチ橋の耐震解析（文献3.1.3.6）

文献3.1.3.6では、アーチの大地震時弾塑性挙動におよぼす床版と補剛桁の結合の影響を明らかにするため、スラブアンカーの非線形性を取り入れた動的有限要素解析を行っている。

・トラス橋の耐震解析（文献3.1.3.7）

文献3.1.3.7では、文献3.1.3.6で実施している解析をトラス橋に用いた場合の動的有限要素解析を実施している。

・不完全合成桁の耐荷力解析（文献3.1.3.1）

ずれ止めの挙動が非弾性領域におよぶ不完全合成を解析の対象としている。ずれ止めの非弾性挙動は押抜き試験に基づく非線形水平ばね要素としてモデル化されており、合成桁の鋼桁およびRC床版はそれぞれ剛体ばねモデルの梁要素によりモデル化されている。解析の結果は3mの模型合成桁実験の結果と比較され、荷重たわみ関係や荷重ずれ変位関係において最大荷重に至るまで実験結果とのよい一致が確認されている。解析および実験に用いた合成桁は、曲げ耐力に至る前にずれ止めの非弾性挙動が現れるようなプロポーションであり、押抜き試験に基づくずれ止めのモデル化が重要かつ有効であると結論付けられる。

1) 耐震解析

文献3.1.3.6, 3.1.3.7で共通しているのは、床版の結合モデルである。非合成桁として設計しながら、実際は、合成構造として挙動する床版と鋼桁のモデル化にスラブアンカーの非線形性を取り入れている。これは、非合成桁として設計したスラブアンカーの特性を考慮し、正確にモデル化することで、より実橋に近い結果となると考えられる。具体的には、トリリニアの非線形ばねでスラブアンカーをモデル化している（図3.1.3.10）。トリリニアの非線形ばねは、荷重と相対変位の関係からスラブアンカーの骨格曲線を作成している（図3.1.3.11）。ここでの相対変位は、床版と補剛桁の変位差である。非線形性は、橋軸方向のみに設定し、橋軸直角方向は剛結合（完全合成）としている。

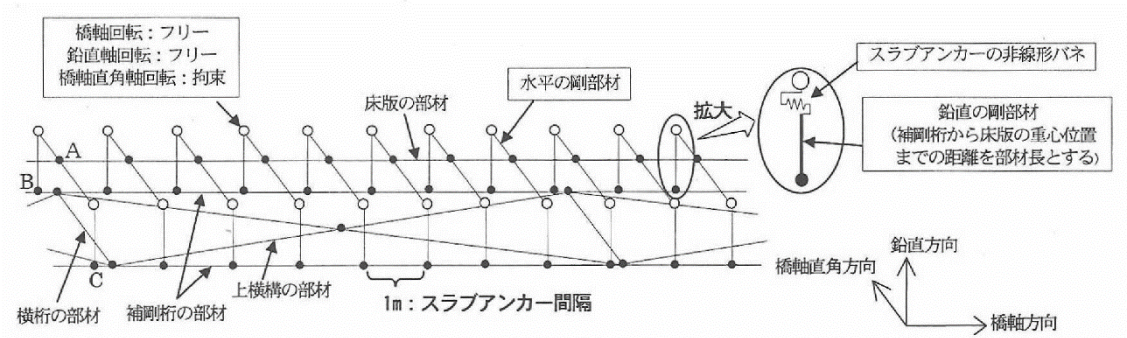


図 3. 1. 3. 10 トリリニアの非線形ばねモデル (文献 3. 1. 3. 6)

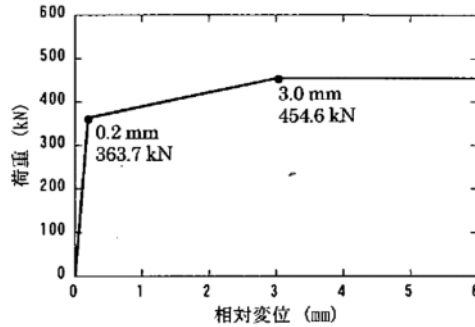


図 3. 1. 3. 11 スラブアンカーの骨格曲線 (文献 3. 1. 3. 11)

解析の結果として、非線形性を取り入れたモデルと従来のモデル（完全合成）では、結果が異なることがわかった。具体的には、非線形性を取り入れたモデルでは、橋軸方向においては、全体的に降伏している部材が少ない。しかし、入力地震動によっては、スラブアンカーが降伏し、床版と補剛桁の間にずれが生じる可能性も考えられる。従来のモデルでは、アーチリブが塑性化する結果となり、現実とは異なるものと考えられる。

よって、スラブアンカーの非線形性を取り入れたモデルのほうがより実挙動に近いと言える。

2) 耐荷力解析

文献 3. 1. 3. 1 では、鋼コンクリート合成構造物の弾塑性挙動を解析により追跡するためには、コンクリートおよび鋼の材料非線形性を考慮するだけでなく、ずれ止め部材の非線形挙動も考慮する必要があると述べている。その点から、不完全合成桁を対象として、剛体ばねモデルにおけるずれ止め要素の水平ばね特性を導入した弾塑性解析を行っている (図 3. 1. 3. 12)。この時の水平ばね特性は、押抜き試験により得られたずれ止めの非線形荷重-ずれ関係により設定している。

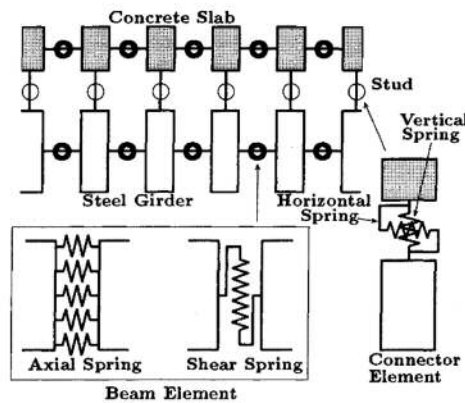


図 3. 1. 3. 12 ずれ止めのモデル化 (文献 3. 1. 3. 1)

上記モデルによる解析結果と実験結果を比較した結果、ほぼ一致していたため、本解析により不完全合成桁のずれ止めが作用する弾塑性域までの水平せん断力の定量的評価が可能となる。鋼桁を梁要素としてモデル化しているため、スタッドが伝達する水平せん断力の影響による桁フランジの応力集中の影響などは考慮できない。そのため、桁フランジのひずみ分布の実験結果と解析結果には多少の差異が認められた。しかし、荷重載荷点の床版のひずみ分布の解析結果は実験結果によく一致した。スタッドに作用する軸ひずみは、桁と床版の鉛直方向の結合条件と水平方向の変位の影響を受けるが、本解析結果において、水平変位も考慮してスタッドの軸ひずみを算定することによって、この軸ひずみもある程度追跡できる。

(3) リダンダンシー解析

1) 桁橋

・2主桁橋 (文献 3.1.3.8)

文献 3.1.3.8 では、損傷を受けた 2 主桁橋のリダンダンシーについて考察している。2 主桁橋の安全性を評価するために、主桁損傷の程度による橋梁の挙動の変化を把握すること、および崩壊機構の解明を試みている。

主桁に損傷を与えた 1/2 スケールの模型実験を行い、この結果を有限要素解析により再現している。解析モデルは、モデル A と B の 2 通りを用いている。モデル A では PC 床版部をソリッド要素、鋼桁部はシェル要素により分割している。モデル B では PC 床版をシェル要素、鋼桁を梁要素によりモデル化している (図 3.1.3.13)。どちらのモデルにおいても、床版と鋼桁は完全合成を仮定し、剛体要素により結合している。この根拠としては、モデルとしている橋梁が、鉛直荷重に対しては非合成として設計されているものの、地震時や風荷重に対しては床版剛性を期待した設計となっていることを挙げている。

主桁たわみについては、解析モデル A・B による結果は、ともに模型実験の結果をよく近似できた。また、模型実験の結果から、対象の 2 主桁橋の終局耐力は損傷部付近の床版の圧壊で決定されることがわかっているが、解析モデル B は床版の圧縮応力を精度よく予測できた。以上のことから、完全合成の仮定は本文献の範囲においては妥当であることが分かる。崩壊機構としては、主桁損傷後に橋梁全体にねじり変形が生じる。

実橋梁による安全性評価のため、モデル B により支間長の異なる 4 つの 2 径間連続 2 主桁橋の損傷時の解析を行っている。損傷は、損傷によって解放される曲げモーメントを載荷する方法で再現している。この結果、支間 70 m 以下であれば、主桁が切断された状態で床版に発生する応力度はコンクリート強度以下であり、終局には至らないと結論付けている。

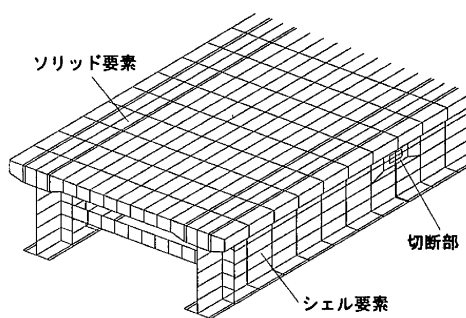


図-20 解析モデル A 概要

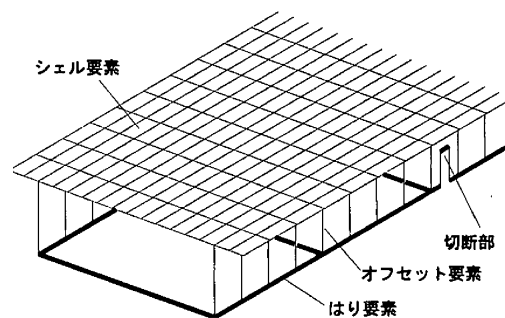


図-21 解析モデル B 概要

図 3.1.3.13 2 主桁橋のモデル化 (文献 3.1.3.8)

・3 主桁橋 (文献 3.1.3.13)

文献 3.1.3.13 では、非線形有限要素解析に基づく 3 径間連続合成 3 主桁橋のリダンダンシーの定量評価を行っている。また、リダンダンシー評価のためのモデル化・解析手法および評価方法について検討している。

解析モデルは、主要部材である床版・主桁・横桁をシェル要素によりモデル化している (図 3.1.3.14)。床版と主桁は完全合成を仮定し剛棒で結合している。構造部材とはみなされない壁高欄および中央分離帯をシェル要素でモデル化した解析も行っており、これらがリダンダンシーに及ぼす影響も考察している。損傷シナリオとして、外桁の端支点・

中間支点・中央支間中央のいずれかに損傷を仮定し、図 3.1.3.14 に示すような 5 パターンの程度の異なる損傷を採用し、パラメトリック解析を行っている。

解析結果として、損傷の程度が比較的大きい場合は損傷部付近に塑性変形が集中し、そうでない場合は損傷桁以外の桁も含めて損傷部付近の断面変化部に塑性変形が進展すると述べている。相当塑性ひずみ 2%を終局ひずみとすると、健全時に比較した損傷時の終局耐力は、中間点部損傷ではフランジに損傷がない場合はほぼ変わらず、ある場合に 60%程度となる。中央径間支間中央部損傷ではウェブのみに損傷がある場合でも 0.6 を下回り、フランジにも損傷がある場合は 0.3 程度になると述べている。中間支点付近に損傷がある場合、壁高欄を考慮しないモデルで終局耐力が活荷重の 9 倍程度あると報告している。壁高欄を考慮すると活荷重倍率で 2 程度の終局耐力の向上が見込める可能性がある。終局ひずみを 2%としても活荷重倍率が 10 を超える程度の耐荷力を有する。これらには床版と桁の合成作用の寄与が大きいとしている。PC 床版のモデル化についてはさらに検討が必要であると結んでいる。

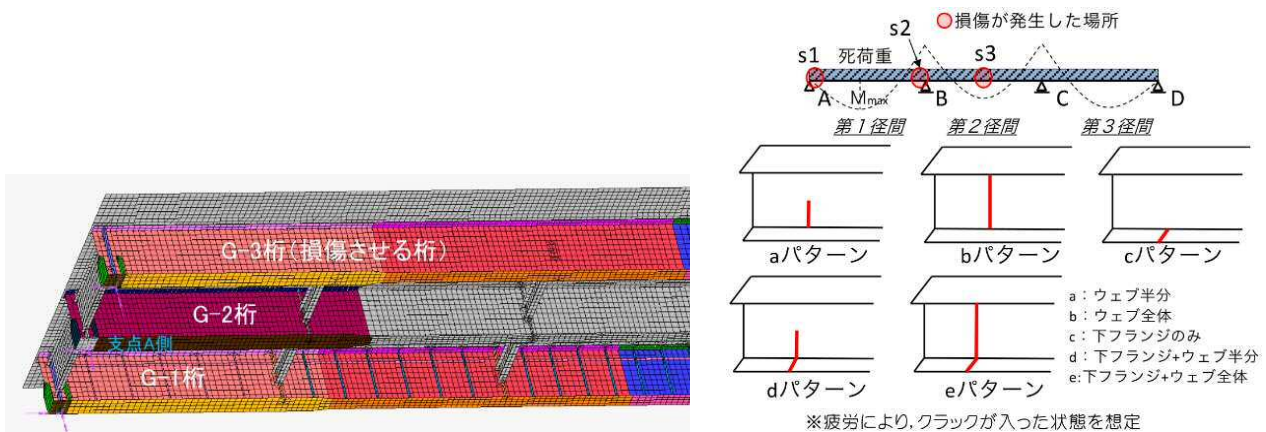


図 3.1.3.14 3 主桁橋のモデル化 (文献 3.1.3.13)

・多主桁橋 (文献 3.1.3.10, 3.1.3.14, 3.1.3.15)

文献 3.1.3.10, 3.1.3.14, 3.1.3.15 はいずれも、損傷を受けた連続多主桁橋 (4 主桁, 幅員 10 m, 38 m+51 m+38 m) の残存耐荷力, リダンダンシーについて検討している。

文献 3.1.3.10 では、実際にき裂損傷が見つかった橋梁をモデルとし、き裂進展に伴う橋梁全体の残存耐荷性能の変化や、き裂損傷による主桁の応力分布の変化を調べることを目的とし、き裂の長さを変えた弾塑性有限変位解析を行っている。

解析モデルは、床版をシェル要素とし、主桁・横桁・横構などは梁要素を用いている。ただし、主桁にき裂を考慮する場合、き裂周辺の垂直補剛材間のみシェル要素とし、シェル要素と梁要素を剛体要素で接合している (図 3.1.3.15)。なお、この接合に関しては、梁要素のみの解析結果と比較し、その妥当性を確認している。また、主桁は弾塑性、主桁以外は終局状態に至らないよう弾性と仮定している。床版と主桁はスラブ止めの挙動を模擬するための非線形ばね要素を水平・鉛直方向に配置し接続している (図 3.1.3.15)。

着目部材にき裂損傷が発生した場合の橋梁全体の耐荷力については、き裂が主桁の腹板のみにあるケースでは全体の剛性や耐荷力には大きな変化はなかった。これは、下フランジにより荷重伝達がされるためであると述べている。一方で、き裂が下フランジまで貫通すると剛性は 30%程度、耐荷力は 20%程度低下した。また、き裂のある中桁に隣接する桁のたわみが、き裂のない時に比べて大きくなった。このことから、き裂のある主桁の下フランジ引張力を他の主桁が分担することがわかった。

スラブ止めの挙動については論文で触れられていないので、床版と主桁の結合のモデル化が結果に及ぼす影響については不明である。

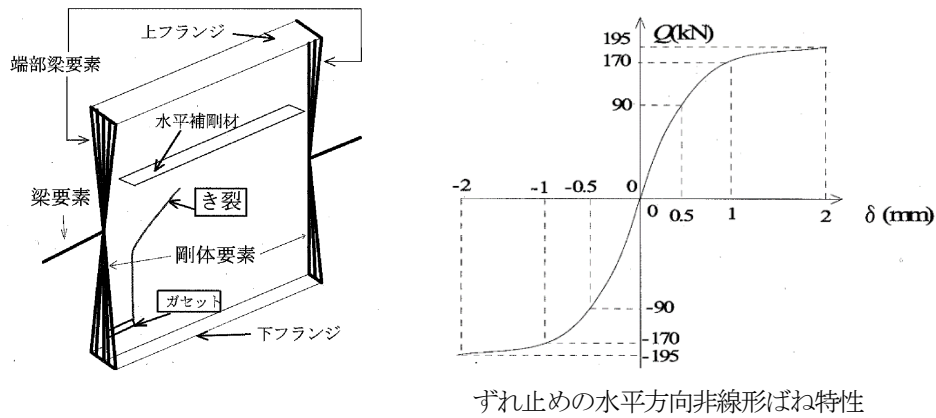


図 3. 1. 3. 15 多主桁橋のモデル化 (文献 3. 1. 3. 10)

文献 3. 1. 3. 14 では、前述の文献 3. 1. 3. 10 と同じ解析対象を用いて、耐荷性能・使用性能・補強の緊急性および必要性・多主桁の荷重分配機能・最大荷重時の変形挙動・き裂進展の可能性などを詳細に検討することを目的としてき裂の位置や長さを変化させた弾塑性有限変位解析を行っている。

解析モデルについては、コンクリート床版はソリッド要素、主桁・補剛材はシェル要素、横桁・対傾構・横構は梁要素によりモデル化している (図 3. 1. 3. 16)。鋼部材は線形硬化の弾塑性、コンクリートは詳しく述べられていないが強度を考慮していることから弾塑性によりモデル化されていると思われるが、軟化は考慮していない。床版と主桁は剛結としている。横桁と主桁は、主桁継手面 (横桁断面相当) と横桁を剛結としている。この接続の妥当性は応力状態から確認していると述べている。

支点反力の総和で評価した橋梁全体の耐荷力は、き裂がない健全な場合に比べ、き裂がある場合は 2~10%程度の低下が見られた。この低下量は文献 3. 1. 3. 10 の報告に比べると小さいが、著者らは終局時の崩壊がき裂の長さによらなかったことが理由であると述べている。崩壊は中間支点の負曲げによる下フランジおよびウェブの座屈により生じており、中央支間のき裂が終局耐力に及ぼす影響が比較的小さくなったと考察している。しかし、き裂がある主桁の断面力が減少するために、隣接する主桁の断面力が増加し、き裂がない場合に比べて隣接主桁の塑性化の範囲と程度が大きくなる。また、上フランジにき裂が貫通したケースの解析では、床版が引張を負担するためにき裂の開口が抑えられたが、実際にはコンクリートに引張破壊が生じるために異なる結果となると述べている。使用性に関しては、き裂により 10%程度たわみが増加するが、道路橋示方書の許容たわみは満足する。き裂進展に関しては、偏心载荷がある場合、面外変位が生じモードⅢのき裂開口モードが生じることから進展の可能性があるとして述べている。今後の課題として、床版のコンクリート材料のひび割れやき裂の延性的な進展のモデル化が現実的なモデルではなかったため、それらを踏まえた解析の高精度化が必要であると結んでいる。

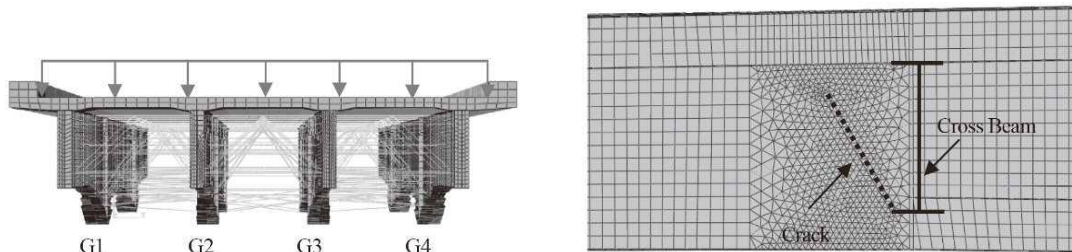


図 3. 1. 3. 16 多主桁橋のモデル化 (文献 3. 1. 3. 14)

文献 3. 1. 3. 10 と 3. 1. 3. 14 では同じ橋梁を解析対象としており、床版と主桁の結合が非線形ばねと剛結という違いがあるが、主桁のモデル化も梁要素とシェル要素と異なっているため、床版と主桁の結合のモデル化の違いを両者の結果から見て取ることは難しい。しかし、文献 3. 1. 3. 14 で述べられているように、き裂進展を考慮していないことと、床版の破壊を考慮していないことから、これらの数値解析結果は実際の耐荷力を過大評価している可能性がある。

文献 3. 1. 3. 15 と 3. 1. 3. 16 では、同じ連続多種桁橋 (5 主桁, 39.0 m + 49.6 m + 53.0 m + 40.6 m) のリダンダンシー

の發揮メカニズムを明らかにすることを目的とし、弾塑性有限変位解析を行っている。

文献 3.1.3.15 では主桁の損傷が進展し局所的に大きな変形をした場合にスラブアンカーの健全性が期待できないこと、および残存耐荷力の下界を把握するために、床版と主桁の合成効果を考慮しない検討を行っている。解析モデルについては、主桁・補剛材・分配横桁をシェル要素、対傾構・下横構は梁要素によりモデル化している。鋼部材は主桁と分配横桁を弾塑性体、それ以外は弾性体としてモデル化している。床版はその死荷重を考慮するが、主桁との合成効果および荷重分配作用を取り除くためにモデル化していない。主桁の横倒れを拘束するために、隣接主桁を橋軸直角水平方向に床版面内剛性程度のばね要素でつないでいる。損傷は全断面欠損とし、最も長い第4径間の外桁において、端支点付近と中間支点付近の2通りのシナリオを想定している(図 3.1.3.17)。全断面欠損としているのも、残存耐荷力の下界を把握するためである。主桁端支点付近の損傷時においても外桁には正曲げの変形が見られたこと、および、隣接中桁の曲げ・支点反力・損傷から近い対傾構の応力が増加したことから、分配横桁・対傾構が代替荷重経路として機能することがわかった。このことから、主桁が支点との連続性を完全に失っても設計荷重レベルでは不安定構造にならないと述べている。一方、たわみに関しては、設計活荷重レベルで損傷時の使用限界とされる支間長の1/100には達しないものの、損傷部先端におけるたわみがモデル内で卓越する。このような変形は路面に段差を生じさせる可能性が高いので、使用性への影響が大きい。支配的な曲げ変形としては、端部損傷時には、隣接する中桁の正曲げ変形が支配的となる一方、中間支部位損傷時は隣接する中桁の中間支点における負曲げ応力が支配的となるが、どちらの場合においても活荷重レベルで降伏応力を超えることはなかった。荷重分配は対傾構・分配横桁によってなされているが、対傾構は圧縮斜材が座屈することにより荷重分配の機能を失う。剛性の高い分配横桁を増やすことで損傷時の荷重分配機能を強化することができ、端部損傷時の損傷部付近のたわみを低減することができるが、中桁の曲げ応力を低減することはできないと結論付けている。

一方、文献 3.1.3.16 では床版と主桁フランジ間のモデル化の違いが評価されるリダンダンシーへおよぼす影響に焦点を当て、床版と上フランジ間に実験を元にしてスラブアンカーの非線形性を考慮した不完全合成モデル、剛結とした完全合成モデル、微小な剛性を考慮した非合成モデルを相互比較して検討を行っている。床版とフランジ間以外のモデル化は文献 3.1.3.15 と基本的に同じだが、対傾構を弾塑性体としてモデル化し、弾性体とした場合との違いについても言及している。また、床版を考慮することから、主桁損傷部付近の床版の局所的な変形が大きく進展することが予想される。しかし、通常の有限要素解析においてそのような進行性破壊現象を精度よく追跡することは一般に困難なので、床版にはあらかじめ欠損とスリットがモデル上設けられている。スラブアンカーの非線形性は、弾性、塑性荷重状態、最大荷重とトリリニアでモデル化しており、外桁端部損傷(図 3.1.3.17)時の各活荷重倍率での状態が示されている(図 3.1.3.18)。このとき、最も大きな曲げが作用する隣接主桁の横桁取付地点において、設計活荷重作用時の曲げ圧縮応力で比較すると、スラブアンカーの非線形性を考慮した場合に比べて、完全合成の場合で30%程度過小評価、非合成の場合で200%程度過大評価となると述べられている。また、損傷部先端のたわみによる路面段差100mmを使用限界とすると、非合成モデルでは活荷重倍率 $f_l = 0.4$ 、不完全合成モデルと完全合成モデルでは $f_l = 1.2$ 、と3倍の違いがある。対傾構を弾性体としてモデル化すると、弾塑性体としてモデル化したときに比べて座屈荷重がほぼ2倍となり、このために段差の使用限界は $f_l = 1.7$ 、と40%程度過大評価する。

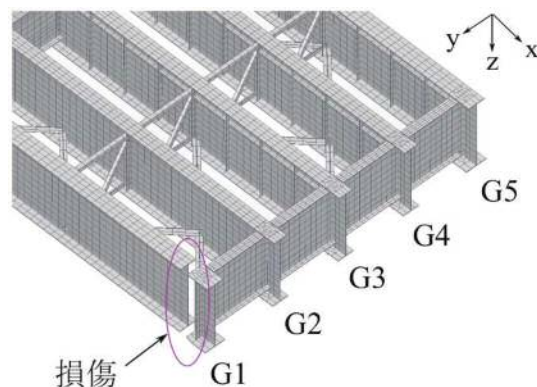


図 3.1.3.17 多主桁橋のモデル化 (文献 3.1.3.15)

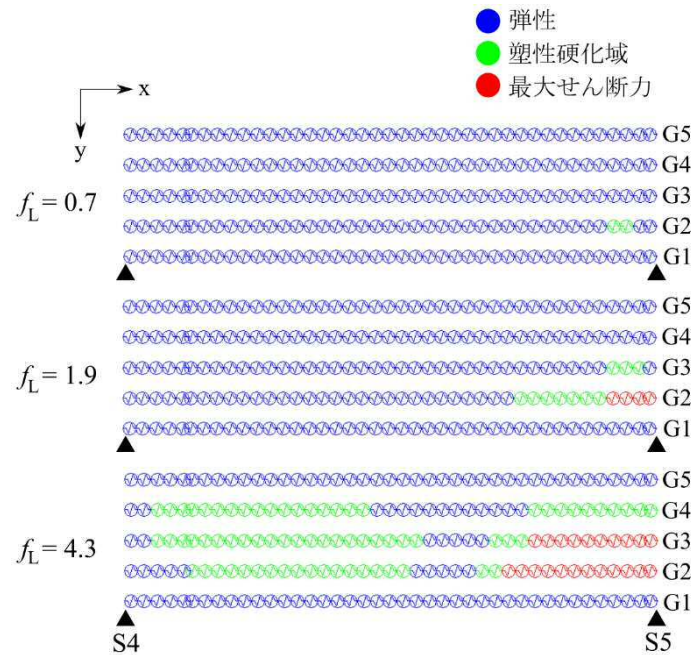


図 3. 1. 3. 18 スラブアンカーの状態 (文献 3. 1. 3. 16)

以上，多主桁橋のリダダンシー解析を行っている 4 編の論文を紹介したが，床版-フランジ間のモデル化は様々である（表 3. 1. 3. 4）．対象としている橋梁と損傷が異なるので単純な比較はできないが，床版-フランジ間を剛結してモデル化している文献 3. 1. 3. 14 ではたわみは許容たわみに達することはないと述べているのに対し，床版の合成効果を無視している文献 3. 1. 3. 15 では損傷部先端においてたわみが卓越すると述べている．文献 3. 1. 3. 16 では文献 3. 1. 3. 15 と同じ橋梁を対象とし，床版の進行性破壊に関しては大胆な仮定を設けているものの，床版-フランジ間のモデル化の違いが解析結果におよぼす影響の一例を示している．これによれば，スラブアンカーの非線形性を考慮した場合でも，たわみは比較的完全合成に近いが，主桁や横桁の曲げ変形はスラブアンカーの降伏により完全合成とかなり異なる結果となる場合もあることを示しており，より実情に即したモデル化によるリダダンシー解析が必要であると考えられる．

表 3.1.3.4 多主桁橋のモデル化と結果の比較

文献 No.	床版-フランジ間のモデル化	有限要素モデル	主な結果
3.1.3.10	非線形ばね (水平および鉛直)	シェル要素 (床版) 梁要素 (主桁・横桁・横構)	<ul style="list-style-type: none"> き裂が下フランジまで貫通すると剛性は 30%程度、耐力は 20%程度低下した。 き裂のある主桁の下フランジ引張力を他の主桁が分担する。 ずれ止めの非線形ばねの影響や状態については言及されていない。
3.1.3.14	剛結	ソリッド要素 (床版) シェル要素 (主桁・補剛材) 梁要素 (横桁・対傾構・横構)	<ul style="list-style-type: none"> 大きな引張応力が作用する位置にき裂がある場合は、そのき裂が橋梁全体系および桁の耐荷性能に影響を及ぼす。 き裂が生じた桁で支点反力が減少した場合、隣の桁や床版に応力が流れ、荷重を負担する。 き裂が生じても許容たわみは満足する。 ずれ止めを剛体とした影響については述べられていない。
3.1.3.15	床版は自重のみ考慮	シェル要素 (主桁・補剛材・横桁) 梁要素 (対傾構・下横構)	<ul style="list-style-type: none"> 主桁損傷時は、分配横桁・対傾構が代替荷重経路として機能する。 外桁の端部損傷時、損傷部先端におけるたわみがモデル内で卓越する。 主桁端部損傷時には、損傷した主桁に隣接する主桁の正曲げ変形が支配的となる。一方、中間支点部損傷時は、隣接する主桁の中間支点における負曲げ応力が支配的となる。
3.1.3.16	a) 剛結 b) 非線形ばね c) 微小剛性ばね	シェル要素 (主桁・補剛材・横桁) 梁要素 (対傾構・下横構)	<ul style="list-style-type: none"> 主桁損傷時はスラブアンカーが降伏する。 主桁上部に生じる圧縮応力は、完全合成を仮定した場合は最大で 60%程度の過小評価となる。 損傷部付近のたわみを使用限界とすると、スラブアンカーの非線形挙動を考慮した場合は設計荷重の 1.2 倍程度となる。

2) トラス橋 (文献 3.1.3.9, 3.1.3.11)

文献 3.1.3.9 と 3.1.3.11 ではトラス橋のリダダンシー解析手法の提案を行っている。

文献 3.1.3.9 では、リダダンシーの評価手法を検討することを第一の目的とし、鋼トラス橋において最も危険な損傷シナリオについても検討している。リダダンシー解析手法として、広く利用できることを重要視し、簡便な線形解析を基本とし、線形解析の妥当性を非線形解析と比較して検証している。

解析対象は単純下路トラス橋 (木曾川大橋) および 3 径間連続上路トラス橋としている。解析モデルは、主構・横構・縦桁・横桁を梁要素、床版をシェル要素としている。床組と床版は、非合成として設計されているが、スラブアンカーによる合成効果を、実験に基づいて決定された剛性を有する線形ばねにより結合している。ただし、床版硬化前の死荷重については床版の合成効果が期待できないため、鋼重と床版自重については床版以外の部材だけで受け持つモデルとしている。トラス格点については、斜材の結合条件をピン結合と剛結の 2 通りで検討している (図 3.1.3.19)。

単純下路トラスについては、下弦材を破断想定部材とした場合、その軸力を床版と床組が負担するために、他の破断想定部材の場合に対して終局に至る部材は少なかった。このことから、床版が構造全体のリダダンシーに大きく寄与していると述べている。また、格点部のみを取り出した非線形解析を行った結果、格点部がクリティカルとなることはなく、構造全体の崩壊につながるような損傷は生じなかったことから、今回の線形解析によるリダダンシー評価は有効であると報告している。しかし、部材破断時は健全時に比べてトラス部材に作用する曲げモーメントが大きくなるので、格点部のモデル化の影響が大きく、今後検討の余地があると述べている。

一方、上路連続トラスでは、上弦材が破断した場合、非合成設計であっても破断した部材の内力は床組が負担することから、他の部材が破断する場合よりも安全な結果となった。これは下路トラスの下弦材破断時と同じであるが、線形解析ではスラブ止めや床版が際限なく荷重を負担してしまうので、リダンダンシーを過大評価する可能性があるとして述べている。そこで、床版をソリッド要素でモデル化し、コンクリートの引張強度後は鉄筋のみで抵抗するモデルとし、スラブアンカーも区分直線の非線形ばねでモデル化し非線形解析を行い、線形解析の妥当性を検証している。非線形解析では線形解析に比べて上弦材に1.5倍の曲げモーメントが見られたが、たわみでは最大7%程度の差であり、床版コンクリートは引張強度に達したものの鉄筋は降伏には至らなかった。以上から、線形解析は妥当であるといえるが、床版はリダンダンシーに大きな影響を与えることから、今後さらに検討の必要があるとも述べている。

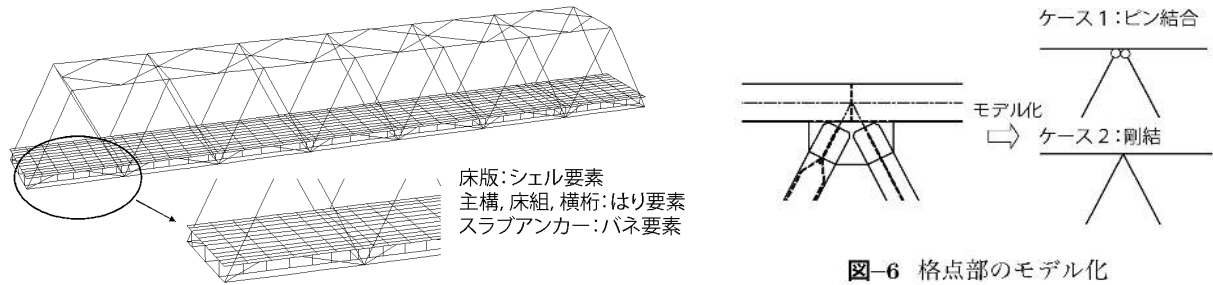


図 3. 1. 3. 19 下路トラス橋のモデル化 (文献 3. 1. 3. 9)

文献 3. 1. 3. 11 では、部材の破壊による部材力の再分配および進行性破壊を考慮したリダンダンシー評価手法を提案することを目的としている。

提案手法の検討に用いた対象橋梁は昭和 57 年に建設された 3 径間連続上路トラス橋である。解析モデルは、トラス部材は梁 (ファイバー) 要素, RC 床版はひび割れを考慮した積層シェル要素としている。部材間の接合は剛結とし、上弦材と床版を接合するスラブアンカーは実験結果に基づくトリリニア非線形ばねとしている (図 3. 1. 3. 20)。解析に当たっては、キャンバーと床版打設を考慮している。

終局強度解析として、荷重倍率 α に対し $\alpha(D+L)$ を載荷し、荷重倍率を漸増させたところ、 $\alpha=2.6$ で中間支点付近の斜材が破壊した。この部材を削除して動的解析を続けたところ、上弦材、下弦材の順に破壊し、橋梁全体が崩壊する結果となった。このとき、床版コンクリートには引張強度に達した領域があったが、鉄筋は降伏していなかったが、スラブアンカーは大部分が塑性化し、部分的には破断 (許容変位超過) していたと報告している。

リダンダンシー解析は、破断想定部材を選び、荷重倍率 α に対し $\alpha(D+L)$ を載荷したのち、破断想定部材を削除し動的解析を行い、連鎖的な破壊が進行するかを確認する。荷重倍率を漸増させながらこの過程を繰り返し、連鎖的な破壊が進行しない限界の荷重倍率 α を余裕度としている。終局強度解析の際に最初に破壊した斜材と隣接する垂直材・下弦材を破断想定部材としてリダンダンシー解析をした結果、垂直材が最もリダンダンシーが低いという結果となった。このときのスラブアンカーの状態については述べられていない。

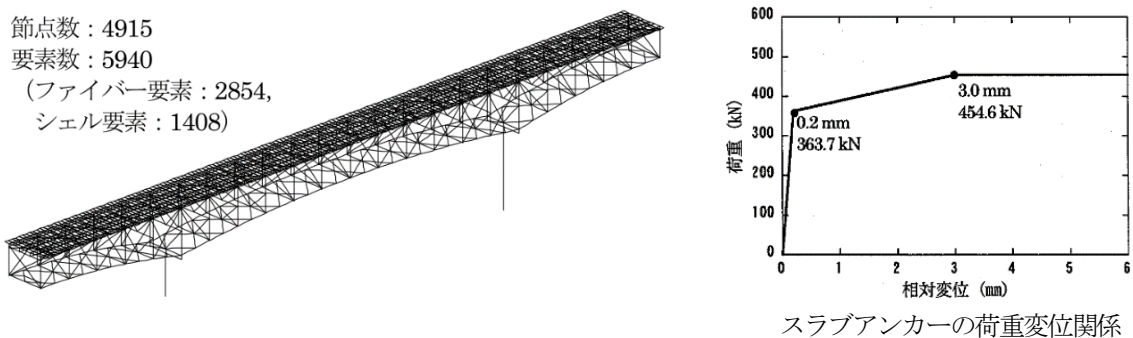


図 3. 1. 3. 20 上路トラス橋のモデル化 (文献 3. 1. 3. 11)

3.1.4 鋼コンクリート界面の付着

RC床版を有する非合成鋼桁橋では合成効果の為のスタッド等は設けられないが、圧縮フランジの座屈に対する配慮や、交通事故などの衝撃や地震等の水平力への対応からスラブ止めの設置が規定されている。合成効果は設計上無視されているが、これら事実上のずれ止めの合成効果への寄与や力学特性は、要素試験やFEM解析などにより今後明らかにされてゆくと考えられる。

ここでRC床版が鋼桁上で打設される場合を考えると、コンクリートが硬化することによって主桁上フランジと面的な結合が生じる。この結合をここでは付着と表現するが、この付着もまた設計上無視されている。加えて合成桁に用いるスタッド等を対象にした要素試験では、スタッド設置面にグリスを塗布するなどして排除されており、近年まで注目されていなかった。しかし前述の様に非合成桁橋梁が合成桁として挙動している事例が挙げられており、解析上の仮定と実橋梁の挙動との違いにこの付着の効果を挙げているものが見られた。付着の寄与が無視できないのであれば、非合成桁に限らず鋼構造のインターフェースストラクチャをFEM解析するにあたり、その力学的特性の把握とモデル化は重要になると思われる。ここでは表3.1.4.1に示す文献について述べる。

鋼コンクリート間に生じる付着は、コンクリート中の鉄筋を部材中で一体とする結合力としては古くから注目されており、試験方法も標準化されている。しかしここで得られる付着応力は異型鉄筋の形状や直径などの影響を受け、構造全体をモデル化したマクロスケール解析の特性値として用いることは望ましくない。面的な付着の力学的特性については文献3.1.3.4でも扱っているが、押抜き試験で求めたものは供試体形状の影響がありこちらも望ましくない。

表 3.1.4.1 収集した文献一覧

文献No.	分類	論文名	著者	年	出典名
3.1.4.1	付着	鋼コンクリート界面の付着強度評価法に関する一提案	斉木 功 他	2010	応用力学 論文集
3.1.4.2	付着	鋼コンクリート界面の付着強度評価のためのトルク型せん断試験に関する基礎的検討	山田真幸 他	2013	構造工学 論文集
3.1.4.3	付着	既設非合成桁橋梁のRC床版と主桁上フランジ間で生じるせん断応力と実耐荷力評価	山田真幸 他	2002	構造工学 論文集

文献3.1.4.1は、鋼コンクリート複合構造中の異種材料界面に生じる付着力および摩擦力の強度を評価することを目的としたもので、均一なせん断応力を発生させる目的で円筒状の鋼コンクリート界面に載荷することを特徴とする。図3.1.4.1~3.1.4.2にここで用いられた供試体と試験装置を示す。

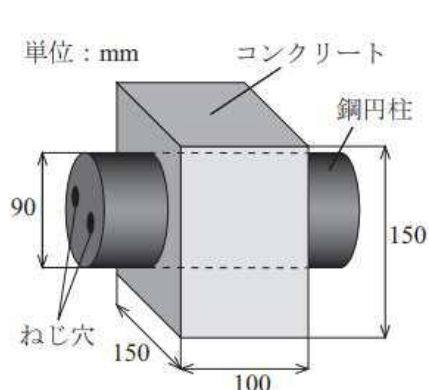


図 3.1.4.1 ねじりせん断試験体

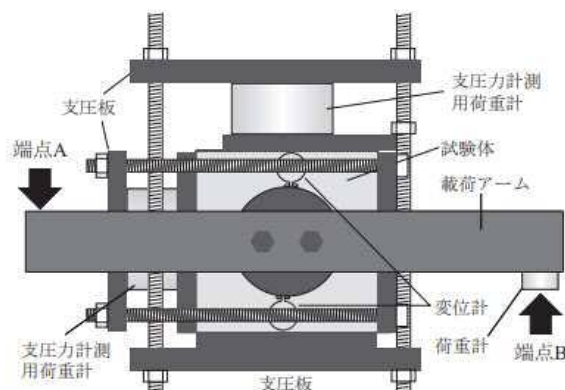


図 3.1.4.2 ねじりせん断試験

供試体は円筒状の鋼モルタル界面を有し、この円筒の円周方向に加力して応力集中を生じる面端部の影響を避けるものである。ここではせん断応力と界面のずれ変位との関係を、鋼モルタル界面の支圧力などを変えて試験を行い、付着破壊が生じる荷重や、付着破壊後の摩擦によるせん断応力の伝達の程度などを比較している。著者らはこの中で有限要

素解析により供試体中のせん断応力分布を求めている。平面応力を仮定した弾性解析としているが、鋼モルタル界面がほとんどずれることなく破壊していることから妥当なモデル化と思われる。図 3.1.4.3 に有限要素モデルと計算結果を示す。

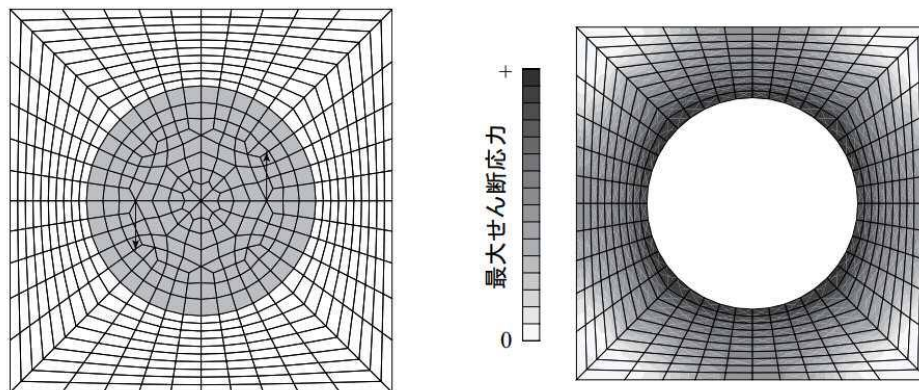


図 3.1.4.3 ねじりせん断試験体の有限要素モデルと試験体の最大せん断応力分布

文献 3.1.4.2 は付着の力学特性を得る試験方法の開発を目的としたもので、文献 3.1.4.1 のねじりせん断試験機の载荷制御について複数の方式により試験結果を比較している。ここで用いられた試験装置を図 3.1.4.4～3.1.4.5 に示す。



図 3.1.4.4 片押しトルク型せん断試験装置

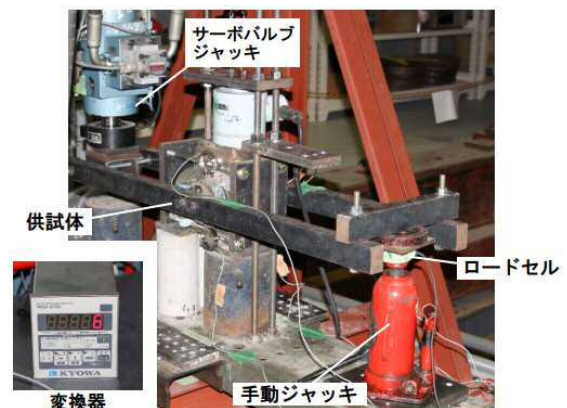
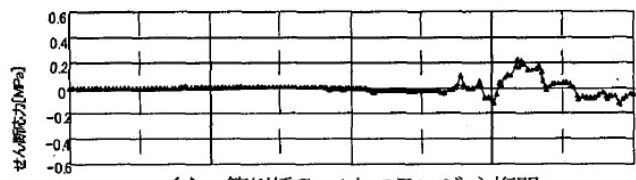


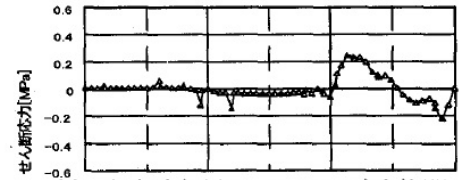
図 3.1.4.5 両押しトルク型せん断試験装置

図 3.1.4.4 ではカウンターウエイトにより一定であったトルクアームの一方に、図 3.1.4.5 ではセンサーにより制御される油圧アクチュエータを用いることでトルクアームの両端に偶力を与えて試験を実施している。これにより文献 3.1.4.1 では不可避に生じていた試験中の支圧力の変化と供試体位置による支圧力の差異を排除し、トルク型せん断試験として提案している。結論については試験方法の開発に関するものは割愛するが、鋼コンクリート間の面的な付着強度は従来考えられていた値より大きい可能性があるとしている。またせん断応力-ずれ変位曲線も得ているが、付着破壊までに観察される鋼モルタル界面のずれは寡少であると報告している。

文献 3.1.4.3 は、上述の要素試験などの結果と比較する目的で、実際に非合成桁橋の主桁上フランジに生じる平均的なせん断応力の推定を試みている。有限要素モデルは文献 3.1.3.3 で扱った合成桁モデルとし、同様に文献 3.1.3.4 で扱った二橋の非合成桁橋を対象に実施した設計荷重レベルの载荷実験をモデル化して線形解析を行っている。モデルについては文献 3.1.3.4 と同様につき割愛する。ここで得られたせん断応力の例を図 3.1.4.6 に示す。



(a) 帯川橋Ga-4上フランジ主桁間
平均せん断応力 (载荷パターン1)



(b) 坂部高架橋Gb-4フランジ主桁間
平均せん断応力 (载荷パターン6)

図 3. 1. 4. 6 フランジ主桁間せん断応力

ここでは上記のせん断応力を着目面以下の主桁の応力分布から数値積分で求めて推定している。計算機の能力が飛躍的に向上した現在であれば、ここで挙げた種々の数値モデルや研究成果を盛り込んだ要素から直接値を得ることが一般的と思われるが、当時の計算機環境下における便宜的ではあるが参考になる事例と思われる。

3.2 高力ボルト継手部

高力ボルト継手部においては、母板、連結板、高力ボルト、座金といった構成要素のインターフェースに機械的接触による相互作用が発生する。この相互作用は接触力と摩擦力に分けられ、ともに、高力ボルト継手を有する鋼構造物の耐力や、継手のすべり挙動等を評価するにあたって重要となる。高力ボルト継手を FEM 解析においてモデル化するには、この相互作用をマスター-スレイブ法を用いたりばね要素や剛体要素などを用いたりすることで再現することが多い。そこで本節では、マスター-スレイブ法ならびにばね要素や剛体要素等を用いた相互作用のモデル化から説明する。その際、商用解析ソフトウェア Abaqus 6.14-6 を使用して独自に得たいくつかの解析結果に基づいて、マスター-スレイブ法におけるモデル化手法の違いの影響を具体的に比較検討する。つづいて、高力ボルト継手部の FEM モデル化手法を過去の事例に基づいて紹介する。

3.2.1 マスター-スレイブ法とその適用方法

マスター-スレイブ法（例えば、文献 3.2.44）は、接触することが予想される 2 表面（以下、接触対と呼ぶ）をマスター面とスレイブ面として定義し、その間において貫入を防ぐための拘束条件（以下、非貫入条件と呼ぶ）を課し、接触力を含むつり合い計算を行う手法である。摩擦特性を組み込むことでさまざまな摩擦力の考慮も可能である（文献 3.2.55）。

3.2.2 節で述べるばね要素や剛体要素等を用いる場合よりも計算負荷は大きいもののその汎用性の高さから多くの商用構造解析ソフトウェアに実装されており、3.2.3 節で述べるとおり高力ボルト継手の固着～主すべり発生～支圧までの挙動や、ねじ部の応力伝達機構などの研究でも近年多く用いられている。

マスター-スレイブ法の基本的な演算は、(1) 各接触対における接触部の探索、(2) 接触部における接触対の貫入量に基づく接触拘束の計算、(3) 接触による変形、応力、ひずみの計算の順になされるが、商用構造解析ソフトウェアにおいてユーザーが行うインターフェースのモデル化は、マスター面とスレイブ面の割り当てと接触拘束の計算に関する設定が主と考えられる。そこで本節では、商用構造解析ソフトウェアが広く普及している現状を鑑み、ソフトウェアにおいてユーザーがマスター-スレイブ法を適用するにあたって重要となる事柄について基本的な考え方を述べる。

・接触対の設定（マスター面とスレイブ面の割り当て）

図 3.2.1 に示すとおり、後述する接触拘束の計算において、非貫入条件はスレイブ面のマスター面に対する貫入に対しては適用されるが、マスター面のスレイブ面に対する貫入に対しては適用されない。したがって、接触対を構成する 2 表面の形状と剛性が異なる場合には、適切にマスター面とスレイブ面の割り当てを決定する必要がある。例えば、小さい面と大きい面が接触する場合は大きい面をマスター面に、大きさが同等であれば剛性の高い面をマスター面に、剛性も同程度であれば要素分割の粗い方をマスター面とすることが推奨されている（文献 3.2.39）。

高力ボルト継手部で接触対を設定することが考えられるインターフェースは、ボルト頭と座金間、座金と連結板間、ボルト軸部と連結板間、連結板と母板間、ボルト軸部と母板間などである。その際、高力ボルトや座金、ナットのほうが母板や連結板より降伏点が高いため、十分に細かい要素分割により表面形状を滑らかに再現した上で、ボルト頭やボルト軸部、座金、ナットを優先してマスター面に選ぶのがよいと考えられる。

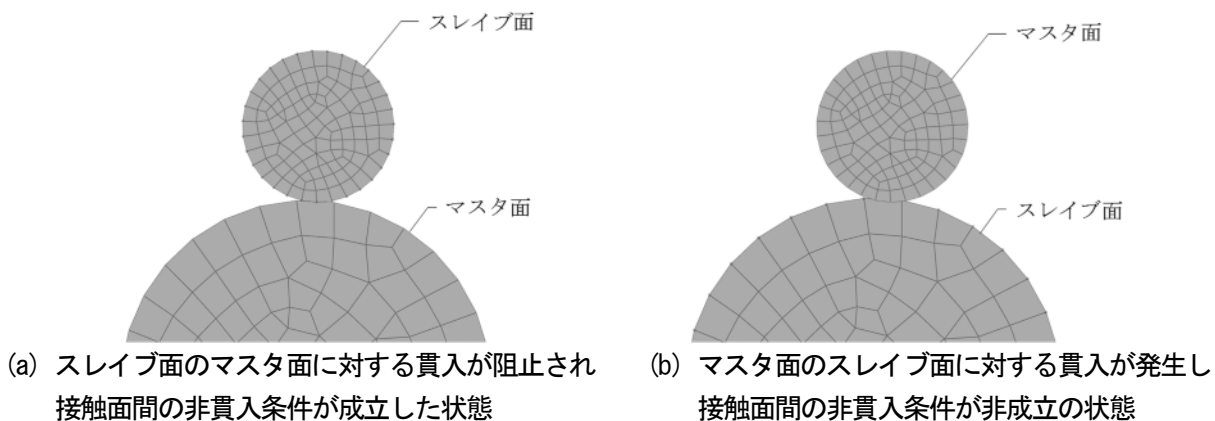


図 3.2.1 マスター面とスレイブ面の関係性

・接触対のモデル選択 (Node to Surface または Surface to Surface の選択)

接触対とした表面の形状離散化においては、Node to Surface (例えば、文献 3.2.40) と呼ばれる方法が用いられることが多い。Node to Surface では、スレイブ面を有限要素の節点群によって、マスタ面を有限要素の面群によって代表させる。後述する接触拘束の計算はマスタ側の要素面に対するスレイブ側の節点 (以下、スレイブ節点) の貫入量に基づいてなされるため、要素分割が不十分な場合にはスレイブ節点の位置に接触圧が過剰に集中する傾向がある。Node to Surface に対して Surface to Surface と呼ばれる方法も存在する。Surface to Surface では、マスタ側の要素面に接触したスレイブ節点のみならずその近傍の有限領域に平均化して接触圧計算を行うため、スレイブ節点の位置における接触圧の過剰な集中が改善され、Node to Surface よりも正確な接触圧分布が得られるとされている (文献 3.2.39)。

ここで、継手の支圧状態を模擬した解析の結果に基づいて接触対の離散化の影響を比較することとする。図 3.2.2 に示す FEM モデルは F10T (M22×90) のボルトおよびボルト孔周辺を再現した 1/4 モデルであり、各部には弾塑性の材料特性が与えられている。ボルトは軸部のみ再現しており軸部をマスタ面を選んだ。ボルトの張力、各面の摩擦力は無視している。母板 (SM490Y, 板厚 20mm) と連結板 (同, 板厚 12mm) には強制変位を与えボルトとの接触により塑性変形が生じる過程を静的解析により再現した。比較対象として、ボルトとボルト孔の半円周の要素分割を、24 分割、12 分割、6 分割の 3 パターンとした。いずれのパターンも Node to Surface を採用したモデルを用意した。6 分割のパターンについては Surface to Surface のモデルも比較のため用意した。

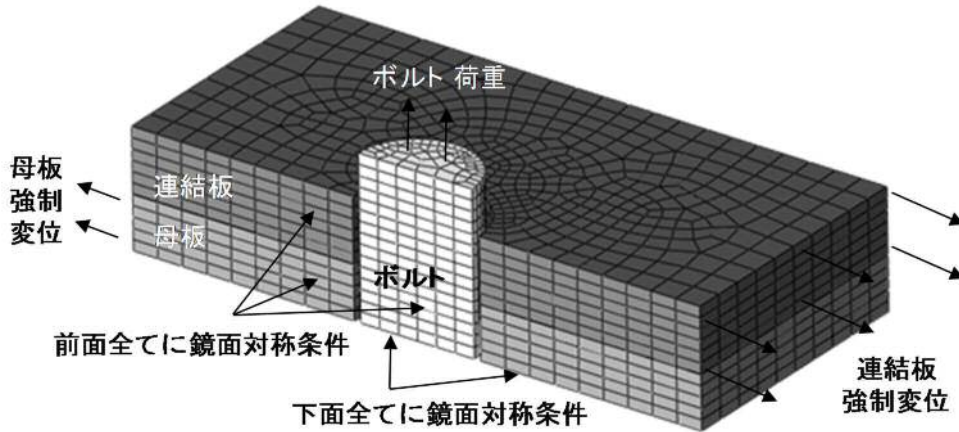
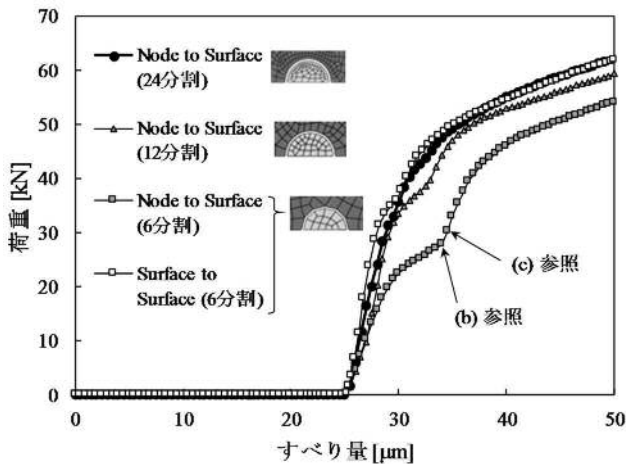
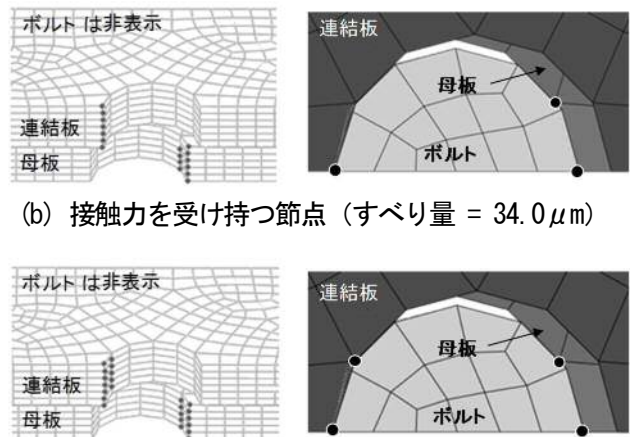


図 3.2.2 ボルト継手の支圧状態解析モデル



(a) 各モデルの解析結果



(c) 接触圧を受け持つ節点 (すべり量 = 34.5 μm)

図 3.2.3 ボルト継手の支圧状態解析における接触対の離散化の影響

解析結果を図 3.2.3 に示す。荷重-すべり量関係からは、ボルト軸部の荷重伝達による荷重の上昇の様子がモデルによって異なり、Node to Surface 同士で比較すると、6 分割の場合は 24 分割の場合と曲線の経路が特に大きく異なることが分かる。これは 6 分割の解析結果において接触圧を受け持つ節点数の影響が顕著なためである (図 3.2.3 (b), (c))。接触部の要素分割数が少ないほどすべり量の増加に伴う荷重上昇が遅れる傾向が見受けられる。一方、同じ 6 分割の要素分割でも Surface to Surface のモデルの結果は 24 分割の結果とかなり近い荷重-すべり量関係を示している。これは Surface to Surface では上述のとおりスレイブ節点の位置における接触圧の過剰な集中が改善された結果であり、Surface to Surface の有用性を示していると言える。

・接触拘束の計算方法 (ラグランジェ乗数法, ペナルティ法または拡張ラグランジェ乗数法の選択)

スレイブ節点をマスタ側の要素面に投影した点をアンカ点と呼ぶ。貫入量は、このアンカ点とスレイブ節点の距離に位置関係に応じた符号を付加して定義される。すなわち、接触対の接触前は負の符号を、接触対が貫入した状態においては正の符号を与える (図 3.2.4)。スレイブ節点の貫入量が正であると計算されると、そのスレイブ節点において接触対は接触していると判定され接触拘束の計算が行われる。接触拘束の計算方法としては、ラグランジェ乗数法、ペナルティ法、拡張ラグランジェ乗数法がよく用いられる (文献 3.2.43)。

ラグランジェ乗数法では、仮想の自由度を追加することで非貫入条件が厳密に満たされる。ただし、過剰拘束の発生により収束解が得られにくくなることがある。

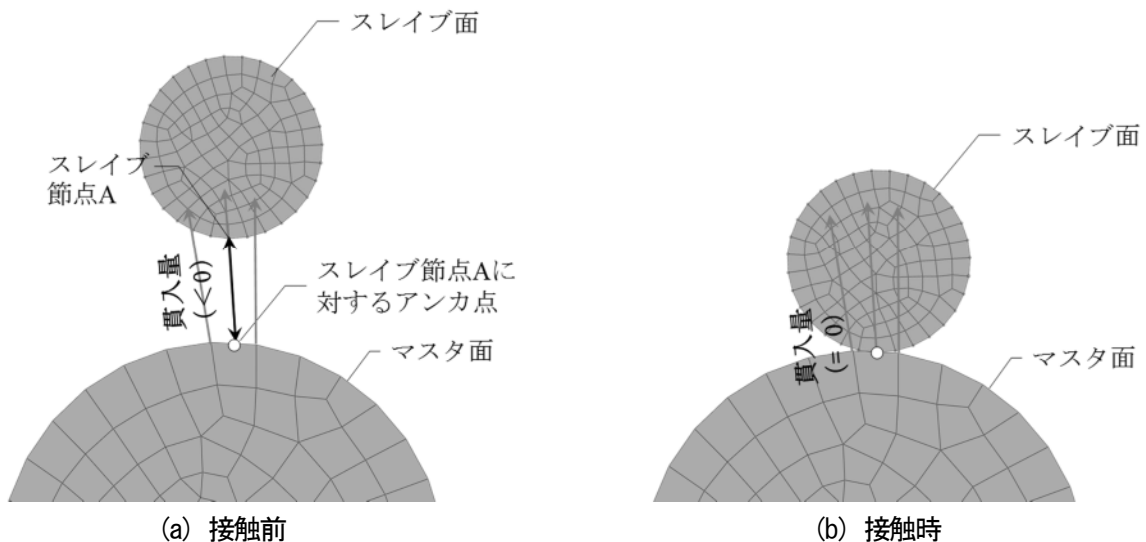


図 3.2.4 マスタ-スレイブ法における貫入量の定義

ペナルティ法は、有限な接触剛性 (ペナルティ剛性とも呼ばれる) により非貫入条件を近似的に満足させることで過剰拘束の問題を回避することができる (文献 3.2.55)。接触剛性が一定の場合は線形ペナルティ法と呼ばれ、貫入量が正の領域で接触圧-貫入量関係は図 3.2.5 に示すように線形となる。接触剛性が一定でない場合は、接触圧-貫入量関係は非線形となり非線形ペナルティ法と呼ばれる。線形ペナルティ法においては接触剛性を要素の代表的な剛性の 10 倍に、非線形ペナルティ法においては初期接触剛性を要素の代表的な剛性と同値、最終接触剛性を要素の代表的な剛性の 100 倍に設定することが多いようである (文献 3.2.39)。

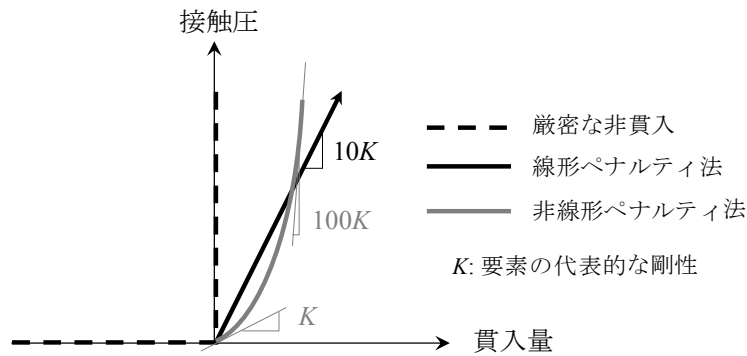


図 3.2.5 ペナルティ法における接触圧-貫入量関係

拡張ラグランジュ乗数法では、まずペナルティ法を適用しつり合い状態の収束解を得る。続いて、得られた収束解において、スレイブ節点の貫入量が許容値を超過していた場合に、接触圧をより大きな値に更新してつり合い状態を解き直し、再度スレイブ節点の貫入量を評価する。この手続きを貫入量が許容値以下となるまで繰り返すことで、貫入量を小さく保ちながら過剰拘束の問題を回避することができる。拡張ラグランジュ乗数法においては、接触剛性を要素の代表的な剛性の1000倍に、貫入量の許容値を界面の特徴長さ（要素1辺の長さなど）の0.1%とすることが多いようである（文献3.2.39）。

・摩擦特性（クーロン則）

接触対に摩擦特性を付与しておくことで、摩擦挙動の再現が可能となる。摩擦特性が設定されていると、接触判定が下された接触対では、接触拘束の計算の結果得られる接触圧に基づいて摩擦せん断応力が算定される。最もよく用いられるクーロン則では、接触部がすべり始める許容摩擦せん断応力を静止摩擦係数と接触圧の積によって定め、すべろうとする向きへの摩擦せん断応力がこの許容摩擦せん断応力に達するまですべりを許容しない固着状態とする（ただし、ペナルティ法や拡張ラグランジュ乗数法では固着状態でも微小な弾性すべりが許容される）。等方性クーロン則ではすべての方向についてすべり係数は同じであると仮定される。ひとたび摩擦せん断応力が許容摩擦せん断応力を超えすべり始めると動摩擦状態に移行する。この動摩擦状態を再現するため、すべり速度依存の摩擦係数が用いられることがある（文献3.2.47）。

高力ボルト継手部においては、静止摩擦係数を0.5などとして等方性クーロン則が採用されることが多い。すべり耐力試験等により主すべり発生時の荷重や変位等が既知の場合は、モデルの再現性を高める目的からそれらを参照して静止摩擦係数を調整することがよく行われる。ボルト軸力が未知の場合には、すべり耐力試験等で得たすべり係数を静止摩擦係数調整時の初期値として用いる場合が多い。すべり速度依存の摩擦係数を用いることで主すべり発生後から支圧状態に移行するまでの間の挙動を精度よく再現することが可能と考えられるが、収束解が得られにくいという問題から、すべり耐力や終局耐力（支圧状態）の評価においてはすべり速度非依存の摩擦係数（動摩擦状態においても静止摩擦係数と同値）も用いられている。

ここで、摩擦特性を使用した解析の一例として、等方性クーロン則を用いたすべり耐力試験の再現解析結果を示す。モデルは高力ボルト継手の標準試験片の1/8を再現しており（図3.2.6）、長手方向に強制変位を付与する静的弾塑性解析を行った。図3.2.7はその解析結果であり、すべり量としてすべり側の内側第1ボルト位置の相対変位を示している。解析は不変の摩擦係数を用いているため、主すべり時の荷重低下が再現されていない点に注意されたい。同図では母板と連結板の要素長に関して、表層の要素を板厚方向に0.25mmで分割した場合と2mmで分割した場合、またボルト孔周辺の要素をボルト半径方向に0.5mmで分割した場合と2mmで分割した場合の荷重-すべり量関係を比較している。解析結果は、検討した範囲において要素分割の影響は小さいことを示している。

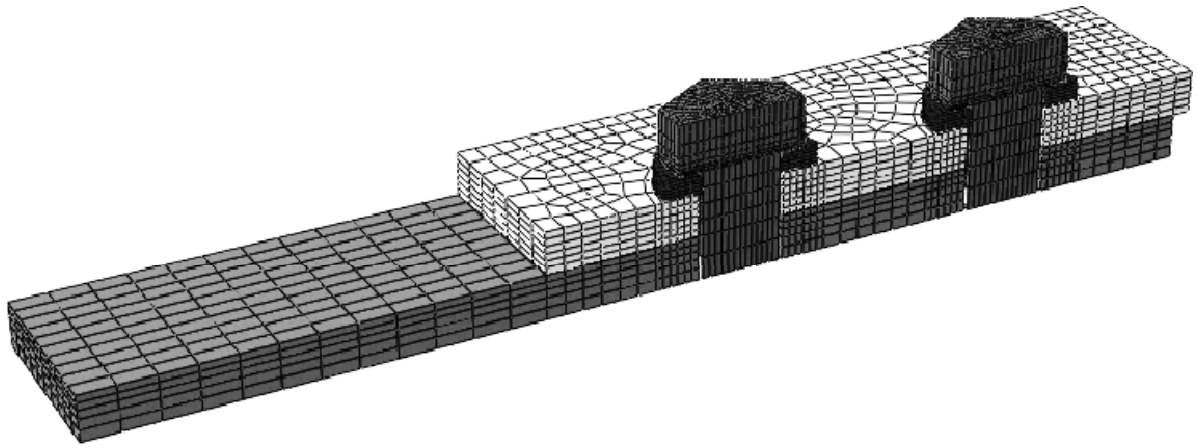


図 3.2.6 標準試験片を対象としたすべり耐力試験の再現解析モデル

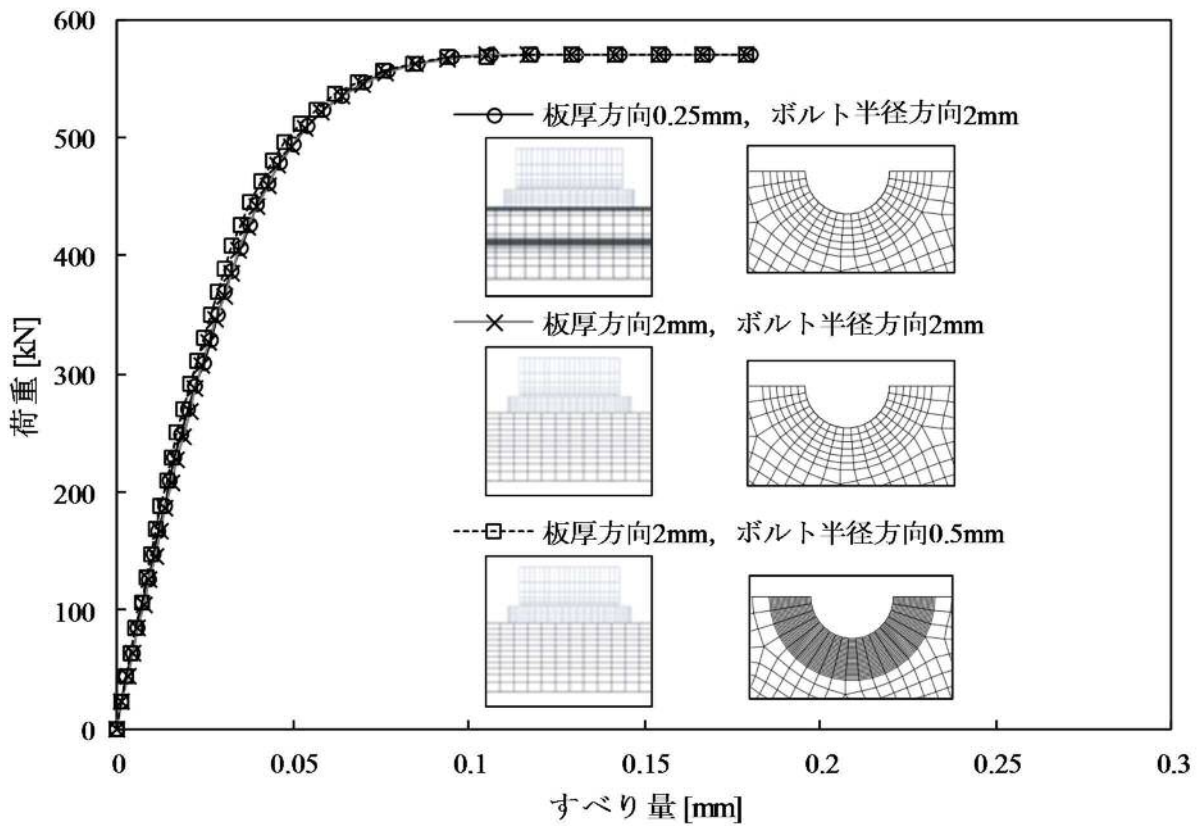


図 3.2.7 標準試験片を対象としたすべり耐力試験の再現解析結果

・接触の追跡方法（微小すべりと有限すべり）

追跡方法の選択は、接触面の相互作用に大きく影響を及ぼす。微小すべりと有限すべりのいずれかを選択する機会が多い。微小すべりによる定式化では、すべり後もスレイブ節点の位置として基準配置の座標が参照されるため、すべり量が十分小さい場合に適用が制限されるが、計算時間の面では有利である。有限すべりではすべり後のスレイブ節点の位置として現配置の座標が参照される。

高力ボルト継手部のモデル化においては、主すべり発生後の挙動に着目する場合には有限すべりを採用することが望ましいと考えられる。

・有限要素の種類（選択低減積分要素、高次要素、非適合要素の選択）

マスター-スレイブ法が適用される高力ボルト継手部のFEMモデルでは3次元ソリッド要素が使用されていることが多い。これは、マスター-スレイブ法が複雑な表面形状や弾塑性挙動下における接触挙動を考慮する解析に用いられることが多く、そういった解析においてはFEMモデルも詳細な形状を再現したものであることが求められるためと考えられる。

3次元ソリッド要素としては、せん断ロッキングや体積ロッキングといった要素が過大な剛性を示す挙動を回避できる8節点選択低減積分要素が用いられることが多い。しかしながら、ボルト頭や座金といった顕著なせん断応力を伴う部位などでは、アワーグラスモード（要素が砂時計のような形に変形する不自然な変形モード）が発現する場合がある。そこで、放物線上の要素変形を再現することが可能な20節点低減積分要素や完全積分を用いる非適合要素に置き換えることが考えられる。図3.2.8は、ある試験体に挿入したF10T（M22×90）のボルトに205kNの設計軸力を導入した際の変形状態を示した断面図である。図3.2.8(a)は、すべての領域に対して8節点選択低減積分要素を用いたモデルの結果で、図3.2.8(b)はボルトと座金に20節点低減積分要素を用いたモデルの静的弾塑性解析の結果である。前者のモデルの結果でボルト頭と座金に示されているアワーグラスモードが、後者のモデルの結果では大幅に解消していることが分かる。要素が十分細分化されていれば8節点選択低減積分要素でもアワーグラスモードを抑制することは可能であるが、アワーグラスモードが顕著となると局所的な応力分布等の解析精度が低下するため注意が必要である。

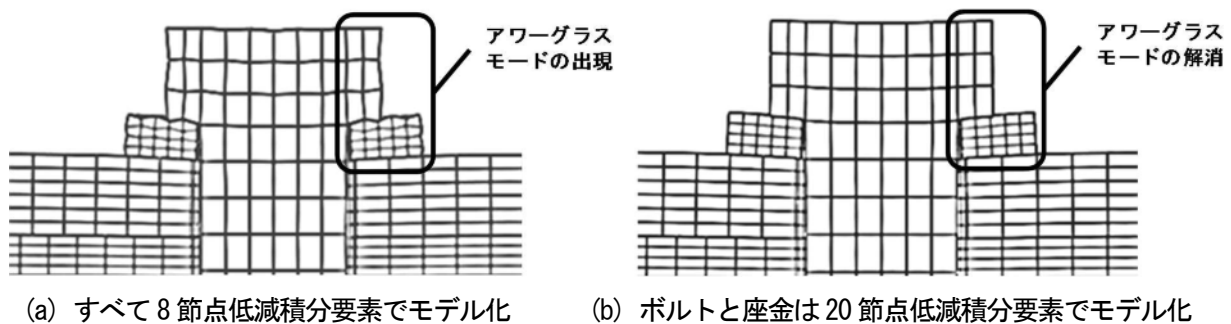


図3.2.8 設計軸力導入時のボルト頭付近の変形（変形倍率を20倍にして表示）

・ボルト軸力の設定（温度収縮法、強制変位法、締結力法の選択）

高力ボルトにおける軸力の再現方法としては、温度収縮法、強制変位法、締結力法などが用いられている。温度収縮法は、ボルト軸力を解析上の軸部の温度収縮によって疑似的に再現する手法である。強制変位法は、ボルト軸部の断面に強制変位を付与する手法であり、対称性によりボルト長さの半分をモデル化する場合に多く用いられている。締結力法は、軸力をボルト軸部の断面に節点荷重として付与する方法で、解析中、ボルト軸力を一定とする方法と、初期軸力を設定した断面の移動量を一定とする方法の2種類がある（文献3.2.39）。

高力ボルト継手モデルに関してはボルト軸力の設定方法が解析結果に及ぼす影響が検討され、締結力法の汎用性が最も高いことが示されており、ボルト長さの半分がモデル化されている場合には強制変位法も締結力法と同等の精度となることが確認されている（文献3.2.18）。

3.2.2 ばね要素・剛体要素・ばね剛体複合要素

ばね要素や剛体要素といった節点間を結ぶ特殊要素を用いて、高力ボルト継手部内のインターフェースに発生する接触力や摩擦力を考慮することができる。マスター-スレイブ法(文献3.2.41)が提案されるまでの間、FEM解析において接触力や摩擦力を考慮するにはこれらの要素を使用することが主流であった。これらの要素は、(1)ばねや剛体といった構造解析において最も基本的な概念を具現化するものであり機構が理解しやすい、(2)基本的にはつり合い式において要素剛性を剛性マトリクスに加えるか自由度を減らすだけの演算であるため計算負荷が小さい、(3)ソリッド要素等の連続体要素のみならず、シェル要素やはり要素などの構造要素からなるモデルに対しても使用しやすいなどの理由から、鋼構造物の実務設計においてFEM解析で高力ボルト継手部をモデル化する際に用いられることが多い。本節では、ばね要素、剛体要素、ばね剛体複合要素について概説する。

・ばね要素

ばね要素は、節点力の伝達方向や線形・非線形の別などによって複数の種類がある。いずれのばね要素も節点間に有限な剛性を付与するものである。

ボルト継手部のモデル化においては、線形ばねによってボルトの軸力を再現したり、節点間の相対変位に応じて剛性が変化する非線形ばねによって固着状態から支圧状態までの間のせん断力の伝達を再現したりする。

支圧接合継手を非線形ばね要素としてモデル化し、橋梁全体系の解析に用いている事例として、文献3.2.26の研究では、鉄道での採用実績が多いボルト方式桁連結工(摩擦接合)の初期剛性、降伏耐力、降伏後の剛性を考慮した簡易式により算出し、桁連結部を取り出したFEM解析結果と比較した上でその妥当性を確認している。また、妥当性を確認した桁連結工の非線形ばねを全体系の動的解析モデルに挿入し、耐震設計の合理化に用いている。

また、支圧接合継手を非線形ばね要素としてモデル化している事例として、文献3.2.12の研究では、当て板補強部の母材と補強部材の間に初期剛性(摩擦接合状態)、すべり強度以降の剛性(支圧状態)、ボルト降伏後の剛性を考慮した非線形ばね要素を挿入している。なお、初期剛性は別途実施した実験結果の平均値、すべり強度以降の剛性はボルトのせん断剛性、ボルト降伏後の剛性はボルトのせん断破壊強度と仮定した終局ずれ量を結んだ勾配としている。

・剛体要素

剛体要素では、節点間の相対変位が常に一定に保たれ、節点間は剛性が無限大の剛体のように振る舞う。一般要素に十分大きな剛性を付与することで剛体に近い性質(疑似剛体)を実現する方法もあるが、計算精度の低下やクーラン条件を満たすための時間増分の縮小(陽解法の解析の場合)に留意する必要がある。商用構造解析ソフトウェアにおいては、剛体要素を配置する代わりに、拘束条件を節点間に直接付与する場合も多い。

ボルト継手部のモデル化においては、接触状態や支圧状態の再現に用いられることがある。

・ばね剛体複合要素

自由度や相対変位などの条件に応じて、剛性や拘束条件が異なる、ばね要素と剛体要素を複合したような機能を有する要素も多く用いられている。このような複合特殊要素は、ジョイント要素、コネクタ要素、ギャップ要素、接触要素など様々な名称で呼ばれているため、ここではばね剛体複合要素と称することとした。

3.2.3 高力ボルト継手部のモデル化事例

高力ボルト継手部のモデル化の方法は様々である。したがって、2000年頃までと2000年以降に分けて、代表的事例とともにモデル化の概略を紹介することとする。一部については、事例編においてより詳細な情報を示しているため、ご参照いただきたい。

・2000年頃まで

FEM解析において高力ボルト継手部を扱った事例としては、文献3.2.24や文献3.2.37の研究があったが、継手部の複雑な形状やインターフェースのモデル化の難しさから、2000年頃までそこまで多くは報告されていなかったようである(文献3.2.22)。

文献3.2.20は、ソリッド要素(8節点アイソパラメトリック要素)で再現した母板と連結板をばね要素(文献3.2.19)で結合したモデルにより、プレートガーダーのすべり耐力試験を解析的に再現している。亀井ら(文献3.2.2, 3.2.4~3.2.8)は、独自に定義したジョイント要素によって、標準すべり試験片や鋼桁フランジの耐荷力やすべり挙動を再現している。ソリッド要素で再現した座金と母板間に弾性係数が低くごく薄い要素を挿入することでボルト締めによる微

小なすべりの再現を試みた事例もある（文献 3.2.30）。

・2000 年頃以降

2000 年を過ぎた頃から、パソコンの演算能力の向上や解析ソフトウェアの充実などといった計算環境の向上を契機として、高力ボルト継手部を扱った解析事例が多く報告され始めた。

国内では、摩擦接合継手のすべり耐力試験時挙動など継手部分を対象とした解析の結果が多く発表され、様々な継手のすべり挙動や終局挙動の解明を後押しした（文献 3.2.1, 3.2.3, 3.2.9, 3.2.11, 3.2.13~3.2.18, 3.2.21, 3.2.23~3.2.24, 3.2.28, 3.2.31~3.2.33）。解析モデルは 8 節点低減積分要素や 6 節点完全積分要素といったソリッド要素で構成されることが多く、座金がボルト頭やナットと一体化してモデル化される場合もある。各部の材料特性は、公称値や材料試験結果を参照してバイリニア、トリリニア、マルチリニア型の応力-ひずみ関係が与えられている。明記されている論文・報告は必ずしも多くないが、このようなモデルの接触面における相互作用の再現にはマスター-スレイブ法が適用されていると考えられる。

支圧接合の解析事例としては、鋼橋の桁連結工の地震時挙動が再現されている（文献 3.2.26）。この事例では、ソリッド要素と接触要素からなるモデルが用いられ、桁連結工の詳細部分モデル解析の結果から橋梁全体モデル解析の非線形ばね特性を決定している。支圧接合継手をばね要素等でモデル化した事例としては、既設鋼トラス橋格点部（文献 3.2.29）や打込式高力ボルト継手（文献 3.2.12）をシェル要素とともに再現した事例などがある。

上述の事例では、ボルト軸部とナットは一連の連続体としてモデル化されているが、ねじ部を詳細にソリッド要素で再現したモデルによって、ねじのゆるみの機構やめねじとおねじの接触部の応力分布を検討している事例もある（文献 3.2.34~3.2.35）。

海外でも、鉄骨の柱はり接合部などで多くの解析事例が紹介されている（文献 3.2.35~3.2.38, 3.2.42, 3.2.45~3.2.46, 3.2.48~3.2.54, 3.2.56）。鉄骨の柱はり接合部では、ソリッド要素やシェル要素とともにコネクタ要素や接触要素が用いられている。引張接合継手の場合には密着状態からの離間挙動が再現されることが多く、摩擦を無視した解析が多い。風力タワーの継手部を対象とした事例もあり、そこではマスター-スレイブ法における種々のモデル化の精度と計算時間を比較されている（文献 3.2.56）。

3.2.4 高力ボルト継手部のモデル化に関する今後の展望

継手部を対象としたすべり耐力試験の再現解析は、上述のとおり、解の収束性の観点から現状ではすべり速度非依存の摩擦係数が多く用いられている。また、無機ジンクリッチペイント等の表面処理の影響も、現状では摩擦係数に代表させて再現しており、信頼性を担保するためには載荷実験との比較や場合によってはそれとのキャリブレーションが必要である。ただし、載荷試験時において試験体内部の摩擦挙動を詳細に把握することは困難であることから、今後様々なインターフェースのモデル化手法が提案され、摩擦係数や表面処理のより精緻なモデル化が可能となれば、主すべり発生メカニズム等の解明に大きく寄与するものと期待される。

構造物の全体系解析においては、現状では継手部は一体化したものとしてモデル化する（例：主桁の添接部）か、または接合されていないものとしてモデル化する（例：落橋防止構造としての桁連結工）場合が多い。事例としても紹介している桁連結工のように、実際は設置されているが全体系の解析ではこれまで考慮していなかった部材を考慮する方法が一般化されることで、設計を合理化できる可能性がある。また、当て板補強部など、現状では構造細目によりボルトの配置を決定しているような部位において、実験や詳細な FEM 解析との比較により信頼性を確認できている簡易な解析方法が一般化されれば、ボルト本数の削減などにより補強設計の合理化に資する可能性がある。

参考文献

- 文献 3.2.1 秋山寿行, 木村充, 小澤克郎, 西村宣男: 被接合材片に板厚差を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.1, pp.66-74, 2007
- 文献 3.2.2 石川誠, 亀井義典, 西村宣男, 秋山寿行: 千鳥配置された高力ボルト摩擦接合継手の強度と荷重伝達機構, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1-9, 2002
- 文献 3.2.3 江見卓郎, 田渕基嗣, 田中剛, 難波尚, 長谷洋司: 高力ボルト摩擦接合部の弾塑性挙動に関する研究, 鋼構造論文集, 第 10 巻, 第 39 号, pp.11-22, 2003
- 文献 3.2.4 亀井義典, 池端文哉, 西村宣男: 低材質フィラープレートを用いた高力ボルト摩擦接合継手の限界状態, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.65-72, 1997
- 文献 3.2.5 亀井義典, 池端文哉, 西村宣男: 高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態区分に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.584, I-42, pp.243-253, 1998
- 文献 3.2.6 亀井義典, 松野正見, 西村宣男: 多列高力ボルト摩擦接合引張継手のすべり強度に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.640, I-50, pp.49-60, 2000
- 文献 3.2.7 亀井義典, 西村宣男: 高力ボルト摩擦接合継手の主すべり以降の挙動, 鋼構造論文集, 第 8 巻, 第 31 号, pp.17-29, 2001
- 文献 3.2.8 亀井義典, 石川誠, 西村宣男, 桐生真司, 竹内修治: 超高強度ボルトの鋼桁橋への適用性に関する検討, 鋼構造論文集, 第 10 巻, 第 38 号, pp.39-49, 2003
- 文献 3.2.9 清川昇悟, 館石和雄, 判治剛, 清水優: ボルト間隔および縁端距離が小さい高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数とすべり後耐力に関する検討, 鋼構造論文集, 第 24 巻, 第 95 号, pp.95-110, 2017
- 文献 3.2.10 酒井智次: ボルト軸方向の繰返し引張荷重作用下のねじの回転ゆるみ機構, 日本機械学会論文集 (A 編), 78 巻 785 号, pp.125-136, 2012
- 文献 3.2.11 下里哲弘, 田井政行, 長嶺由智, 有住康則, 矢吹哲哉: 実腐食減肉形状を有する摩擦接合用高力六角ボルトの残存軸力特性, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.503-513, 2016
- 文献 3.2.12 下里哲弘, 木ノ本剛, 三木千壽: 打込式高力ボルト支圧接合継手の耐荷力性状と FEM 解析モデルの提案, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.2, pp.167-178, 2008
- 文献 3.2.13 高井俊和, 彭雪, 山口隆司, 山階清永: 各種のばらつきが厚板鋼板の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に与える影響に関する研究, 鋼構造論文集, 第 21 巻, 第 82 号, pp.15-27, 2014
- 文献 3.2.14 高井俊和, 彭雪, 山口隆司: フィラープレートの板厚が高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達に与える影響に関する解析的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.1, pp.1-9, 2015
- 文献 3.2.15 高井俊和, 山口隆司, 山階清永: 高力ボルト摩擦接合継手の目違いがすべり耐力に与える影響に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.605-613, 2015
- 文献 3.2.16 田畑晶子, 金治英貞, 黒野佳秀, 山口隆司: 皿型高力ボルトを用いた摩擦接合継手のボルト形状及び継手特性に関する解析的検討, 鋼構造論文集, 第 20 巻, 第 79 号, pp.19-28, 2013
- 文献 3.2.17 田畑晶子, 黒野佳秀, 金治英貞, 山口隆司: 拡大孔を有する皿型高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関する研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.674-685, 2014
- 文献 3.2.18 玉越隆史, 石尾真理, 横井芳輝, 山崎健次郎, 水口知樹: 高力ボルト摩擦接合のボルト軸力導入に着目した解析モデルに関する研究, 鋼構造論文集, 第 21 巻, 第 84 号, pp.84-84, 2014
- 文献 3.2.19 長嶋文雄, 伊藤文人: 剛体ばねモデルを用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動解析, 土木学会論文集, 第 350 号, I-2, pp.341-350, 1984
- 文献 3.2.20 長嶋文雄, 山田稔, 長島和男, 成田信之: プレートガーダー継手のすべり強度試験および解析, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1223-1234, 1991
- 文献 3.2.21 永田和寿, 町田幸大, 小川麻実, 山口隆司: 引張を受ける高力ボルト鋼板当て板接合部の荷重伝達機構に関する解析的検討, 鋼構造論文集, 第 23 巻, 第 90 号, pp.27-37, 2016
- 文献 3.2.22 西村宣男, 秋山寿行, 亀井義典: 高力ボルト摩擦接合継手に関する最近の研究動向, 土木学会論文集, No.667, I-55, pp.1-14, 2001

- 文献 3.2.23 橋本国太郎, 山口隆司, 北田俊行: 高力ボルト摩擦接合とする既設リベット継手の部分取替え補修に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.555-562, 2008
- 文献 3.2.24 橋本国太郎, 杉浦邦征: 高力ボルト摩擦接合された GFRP 部材の摩擦挙動および最大強度に関する力学的考察, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.935-945, 2012
- 文献 3.2.25 福岡俊道, 野村昌孝, 森本雄哉: ねじ山らせん形状の高精度なモデリングと有限要素解析, 日本機械学会論文集 (A 編), 72 巻 723 号, pp.45-51, 2006
- 文献 3.2.26 福本守, 斉藤雅充, 和田一範, 池田学: 鋼橋の桁連結工の地震時挙動の評価方法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.3, pp.47-52, 2015
- 文献 3.2.27 藤本盛久, 橋本篤秀: 高力ボルト引張り接合に関する研究: 第一部・板のばね常数設定の為の軸対象三次元弾性理論解析 (その 2), 日本建築学会論文集, 第 165 号, pp.67-76, 1969
- 文献 3.2.28 彭雪, 山口隆司, 高井俊和, 村越潤, 澤田守: 厚板多列高力ボルト摩擦接合継手の構造諸元がすべり挙動に与える影響に関する解析的研究, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.3, pp.452-466, 2013
- 文献 3.2.29 村越潤, 遠山直樹, 澤田守, 有村健太郎, 郭路, 依田照彦, 笠野英行, 野上邦栄: 腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部の圧縮耐荷力に着目した載荷試験, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.156-168, 2013
- 文献 3.2.30 森猛: ボルト締めした円孔の応力集中と疲労強度, 土木学会論文集, 第 543 号, pp.123-132, 1996
- 文献 3.2.31 山階清永, 山口隆司, 高井俊和, 彭雪: 千鳥配置された高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達メカニズム, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.2, pp.221-233, 2015
- 文献 3.2.32 山口隆司, 森猛, 橋本国太郎: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり強度/降伏強度比とすべり係数に関する検討, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1737-1748, 2005
- 文献 3.2.33 山口隆司, 北田俊行, 池田敬之, 吉岡夏樹: 圧縮力を受ける F18T 級超高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1005-1013, 2009
- 文献 3.2.34 山田嘉昭, 江澤良孝: 接合要素とその有限要素解析における応用, 生産研究, 31 巻, 6 号, pp.519-524, 1979
- 文献 3.2.35 A.B. Sabbagh and T.M. Chan: Development of I-beam to CHS column moment connections with external diaphragms for seismic applications, Connections in Steel Structures VII, pp.291-302, 2012
- 文献 3.2.36 Adrian Dogariu, Sorin Bordea and Dan Dubina: Steel brace-to- RC frame post-tensioned bolted connection, Connections in Steel Structures VII, pp.475-490, 2012
- 文献 3.2.37 A.M. Girao Coelho, F.S.K. Bijlaard: Finite element evaluation of the rotation capacity of partial strength steel joints, Connections in Steel Structures VII, pp.525-534, 2012
- 文献 3.2.38 A.M. Pop, D. Grecea and A. Ciutina: Low cycle performance of T-stub components of bolted moment beam-to-column connections, Connections in Steel Structures VII, pp.163-172, 2012
- 文献 3.2.39 Dassault Systèmes: Abaqus/CAE User' s Guide, 2017
- 文献 3.2.40 D.J. Benson and J.O. Hallquist: A single surface contact algorithm for the post-buckling analysis of shell structures, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol.78, pp.141-163, 1990
- 文献 3.2.41 G. Jelenic and M.A. Crisfield: Non-linear 'Master-Slave' Relationships for Joints in 3-D Beams with Large Rotations, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 135, pp.211-228, 1996
- 文献 3.2.42 G.J. van der Vegte: NUMERICAL SIMULATIONS OF BOLTED CONNECTIONS: THE IMPLICIT VERSUS THE EXPLICIT APPROACH, Connections in Steel Structures V - Amsterdam, 2004
- 文献 3.2.43 Juan C. SIMO, Peter WRIGGERS and Robert L. TAYLOR: A Perturbed Lagrangian Formulation for the Finite Element Solution of Contact Problems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 50, pp.163-180, 1985
- 文献 3.2.44 J.O. Hallquist, G.L. Goudreau and D.J. Benson: Sliding interfaces with contact-impact in large-scale Lagrangian computations, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol.51, pp.107-137, 1985
- 文献 3.2.45 J. Fernández, A. Pernía, F.J. Martínez-de-Pisón, R. Lostado: Prediction models for calculating bolted connections using data mining techniques and the finite element method, Engineering Structures, Vol.32,

pp.3018-3027, 2010

- 文献 3.2.46 J.J. dos Santos, A.T. da Silva, L.R.O. de Lima, P.C.G. da Silva Vellasco, S.A.L. de Andrade and J.G.S. da Silva: Structural assessment of the tension capacity of carbon & stainless steel plates with staggered bolts, Connections in Steel Structures VII, pp.77-90, 2012
- 文献 3.2.47 J.T. Oden and J.A.C. Martins: Models and Computational Methods for Dynamic Friction Phenomena, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 52, pp.527-634, 1984
- 文献 3.2.48 M. Couchaux, M. Hjiiaj and I. Ryan: Static resistance of bolted circular flange joints under tensile force, Proc. 13rd International Symposium on tubular structures, Vol.1, 2010
- 文献 3.2.49 M. Komuro, N. Kishi and W.F. Chen: ELASTO-PLASTIC FE ANALYSIS ON MOMENT-ROTATION RELATIONS OF TOP- AND SEAT-ANGLE CONNECTIONS, Connections in Steel Structures V, pp.111-120, 2004
- 文献 3.2.50 N. Baldassino, V. Mancini and R. Zandonini: Experimental and numerical investigation on unstiffened and stiffened T-stubs, Connections in Steel Structures VII, pp.399-410, 2012
- 文献 3.2.51 OS Bursi and JP Jaspart: Benchmarks for finite element modelling of bolted steel connections, Journal of construction steel research, Vol.43, Nos.1-3, pp.17-42, 1997
- 文献 3.2.52 Primož Može and Darko Beg: TESTS ON BOLTED SHEAR CONNECTION IN HIGH-STRENGTH STEEL WITH THREE OR FOUR BOLTS IN LONGITUDINAL DIRECTION, Connections in Steel Structures VI, pp.65-74, 2008
- 文献 3.2.53 Roberto T. Leon and Jong Wan Hu: DESIGN OF INNOVATIVE SMA PR CONNECTIONS BEWTEEN STEEL BEAMS AND COMPOSITE COLUMNS, Connections in Steel Structures VI, pp.513-524, 2008
- 文献 3.2.54 S.-H. Ju, C.-Y. Fan, G.H. Wu: Three-dimensional finite elements of steel bolted connections, Engineering Structures, Vol.26, pp.403-413, 2004
- 文献 3.2.55 T.A. Laursen: Computational contact and impact mechanics, Springer, Berlin, 2002
- 文献 3.2.56 Wylliam Husson: Friction Connections with Slotted Holes for Wind Towers, Licentiate Thesis 2008, 2008

3.3 支承部, 落橋防止構造

3.3.1 支承部

支承部をモデル化する FEM 解析では、目的に応じて、橋梁全体モデルの中で支承部をばね要素やダッシュポットを用いて簡易的にモデル化するケースと、支承単体をソリッド要素やシェル要素を用いて詳細にモデル化するケースの 2 種類に大別できる。本節では、橋梁全体系の解析と支承単体の解析の 2 種類のケースについて収集した事例から、モデル化手法を整理した。

(1) 橋梁全体系の解析

支承構造には、積層ゴム支承、高減衰ゴム支承や鉛プラグ入りゴム支承等の免震支承、ローラー支承やピン支承等の鋼製支承などがあるが、設計実務で用いられる橋梁全体系の解析においては、支承部はばね要素を用いて簡易的にモデル化する場合が多い。ただし、支承の損傷メカニズムの解明や支承の損傷が橋梁全体系の挙動に及ぼす影響を把握することを目的に、より詳細にモデル化した検討例も見られる。その際、落橋防止ケーブル等もモデル化する場合がある。また、粘性効果を考慮したレオロジーモデルを用いて高減衰ゴム支承をモデル化した例もある。

図 3.3.1.1 のモデル化例では、固定支承は剛なばね、水平力分散構造に用いられる積層ゴム支承は線形せん断ばね、免震支承はバイリニア型の非線形せん断ばね、可動支承は動摩擦力を考慮した剛塑性型の非線形せん断ばねでモデル化している。

図 3.3.1.2 は、曲線橋のモデル化例である。P4 橋脚の支承をピン支承、その他の支承をローラー支承としているが、主桁の接線方向とそれに対する法線方向に固定および可動方向を設定している。ここでは、ばね剛性を 10^{-2} (kN/m) とすることで自由、 10^{10} (kN/m) とすることで固定を表している。

図 3.3.1.3 は、粘性効果を考慮したレオロジーモデルを用いて高減衰ゴム支承をモデル化した例である。レオロジーモデルの概念図を示しているが、線形ばね A、C、ハードニングを表す非線形ばね B、スライダー S、非線形速度依存性を表すダッシュポット D から構成されたモデルである。

図 3.3.1.4 は、すべり免震支承システムのモデル化例である。この検討事例では、ゴム支承を表す線形ばねとすべり支承を表すバイリニア型の非線形ばねを用いてモデル化しているが、併せて摩擦係数の速度・面圧依存特性を考慮している。

図 3.3.1.5 は、ハードニングを考慮したゴム支承のモデル化例である。この例では、ゴム支承の実験結果に基づき、トリリニア型のモデル化を用いており、剛性 G1、G2、G3 がスケルトンカーブを決めるパラメータであるが、パラメータ算出のための係数は HDR、LRB、RB の支承の種別ごとに設定している。

図 3.3.1.6 は、損傷を考慮した固定支承と可動支承のモデル化例である。ローラー支承のころがり摩擦や支承損傷後の動摩擦を考慮している。

可動支承の摩擦係数については、道路橋示方書や道路橋支承便覧に示された値が参考となる。摩擦係数は、すべり摩擦ところがり摩擦を区別して示されている。

支承の拘束条件は、回転に対しては、ピン支承等ではピンの回転する方向は拘束せずピンが回転しない方向は剛とするモデル化もある。ただし、死荷重等の荷重に対して過大な反力が生じないことを確認するなど、解析上の拘束条件の与え方については注意が必要である。

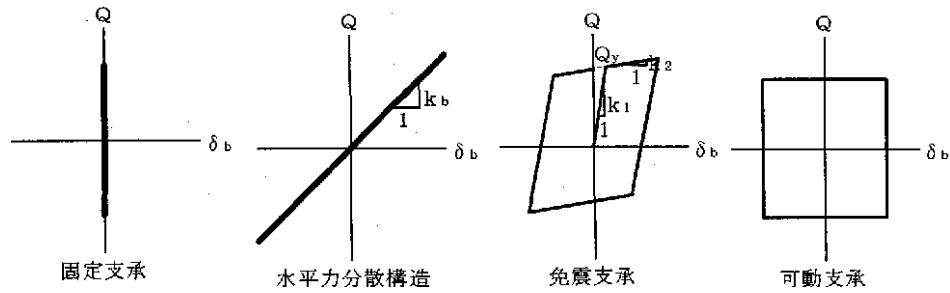
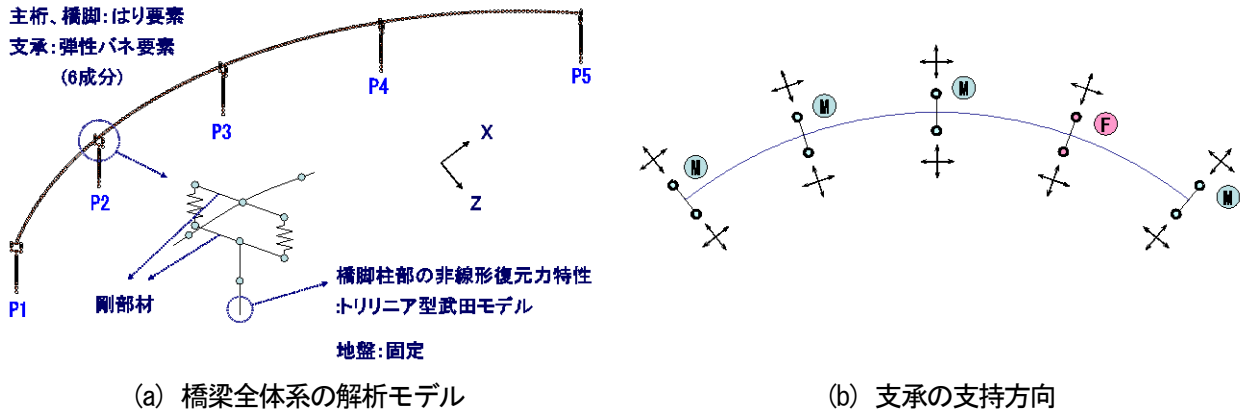


図 3.3.1.1 橋梁全体系の解析における支承のモデル化例 (文献 3.3.1.1)



(a) 橋梁全体系の解析モデル

(b) 支承の支持方向

(単位: kN/m)

接線方向	法線方向	鉛直方向	接線軸回り	法線軸回り	鉛直軸回り
1×10^{-2}	1×10^{10}	1×10^{10}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}

(*: P4固定支承は、 1×10^{10} である.)

(c) 支承の剛性

図 3.3.1.2 曲線橋の解析における支承のモデル化例 (文献 3.3.1.2)

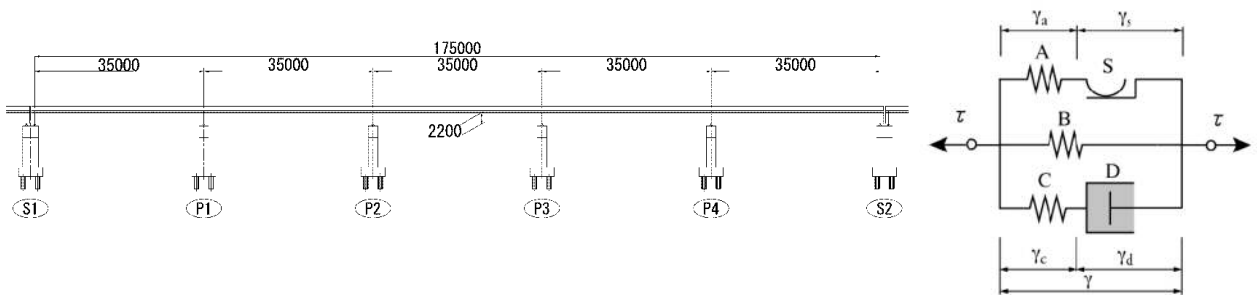
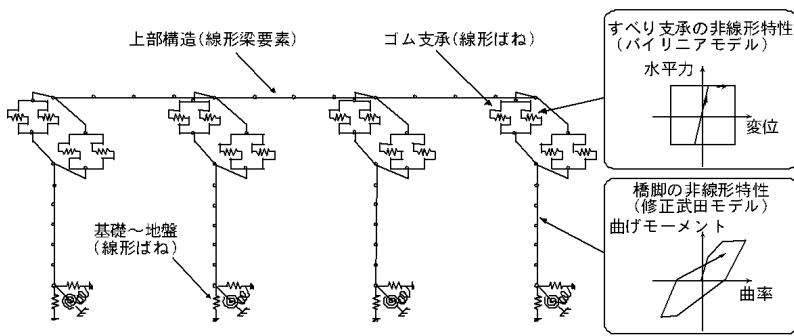
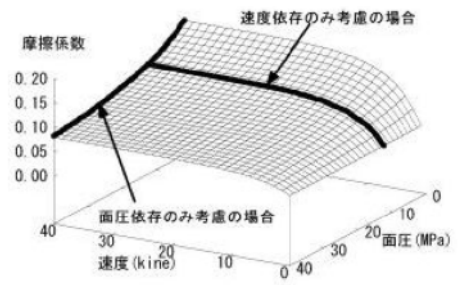


図 3.3.1.3 レオロジーモデルを用いた高減衰ゴム支承のモデル化例 (文献 3.3.1.3)



(a) 解析モデル



(b) 摩擦係数の速度・面圧依存特性

図 3.3.1.4 すべり免震支承のモデル化例 (文献 3.3.1.4)

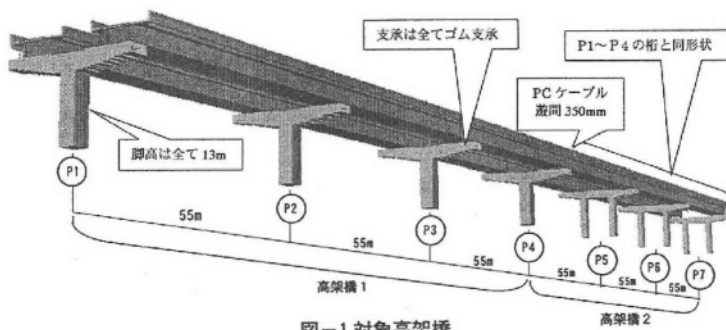
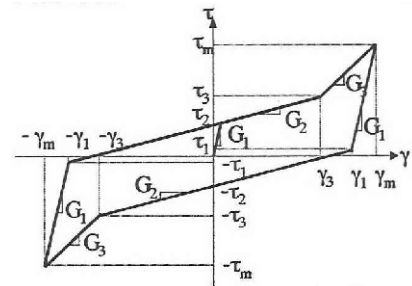


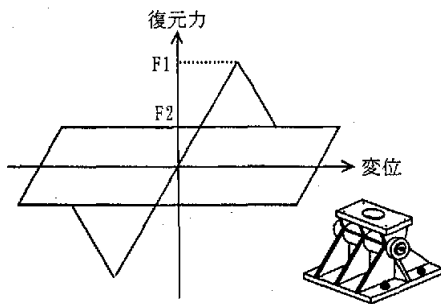
図-1 対象高架橋

(a) 対象橋梁

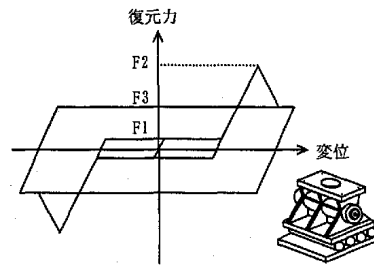


(b) トリリニアモデル

図 3.3.1.5 ハードニングを考慮したゴム支承のモデル化例 (文献 3.3.1.5)



(a) 固定支承



(b) 可動支承

図 3.3.1.6 損傷を考慮した支承のモデル化例 (文献 3.3.1.6)

(2) 支承単体の解析

支承部は上部構造と下部構造との接点に位置し、鉛直・水平力支持の荷重伝達機能と、水平移動および回転の変位追従機能を保持する。地震の振動エネルギーを履歴減衰や摩擦減衰などで吸収し、地震力を低減させる機能を保持した支承は免震支承として使用される。免震支承の構造は、薄い層状のゴムと鋼板を積層して加硫接着しており、鉛直方向には剛性が高いため耐荷重性能が大きく、水平方向には剛性が低いため変形性能が大きいという特性を有する。

免震支承には、天然ゴム系、高減衰ゴム系、鉛プラグ入りのタイプがある。図 3.3.1.7 は免震支承本体の構造を示す。高減衰ゴム支承は、樹脂や充填材を配合調整することで減衰機能を発現させたゴム材料が使われている。鉛プラグ入りゴム支承は、ゴム支承の中央部に鉛棒を挿入した構造である。それぞれのタイプにおける荷重-変位関係は、図 3.3.1.8 に示すように、天然ゴム系は線形的であるのに対し、高減衰ゴム系および鉛プラグ入りは非線形的な性能を示す。解析では一般に、非線形モデルではバイリニアやトリリニアモデルが用いられる。

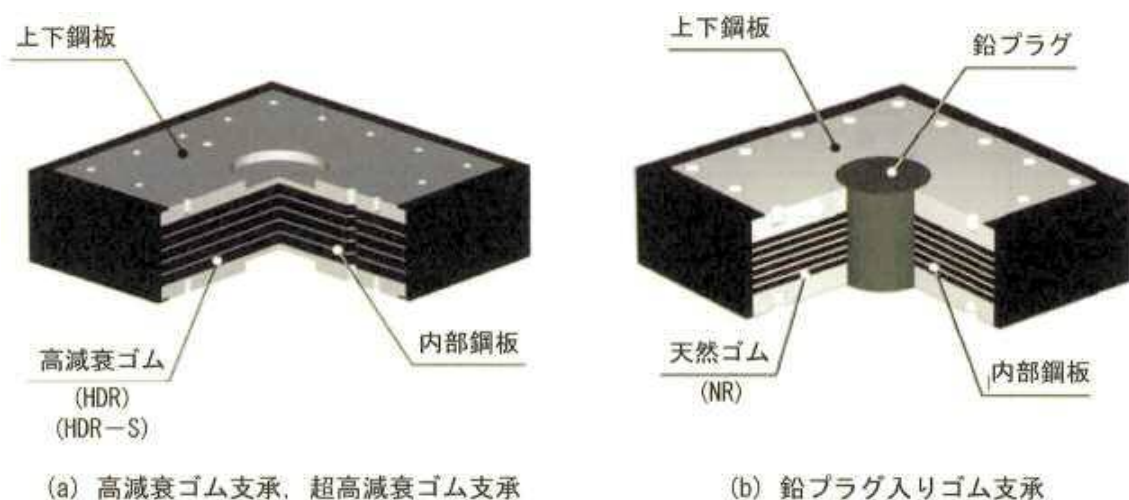


図 3.3.1.7 免震支承本体の構造図 (文献 3.3.1.7)

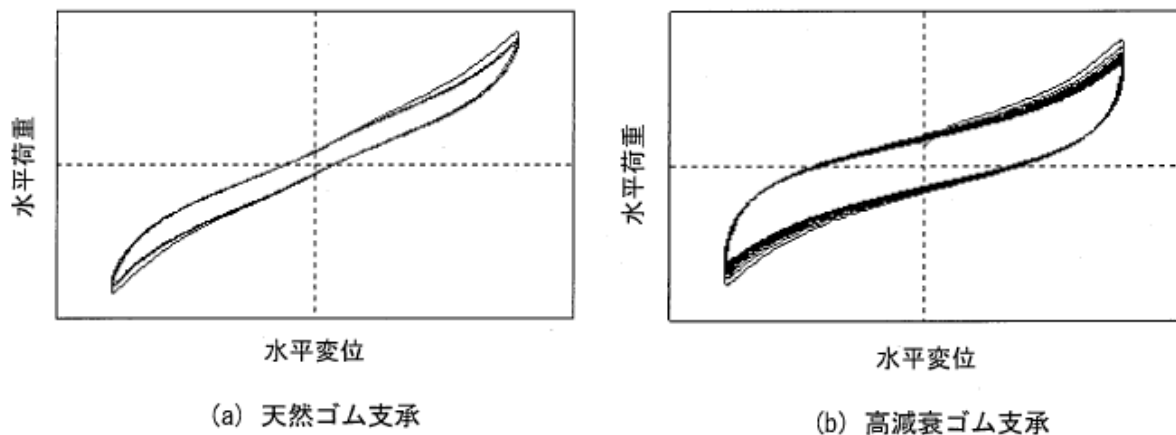


図 3.3.1.8 ゴム支承の履歴曲線の例 (文献 3.3.1.7)

ゴム材料は非圧縮性あるいは微圧縮性の超弾性体としてモデル化される。非圧縮性とは、体積変化しない性質であり、ポアソン比は 0.5 となる。超弾性体とは、ひずみエネルギー密度関数（単位体積当たりのひずみエネルギーを表す弾性ポテンシャル）を有する弾性体を指し、ゴムの最も簡易なモデルとして登場したことに由来して、数十%～数百%の大ひずみ状態を想定している（文献 3.3.1.8）。代表的なモデルとして、大変形下におけるゴムの挙動を精度よく再現できる Ogden モデルや、より単純な Mooney-Rivlin モデルが提案されている。

最大経験ひずみに依存する剛性低下，すなわち損傷（ダメージ）を導入した非弾性モデルを損傷あるいはダメージモデルと呼び，ひずみ履歴に依存して応力-ひずみ関係が変化する擬似的な弾性体である．図 3.3.1.9 は超弾性モデルにダメージモデルを導入したモデルの代表的な挙動を示す．

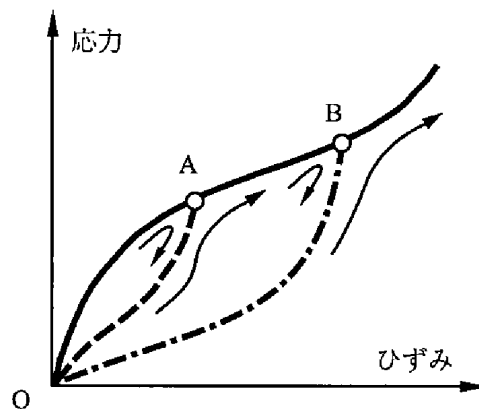


図 3.3.1.9 超弾性ダメージモデルの応力-ひずみ関係の例（文献 3.3.1.8）

支承単体の FEM 解析は，支承内部の局所的な挙動特性の把握や，損傷や破壊あるいは経年劣化の発生メカニズムの検証を目的として行われる．また，橋梁全体系の解析により得た支承の作用力や変位を単体の支承モデルに与え，支承内部に発生する局部応力について検証するといった目的もある．解析の対象となる支承構造の種類には，積層ゴム支承，高減衰ゴム支承，ローラー支承などがある．

一般に，3次元モデルではシェル要素やソリッド要素が用いられる．例えば，積層ゴム支承を対象とした3次元モデルの場合，ゴムはソリッド要素，内部鋼板はシェル要素を用いる例が多い．

ゴムには超弾性体の材料特性が適用される他にも，ダメージや粘性，弾塑性などを付加した構成モデルを適用する例や，支承の載荷実験に基づいて超弾性の材料構成則の定数をキャリブレーションする例もある．支承周りの鋼板や内部鋼板などの部材は剛体や弾性体または弾塑性体の材料特性を適用する例が多く，材料試験を行った結果から材料定数を同定し，バイリニアまたはトリリニア型の構成モデルとして設定する例もある．鉛はひずみ速度依存性が非常に大きい材料で，その構成モデルが一義的に示されておらず，引張試験を行い応力-ひずみ関係を求める必要がある．

解析速度の向上を目的として，対称性を考慮してモデル化を省略したり，着目しない部材に対しては弾性体を適用したりする例もある．また，定性的な挙動の把握を目的として付着剥離現象のモデル化を省略するといった例や，耐荷性能等の機能が期待されない被覆ゴムのモデル化を省略する例もある．

図 3.3.1.10 は積層ゴム支承の FEM 解析モデルの例である．すべてソリッド要素でモデル化しており，ゴムは超弾性材料，内部鋼板は弾塑性材料（等方硬化則）としている．超弾性の材料構成則の定数は，マクロ的な支承の載荷実験に基づきキャリブレーションを行ったものである．

図 3.3.1.11 は鉛プラグ入り積層ゴム支承の FEM 解析モデルの例である．ゴムは超弾性材料（Ogden モデル）とし，鉛は引張試験結果を用いたトリリニアモデルとしている．接触条件は，ゴムとすべての鋼板間を固着とし，鉛プラグとゴムおよび鋼板間は接触としてモデル化している．接触摩擦係数は 0.8 としている．

図 3.3.1.12 はローラー支承の FEM 解析モデルの例である．すべてソリッド要素でモデル化しており，ローラーは弾塑性体，上下支圧板は剛体でモデル化している．拘束条件については，ローラー部は全方向自由，上支圧板は鉛直方向のみ自由，下支圧板は X 軸方向のみ自由，他は固定としている．ローラーと支圧板の接触摩擦係数は 0.15 としている．

図 3.3.1.13 は劣化した天然ゴム支承の FEM 解析モデルの例である．すべてソリッド要素でモデル化しており，構成則は超弾性体と弾塑性体を並列に組み合わせたモデルを適用している．劣化予測で得られた結果から，構成則に含まれる材料定数を同定している．

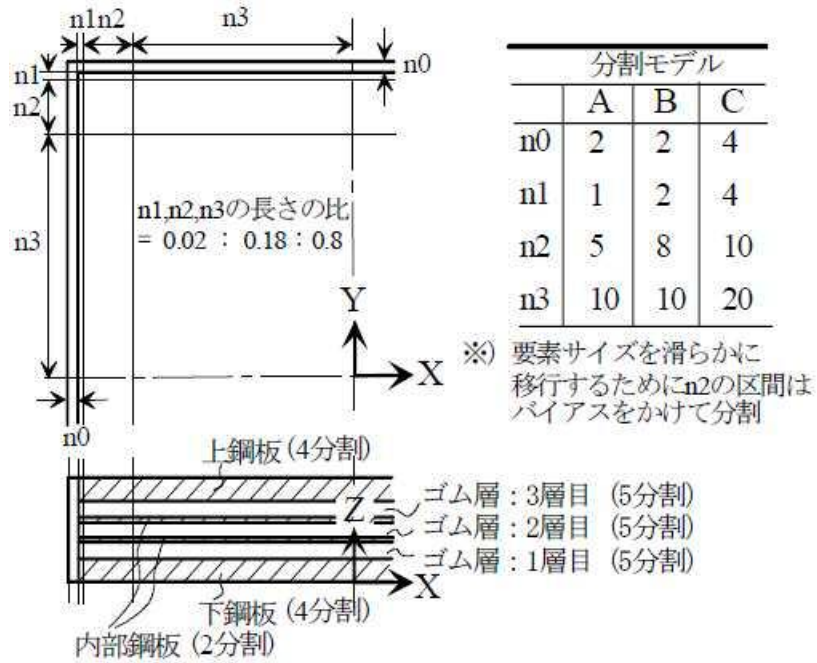
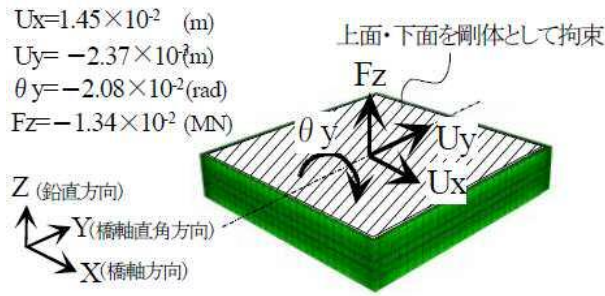


図 3. 3. 1. 10 積層ゴム支承のFEM 解析モデルの例 (文献 3. 3. 1. 9)

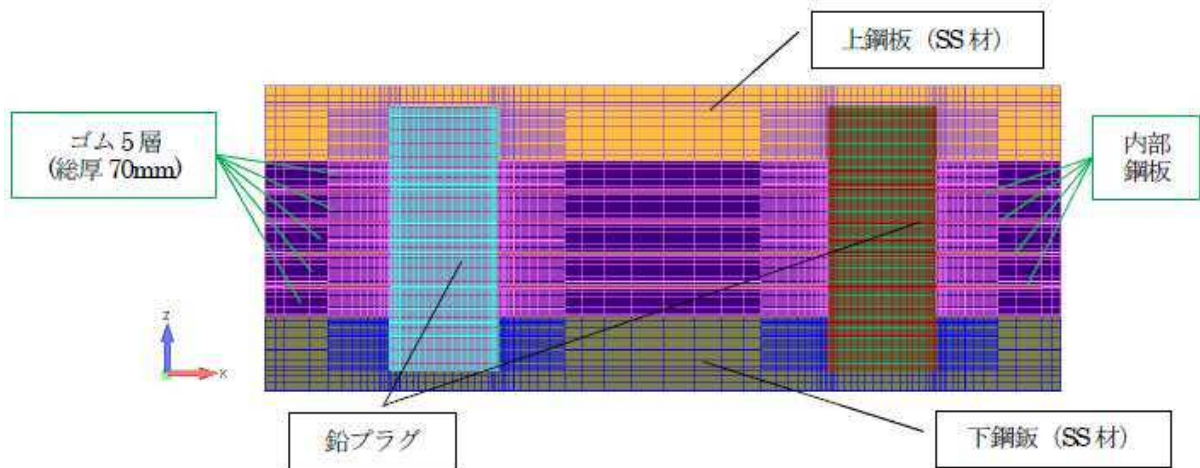


図 3. 3. 1. 11 鉛プラグ入り積層ゴム支承のFEM 解析モデルの例 (文献 3. 3. 1. 10)

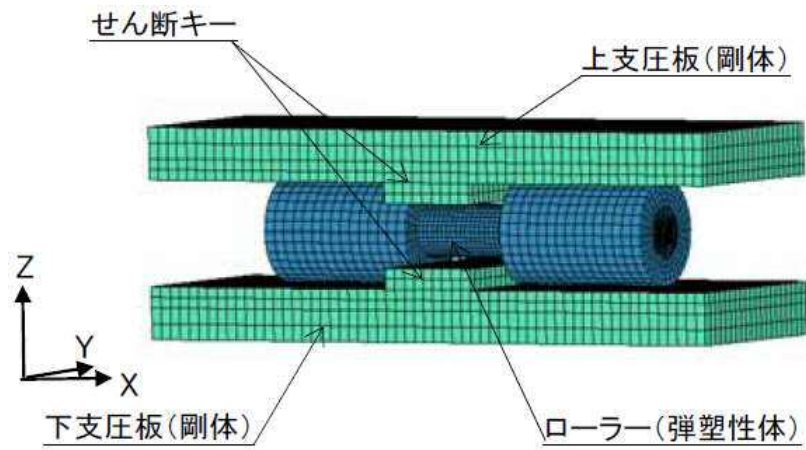


図 3. 3. 1. 12 ローラー支承の FEM 解析モデルの例 (文献 3. 3. 1. 11)

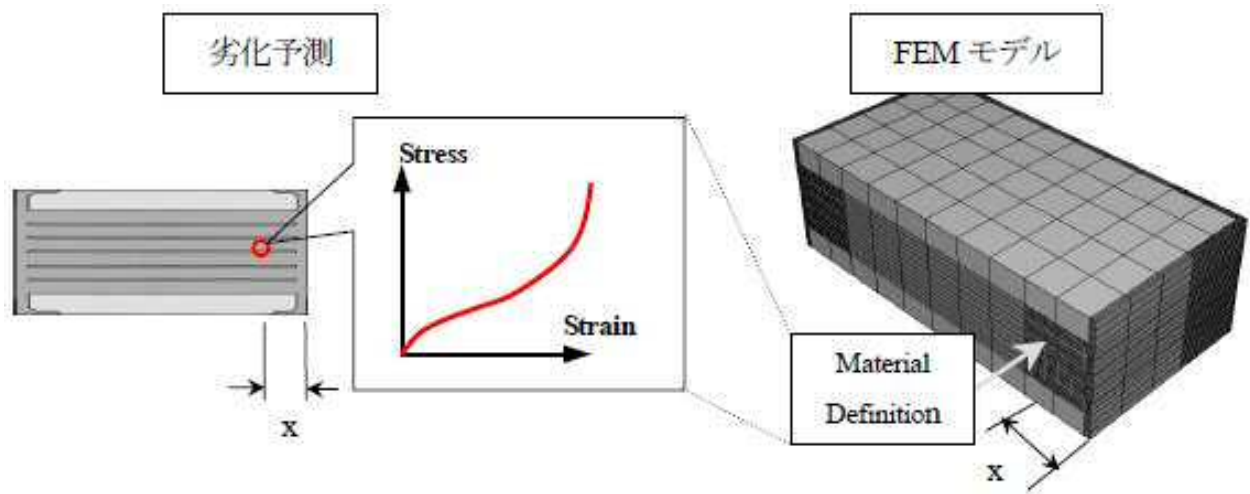


図 3. 3. 1. 13 劣化した天然ゴム支承の FEM 解析モデルの例 (文献 3. 3. 1. 13)

参考文献

- 文献 3.3.1.1 友澤武昭, 星谷勝, 矢部正明: オールフリー支持形式の多径間連続高架橋への実用化に関する基礎的な検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.46A, 2000.3
- 文献 3.3.1.2 崔準祐, 大塚久哲: 4径間連続曲線箱桁橋における金属支承の地震時応答特性に関する研究, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007.9
- 文献 3.3.1.3 奥井義昭, A. Rahman Bhuiyan, 三田村浩, 今井隆: 高減衰ゴム支承のモデル化に違いによる橋梁応答解析結果への影響と低温時の挙動, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9
- 文献 3.3.1.4 藤田亮一, 森敦, 金治英貞, 伊津野和行: すべり免震支承システムのパラメータが橋梁応答に及ぼす影響, 土木学会地震工学論文集, 2003.6
- 文献 3.3.1.5 木納利和, 森下宣明, 前野裕文, 野中哲也, 折野明宏: ゴム支承およびPCケーブルの非線形特性を考慮した連続高架橋の動的解析, 第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, 2001.12
- 文献 3.3.1.6 梶田幸秀, 渡邊英一, 杉浦邦征, 丸山忠明, 永田和寿: 鋼製支承の破損を考慮した連続高架橋の地震時応答性状と落橋防止装置の有効性の検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.45A, 1999.3
- 文献 3.3.1.7 鋼構造シリーズ 17 道路橋支承部の改善と維持管理技術, 土木学会鋼構造委員会鋼橋の支持機能検討小委員会, 2008
- 文献 3.3.1.8 丸善株式会社: いまさら聞けない計算力学の常識, 土木学会応用力学委員会計算力学小委員会, 2008
- 文献 3.3.1.9 奥村徹, 後藤芳頭, 海老澤健正, 小畑誠, Jianzhong Li, Yan Xu: 鋼製橋脚で支持された連続高架橋における積層ゴム支承の水平2方向地震動下の挙動特性, 第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2015
- 文献 3.3.1.10 林訓裕, 足立幸郎, 坂本直太, 五十嵐晃, 党紀, 大谷修, 下池利孝: ゴム支承の損傷メカニズムに関する基礎的検証, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, 2015
- 文献 3.3.1.11 崔準祐, 下野将樹, 大塚久哲, 長田修一: 3次元FEM解析によるローラー支承部の地震被害発生メカニズムに関する研究, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010
- 文献 3.3.1.12 崔準祐, 徳永裕二: FEM解析による水平力の方向変化に伴うローラー支承の水平合成変化率の算定と実曲線橋の動的解析への適用, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, 2014
- 文献 3.3.1.13 伊藤義人, 佐藤和也, 顧浩声, 山本吉久: 橋梁用天然ゴム支承の性能劣化特性に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.2, 2006
- 文献 3.3.1.14 幸左賢二, 安藤高士, 閑上直浩, 萩原隆朗: ゴム支承アンカー部の地震時挙動の解析的検討, 第5回耐震補強・補修技術, 2001

3.3.2 落橋防止構造

(1) 落橋防止システム

道路橋示方書の中で落橋防止構造とは、落橋防止システムの一部として機能するデバイスを指す。落橋防止システムは大地震時など橋梁本体に巨大な力が作用し、それに伴い支承の損傷や橋壁への衝突などにより支持能力を失い、上部構造と下部構造が別構造となり、橋梁全体に大きな移動が発生し、落橋に至る状態を防止するために設けられている装置を総称して呼んでいる。具体的に代表的な装置を示すと、橋軸方向の移動に対して機能させる落橋防止ケーブル、橋軸直角方向への移動に対して機能させる横変位拘束装置、橋座を超えて落下しないように橋台上に作用する桁かかり長がある（文献3.3.2.1）。橋軸方向の変位に対して機能する順番を示すと図3.3.2.1のようになる。これらの装置はそれぞれが単独で作動することが求められているため、機能を掛け持つことは認めていない。

これら落橋防止システムは我が国独自の思想で開発された装置であり、「落橋」という橋梁構造システムが機能していない状態を対象にしている点は注目される。また、落橋防止ケーブルや横変位拘束装置などは既設橋梁への設置も可能であるため、橋梁の耐震補強工事の際に数多く設置されており、これから新設される橋梁にも、ある一定のスパン長を有する橋梁には必ず設置されると考えられる。橋軸方向の落橋防止構造の一例を図3.3.2.2に示す。

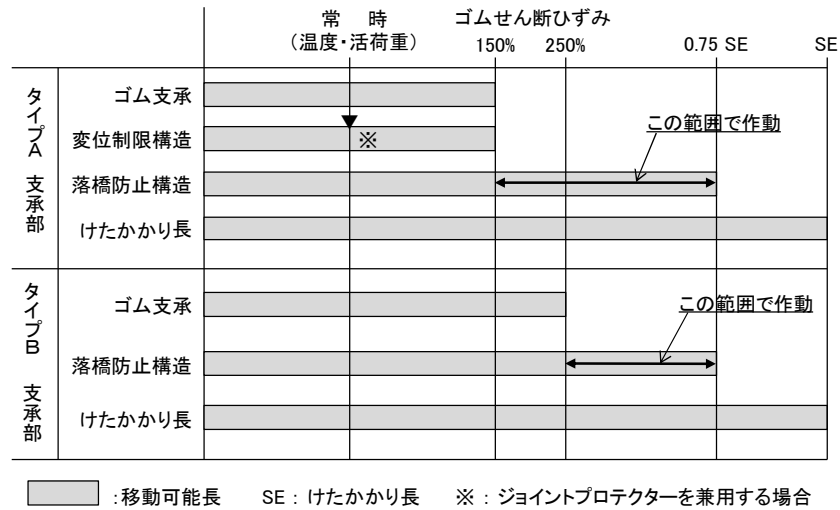


図3.3.2.1 落橋防止システムの移動量（橋軸方向）（文献3.3.2.1）

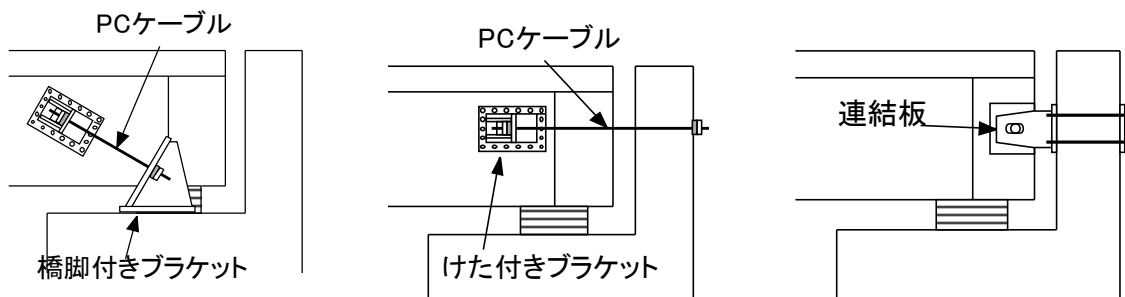


図3.3.2.2 落橋防止構造の構造例（文献3.3.2.1）

(2) 落橋防止ケーブルの解析モデル

落橋防止構造の中で、落橋防止ケーブルを取り上げる。落橋防止ケーブルは、橋台と上部工、あるいは桁間に設置されるケーブルであり、主に引張力に対して抵抗するように設置される。落橋防止ケーブルの引張試験を行うと、図 3.3.2.3 のようなカーブを示し、図 3.3.2.4 に示すようにバイリニア型でモデル化がなされることが多い。図 3.3.2.4 中の記号は次のように用いられている（文献 3.3.2.1）。

P_u, u_u : ケーブルの終局耐力，終局変位

P_y, u_y : ケーブルの降伏耐力，降伏変位

いずれもケーブルの引張試験から得られるデータであり、降伏耐力は 0.2%耐力法が用いられる。ただし、図中の P_a, u_a は、それぞれ保有耐力，保有変位であり、次式で求められる。

$$P_a = P_y + \frac{P_u - P_y}{\alpha}, \quad u_a = u_y + \frac{u_u - u_y}{\alpha} \quad (1)$$

ここに、係数 α は安全係数である。文献 3.3.2.1 では、この保有耐力を用いて、落橋防止構造の要求耐力 P_d 、上部構造と下部構造間の相対変位 u_d を次式のように満足するように設計することを示している。

$$P_a > P_d, \quad u_a \geq u_d \quad (2)$$

動的解析など、繰り返し荷重を想定する場合や実際の落橋防止ケーブルでは、図 3.3.2.5 に示すように作動するまでの遊び（設計遊間）があることもある。これらを加味した場合、図 3.3.2.6 に示すような復元力として定義することも提案されている（文献 3.3.2.4）。図 3.3.2.6 の場合は連続高架橋の桁間連結ケーブルの解析で用いられた復元力モデルであり、離反側とは桁同士が離れる方向でケーブルに引張力が発生する側を示し、接触側とは、桁同士が近づく方向を示し、桁間の衝突を線形ばねでモデル化して示している。従って、衝突するまで、あるいは連結ケーブルが作動するまでは移動のみが発生することを再現したモデルとなる。図 3.3.2.7 に解析モデルを示すが、桁間衝突、及びケーブルの効果を動的解析で同時に検討できる解析モデルとなっている。

以上のように、落橋防止ケーブルはばね要素として用いられる解析事例がほとんどである。特にモデル化の際の留意点としては、例えば図 3.3.2.7 の解析モデルのように、ケーブルとしての張力と桁間の衝突のような物理現象を考慮するような部位については図 3.3.2.6 のように引張・圧縮側両方を考慮したモデル化を行うなどの留意が必要である。また、落橋防止ケーブルには緩衝材としてゴム板の設置や遊び量などが設置されていることが多いため、ケーブルのみを対象とした場合は図 3.3.2.4 のモデルが妥当であると考えられるが、実橋梁に設置した状態を検討する場合は遊び量や緩衝材の影響を考慮したモデルが妥当であると考えられる。

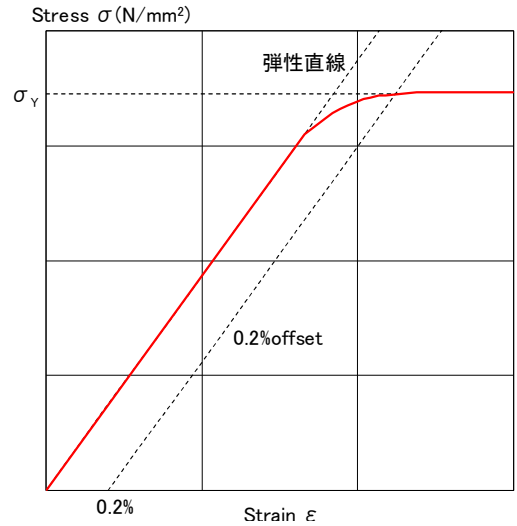


図 3.3.2.3 ケーブルの応力—ひずみ曲線

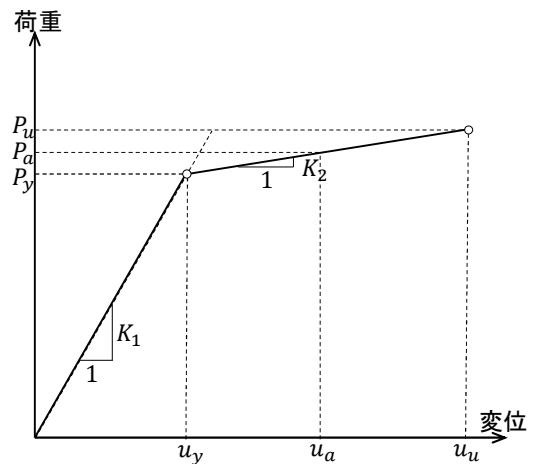


図 3.3.2.4 耐力—変位関係のモデル化

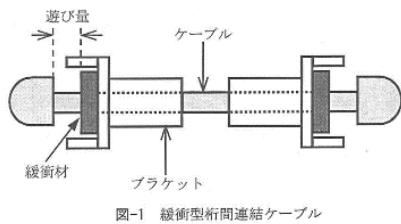


図-1 緩衝型桁間連結ケーブル

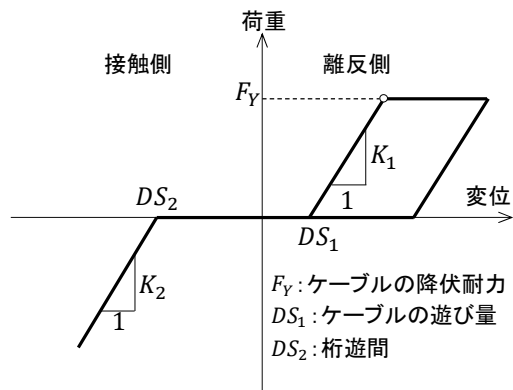


図 3.3.2.5 緩衝型桁間連結ケーブル (文献 3.3.2.4)

図 3.3.2.6 桁間連結ケーブルの復元力モデル

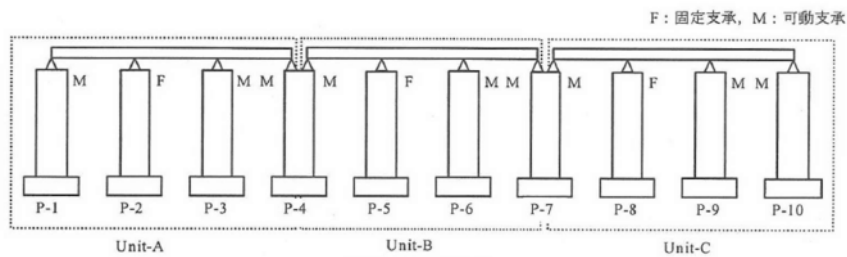


図-10 解析モデル

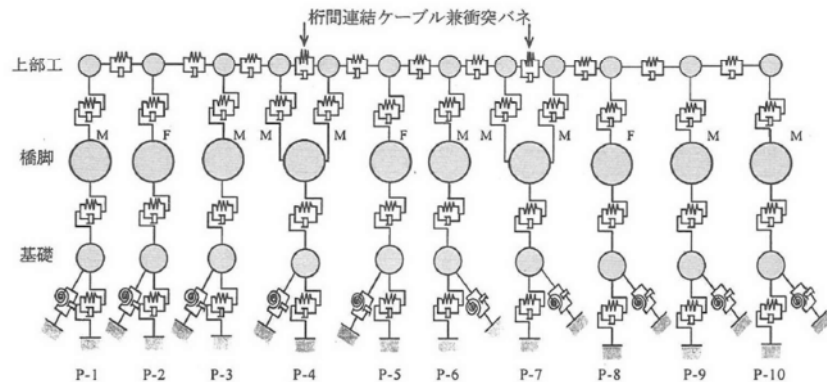


図-11 バネ-質点-ダッシュポット系モデル

図 3.3.2.7 連続高架橋の解析モデル (文献 3.3.2.4)

参考文献

文献 3.3.2.1 日本橋梁建設協会：落橋防止システム設計の手引き (改訂版), 2010.8
 文献 3.3.2.2 土木研究センター：落橋防止構造設計ガイドライン (案), 2005.7
 文献 3.3.2.3 鎌田耕平, 伊津野和行：非線形挙動を考慮した落橋防止ケーブルの要求性能に関する研究, 第 26 回地震工学研究発表会論文集, pp.1169-1172, 2001
 文献 3.3.2.4 梶田幸秀, 杉浦邦征, 渡邊英一：緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震時応答性状, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.297-310, 2002
 文献 3.3.2.5 中尾尚史, 伊津野和行：非線形緩衝材を有する落橋防止ケーブルの設計法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.751-758, 2005
 文献 3.3.2.6 竹田周平, 北浦勝, 宮島昌克：エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置の設計に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.315-326, 2006
 文献 3.3.2.7 堺淳一, 運上茂樹, 星隈順一：大規模地震における落橋メカニズムと落橋防止構造の効果に関する分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.1, pp.55-71, 2011

3.4 接着接合

鋼構造物の接合方法としては、溶接継手、高力ボルト継手が一般的であるが、FRPシートによる鋼部材腐食部の補強などを中心に、接着接合も使われるようになってきている。この接着接合を対象としたFEM解析も数多く行われている（例えば、文献3.4.1～3.4.14）。

接着接合を対象としたFEM解析モデルの一例を図3.4.1（文献3.4.12）と図3.4.2（文献3.4.2）に示す。接着接合を対象とした過去のFEM解析においては、2次元モデル、3次元モデルが使われるが、接着材のモデル化としては大きく2つに分けられる。一つは、接着層の厚さを仮定し、接着層を鋼材やコンクリート、CFRP補強材と同様に、2次元の場合はシェル要素で、3次元の場合はソリッド要素でモデル化し、節点は鋼材、補強材と共有させるモデルである（図3.4.1）。もう一つは接着層にある境界条件を仮定し、鋼材やコンクリート、CFRP補強材間の界面に境界要素やばね要素を加えるモデル化方法である（図3.4.2）。前者については弾性解析による応力分布や接着層のせん断応力分布、剥離応力の確認に使われることが多く、後者については補強された部材全体の耐力や破壊性状を確認するための非線形解析に使われることが多いようである。

ただし、近年はハードウェアの著しい向上から、後者の境界要素を設定する方法よりも、特に鋼構造を中心に接着層をメッシュで直接モデル化する前者の方法が多いようである。

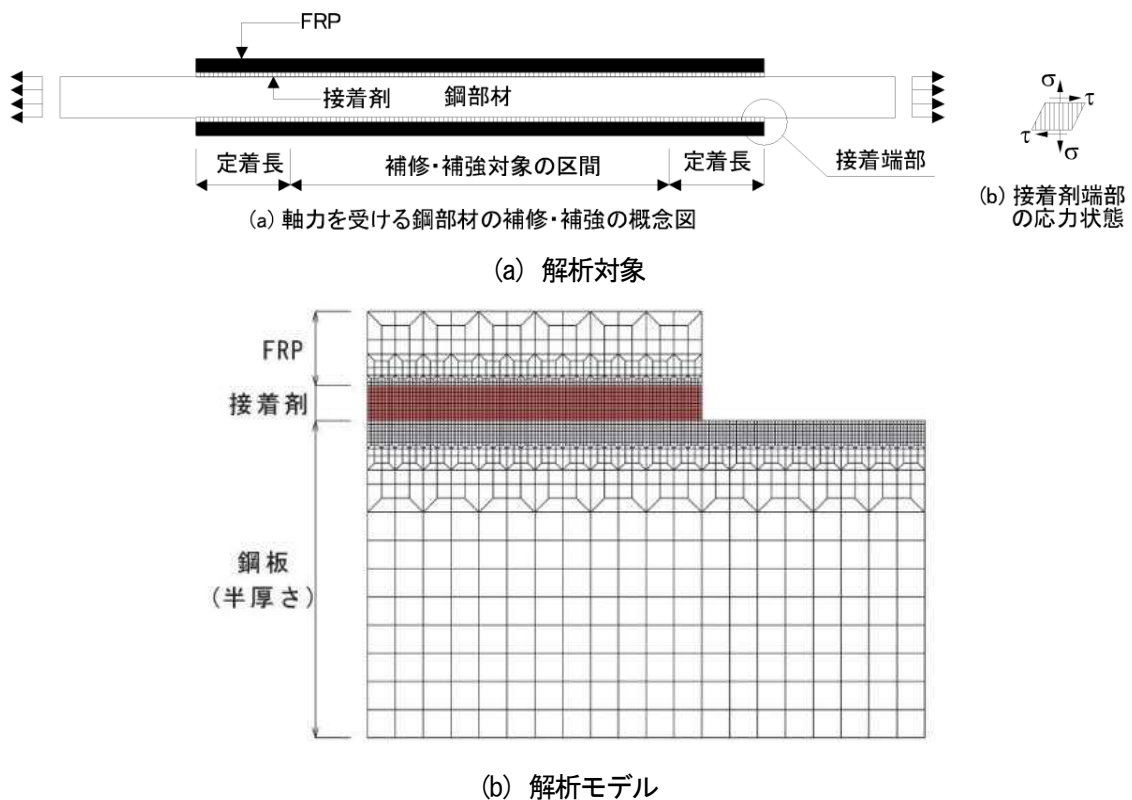
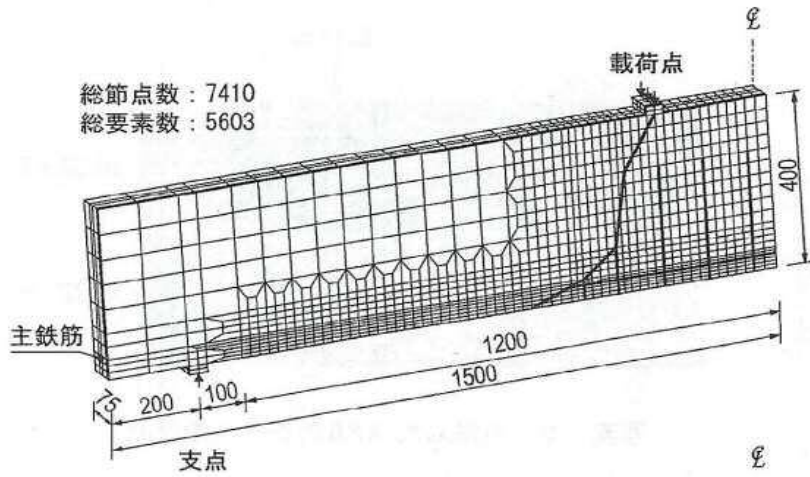
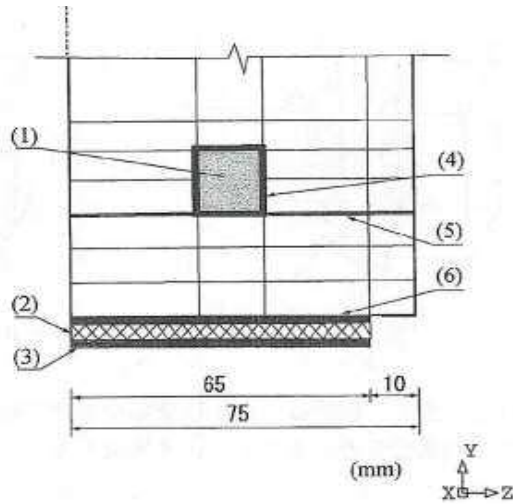


図3.4.1 接着層をシェル要素、もしくはソリッド要素でモデル化したFEM解析モデル

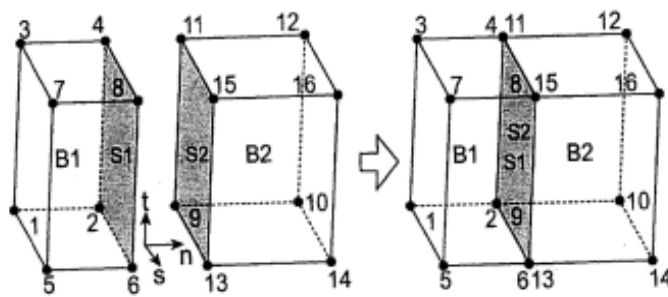


(a) 解析モデル全体 (RC 梁の下面 FRP 補強)



- (1) : 主鉄筋
- (2) : 接着層 厚さ: 2 mm
- (3) : AFRP シート
- (4) : 接触面要素 (Bond-slip モデル)
- (5), (6) : 接触面要素 (Discrete Cracking モデル)

(b) モデルの断面図



(c) 境界要素

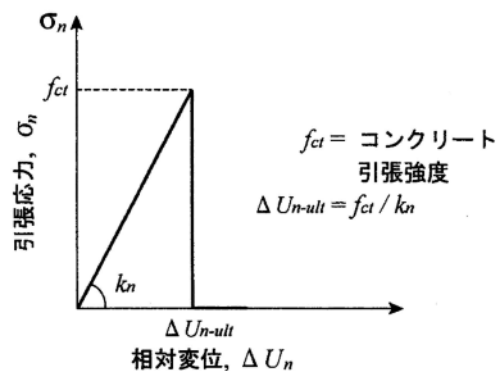
図 3.4.2 接着層に境界要素を入れた FEM 解析モデルの例

(1) 境界要素や接触条件を仮定する場合

接着層に境界要素を仮定する場合、例えばコンクリートと AFRP (アラミド繊維強化プラスチック) を接着材で接着する場合、コンクリートの要素と AFRP の要素間に境界条件を与えることになる。図 3.4.2 に示した例では、図 3.4.3 に示すような構成則をもつ境界要素を仮定している。この例では、AFRP の剥離が接着層ではなく、コンクリート材料内で起こることに着目し、接着層は厚さのみ考慮してコンクリートと同等の構成則を与え、コンクリートと AFRP の界面、および主鉄筋下面には境界要素として界面直角方向に図 3.4.3 に示される Discrete Cracking モデルを与えている (剥離面としてコンクリートと AFRP との境界付近、および主鉄筋下面を仮定)。

剥離方向の Discrete Cracking モデルは、界面直角方向の引張応力 σ_n がコンクリートの引張強度 f_d に達すると伝達されている応力が解放され、界面が開くモデルである。 ΔU_n は界面の法線方向の相対変位、 k_n は初期勾配であるが、開口前の要素間の連続性を保証するため、 k_n は解析が安定する範囲で出来るだけ大きな値を設定している。

界面せん断方向については、便宜的にせん断剛性を法線方向の k_n と同じ、すなわち、ずれは生じないと仮定し、界面が開くまでは線形とし、界面が開くとせん断方向の力も伝えないものとしてモデル化している。



(a) Discrete Cracking モデル

図 3.4.3 境界要素の構成則の例

図 3.4.4 (文献 3.4.6) に示す例では、鋼板、接着層をソリッド要素でモデル化し、接着層と鋼板の界面に接触条件を設定し、界面の破壊の条件は次式で判定している。なお、接着層内の凝集破壊は生じないことを確認の上、接着層は厚さを 1 分割でメッシュ分割している。

$$\left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^2 \geq 1$$

τ : 接着剤の面内方向に生じるせん断応力(N/mm²), σ : 接着剤の面外方向に生じる垂直応力(N/mm²),

τ_f : せん断破壊応力(N/mm²), σ_f : 垂直破壊応力(N/mm²)

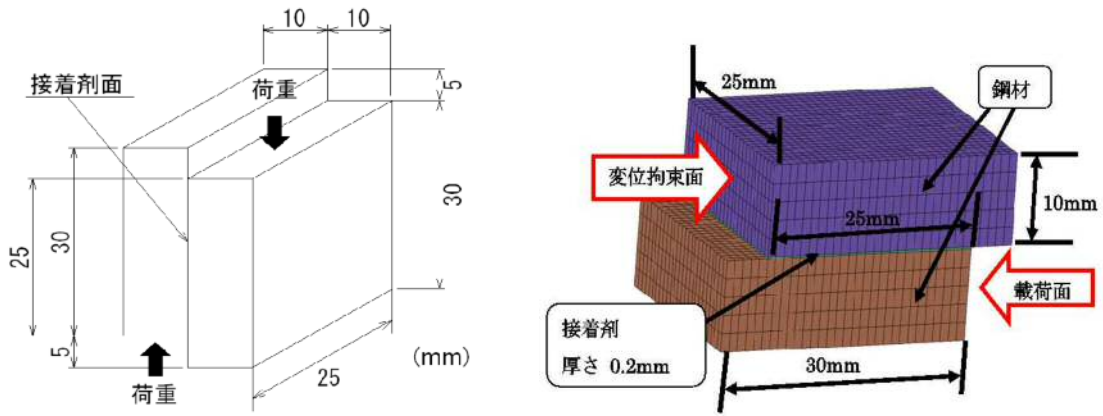


図 3.4.4 境界に接触条件を与えた解析の例

(2) 接着層をシェル要素，ソリッド要素でモデル化して評価する場合

接着材継手の接着層を，鋼材や CFRP 補強材と同様にシェル要素（2次元モデルの場合）やソリッド要素（3次元モデルの場合）でモデル化する場合，鋼材や CFRP 補強材と比較して接着層が相当に薄いこと，弾性係数が鋼材や CFRP 補強材と比較して相当に小さいことから，要素サイズに注意する必要がある。既往の FEM 解析による検討例では，接着層の厚さは 0.4 mm から最大でも 5 mm 程度，接着層の厚さは 2～10 層の要素でモデル化されており，要素サイズは小さいもので 0.05 mm×0.05 mm 程度のものもある。そのため，要素数や節点数が膨大となり，モデリングや解析時間に時間を有することが課題である。さらに，補強材端部の接着層のせん断応力および剥離応力が卓越するが，接着層をシェル要素，もしくはソリッド要素でモデル化する方法の場合，この部位はシャープエッジとなることから，応力特異場となることに注意が必要である。端部の応力はメッシュサイズに依存するため，応力の絶対値の評価，例えば解析により得られた応力値を接着材の強度と比較して破壊を判定するなどの評価は困難である。相対評価とするか，メッシュサイズの影響を十分に検討する等，注意が必要である。理論値と比較し，差がないことを確認した事例もある。

シャープエッジのメッシュサイズと応力特異点の応力の関係を図 3.4.5 に示すケースを対象に説明する。厚さ 20 mm の鋼材の両側に，厚さ 10 mm の鋼材を補強材として接着材で接合することを想定した継手である。モデルは 2 次元モデルとし，接着層の厚さは 1 mm と仮定した。メッシュサイズを 1.0 mm×1.0 mm（接着層を 1 層でモデル化）から 0.125 mm×0.125 mm（接着層を 8 層でモデル化）まで変化させ，応力特異点となる位置の応力の変化を確認した。母板および補強板の弾性係数は 200,000 N/mm²，ポアソン比は 0.3 とした。接着材の弾性係数は 3,600 N/mm²，ポアソン比は 0.25 とした。FEM 解析モデルの一例を図 3.4.6 に示す。対称性を考慮してモデルは 1/4 モデルとし，荷重は補強していない母材一般部の公称応力値が 100 N/mm² となるように与えた。

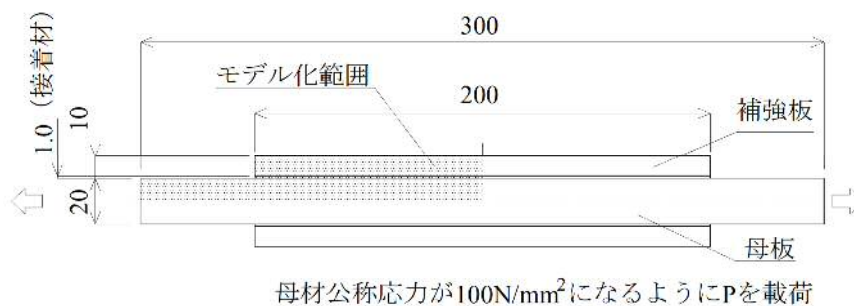
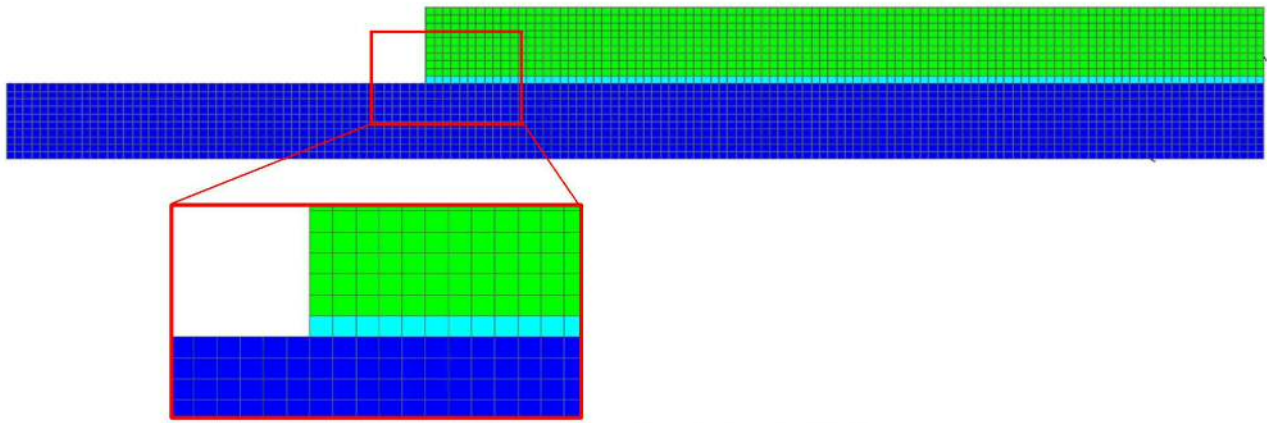
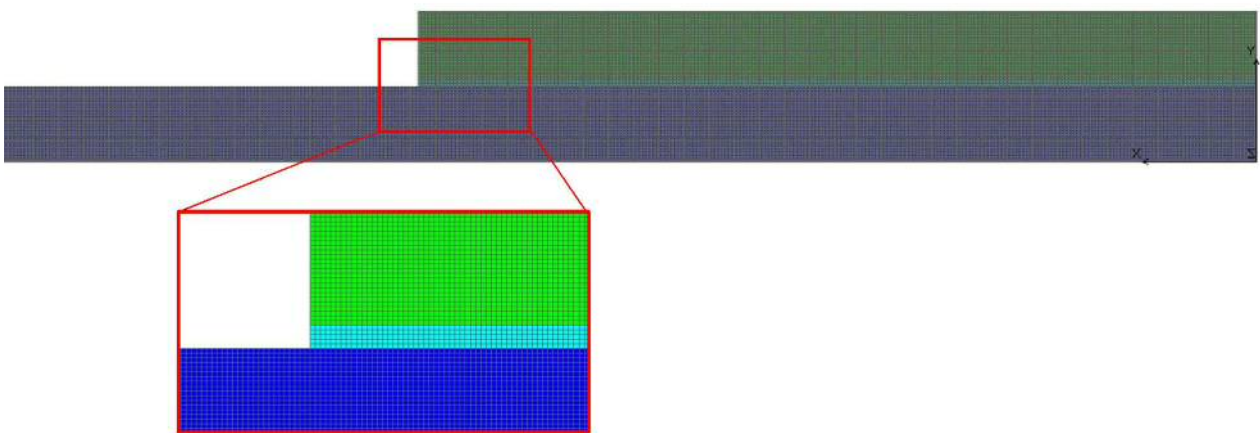


図 3.4.5 応力特異場におけるメッシュサイズと応力との関係を確認するための継手モデル



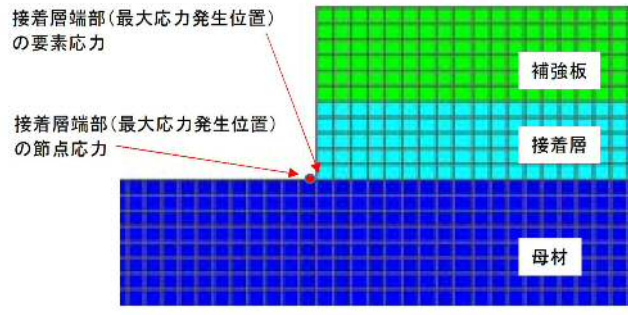
(1) 接着継手モデル1:接着層1mmを1層でモデル化 メッシュサイズ1.0×1.0mm



(2) 接着継手モデル5:接着層1mmを5層でモデル化 メッシュサイズ0.2×0.2mm

図 3. 4. 6 解析モデルの一例

各モデルの応力特異点の von Mises 応力値と、メッシュサイズの関係を図 3. 4. 7 に示す。メッシュサイズが細くなるほど、応力特異点の応力値が大きくなっていることが分かる。メッシュサイズが 1 mm のモデルから得られた応力値とメッシュサイズが 0.125 mm のモデルから得られた応力値を比べると、後者が前者の 2.0 倍程度となっている。このように、シャープエッジなど応力特異点の応力値はメッシュサイズに依存するため、その絶対値は評価できないことが分かる。



モデル名	接着材層のメッシュ分割数	メッシュサイズ [mm]	要素応力		節点応力	
			応力値 N/mm ²	モデル1との比率	応力値 N/mm ²	モデル1との比率
接着継手モデル1	1	1.000	29.0	1.00	29.8	1.00
接着継手モデル2	2	0.500	29.3	1.01	35.1	1.18
接着継手モデル3	3	0.333	32.4	1.12	42.3	1.42
接着継手モデル4	4	0.250	35.6	1.23	47.5	1.59
接着継手モデル5	5	0.200	38.5	1.08	51.5	1.09
接着継手モデル6	6	0.167	41.1	1.42	54.8	1.84
接着継手モデル7	7	0.143	43.4	1.50	57.7	1.94
接着継手モデル8	8	0.125	45.5	1.57	60.2	2.02

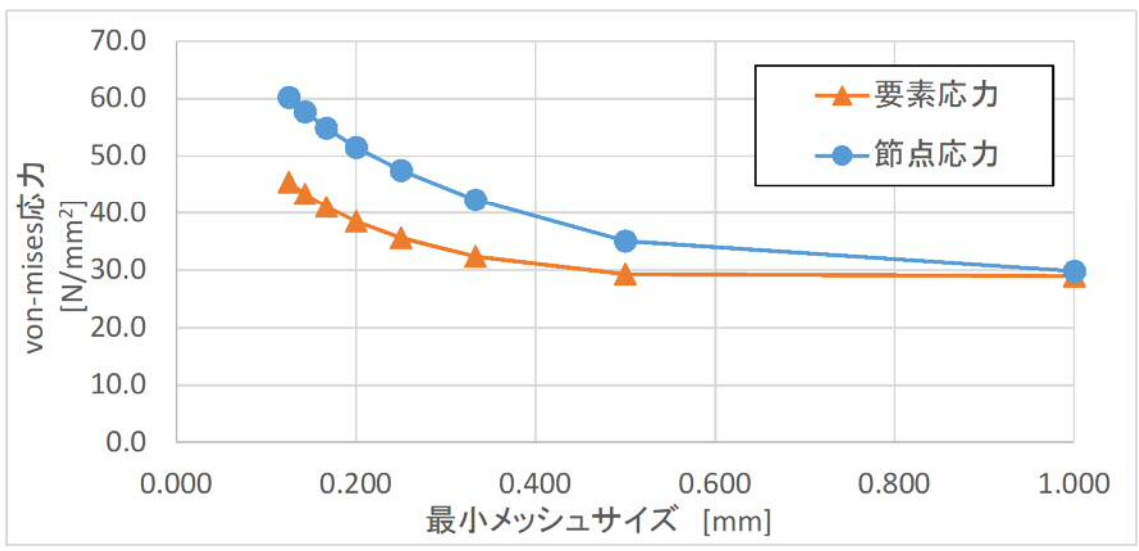
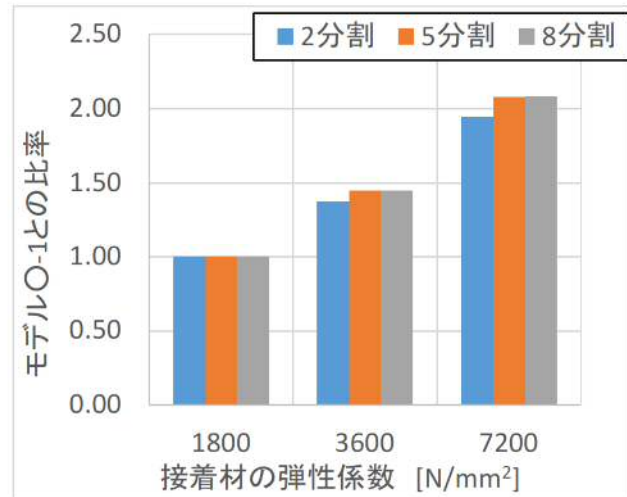
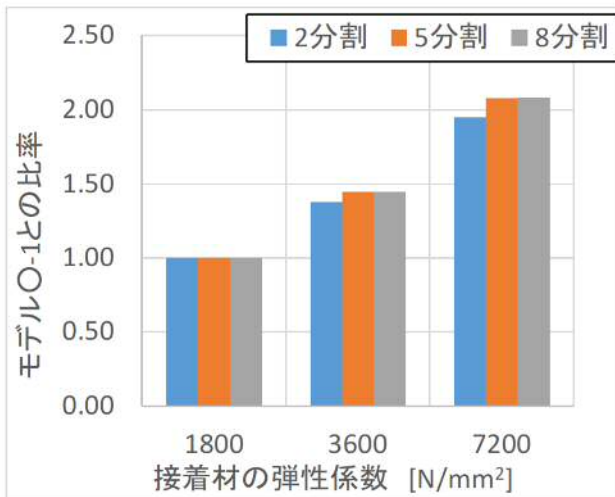
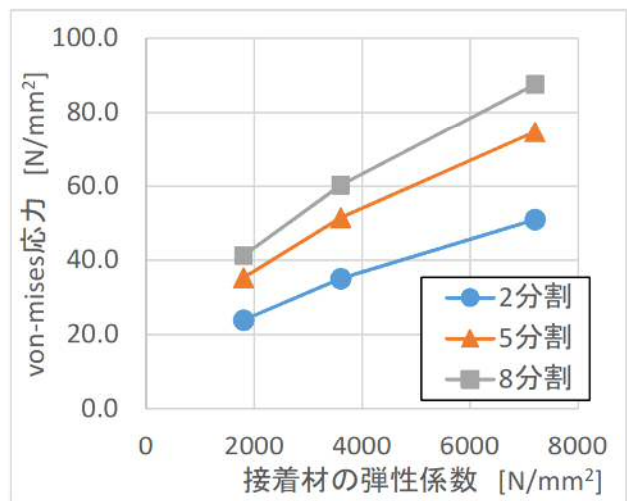
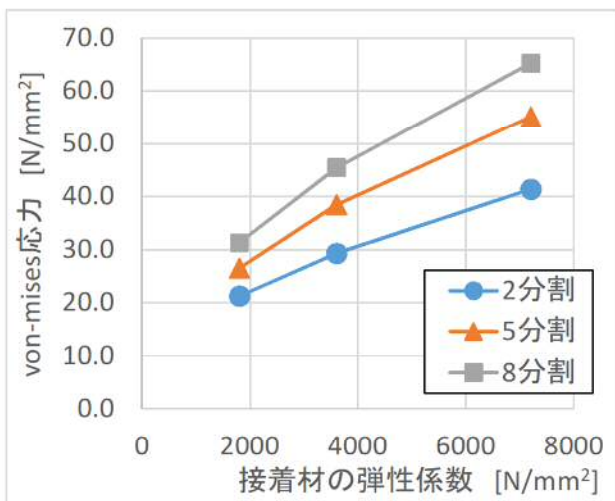


図 3.4.7 応力特異点の応力値とメッシュサイズの関係

一方で、応力の相対的な評価であれば、応力特異点であっても FEM 解析による評価がある程度は可能である。例えば、接着材の弾性係数が接着材端部の応力に与える影響を、図 3.4.5～3.4.6 のモデルを用いて検証することを考える。メッシュサイズを 0.5 mm×0.5 mm とした場合（モデル 2：接着層を厚さ方向に 2 分割）、0.25 mm×0.25 mm とした場合（モデル 5：接着層を厚さ方向に 4 分割）、0.125 mm×0.125 mm とした場合（モデル 8：接着層を厚さ方向に 8 分割）において、接着材の弾性係数をパラメータとして解析した結果を図 3.4.8 に示す。前述のとおり、応力の絶対値は要素サイズに依存するが、接着材の弾性係数の影響を考えた場合、弾性係数 1800 N/mm² の場合（モデル O-1）に対する他の弾性係数の比率はどの要素サイズでも大きな差はないことが分かる。いずれの要素サイズにおいても、弾性係数を 2.0 倍とすれば接着材端部応力は 1.4 倍前後、弾性係数を 4.0 倍とすれば接着材端部応力は 2 倍前後となっている。特に、モデル 2 とモデル 5 では比率はほとんど同じであり、要素分割を適切に設定すれば、相対的な評価については可能であると考えられる。

モデル名	接着材層のメッシュ分割数	メッシュサイズ [mm]	接着材層ヤング係数 N/mm^2	要素応力		節点応力	
				応力値 N/mm^2	モデルO-1との比率	応力値 N/mm^2	モデルO-1との比率
モデル2-1	2	0.500	1800	21.2	1.00	23.9	1.00
モデル2-2			3600	29.3	1.38	35.1	1.47
モデル2-3			7200	41.4	1.95	51.0	2.13
モデル5-1	5	0.250	1800	26.5	1.00	35.3	1.00
モデル5-2			3600	38.5	1.45	51.5	1.46
モデル5-3			7200	55.2	2.08	74.6	2.11
モデル8-1	8	0.125	1800	31.3	1.00	41.3	1.00
モデル8-2			3600	45.5	1.45	60.2	1.46
モデル8-3			7200	65.3	2.08	87.5	2.12



(1) 要素応力

(2) 節点応力

図 3.4.8 応力特異点の相対的な評価の例

接着材のモデル化には関係ないが、円孔など、シャープエッジでなく理論値が計算で求められる形状であれば、メッシュサイズがある程度細かければ応力の絶対値を評価することが可能である。ここでは、図 3.4.9 に示す直径 20 mm の円孔を有する幅 100 mm の帯板モデルを対象として説明する。対称性を考慮し、1/4 を解析対象とした。板厚は 10 mm と仮定し、公称応力値が 100 N/mm² となるように荷重を載荷した。円孔周りのメッシュサイズをパラメータとし、1/4 円を 2 分割するモデルから、32 分割するモデルまで調査した。モデルの一例を図 3.4.10 に示す。

ここで、このケースにおける円孔壁の最大応力値は、式(1),(2)により近似解として与えられる（文献 3.4.15）。

$$\alpha = 2 + \left(\frac{b-\rho}{b}\right)^3 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_A = \alpha \times \sigma_o \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

α : 円孔部の純断面積応力に対する円孔壁の応力集中度

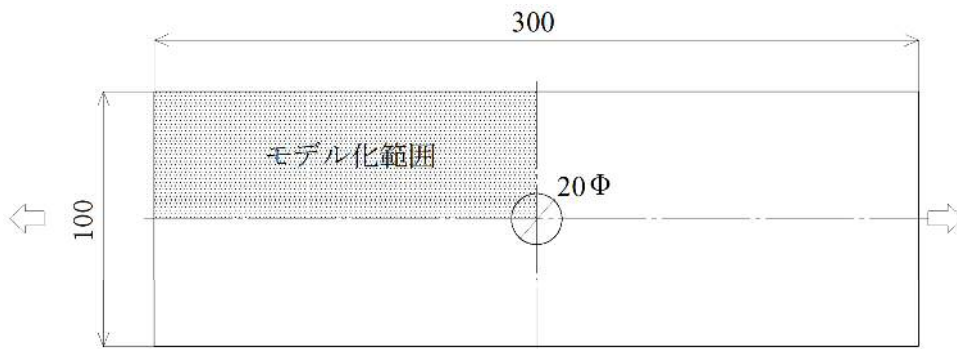
b : 帯板の板幅

ρ : 円孔の半径

σ_A : 円孔壁の最大応力

σ_o : 純断面積における公称応力

式(1),(2)に $b = 50 \text{ mm}$, $\rho = 10 \text{ mm}$, $\sigma_o = 125 \text{ N/mm}^2$ (総断面積における公称応力値 100 N/mm²) を代入すると、 $\alpha = 2.512$, $\sigma_A = 314 \text{ N/mm}^2$ と算出される。

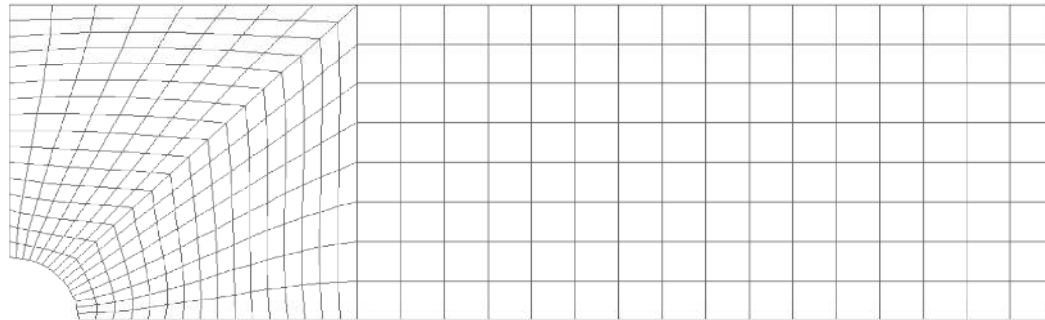


母材公称応力が100N/mm²になるようにPを載荷

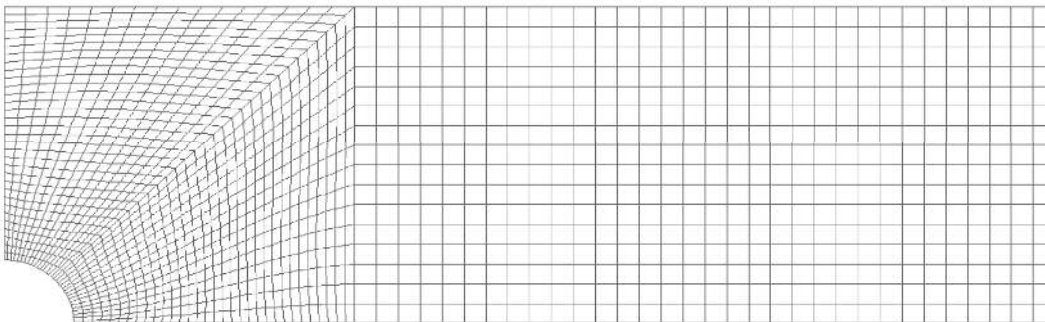
図 3.4.9 メッシュサイズと円孔壁の応力との関係を知るための有限帯板に円孔を有する解析対象



(1) 円孔モデル1: 1/4円を2分割



(2) 円孔モデル8: 1/4円を16分割



(3) 円孔モデル16: 1/4円を32分割

図 3.4.10 円孔モデルの一例

解析結果の一例を図 3.4.11 に、1/4 円あたりのメッシュ分割数と円孔壁の応力値の関係を図 3.4.12 に示す。メッシュが細かくなると、円孔壁の応力値は近似値にほぼ収束していくことが分かる。1/4 円を 10 分割したモデルでは近似値との差は 3%であり、14 分割以上であれば近似値との差は 1%以内となる。

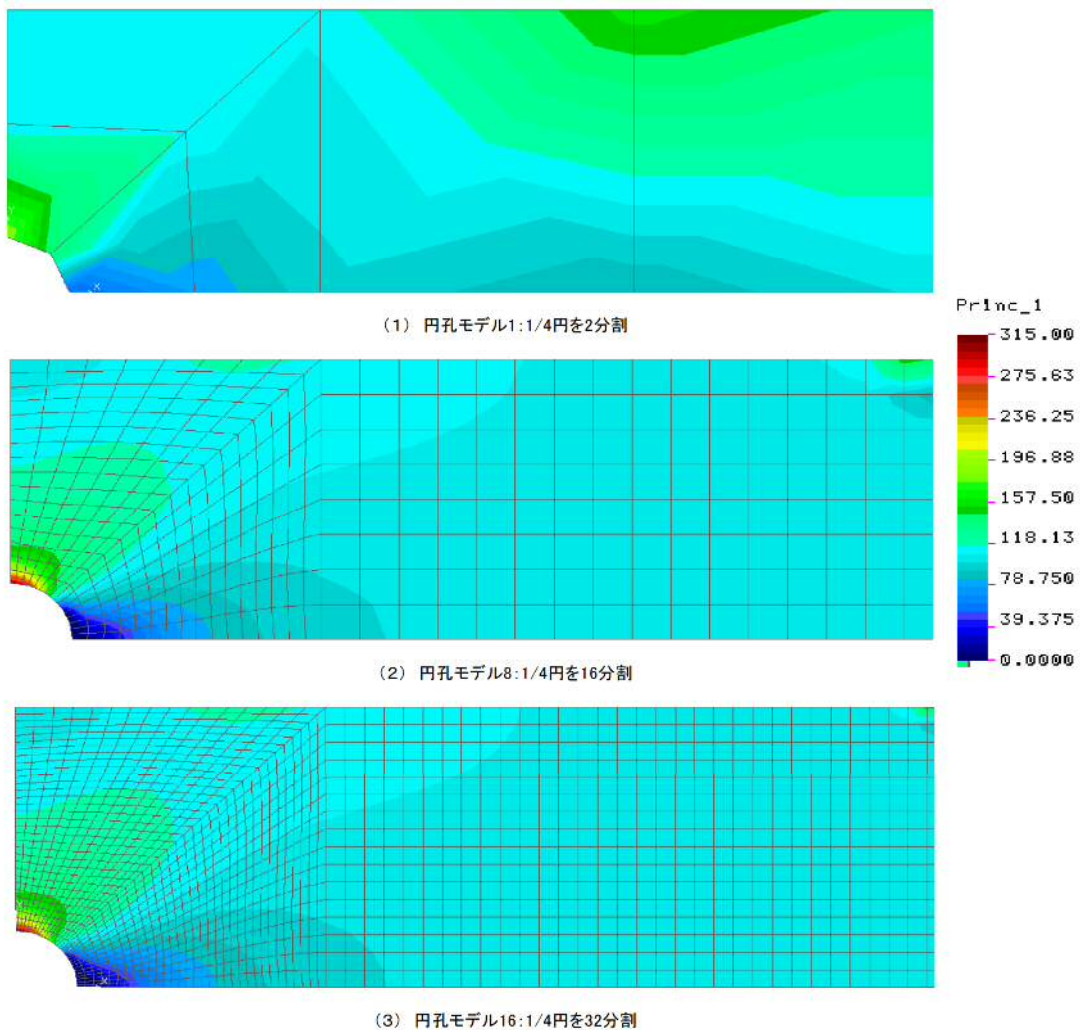


図 3. 4. 11 解析結果の一例

モデル名	1/4円あたりの要素分割数	①FEM 応力値 [N/mm ²]	比率 ①/②	②近似式による理論値 [N/mm ²]
円孔モデル1	2	181.76	0.579	314
円孔モデル2	4	247.62	0.789	
円孔モデル3	6	280.8	0.894	
円孔モデル4	8	296.43	0.944	
円孔モデル5	10	304.6	0.970	
円孔モデル6	12	309.17	0.985	
円孔モデル7	14	311.89	0.993	
円孔モデル8	16	313.62	0.999	
円孔モデル9	18	314.77	1.002	
円孔モデル10	20	315.56	1.005	
円孔モデル11	22	316.13	1.007	
円孔モデル12	24	316.54	1.008	
円孔モデル13	26	316.84	1.009	
円孔モデル14	28	317.07	1.010	
円孔モデル15	30	317.24	1.010	
円孔モデル16	32	317.37	1.011	

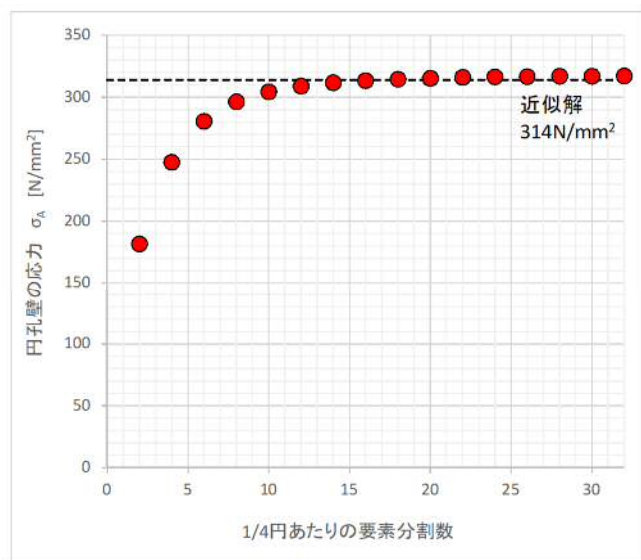
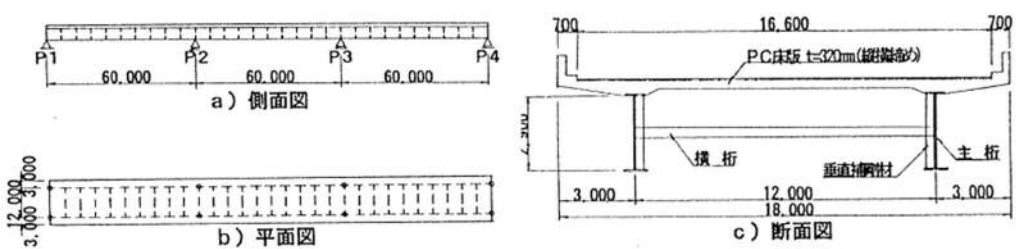
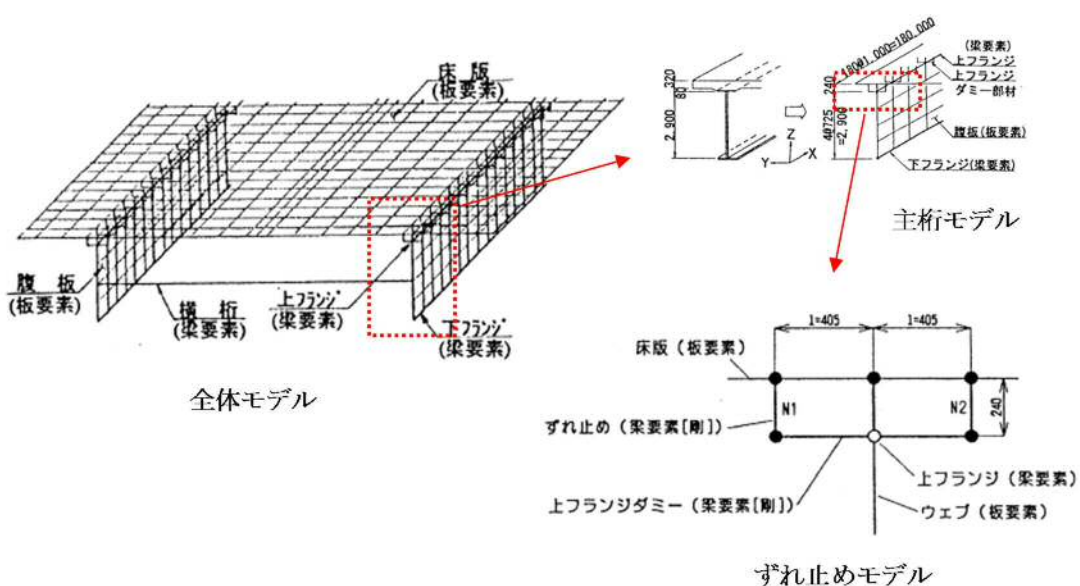


図 3. 4. 12 メッシュサイズと円孔壁の応力の関係

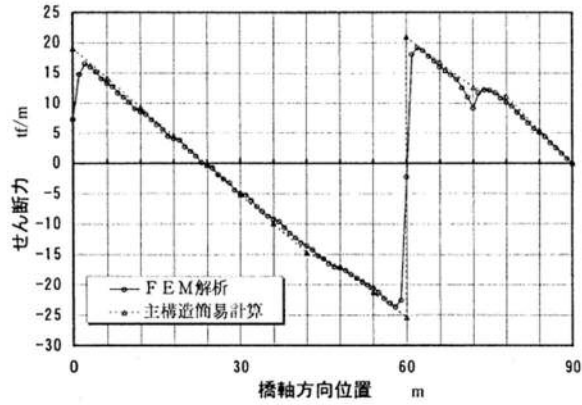
参考文献

- 文献 3.4.1 佐野正, 三浦尚: 鋼板接着によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.117-229, 1996.11
- 文献 3.4.2 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介, 張広鋒: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の破壊挙動に関する非線形数値解析, 応用力学論文集, Vol.4, pp.333-344, 2001.8
- 文献 3.4.3 杉山裕樹, 森川英典: 付着破壊特性を考慮した連続繊維シート補強 RC はりの有限要素解析, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集, pp.1088-1089, 2001.10
- 文献 3.4.4 山田真司, 張広鋒, 岸徳光, 三上浩: 繊維強化方向の異なる側面接着シートを有する AFRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊挙動に関する数値解析, 土木学会第 60 回年次学術講演会概要集, pp.1031-1032, 2005.9
- 文献 3.4.5 内田雅俊, 岸徳光, 張広鋒, 三上浩: FRP シート下面接着 RC 版の耐荷性状に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1435-1440, 2006
- 文献 3.4.6 山田稔, 白石康隆, 長嶋文雄: 炭素繊維補強における接着面のせん断破壊応力に関する検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会概要集, pp.909-910, 2008.9
- 文献 3.4.7 杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣: 鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究, 土木学会論文集 A, Vol.64A, No.4, pp.806-813, 2008.11
- 文献 3.4.8 中村一史, 姜威, 前田研一, 鈴木博之, 入部孝夫, 福田欣弘: CFRP 板接着により補修された面外ガセット溶接継手部き裂の疲労寿命予測, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.842-851, 2011.3
- 文献 3.4.9 氏家友哉, 岸徳光, 三上浩, 小室雅人: AFRP シート緊張接着 RC 梁の耐荷挙動に関する数値解析的研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集, pp.339-340, 2011.9
- 文献 3.4.10 石川敏之, 富田貴大, 服部篤史, 河野広隆, 長尾隆史, 小林朗: CFRP 板が片面に接着された鋼部材に生じる熱応力の低減, 土木学会論文集 A2, Vol.68, No.2, pp.1703-1714, 2012
- 文献 3.4.11 宮下剛, 石川敏之: 多層の CFRP 板が積層された曲げを受ける鋼部材の応力解析, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.1, pp.26-39, 2013
- 文献 3.4.12 複合構造委員会・FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会: FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.5, pp. II 120- II 133, 2014
- 文献 3.4.13 臼井瑛人, 北根安雄, 石川敏之, 伊藤義人: 軸力が作用する CFRP 接着補修鋼板に対する CFRP 板のせん断変形を考慮した理論解析, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.798-807, 2015.3
- 文献 3.4.14 中村一史, 手塚渉太, タイウィサル: CFRP 板と鋼板の接着接合部の疲労耐久性評価, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.906-914, 2016.3
- 文献 3.4.15 西田正孝: 応力集中, 森北出版株式会社, 1967.8

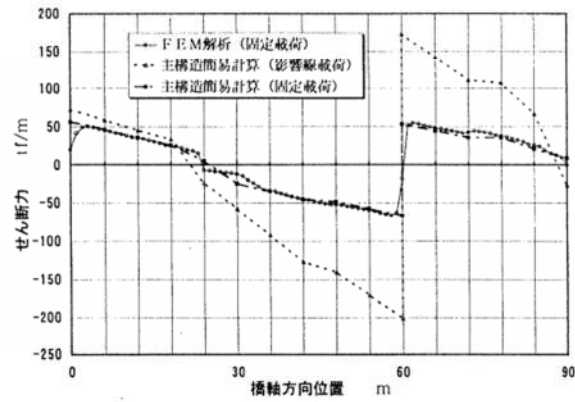
大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	連続合成2主桁橋のずれ止め設計に関する一考察		
著者	大垣賀津雄, 川口喜史, 八部順一, 長井正嗣		
公開年次	1997年9月	出典	鋼構造論文集, 第4号第15巻
解析の目的	死, 活荷重等の鉛直荷重と風荷重の水平力を作用させた立体FEM解析の結果から, ずれ止めの作用力を明らかとする。		
解析対象	3径間連続合成2主桁橋を対象としている。 		
解析モデルの概要			
使用要素	主桁ウェブ・床版：シェル要素 その他部材：はり要素		
ずれ止め部材	床版厚の1/2+ハンチ高さの長さを持つはり要素でモデル化し, 曲げに対し剛な部材でモデル化		
解析モデル			

解析結果

解析結果



a) 合成後死荷重 (D_2)



b) 合成後死荷重+活荷重 (D_2+L)

軸方向せん断力分布

備考

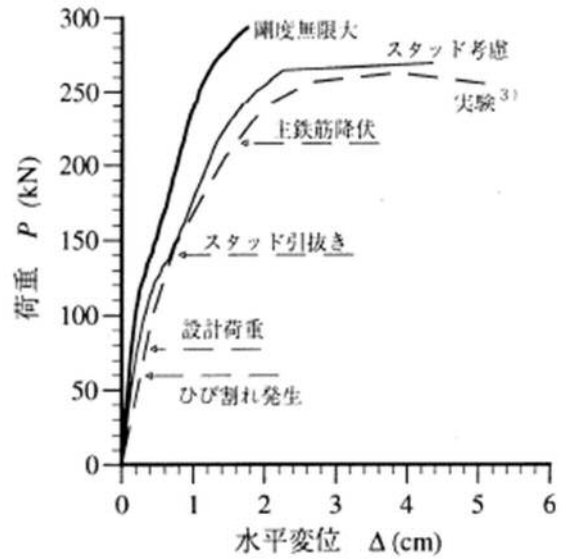
簡易なモデルとなっているが、ずれ止めの要素が曲げに対して剛なため、スタッドの曲げ変形は考慮できないモデルとなっている。

大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	スタッドの非線形特性を考慮した2主鋼桁と鉄筋コンクリート橋脚の結合部の有限要素解析		
著者	劉玉攀, 彦坂熙, 黄玲		
公開年次	1998年8月	出典	応用力学論文集, Vol. 1
解析の目的	鋼・コンクリート複合ラーメン橋のRC橋脚の剛結部の破壊挙動を検討する		
解析対象	2種鋼桁とRC橋脚の剛結部試験を対象としている。		
解析モデルの概要			
使用要素	橋脚のコンクリート, 鋼主桁のウェブ: シェル要素 鉄筋, 主桁: はり要素		
応力-ひずみ関係	コンクリート: 圧縮ひずみ硬化および軟化を考慮した非線形モデル 鉄筋, 主桁: パイリニアモデル スタッド: 実験結果をもとにした非線形リンク要素		
解析モデル	横桁ウェブおよび主桁フランジのはり要素の節点とコンクリート要素の節点の間には, スタッドの相対ずれおよび軸方向変形を表すためのリンク要素が設けられている. 一方, 鋼主桁ウェブ要素とコンクリート要素の節点間には, 全体座標系に対応するxおよびy方向のスタッドの相対ずれを表現するためのリンク要素を配する.		

解析結果

実験結果
との比較

スタッドを考慮した解析結果は、降伏荷重を経て最大荷重に至る実験包絡線を概ねシミュレートできている。



結果概要

当モデルにより、剛結部の破壊までの挙動をシミュレートできることを確認し、実験では観察し難いスタッドの終局破壊までの作用分布と変形挙動を、供試体全体の破壊特性と結び付けて考察している。

備考

当モデルでは、スタッドをばね系非線形リンク要素でモデル化している。鋼板面内の任意方向の相対ずれ剛度を、全体座標系に対応する非線形ばね剛度を用いて評価するとともに、鋼板面内のスタッドのせん断作用と面外の軸方向作用をそれぞれ相対ずれおよび軸変形に抵抗する直交ばねにより再現している。

大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	橋軸直角方向力による合成桁ずれ止めの挙動の把握に関する研究		
著者	中島章典, 斉木功, 安中真紀, 和田敏雄, 吉田育生		
公開年次	2000年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 46A
解析の目的	合成桁橋の橋軸直角面内応力伝達がずれ止めとしてのスタッドに与える影響を明らかにする。		
解析対象	<p style="text-align: right;"><単位: mm></p>		
解析モデルの概要			
モデル概要	離散化モデルである剛体ばねモデル		
使用要素と 接続ばね	コンクリート梁・鋼フランジ・ウェブ：梁要素 コンクリート床版同士の剛体間：軸ばね・せん断ばね フランジ-ウェブの鋼部分同士の剛体間：軸ばね・せん断ばね・回転ばね コンクリート床版-鋼桁上フランジ間，フランジ-補剛材間：水平ばね・鉛直ばね		
解析モデル	<p style="text-align: center;">剛体ばねモデル概要</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>軸ばね せん断ばね</p> <p>コンクリート床版間要素</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>軸ばね せん断ばね 回転ばね</p> <p>フランジ間要素</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>水平ばね 鉛直ばね</p> <p>コンクリート・フランジ間要素</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>水平ばね 回転ばね 鉛直ばね</p> <p>フランジ・ウェブ間要素</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">フランジ・補剛材間要素</p> <p style="text-align: center;">接続ばね概要</p>		

解析結果

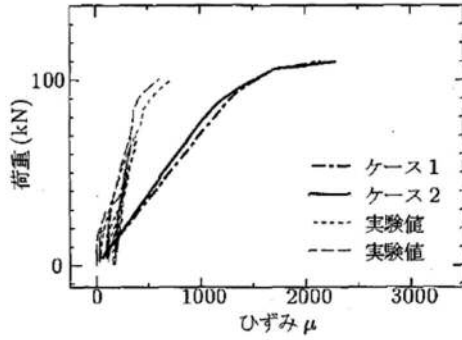


図-22-a 外側スタッド

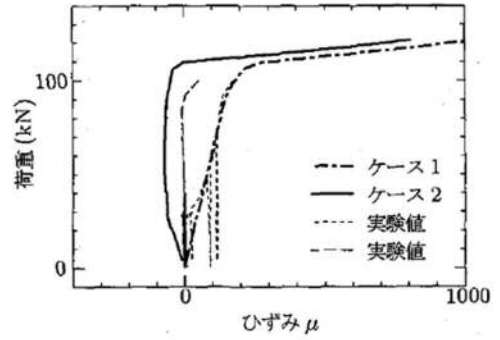
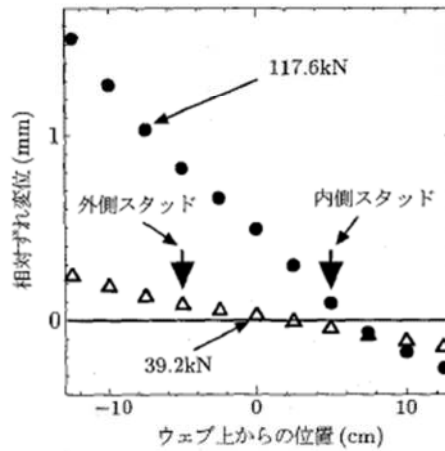


図-22-b 内側スタッド

スタッドの軸ひずみ

解析結果



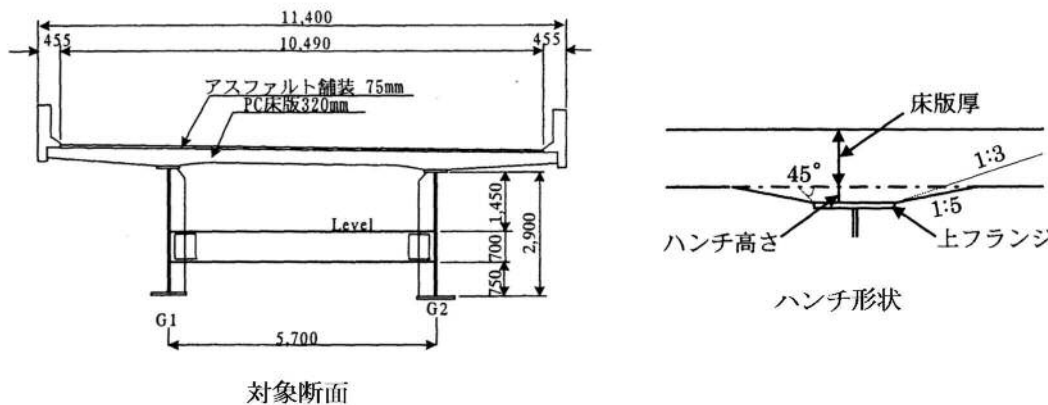
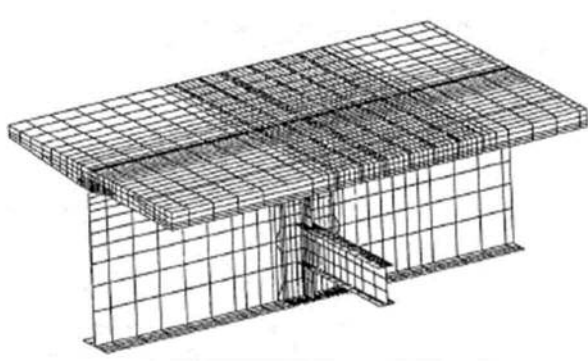
支圧ばねの相対変位

結論概要

解析精度に改善の余地を残すものの、初期荷重段階における橋軸直角方向力を受けるスタッドの挙動の定性的傾向を把握できた。要素試験で得られた実験式を用いることによって、軸引張力を受けるスタッドの実験結果をより良く追跡できた。

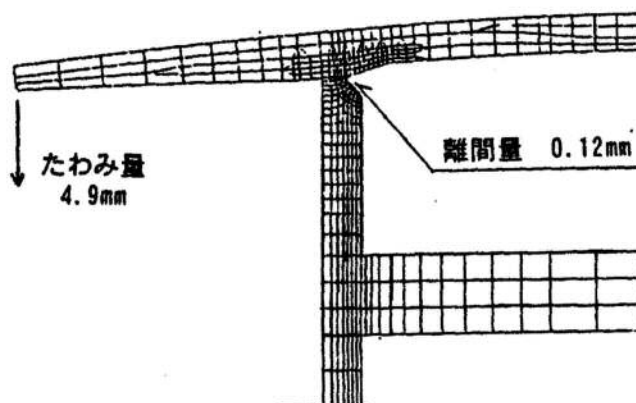
備考

要素試験結果を用いて剛体ばねモデルを作成することにより、よりマクロなモデルの挙動を簡易的に再現可能なモデル化手法であり、汎用性が高いと考えられる。

大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	PC床版連続合成2主桁橋の合理的設計・施工法		
著者	大垣賀津雄, 八部順一, 中齒明広, 中村元, 長井正嗣		
公開年次	2001年6月	出典	土木学会論文集, No. 679/VI-51
解析の目的	床版施工時のフランジと床版の界面に剥離が生じる事例が見られることから, 対策方法を施工時計測結果とFEM解析結果より検討するため.		
解析対象			
解析モデルの概要			
使用要素	床版コンクリート: ソリッド要素 主桁・横桁: シェル要素 PC鋼線: 棒要素 スタッド: 梁要素		
界面	上フランジ上面にギャップ要素を設定		
解析モデル			

解析結果

解析結果



壁高欄載荷時の断面変形図

スタッド発生応力

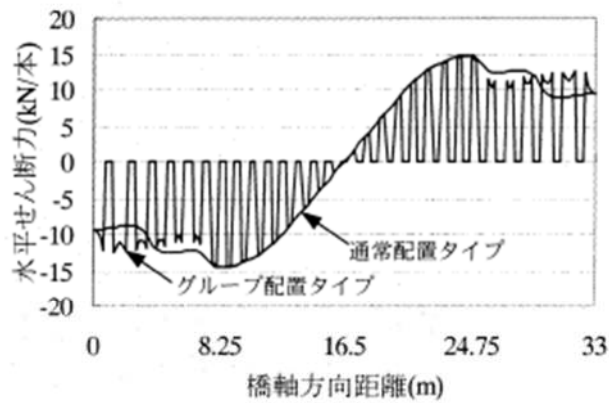
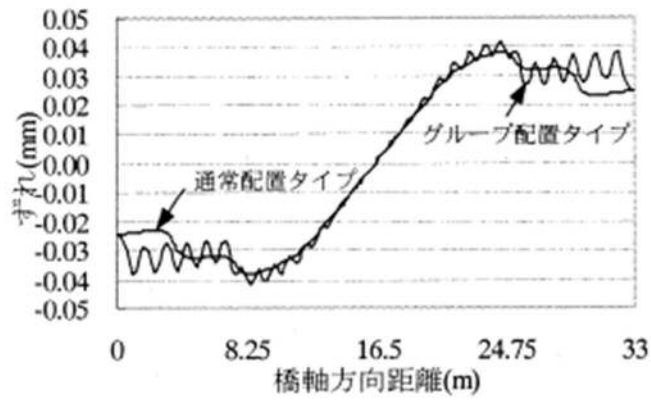
スタッド 位置	PC 軸力導入時		壁高欄施工時	
	計測値	解析値	計測値	解析値
支間側	-0.4	-1.7	25.6	70.7
腹板直上	0.6	2.0	-5.0	-0.9
張出側	0.4	0.8	-11.5	1.5

備考

鋼桁と床版間にギャップ要素を設けることにより、圧縮力の伝達が可能。ギャップ要素の条件によって初期付着や摩擦力の考慮も可能となる。

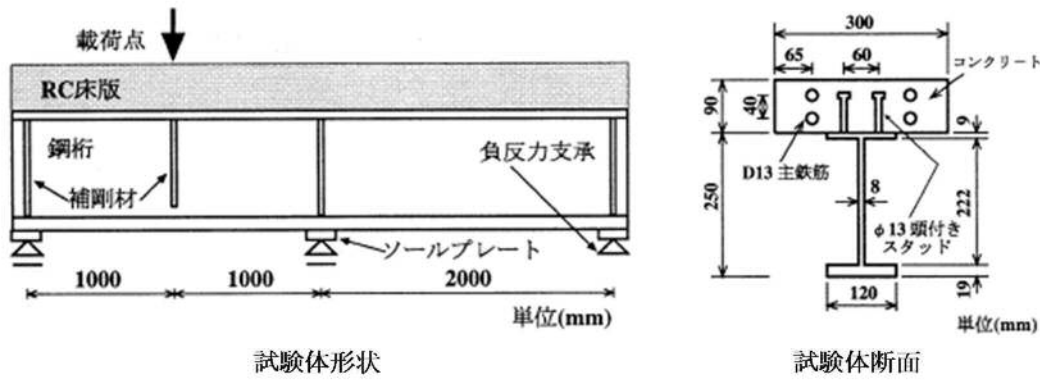
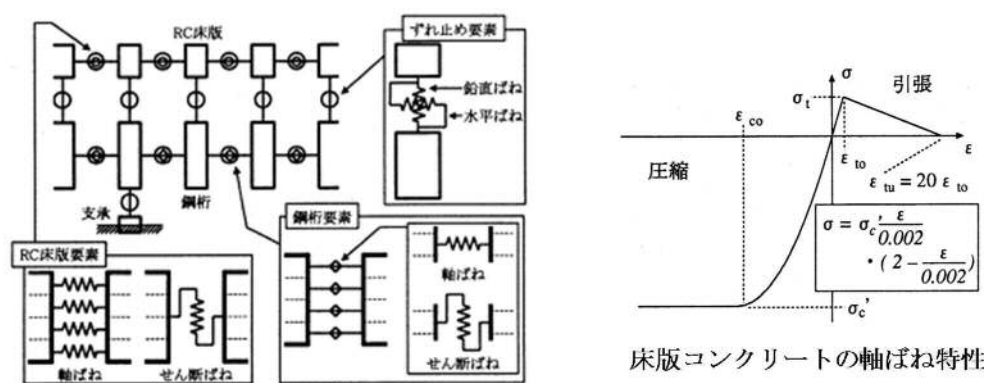
解析結果

解析結果



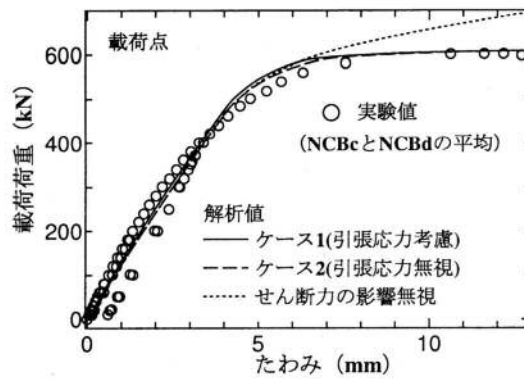
備考

断続弾性合成理論を用いることにより、桁要素ごとにばね定数を与えずれ変形などが、個々のスタッドをモデル化せずとも詳細に解析可能な利点を有する。一方で断続弾性合成理論を用いた数値解析を実施するには、定式化の理解が必要であり技術者の専門性が要求されると考えられる。

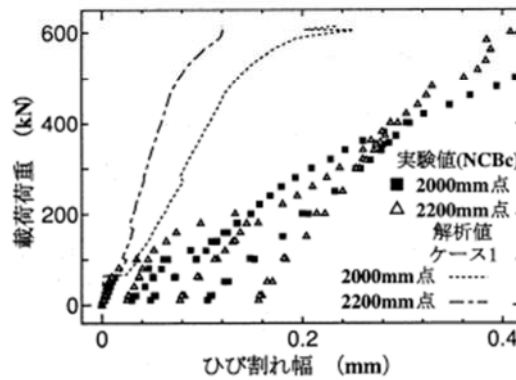
大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	連続合成桁の弾塑性挙動についての実験と数値解析の比較		
著者	中島章典, 浅井貴幸, 齐木功		
公開年次	2003年12月	出典	鋼構造論文集, 第10巻第40号
解析の目的	連続剛性桁の負曲げ領域の力学特性の把握。2径間連続合成桁試験体の静的荷重試験結果と、剛体ばねモデルを用いた数値解析結果を比較し、さらに終局状態までの比較を通して、RC床版のひび割れ幅の算定を試みる。		
解析対象	 <p style="text-align: center;">試験体形状</p> <p style="text-align: center;">試験体断面</p>		
解析モデルの概要			
解析手法	剛体ばねモデル解析		
解析モデル	 <p style="text-align: center;">剛体ばねモデル概要</p> <p style="text-align: right;">床版コンクリートの軸ばね特性</p>		

解析結果

解析結果



載荷点 荷重-変位関係



載荷荷重-ひび割れ幅関係

結論概要

剛体ばねモデル解析が終局状態まで鋼桁に局部座屈などが生じない連続合成桁の負曲げ領域を含む弾塑性挙動やひび割れ幅の概算値をある程度推定できることを示した。

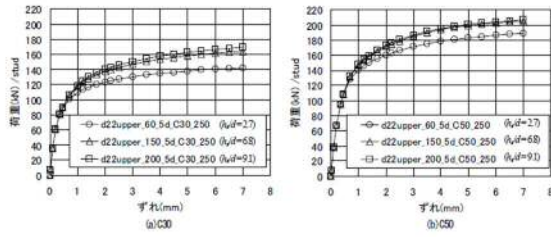
備考

2径間連続合成桁試験体の静的載荷試験結果と剛体ばねモデルを用いた数値解析結果の比較により、終局状態までの挙動をある程度推定できている。鉄筋ひずみ、ひび割れ幅の精度には改善の余地が見られるものの、鉄筋と床版コンクリートの付着すべりやコンクリート床版の乾燥収縮の影響などのモデル化により、より精度の良い数値解析手法となることが期待される。

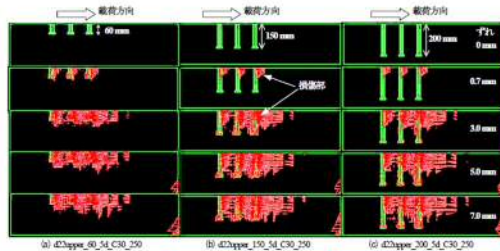
大分類	ずれ止め	小分類	スタッド
論文題目	密にグループ配列した頭付きスタッドの寸法および強度のせん断耐荷性能に及ぼす影響と床版断面のせん断耐荷力評価		
著者	岡田淳, 依田照彦		
公開年次	2006年7月	出典	土木学会論文集A, Vol. 62, No. 3
解析の目的	スタッドの寸法および強度の影響に着目した解析的検討を実施し, 破壊モードと関連付けてこれらのパラメータがせん断耐荷性能に及ぼす影響について考察。		
解析対象	<p>押し抜きせん断試験の供試体を対象とする。</p> <p>単位: mm</p> <p>鉄筋: D14</p> <p>鋼桁: HEM260 フランジ厚: 32.5 ウェブ厚: 18</p>		
解析モデルの概要			
モデル化方法	上記押し抜きせん断試験の試験体を, 対称性を考慮した1/4モデルとする。		
使用要素	コンクリート・鋼桁フランジ・スタッド: ソリッド要素 鋼桁ウェブ: シェル要素 鉄筋: 埋め込み鉄筋要素 鋼桁-コンクリート間・スタッド-コンクリート間: インターフェイス要素		
応力-ひずみ関係	下記に示す, 非線形モデルを使用. コンクリートの破壊基準はDrucker-Pragerの破壊基準を用いている. スタッドおよび鉄筋の降伏判定には, von Misesの降伏基準を用いている。		
解析モデル	<p>解析モデル</p> <p>応力 σ (N/mm²)</p> <p>ひずみ ϵ</p> <p>スタッドの構成則</p> <p>コンクリートの構成則</p> $\frac{\sigma}{f_c} = \frac{k \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c1}} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c1}} \right)^2}{1 + (k-2) \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c1}} \right)}$ $k = (1.1E_c) \left(\frac{\epsilon_{c1}}{f_c} \right)$		

解析結果

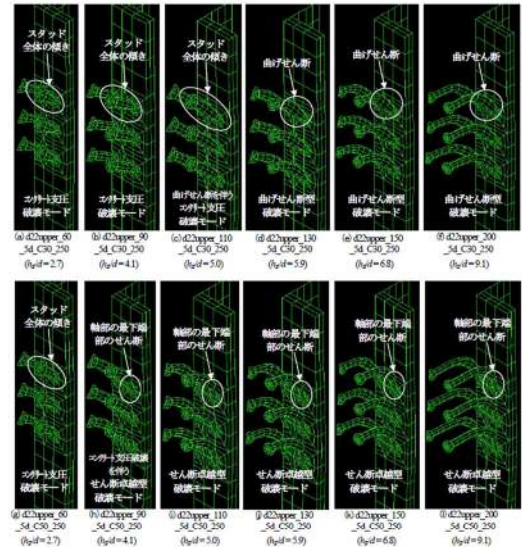
解析結果



荷重-ずれ関係



コンクリート床版断面の損傷状況




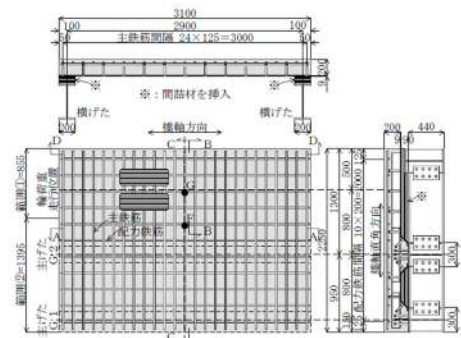
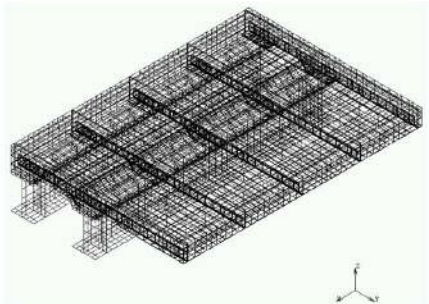
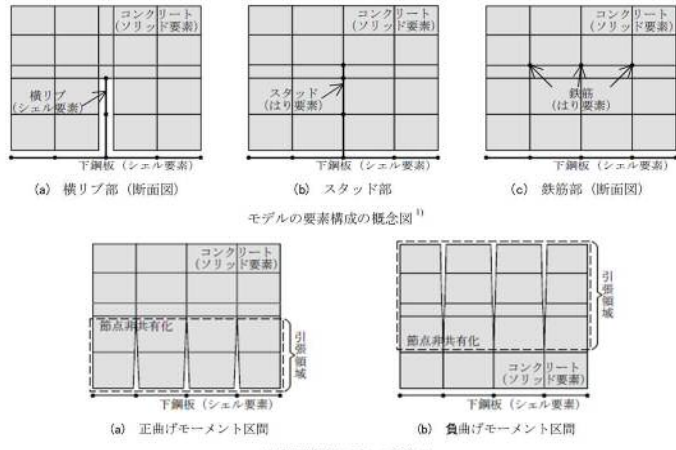
スタッドの変形モード

結論概要

各パラメータの差異によるコンクリートおよびスタッドの破壊モードを明らかとし、グループ配列したスタッド群による床版の終局的なせん断破壊に対する照査が可能。

備考

スタッドをソリッド要素で詳細にモデル化することにより、複雑なモデルとなっているが、スタッドの強度や長さなどのパラメータの違いによる変形モードの差異の再現が行えるが、橋梁全体などの解析手法に流用することは解析時間等の問題から推奨できない。

大分類	スタッド	小分類	頭付きスタッド
論文題目	鋼・コンクリート合成床版の張出し部の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析による疲労耐久性評価		
著者	街道浩, 田坂裕一, 橋吉宏, 松井繁之, 堀川都志雄		
公開年次	2007年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 53A
解析の目的	細部まで忠実に再現した3次元モデルを用いたFEM解析を実施し, 走行試験の測定値との比較から張出し部のたわみや各部位のひずみなどの挙動を照査する.		
解析対象	走行試験を実施した張出し部を有する合成床版の試験体を対象とした.		
	 <p>試験体写真</p>	 <p>試験体配筋図</p>	
解析モデルの概要			
解析コード	MSC Marc		
使用要素	床版コンクリート: ソリッド要素 下鋼板・横リブ: シェル要素 スタッド・鉄筋: はり要素		
応カーひずみ関係	材料試験試験結果より決定.		
コンクリートのモデル	全断面有効モデルと, 引張領域無視モデルの2種で検討. また, 横リブや下鋼板との接触判定も行う.		
解析モデル	 <p>解析モデル</p>		
	 <p>モデルの要素構成の概念図¹⁾</p> <p>引張領域無視モデルの概念図</p>		

解析結果

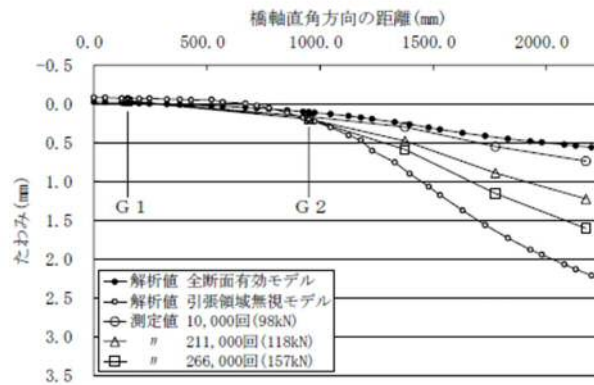


図-9 橋軸直角方向のたわみ分布の比較 (C-C断面)

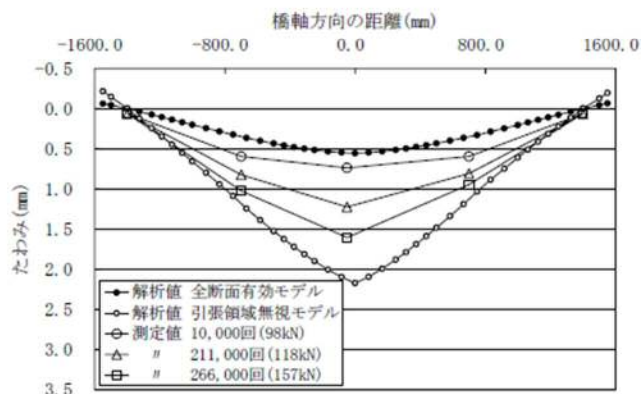


図-10 橋軸方向のたわみ分布の比較 (D-D断面)

実験結果との比較

結論概要

走行試験を実施した結果と、解析の比較を通して、試験体のたわみ分布を解析的にも把握できることを示している。

備考

接触要素判定を考慮した、細部まで忠実に表現した解析モデルとなっている。

大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	合成桁ずれ止めのFEMモデル化と曲げ部材の弾塑性挙動		
著者	森田哲夫, 山沢哲也, 野上邦榮		
公開年次	2007年9月	出典	土木学会年次学術講演会, CS02-002, 第62回
解析の目的	解析コスト削減のため, スタッド部の精緻な有限要素に代替するずれ止め挙動再現可能な簡易なばね系の提案.		
解析対象	スタッド配置の異なる3つの合成桁試験体 (CaseA, CaseB, CaseC) 		
解析モデルの概要			
解析ソフト	MSC. MARC2005r2		
使用要素	スタッド: ソリッド要素 (精緻なモデル), ばね要素 (簡易なばね系) その他: ソリッド要素		
材料構成則	鋼材, コンクリートともに材料試験結果を適用		
解析モデル (ソリッド)	摩擦力は線形摩擦モデル (勾配 $\mu = 0.25$) 付着考慮なし 		
	要素分割	鉄構成則	コンクリート構成則
			摩擦モデル
解析モデル (ばね系)	平面方向抵抗力の大きい $h \leq 30\text{mm}$ の範囲に対し, ソリッド要素FEM解析での接触力, 摩擦力と節点変位から得られた非線形ばね係数を適用した3本のばねを配置 		
	ばね系モデル		平面非線形ばね係数 ($h=30\text{mm}$)

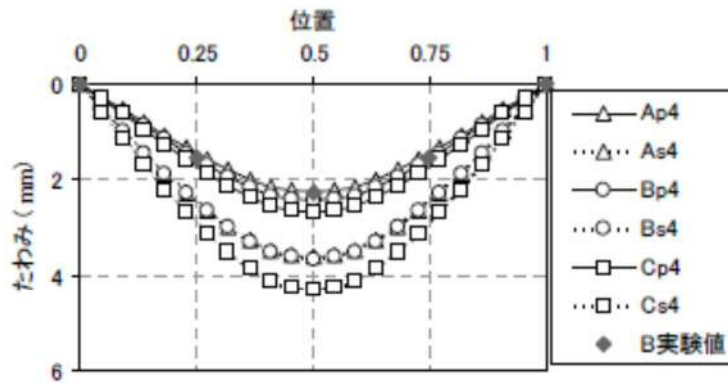
解析結果

支持条件を単純支持・ピン支持とした解析を実施

解析ケース

モデル	Bp4	Bp4'	Bs4	Bs4'	Ap4	As4	Cp4	Cs4
スタッド	caseB	caseB	caseB	caseB	caseA	caseA	caseC	caseC
支点	両ピン	両ピン	単純	単純	両ピン	単純	両ピン	単純
ばね系列	4系列	4'系列	4系列	4'系列	4系列	4系列	4系列	4系列

実験結果
との比較



結論概要

対象とした合成桁の曲げ試験において、簡易ばねモデルによってずれ止め挙動の精度の良い解析結果が得られた。

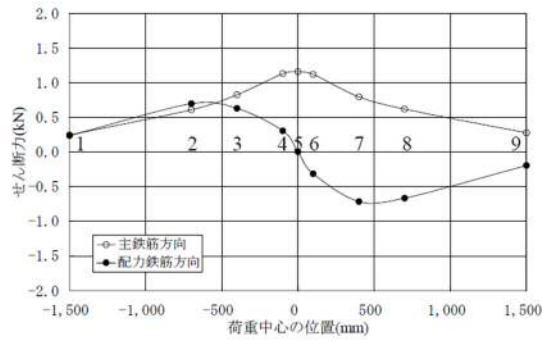
備考

本解析手法は、頭付きスタッドを有し、解析コストの大きい全体系解析を実施する際のスタッド挙動のモデル化に有効であると考えられる。

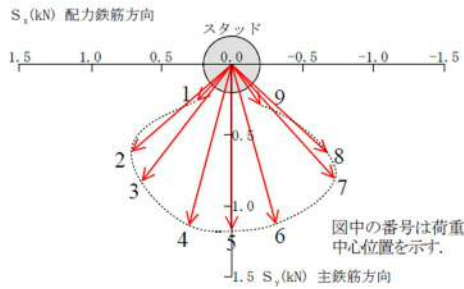
大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のスタッドの疲労強度評価		
著者	街道浩, 松井繁之		
公開年次	2008年11月	出典	土木学会論文集A, Vol. 64, No. 4
解析の目的	輪荷重走行試験を実施した支間部および張出し部の試験体を対象として、コンクリート、鋼板、スタッド、鉄筋などについて細部まで忠実に再現した3次元モデルを用いたFE解析を実施し、スタッドに作用するせん断力の性状を把握する。		
解析対象			
解析モデルの概要			
使用要素	コンクリート：ソリッド要素 下鋼板・横リブ：シェル要素 スタッド・鉄筋：梁要素		
コンクリート界面	下鋼板-コンクリート・横リブ-コンクリート：付着力，摩擦力を無視 鉄筋-コンクリート：並進変位共有		
解析モデル			

解析結果

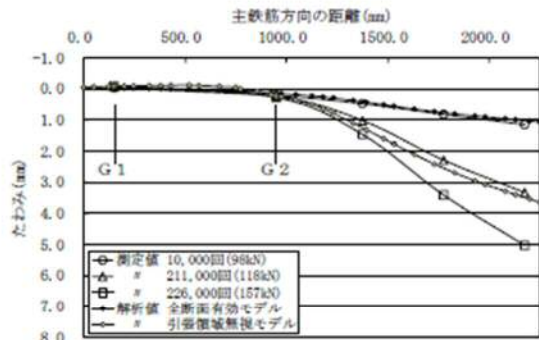
解析結果



スタッドに作用するせん断力



スタッドに作用する合成せん断力の作用方向



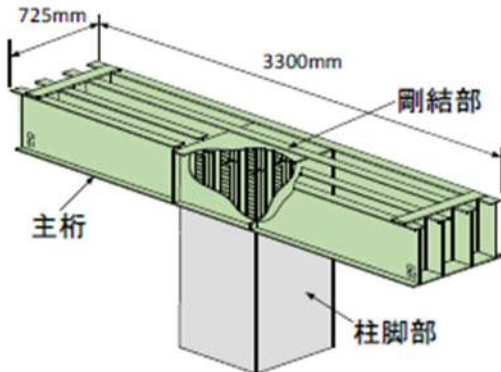
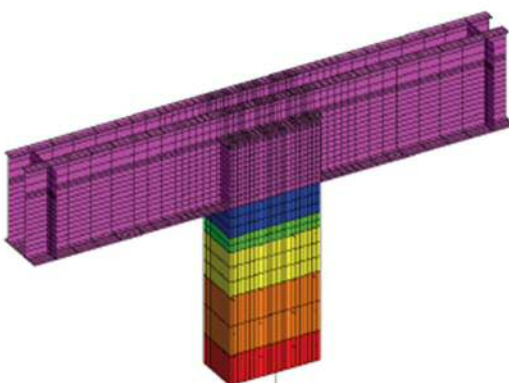
主鉄筋方向のたわみ分布の比較

結論概要

支間部および張出し部ともにスタッドのせん断力の作用方向が変化する性状を示した。

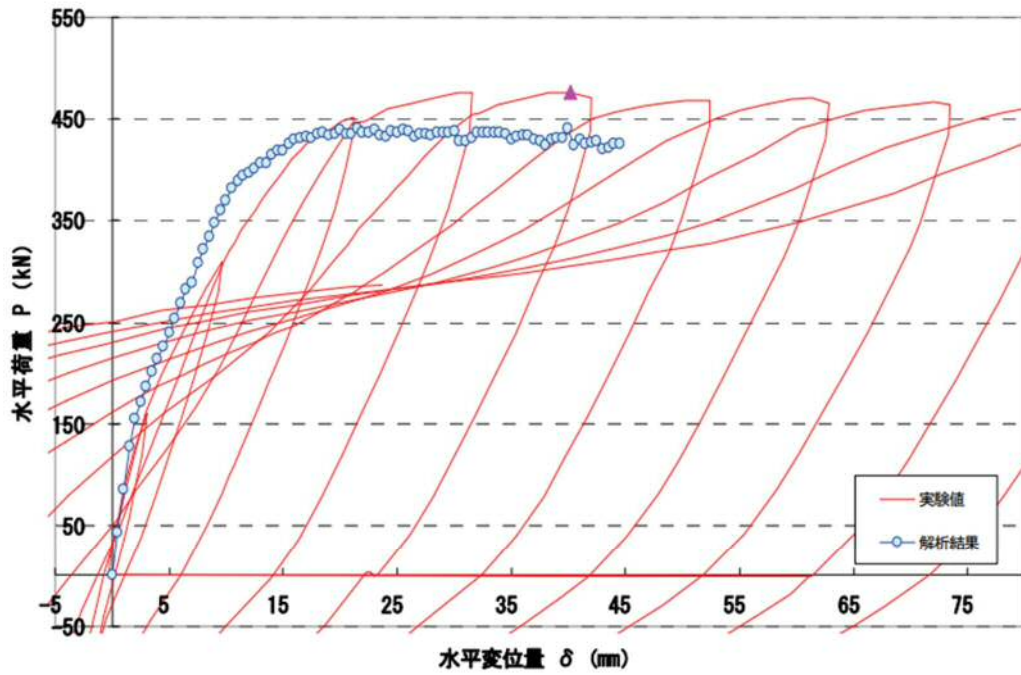
備考

スタッドを梁要素でモデル化したことにより、スタッドに作用するせん断力の性状を把握でき、さらに疲労強度の評価も可能となっている。

大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド																		
論文題目	開断箱桁複合ラーメン橋の剛結部における構造性能と設計法に関する検討																				
著者	伊藤始, 熊野拓志, 上村明弘, 白根勇二																				
公開年次	2011年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 57A																		
解析の目的	剛結部の縮小モデル実験供試体の3次元再現解析を実施し, 剛結部の性能検証にあたり解析的手法の適用性の検討を行う。																				
解析対象																					
解析モデルの概要																					
使用要素	コンクリート：ソリッド要素 H型鋼・主桁・横梁・端横桁・水平補剛材：シェル要素 主桁鉛直補剛材：梁要素 スタッド・補強金：埋め込み鉄筋要素 H型鋼：コンクリート界面：インターフェイス要素（クーロン摩擦モデル）																				
解析モデル	 <p style="text-align: center;">インターフェイス要素（クーロン摩擦モデル）</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>部位</th> <th>モデル</th> <th>初期剛性 (N/mm²/mm)</th> <th>粘着力C (N/mm²)</th> <th>内部摩擦角 φ(摩擦係数 tan φ)</th> <th>ダイラタンシー 角 ψ(tan ψ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>突起部</td> <td>クーロン摩擦</td> <td>1.0 × 10²</td> <td>1.1327</td> <td>43.62度 (0.9528)</td> <td>45.79度 (1.0281)</td> </tr> <tr> <td>その他</td> <td>クーロン摩擦</td> <td>1.0 × 10⁵</td> <td>0.01</td> <td>21.80度 (0.40)</td> <td>0.00度 (0.00)</td> </tr> </tbody> </table>			部位	モデル	初期剛性 (N/mm ² /mm)	粘着力C (N/mm ²)	内部摩擦角 φ(摩擦係数 tan φ)	ダイラタンシー 角 ψ(tan ψ)	突起部	クーロン摩擦	1.0 × 10 ²	1.1327	43.62度 (0.9528)	45.79度 (1.0281)	その他	クーロン摩擦	1.0 × 10 ⁵	0.01	21.80度 (0.40)	0.00度 (0.00)
部位	モデル	初期剛性 (N/mm ² /mm)	粘着力C (N/mm ²)	内部摩擦角 φ(摩擦係数 tan φ)	ダイラタンシー 角 ψ(tan ψ)																
突起部	クーロン摩擦	1.0 × 10 ²	1.1327	43.62度 (0.9528)	45.79度 (1.0281)																
その他	クーロン摩擦	1.0 × 10 ⁵	0.01	21.80度 (0.40)	0.00度 (0.00)																

解析結果

解析結果



水平荷重-載荷点水平変位

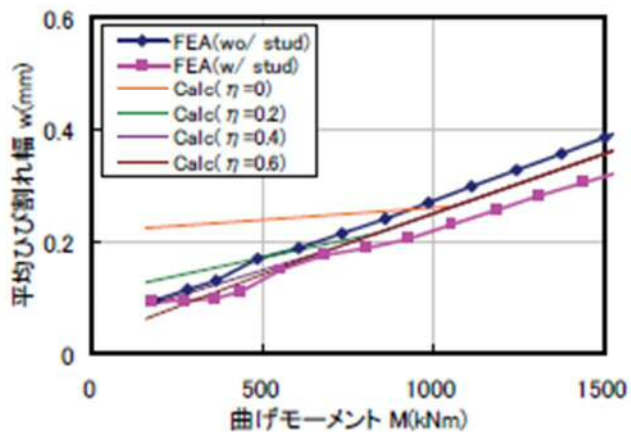
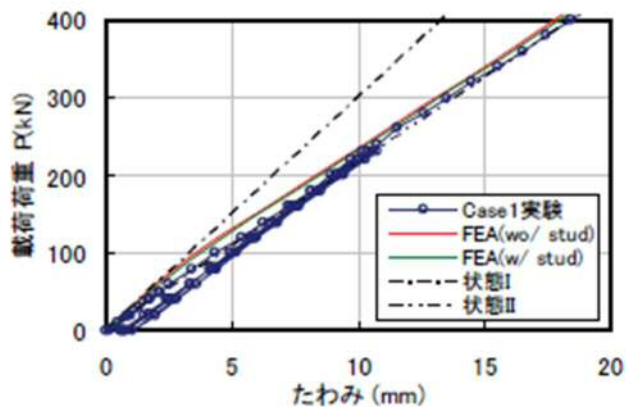
備考

剛結部の設計に解析を用いることで、柱脚部の耐荷力に応じたストライプHの定着長さを、安全側に評価することがある程度可能となることが示された。

大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	合成床版合成桁の負曲げ部ひび割れ幅に関する実験と解析		
著者	上條崇, 利根川太郎, 湯川雅之, 長井正嗣, 工藤晃也		
公開年次	2012年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 58A
解析の目的	合成床版の底鋼板が桁断面の一部として曲げモーメントに抵抗するだけでなく、コンクリートとの合成作用により、テンションスティフニングにも寄与していると考えられることから、この効果を定量化するため。		
解析対象			
解析モデルの概要			
使用要素	床版コンクリート：ソリッド要素+スミア補強 底鋼板・鋼桁：シェル要素 スタッド：非線形ばね要素		
解析コード	ANSYS Structural 12.1		
解析モデル	<p style="text-align: center;">解析モデル図</p> <p style="text-align: center;">(a) 完全合成 (b) スタッド考慮</p> <p style="text-align: center;">床版と鋼桁の結合条件</p>		

解析結果

解析結果



結論概要

合成床版を有する合成桁のひび割れ幅、鉄筋応力を精度良く求めるには、テンションステイフニングおよびひび割れ状態の考慮が不可欠。
 合成床版の底鋼板は、桁断面の一部として曲げモーメントに抵抗するだけでなく、鉄筋と同様にひび割れ発生直後のひび割れ幅を抑制する効果がある。

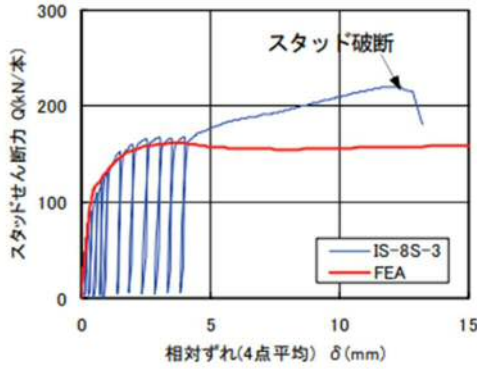
備考

ひび割れ幅を精度良く求めるために、床版コンクリートのテンションステイフニング考慮が不可欠となることから、ひび割れ幅の算定においては鋼-コンクリート界面のモデル化手法が重要となる。

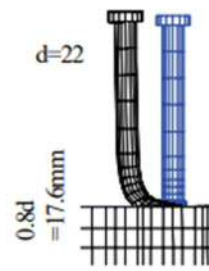
大分類	ずれ止め	小分類	スタッド
論文題目	プレキャスト床版連続合成桁のずれ止めに関する実験および解析		
著者	大城壮司, 上條崇, 奥井義昭, 長井正嗣		
公開年次	2012年	出典	土木学会論文集A1, Vol.68, No.2
解析の目的	スタッド押し抜き実験, 合成桁正曲げ実験で得られた結果を再現できる解析手法や解析モデルの構築		
解析対象	スタッド押し抜き実験, 合成桁正曲げ実験の供試体を対象とする.		
解析対象			
解析モデルの概要			
使用要素	<p>【押し抜き実験】 コンクリート・鋼部材・スタッド：ソリッド要素 補強鉄筋：ロッド要素</p> <p>【合成桁正曲げ実験】 床版：ソリッド要素 鋼桁：シェル要素 スタッド：ビーム要素 鉄筋：分布鉄筋 床版-鋼桁間の接触：接触要素</p>		
構成則	全要素において材料非線形性を考慮. コンクリートは分散ひび割れモデルによりひび割れ挙動を考慮.		
解析モデル	<p style="text-align: center;">※ 対象性を利用して 1/4 モデルで解析</p>		

解析結果

実験結果との比較



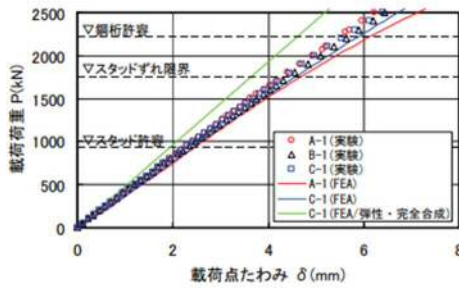
(a) φ22 頭付スタッド (実験後)



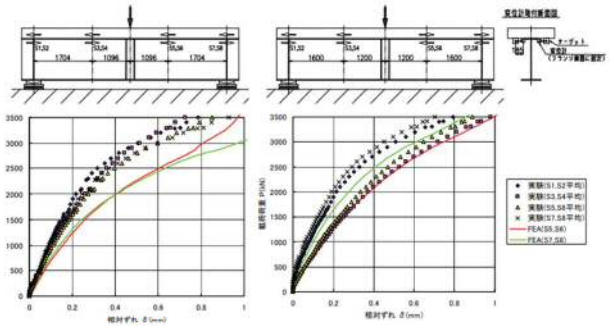
(b) φ22 頭付スタッド (FEA)

押し抜き実験のせん断力-相対ずれ関係

押し抜き実験のスタッドの変形図



合成桁正曲げ実験の荷重-たわみ関係



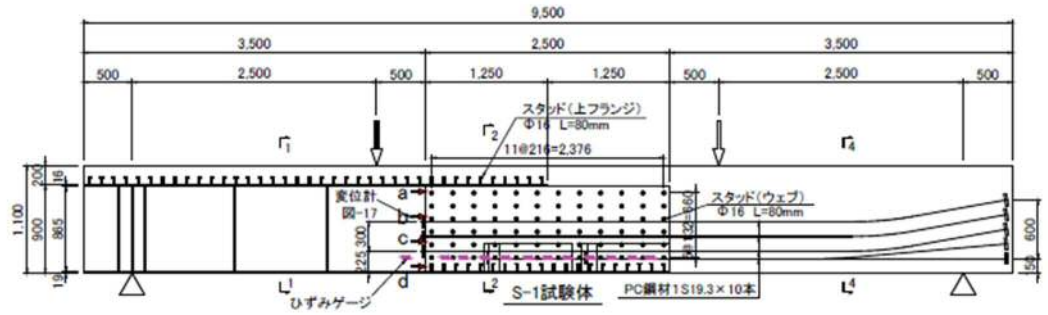
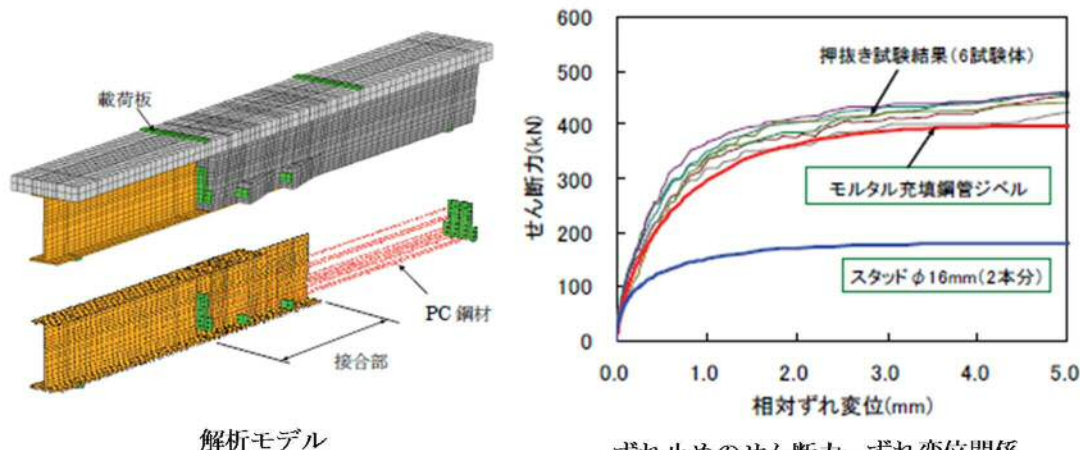
押し抜き実験の床版-鋼桁間の相対ずれ

結論概要

押し抜き実験では、実験と解析の対応は良好である。合成桁正曲げ実験では、実験初期から鋼桁下フランジが許容応力度に到達する荷重レベルまではほぼ一致。スタッドの配置間隔、ならびに、床版形式が合成桁としての全体的な挙動に影響していない。

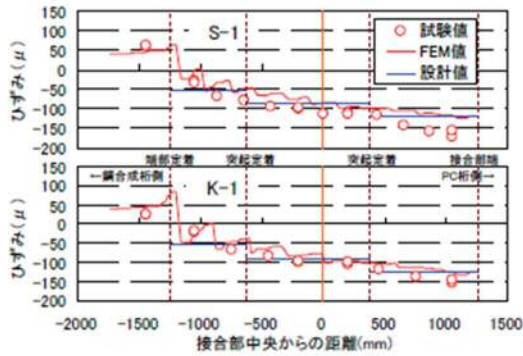
備考

実橋では疲労に対する安全性に関して別途検証が必要。

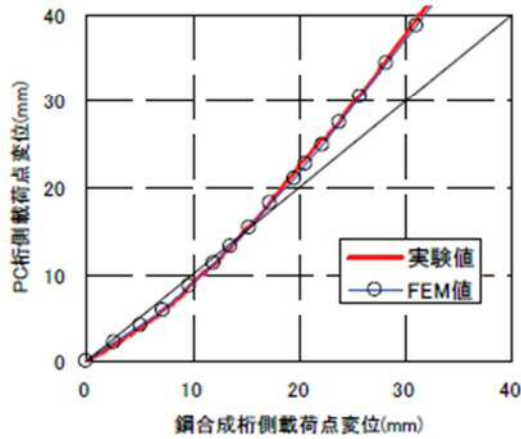
大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	少数主桁形式の鋼合成桁とPC桁のずれ止め方式による接合構造の研究		
著者	篠崎裕生, 浅井洋, 紙永祐紀, 牧剛史, 睦好宏史		
公開年次	2014年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 60A
解析の目的	ずれ止めの特性を押抜き試験結果に基づいて非線形パネでモデル化した3次元非線形有限要素解析を実施し, 接合部の挙動を詳細に再現できることを明らかにした。		
解析対象	2主桁のうち片方の接合部付近を切り出したもの。 		
解析モデルの概要			
使用要素	鉄筋コンクリート・鋼桁：ソリッド要素 PC鋼材：トラス要素 スタッド：ばね要素		
構成則	鉄筋コンクリート：圧縮側に弾塑性破壊モデル, 引張側にはTension Stiffeningモデルを適用し, かつ固定ひび割れ面におけるせん断伝達を考慮 鋼桁：von Misesの降伏条件を与え, 載荷板や定着板は線形弾性 PC鋼材：トリリニア型の応力-ひずみ関係 スタッド：法線方向パネは線形弾性とし, 接線方向パネにはずれ止めの非線形せん断力-ずれ変位関係		
解析モデル	 <p style="text-align: center;">解析モデル</p> <p style="text-align: center;">ずれ止めのせん断力-ずれ変位関係</p>		

解析結果

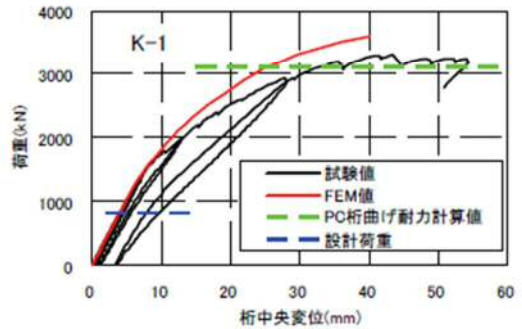
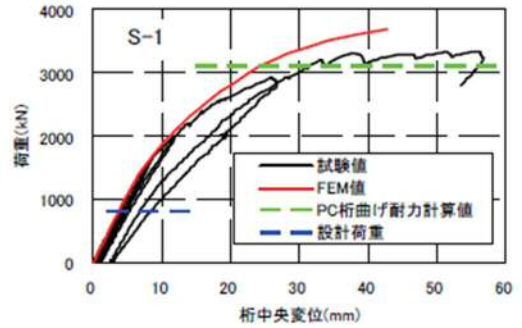
実験結果
との比較



緊張時の鋼桁ウェブ桁軸方向ひずみ



載荷点の変位の推移 (K-1試験体)



荷重－析中央変位関係

結論概要

ずれ止めのせん断力－ずれ変位関係を、押抜き試験結果を基に非線形のパネでモデル化した3次元FEM解析により、接合部の挙動を詳細に再現できることを確認した。ずれ止めに発生するせん断力の分析から、簡易設計法の妥当性を確認した。

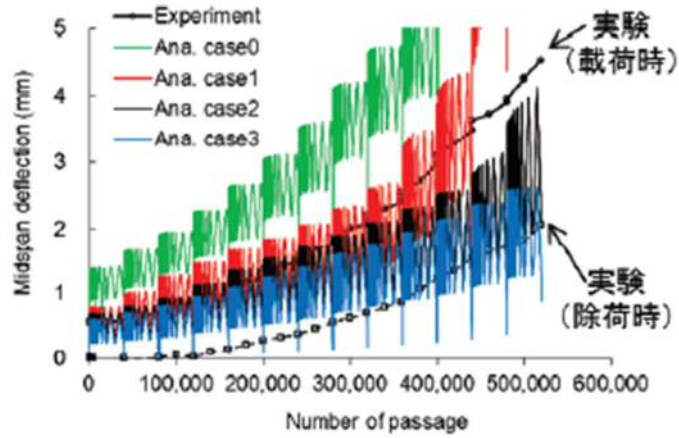
備考

ウェブの回転に対して抵抗するフランジスタッドやフランジの支圧力の寄与などについては、今後の検討課題。

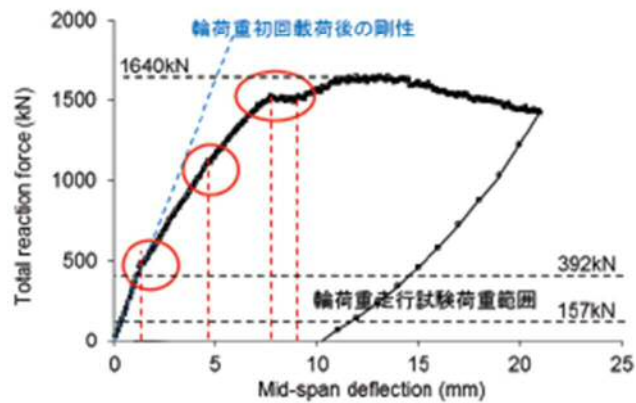
大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	3次元非線形FEM解析に基づく移動荷重下の鋼・コンクリート合成床版破壊過程の考察		
著者	藤山知加子, 松村寿男, 高須賀丈広		
公開年次	2014年5月	出典	土木学会論文集A1, Vol. 70, No. 2
解析の目的	数値解析をもとに, 実橋での合成床版コンクリート内部のリップを起点とするひび割れ発生・進展を詳細に分析し, 破壊過程の推定を行う.		
解析対象			
解析モデルの概要			
使用要素	底鋼板・底鋼板溶接リップ: ソリッド要素 スタッド: スタッド剛性によるパネ要素		
鋼コンクリート界面	マクロモデルとして, 多数のスタッドを含む底鋼板単位面積当たりの鉛直およびせん断方向パネ値を, 底鋼板とコンクリート要素との間の境界面特性として2種類の接合要素を設定 底鋼板-コンクリート: スタッド剛性 (開口方向・ずれ方向の初期付着・摩擦は考慮しない) リップ側面-コンクリート: 初期付着強度までは線形, その後摩擦係数0.6の摩擦則		
解析モデル			

解析結果

解析結果



版中央たわみ-载荷回数関係



荷重-版中央たわみ関係

結論概要

ロビンソン型合成床版のスタッドによるずれ止め効果を、空間平均したバネ値によってモデル化する手法により、輪荷重走行試験でのたわみや各部材のひずみの推移を良好に再現できた。

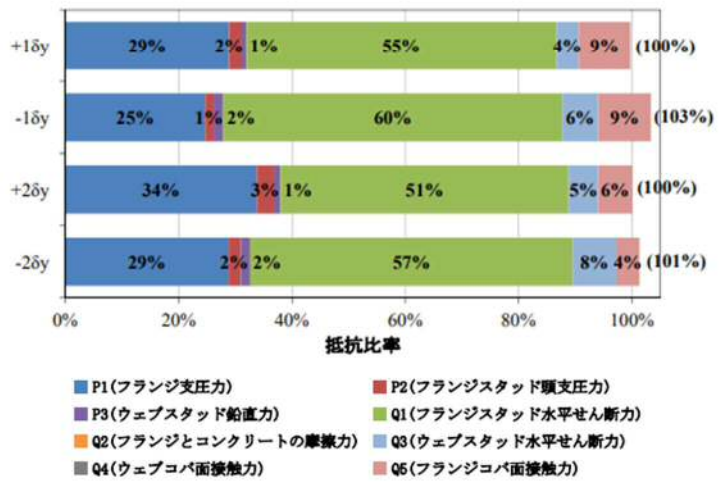
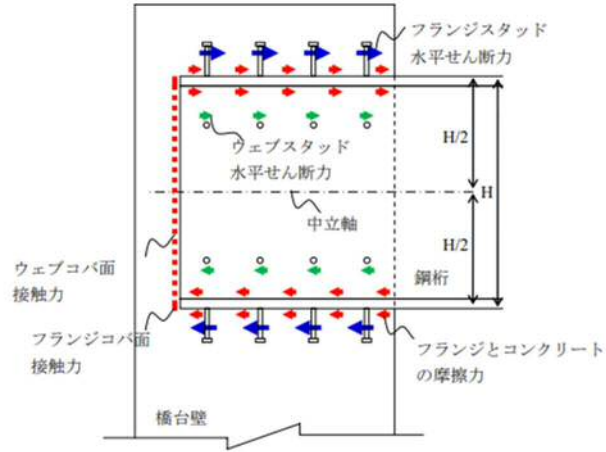
備考

破壊過程の検討といった解析ステップ数が膨大な解析においては、スタッドによるずれ止め効果を空間平均したバネ値にモデル化する手法は有効である。

大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	鋼-コンクリート接合部の耐力評価に関する解析的研究		
著者	岑山友紀, 楠田広和, 橋肇, 三宅隆文, 和田圭仙, 七澤利明		
公開年次	2016年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 62A
解析の目的	損傷を受けた場合の鋼-コンクリート接合部の耐力が最も小さくなる部位を検証する。		
解析対象	<p>The figure shows two technical drawings of steel-concrete joint specimens. The top drawing is for a specimen with 55 studs (55-STUD) and the bottom drawing is for a specimen with 60 studs (60-STUD). Each drawing includes a plan view (top) and a cross-section view (A-A). Dimensions and material specifications are provided for each component.</p>		
解析モデルの概要			
使用要素	主桁ウェブ：シェル要素 橋台コンクリート・フランジスタッド・主桁フランジ：ソリッド要素 ウェブスタッド：ばね要素		
接触の設定	<ul style="list-style-type: none"> ・フランジスタッド-橋台コンクリート ・フランジコバ面-橋台コンクリート ・ウェブコバ面-橋台コンクリート 		
解析モデル	<p>The figure shows a 3D finite element model of the joint. The left part shows the bridge wall (橋台壁) and the steel beam (鋼桁) with dimensions and load directions (負加力(-側) and 正加力(+側)). The right part shows a close-up of the studs (Stud 150x19) with a note indicating that the basic displacement of the studs is set to 15y.</p>		

解析結果

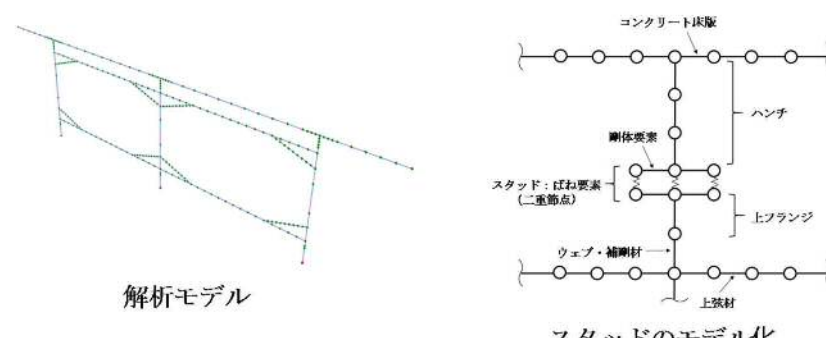
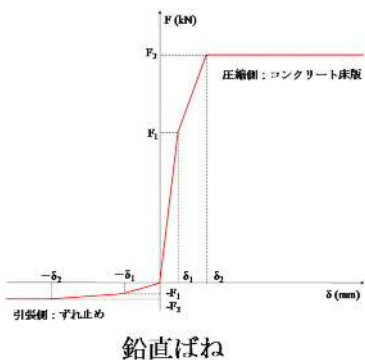
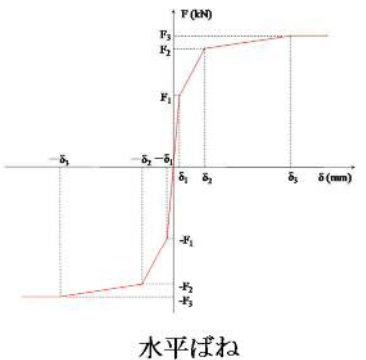
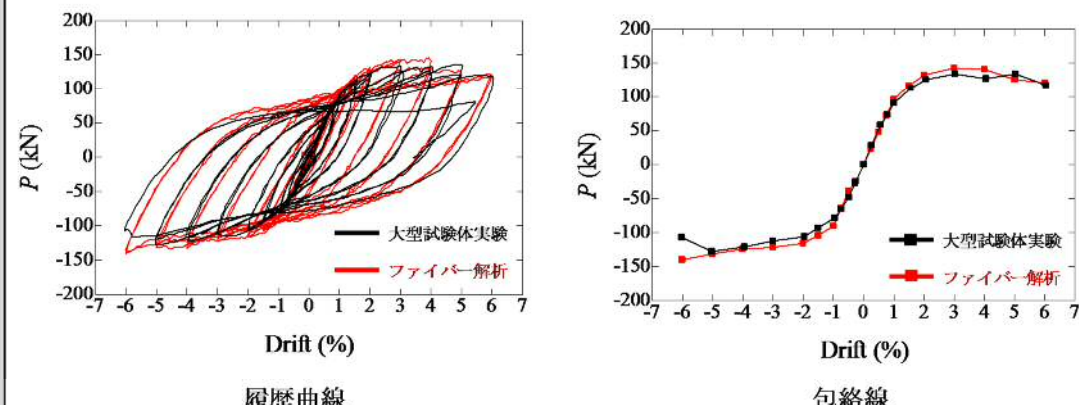
解析結果

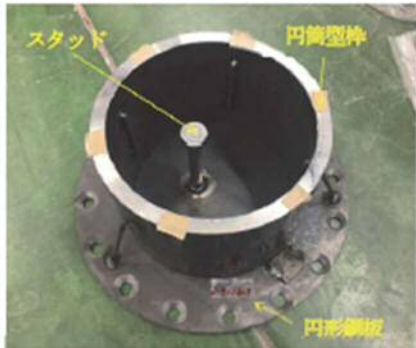
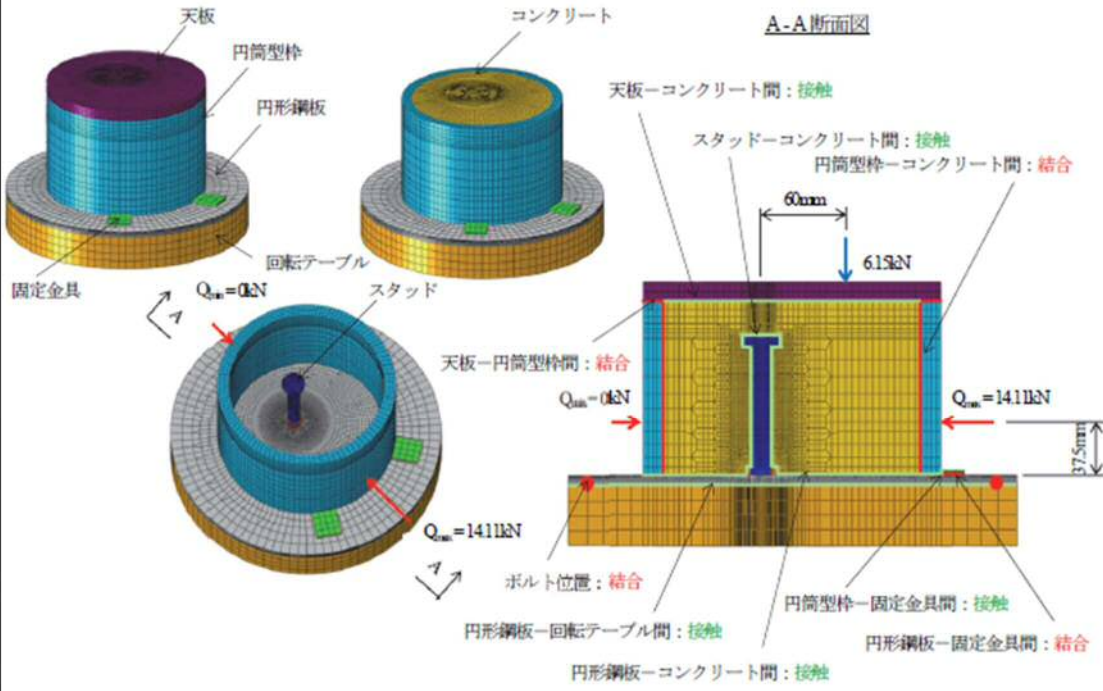


備考

鋼-コンクリート接合部を詳細にモデル化することにより、スタッド・コバ面の分担率まで詳細に検討することが可能となっている。一方で、詳細なモデル化による計算コストが大きく、個々の条件での検討には不向きと考えられる。

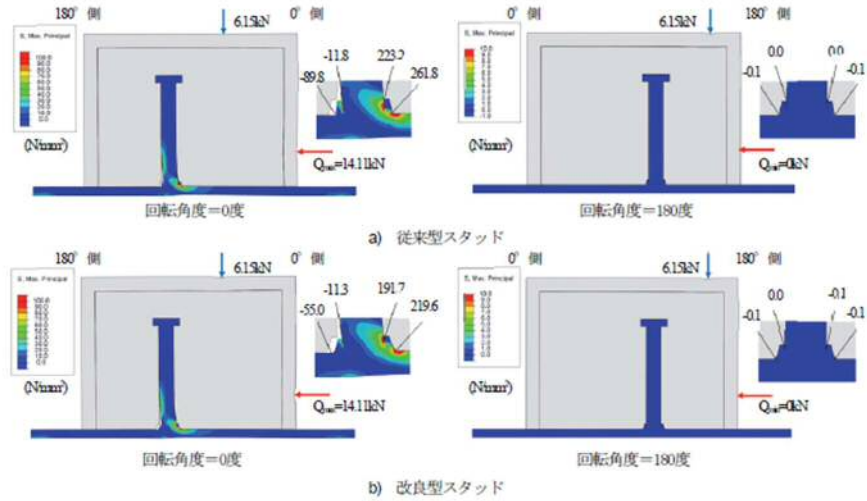
大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	鋼上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検討可能な縮小試験体と解析手法の構築		
著者	木下幸治, 岩田隆弘, 井上一磨		
公開年次	2018年11月	出典	土木学会論文集A1 (構造・地震工学), 74巻4号
解析の目的	鋼上部構造へダンパー・ブレースを付与することが可能な汎用的で, かつ精度が高い実用的な解析技術の開発を目的としている.		
解析対象	<p>コンクリート床版を有する鋼I桁断面3主桁の橋軸方向から一部を抜き出した試験体</p> <p>全体図</p> <p>配筋図 (橋軸直角断面)</p> <p>配筋図 (橋軸断面)</p>		

解析モデルの概要	
解析ソフト	uc-win/frame
使用要素	スタッド：ばね要素 その他：ファイバー要素
応力ひずみ関係	鋼材：パイリニアモデル（二次勾配はE/100） コンクリート：hoshikumaモデル スタッド：既往文献を参考に、水平ばねをマルチリニア、鉛直ばねをトリリニア
解析モデル	 <p>解析モデル</p> <p>スタッドのモデル化</p>  <p>鉛直ばね</p>  <p>水平ばね</p>
解析結果	
実験結果との比較	 <p>履歴曲線</p> <p>包絡線</p>
結論概要	実験より得られた損傷状況を基に、解析モデルに考慮するスタッド本数を、鋼桁上フランジ中央部のみを対象に1要素あたり3本とした。その上で、既往研究で提案されたスタッドを鉛直と水平ばねとするモデル化を、本ファイバー解析に採用した結果、大型試験体の載荷実験における荷重-変位関係を良く再現できた。
備考	
ファイバー要素解析においてもばね要素を用いることで、スタッドを考慮したモデル化が可能。1要素のばねにモデル化するスタッド群の本数の取り決めが重要。	

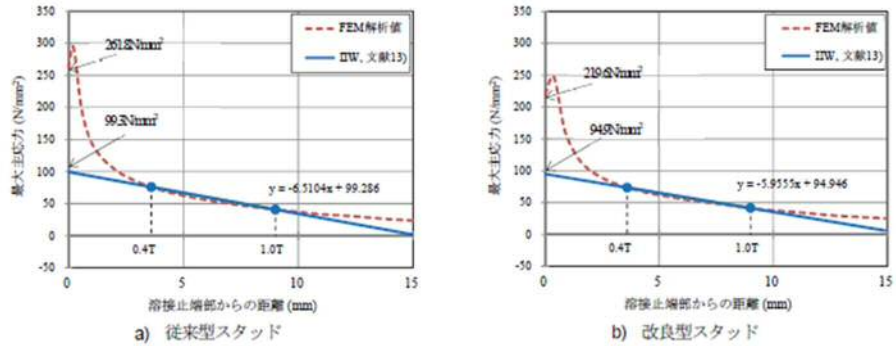
大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド
論文題目	鋼・コンクリート合成床版内のスタッドの疲労耐久性評価と疲労強度向上に関する研究		
著者	吉田賢二, 東山浩士, 馬場敏, 松井繁之		
公開年次	2018年	出典	土木学会論文集A1, Vol.74, No.3
解析の目的	合成床版に適用する従来型スタッドに対する改良型スタッドの疲労寿命の向上について, 回転せん断試験体を詳細にモデル化したFEM解析により, スタッドの溶接止端部に発生する応力集中を比較, 検証する.		
解析対象	回転せん断試験体 		
解析モデルの概要			
解析コード	ABAQUS		
使用要素	ソリッド要素		
界面条件	円形鋼板・スタッド・天板-コンクリートおよび円筒型枠-円形鋼板: 垂直・水平力の接触を考慮, せん断力付着・摩擦力を無視 円形鋼板-回転テーブル, 円筒型枠-天板: ボルト接合部で接点を共有 円筒型枠-コンクリート: 結合		
解析モデル	 <p>a) FEM解析モデルの全体図</p> <p>b) 接触条件, 荷重条件</p>		

解析結果

解析結果



スタッド溶接部の主応力分布



円形鋼板側のホットスポット応力

結論概要

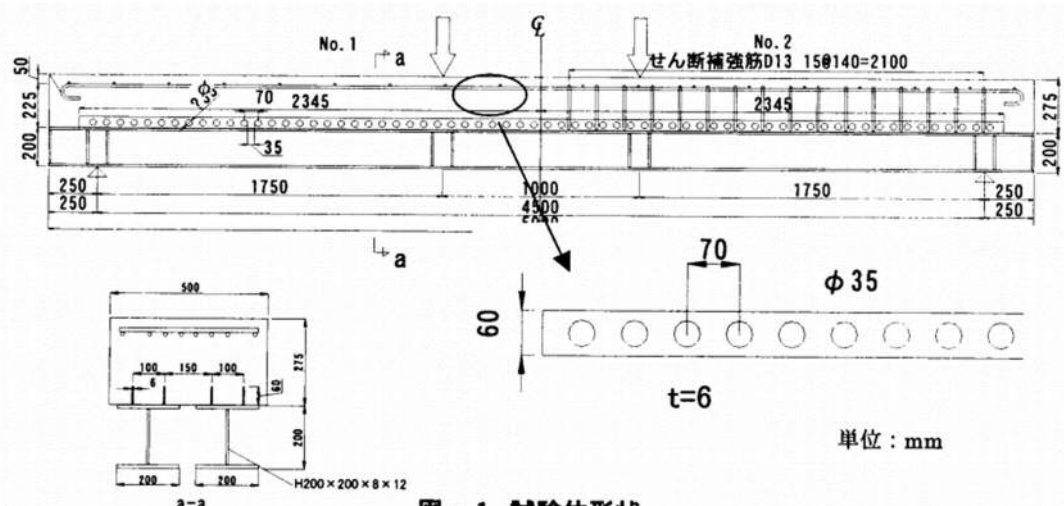
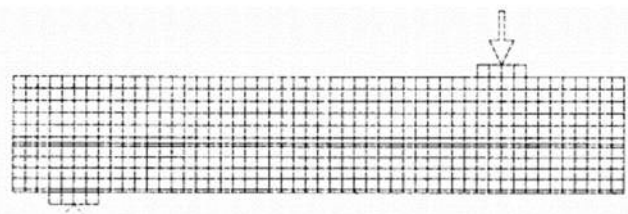
公称せん断応力振幅および輪荷重の等価繰返し回数を用いることで、回転せん断試験の従来型スタッドの疲労S-N曲線の近傍にプロットすることができた。

備考

スタッド溶接部に至るまでの精緻なモデル化をした上で、疲労耐久性評価を実施しており、今後の結果を利用した簡易モデルへの展開が期待される。

大分類	ずれ止め	小分類	頭付きスタッド																		
論文題目	合成はりの諸因子がその耐荷挙動に及ぼす影響に関する解析検討																				
著者	溝江慶久, 中島章典																				
公開年次	2018年5月	出典	土木学会論文集A1, Vol.74, No.5																		
解析の目的	合成はりの耐荷挙動が、頭付きスタッドの配置間隔のみならず、鋼はりやコンクリート床版の断面諸量、载荷条件の違いによっても異なることが予想されるため、これらの諸因子が合成はりの耐荷挙動に及ぼす影響を明らかにする。																				
解析対象																					
解析モデルの概要																					
解析手法	剛体ばねモデル解析																				
解析モデル																					
解析結果																					
解析結果	<p>合成はりの耐荷挙動は、鋼はりやコンクリート床版の断面諸元、载荷条件によらず、ひずみが急変する4つの荷重段階で特徴付けることができる。具体的には、荷重-ひずみ関係の線形性が失われたり、鋼はりの引張域のひずみが急増したりし始める際の荷重[1]と、コンクリート床版の圧縮域のひずみが急増し始める荷重[2]と、鋼はりの中立軸付近のひずみが引張側に急増し始める際の荷重[3]と、床版や鋼はりの圧縮域のひずみが増分方向を反転させる際の荷重[4]である。</p>	<table border="1"> <caption>Approximate data points from the load-deflection graph</caption> <thead> <tr> <th>たわみ (mm)</th> <th>荷重 (kN)</th> <th>特徴</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Start</td> </tr> <tr> <td>~100</td> <td>~3500</td> <td>荷重[1] (Linear limit)</td> </tr> <tr> <td>~200</td> <td>~4000</td> <td>荷重[2] (Concrete compression limit)</td> </tr> <tr> <td>~400</td> <td>~4500</td> <td>荷重[3] (Steel tension limit)</td> </tr> <tr> <td>~800</td> <td>~4500</td> <td>荷重[4] (Softening point)</td> </tr> </tbody> </table>		たわみ (mm)	荷重 (kN)	特徴	0	0	Start	~100	~3500	荷重[1] (Linear limit)	~200	~4000	荷重[2] (Concrete compression limit)	~400	~4500	荷重[3] (Steel tension limit)	~800	~4500	荷重[4] (Softening point)
たわみ (mm)	荷重 (kN)	特徴																			
0	0	Start																			
~100	~3500	荷重[1] (Linear limit)																			
~200	~4000	荷重[2] (Concrete compression limit)																			
~400	~4500	荷重[3] (Steel tension limit)																			
~800	~4500	荷重[4] (Softening point)																			
結論概要	<p>合成はりの荷重-たわみ関係は、荷重[1]を境に線形性を失い、荷重[3]以降に急増する。合成はりについて検討する際には、コンクリート床版や鋼はりの材料特性に加え、頭付きスタッドの挙動も考慮しながら耐荷挙動を確認することが望ましい。</p>																				
備考																					
<p>剛体ばねモデルを用い、合成はりの耐荷挙動に影響する因子を複数の解析を実施することにより検討しており、さらに挙動を決定付ける荷重ステップの特定を行っている。このような複数のパラメータを有する解析に対して、剛体ばねモデル解析はハンドリングが良く有効であると考えられる。</p>																					

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	3次元弾塑性FEMを用いた孔あき鋼板ジベルの耐力評価に関する一考察		
著者	宗本理, 園田佳巨, 奥石正己		
公開年次	2013年	出典	コンクリート工学年次論文集
解析の目的	PBLの耐荷特性や破壊性状を把握できる解析手法の確立を目的として基礎的な検討を試みる。		
解析対象	<p>ジベル孔径を30, 60, 90mmの3種類変えたPBLをコンクリートブロックから静的に押抜く試験で、試験体は500×500×450mmのコンクリートブロックに厚み12mm, 幅100mmの鋼板が420mm埋め込まれている試験体である。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>図-10 解析モデル(ジベル孔径 90mm の場合)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>図-13 解析モデル(ジベル孔数 3 の場合)</p> </div> </div>		
解析モデルの概要			
解析モデル	3次元弾塑性モデル, 1/4モデル		
要素	8積分点を有するソリッド要素		
付着	鋼板とコンクリートの付着はクーロン摩擦モデル		
材料力学特性	<p>コンクリートの力学特性には、静水圧の依存性を考慮した式を適用した平面キャップ付き Drucker-Pragerモデルを用いた。引張域では引張限界ひずみを2500μと仮定した上で引張軟化を考慮している。</p> <p>鋼板と貫通鉄筋の力学特性にはvon Misesの降伏条件を仮定した簡易なパイリニア型を用いて、降伏後は初期剛性の1/100の剛性による等方硬化を仮定した。</p>		
解析結果			
実験結果との比較	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(a) ジベル孔径 60mm</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(b) ジベル孔径 90mm</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">図-11 せん断力-相対ずれ変位</p>		
結果概要	ジベル孔径が大きくなるにつれてせん断力が大きくなる定性的な傾向は解析によって良好にシミュレートできていることが確認できる。		
備考			
<p>PBLの押抜きせん断解析に提案モデルを適用したところ、ジベル孔径の増加や貫通鉄筋の有無が最大せん断力に与える影響について、解析により良好に再現できることが確認できた。</p> <p>今後の課題は、解析の精度を向上させるために、材料強度の異なる複数の試験体を用いた検討を改めて行うことが望ましい。</p>			

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	孔あき鋼板ジベルを用いた合成梁に関する実験的研究		
著者	平陽兵, 古市耕輔, 吉田健太郎, 河野哲也		
公開年次	2001年	出典	コンクリート工学年次論文集
解析の目的	鋼材と鉄筋コンクリートとの一体性や耐荷性状を把握する目的で, 合成梁の曲げ载荷試験及びFEMによるシミュレーション解析を実施.		
解析対象	<p>試験体は, 合成土留壁の側壁部における挙動の把握を目的とし, 側壁部を梁部材としてモデル化.</p>  <p style="text-align: right;">単位: mm</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	<p>2次元非線形モデル</p>  <p style="text-align: center;">図-9 FEM 解析モデル図</p>		
要素	鋼材及びコンクリート: 2次元平面応力要素 PBL: パネでモデル化 (非線形パネ)		
材料力学特性	鋼材: パイリニア コンクリート: 標準示方書の曲線		

解析結果

実験結果
との比較

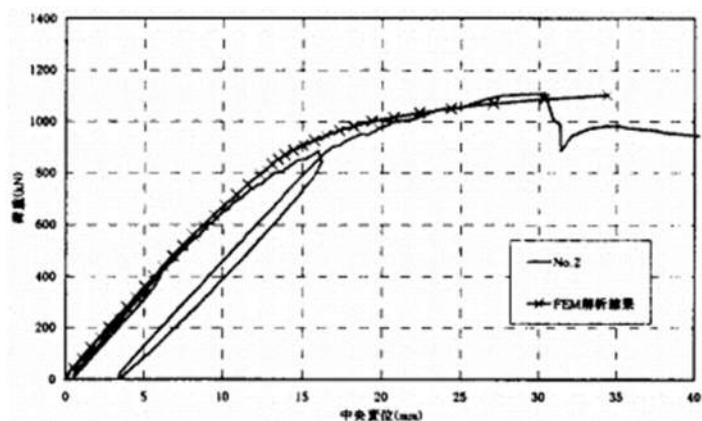


図-10 荷重-中央変位関係

結果概要

剛性、耐力ともに解析値と実験値とは概ね一致している。これにより、H鋼部とRC部との間にずれ止めを有する試験体の実験をシミュレートできることが確認された。

備考

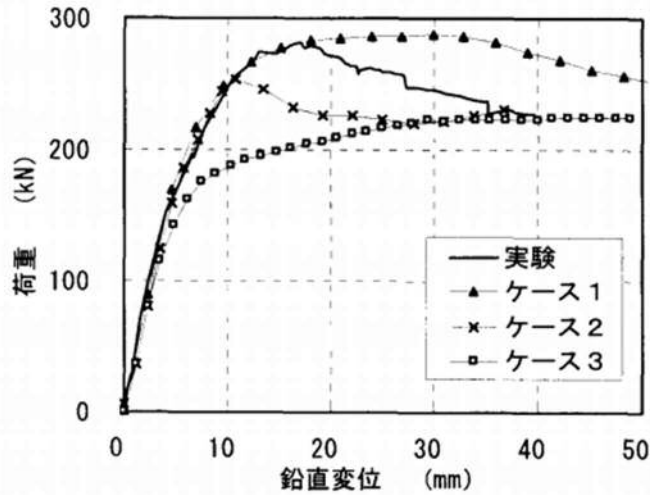
孔あき鋼板ジベルはH形鋼とRC部材との一体性を確保するのに充分なずれ耐力を有しており、本構造は合成構造として機能することが分かった。

今後の課題は、孔あき鋼板ジベルで一体化した合成梁について、RC部が引張側となった時の挙動の把握や鋼材部とRC部の接合面のずれ量が大きい場合の評価などが挙げられる。

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	孔あき鋼板ジベルを用いた超高強度繊維補強コンクリート桁間の接合構造に関する研究		
著者	田中良弘, 福浦尚之, 三桶達夫		
公開年次	2004年	出典	コンクリート工学年次論文集
解析の目的	孔あき鋼板ジベルを従来のウェブとフランジのせん断伝達としてではなく, 曲げによる引張部材の引張伝達を主目とする構造に対し, 供試体の曲げ載荷実験とFEM解析により接合部での力の伝達特性を明らかにすることを目的とする。		
解析対象	<p>矩形断面のRPC桁を2本製作し, PBLにて接合。</p> <p style="text-align: right;">単位: mm</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	<p>2次元FEMモデル</p>		
要素	<p>鋼材及びコンクリートは2次元平面応力要素 PBLは鋼材にせん断非線形を考慮しずれ変形を模擬</p>		
材料力学特性	<p>コンクリートは弾塑性</p>		

解析結果

実験結果
との比較



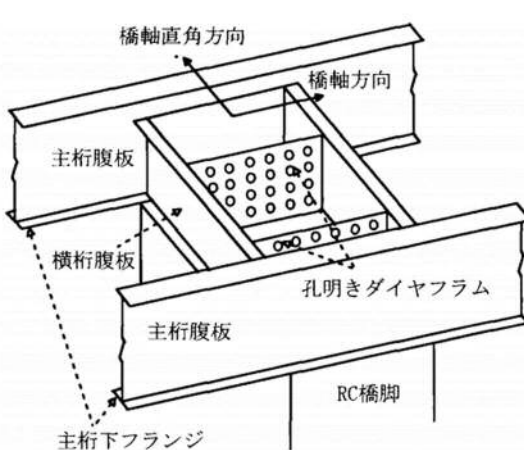
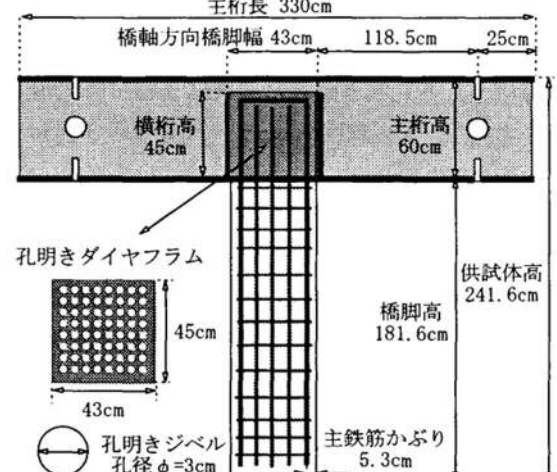
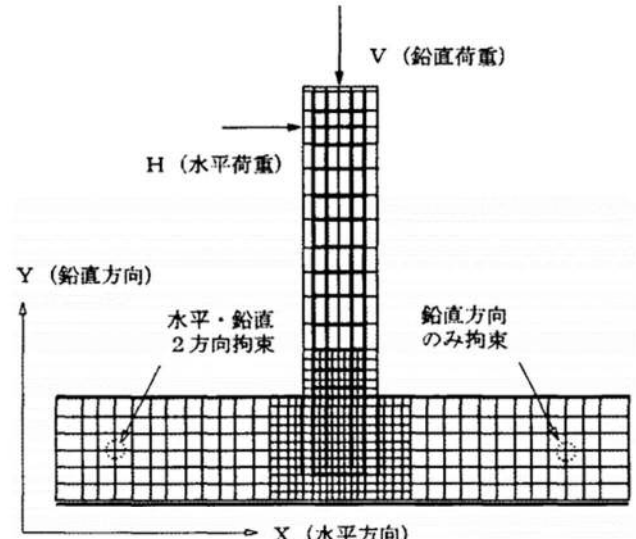
図—12 解析結果

結果概要

実験結果をよくシミュレートしている。
従来のウェットジョイントにPBLを適用した接合方法は、従来の方法に比較して使用限界状態の設計荷重を向上することができる。

備考

充填材料としてRPCを適用したPBLは従来のコンクリートとの組み合わせに比較して貫通鉄筋を挿入する必要が無く、コンパクト設計でき、合理的な接合方法である。
今後の課題は、U断面桁やI断面桁による接合実験による検証とPBLとRPCの基礎実験による設計手法の確立が必要である。

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	孔明き鋼板ジベルを用いた複合ラーメン橋剛結部の水平耐荷力		
著者	下藪征史, 彦坂照		
公開年次	2003年	出典	コンクリート工学年次論文集
解析の目的	鋼桁とコンクリート橋脚からなる複合ラーメン橋の剛結部にせん断ずれ止めとして採用される孔明き鋼板ジベルの力学的挙動を把握することを目的とする。		
解析対象	<p>2主桁桁とRC橋脚からなる複合ラーメン橋剛結部供試体。供試体スケールは1/7。</p>   <p>図-1 鋼2主桁—RC橋脚剛結部の概念図</p> <p>図-3 橋軸直角断面図</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	<p>2次元有限要素モデル</p>  <p>図-4 2次元有限要素モデル</p>		
要素	<p>コンクリート：2次元平面応力要素 鋼部材：非線形棒要素（主桁・横桁・鉄筋） PBL：リンク要素に非線形を設定</p>		
材料力学特性	<p>鋼材：バイリニア コンクリート：分布ひび割れモデル（ひび割れ発生時にひび割れ垂直方向の剛性低下）</p>		

解析結果

実験結果
との比較

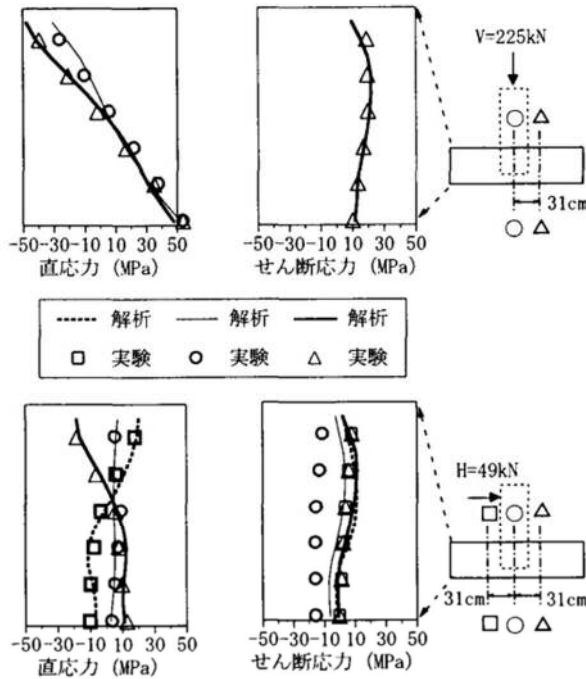


図-6 主桁鋼板直応力およびせん断応力分

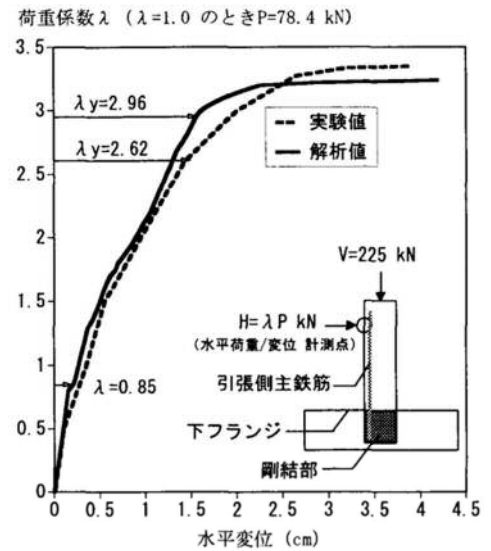


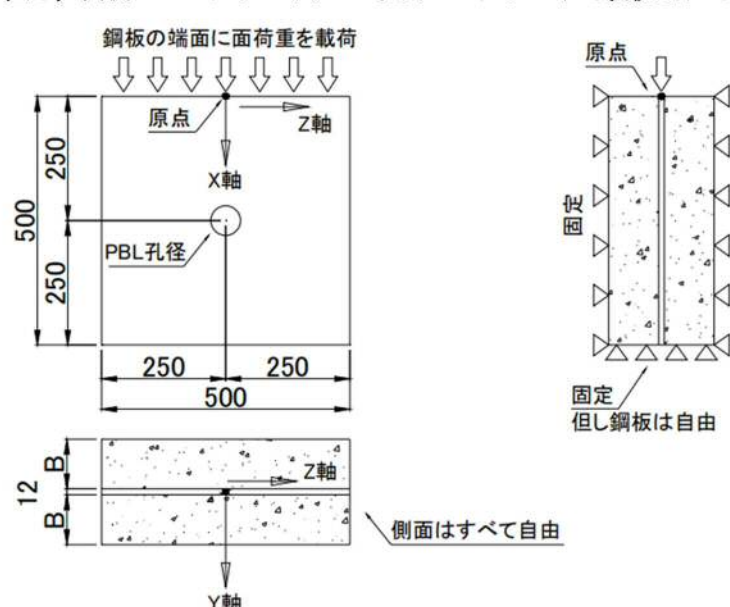
図-7 荷重-変位曲線

結果概要

主桁の応力分布は、鉛直荷重のみの荷重では、直応力、せん断応力の解析値と実験値は良く一致している。また、水平荷重のみの荷重では、剛結部の鋼主桁の応力分布が複雑になり、柱中央断面のせん断応力分布に差が生じている。
荷重-変位曲線では、解析の降伏位置が実験に比べ遅れている。これは、実験値は正負交番荷重に対する包絡線であり、解析値は単調漸増荷重に対する変位であることが遅れの一因として挙げられる。

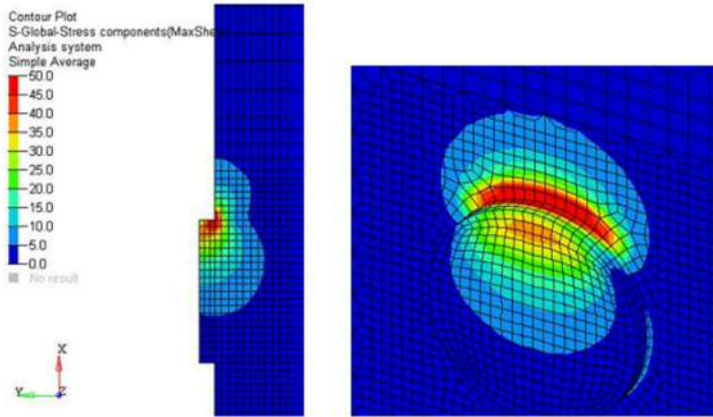
備考

孔明き鋼板ジベルを用いた2主桁とRC橋脚の剛結部は、水平荷重の実験、解析ともに鋼主桁およびRC橋脚部に先行して破壊せず、複合ラーメン橋を骨組み構造とみなして設計するのに十分な剛性と終局強度を有する。孔明き鋼板ジベルのせん断分布から、せん断力は鋼板ダイアフラム外縁周辺部のジベルに集中してき働いたため、中央部を穿孔する効果は小さいことがわかる。

大分類	孔あき鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	孔あき鋼板ジベルの荷重伝達メカニズムに関する一考察		
著者	道管裕一, 藤井堅, 民家洋輔, 藤井大成		
公開年次	2014年	出典	構造工学論文集
解析の目的	孔あき鋼板ジベル (PBL) は, 周辺のコンクリートを拘束することで著しくずれ耐力が上昇することが知られている. そこで, PBLの拘束力に着目し, PBLのずれ耐力と拘束力の関係を, 実験的手法と解析的手法の両面から考察する.		
解析対象	<p>モデルの中央に500mm四方の鋼板を配置し, その中心に1箇所PBLを設けた. 鋼板の両脇にはコンクリートを配置し, 両側のコンクリートはPBL孔内コンクリートで接続されている.</p>  <p style="text-align: center;">図-19 FEM解析モデル</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	3次元弾性モデル		
要素	コンクリート: ソリッド要素 鋼: ソリッド要素		
境界条件	鋼とコンクリートは接触を考慮 (圧縮のみ伝達)		
材料力学特性	弾性		

解析結果

解析結果



(c) 最大せん断力

(d) 孔周りのせん断分布

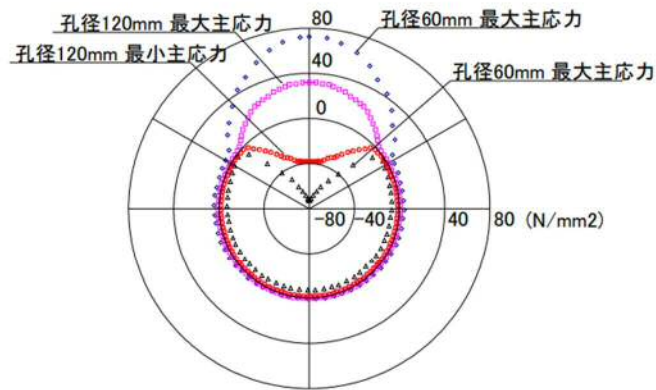


図-22 孔周囲の応力状態

結果概要

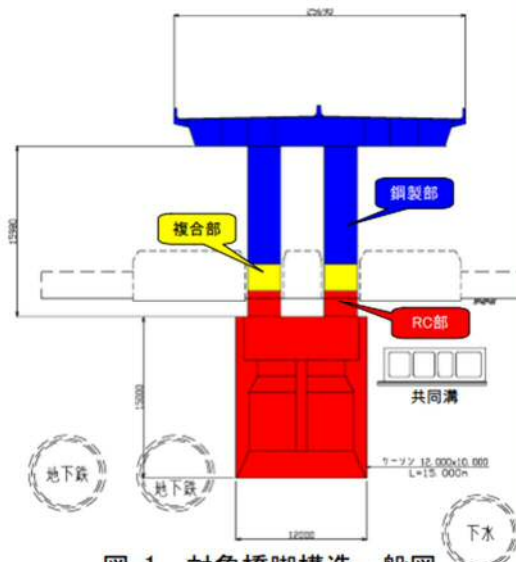
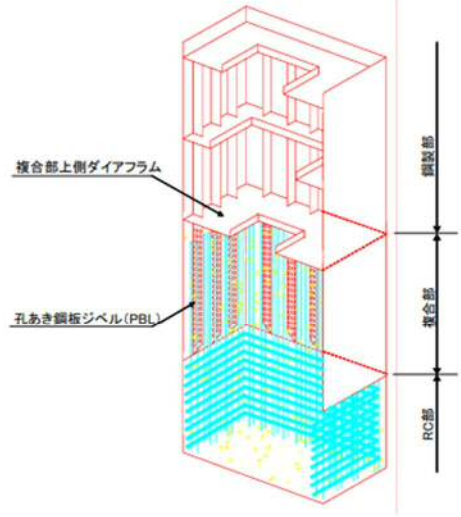
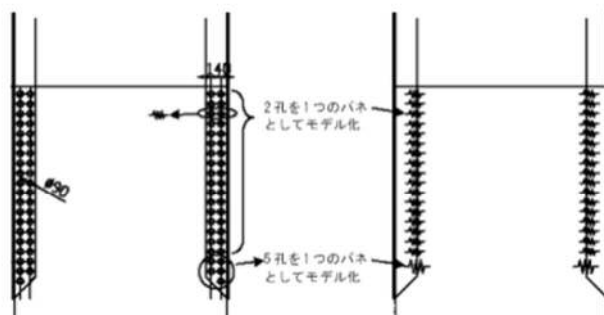
PBLにずれ荷重が作用する初期の段階では、孔内コンクリートと鋼板の接触部に応力が集中し、その部位がまず破壊する。
 孔内コンクリートがすべて破壊した後も、構造的に拘束力がある限り、孔面積と拘束力を関数とする力で荷重を伝達し続ける。

備考

- ・コンクリートが破壊する前では、大きな押し広げ力は発生せず、PBLに対する拘束力も発生しない。コンクリートの破壊により生じる界面の不陸が、押し広げ力を発生させる。
- ・押し広げ力は、ずれ量とともに大きくなり、その後一定値に収束しようとする。ずれ量が、PBL直径の1/10程度まで大きく発生しても、PBLを拘束する力があれば、押し広げ力は低下しない。
- ・PBLの拘束力は、孔内コンクリートの一部の破壊により押し広げ力が発生し、それに抵抗する力である。拘束力がある場合は、孔内コンクリートが破壊しても、ずれ耐力は低下しない。

大分類	孔あき鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	3次元弾塑性FEMによる孔あき鋼板ジベルの設計式に関する基礎的考察		
著者	藺田佳巨, 手嶋康博		
公開年次	2008年	出典	応用力学論文集
解析の目的	孔あき鋼板ジベルの3次元弾塑性有限要素解析を行い, 既往の設計式の中でも基本的で簡易な式と考えられるLeonhardtの式に関して, その妥当性と適用範囲に関する考察を解析的に試みる.		
解析対象	供試体の鋼板の寸法は, 孔径60mm, 鋼板厚さ12mm, 孔の中心間隔140mm, 鋼板長さ420mm.		
	<p>(a) 側面図 (b) 断面図</p> <p>図-6 押抜きせん断試験供試体図 (単位: mm)</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	3次元弾塑性モデル, 供試体の対称性を考慮して1/4 モデル.		
	<p>(a) モデル全体図 (b) 鋼板拡大図</p> <p>図-7 実験モデルの要素分割図</p>		
要素	コンクリート: ソリッド要素 鋼: ソリッド要素		
ずれ評価	孔部のコンクリートのずれを評価するずれ要素 (薄い等方弾性体) を使用		
材料力学特性	鋼材: バイリニア コンクリート: 完全弾塑性		

解析結果	
実験結果との比較	<p>図-9 荷重-相対ずれの実験値と解析値の比較</p>
結果概要	<p>実験では約500kNで最大耐力を示し、その後徐々に剛性が低下しているのに対し、解析では約600kN付近まで耐力が上昇し、最大耐力時の相対ずれ量も実験値より大きくなっている。また、初期勾配も解析値の方が小さい。この初期勾配や変位量の差は現実には存在する付着力や摩擦力の影響を無視していることが一つの要因であると考えられる。</p> <p>また、最大耐力については、実験値は500kN程度であるが、設計式から計算した値は646kNと解析値に近いものであった。したがって、この耐力差は供試体の個体差による可能性が考えられる。</p>
備考	
<p>本解析手法は変形量を精度良く求める目的には適していないが、耐力評価には用いることが可能であると考えられる。</p>	

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	孔あき鋼板ジベルを用いた鋼-コンクリート複合橋脚の設計		
著者	志村敦, 内田諭, 眞嶋隆行		
公開年次	2004年	出典	土木学会第59回年次学術講演会
解析の目的	PBLの実験より得られた荷重-変位関係を考慮した3次元FEM解析を実施し, PBLの設計を行う。 解析対象は, 上部工と橋脚の剛結構造とし, 鋼-コンクリート部材の接合位置は, 地震時に発生する断面力が比較的小さい箇所とする。		
解析対象	 <p>図-1 対象橋脚構造一般図</p>  <p>図-2 複合部・構造詳細</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	<p>3次元弾塑性性モデル</p>  <p>図-4 解析のモデル</p>		
要素	<p>PBL: バネ要素 (非線形バネ) 鋼材: シェル要素</p>		
材料力学特性	<p>PBL: 実験より得られた荷重-変位関係</p>		

解析結果

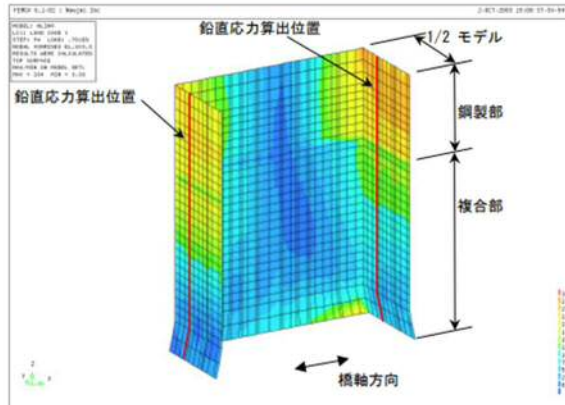


図-5 FEM 解析結果コンター図
(RC 上端終局荷重レベル・鋼製部・橋軸方向)

実験結果
との比較

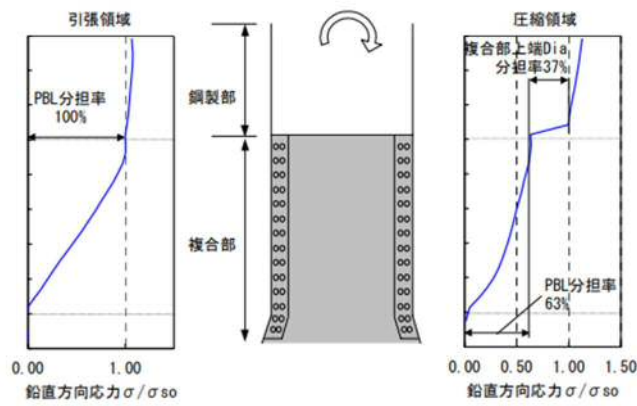


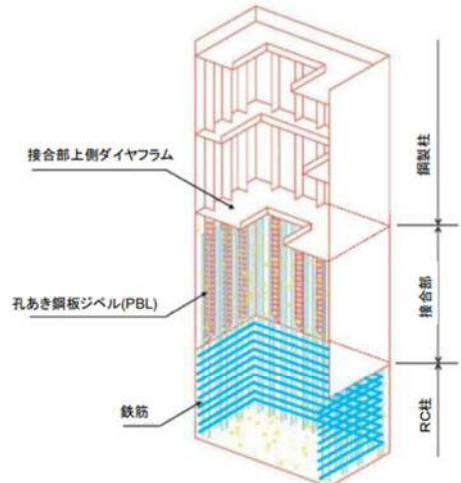
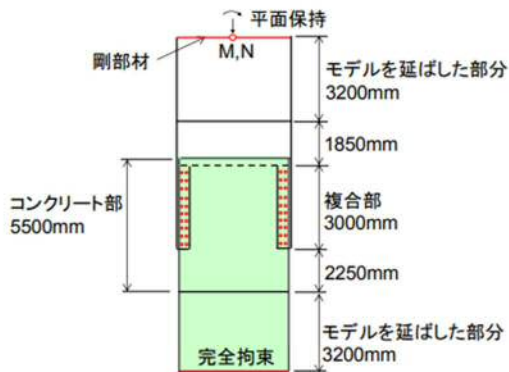
図-6 鋼製部鉛直応力分布図

結果概要

圧縮領域におけるPBL分担率が、橋軸方向荷重時では63%、橋軸直角方向荷重時では73%であり、引張領域においては、PBL分担率が100%であることが確認できた。

備考

今回の複合構造は、従来のアンカーフレーム方式と比較すると明らかに構造が単純化されており、大きなコストの縮減が期待できる。

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	鋼・コンクリート複合橋脚接合部の構造合理化		
著者	篠原聖二, 加藤祥久		
公開年次	2010年	出典	土木学会第65回年次学術講演会
解析の目的	接合部の構造合理化に資することを目的として, フランジ側PBL, 接合部上面のダイヤフラムおよびウェブ側PBLの荷重の分担について, 3次元FEM解析を用いた検討を行う。		
解析対象	<p>鋼製柱と鉄筋コンクリート柱を接合したモデル。(アンカーフレームが不要となる構造)</p>  <p>図-1 鋼・コンクリート複合橋脚</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	<p>3次元弾塑性モデル 接合部を中心とした部分モデルとし, 接合部に境界条件の影響が出ないように, 上下端の断面を伸ばしたモデルで実施。</p>  <p>図-2 解析モデル</p>		
要素	<p>コンクリート: ソリッド要素 鋼板: シェル要素 PBL: バネ要素</p>		
要素境界	<ul style="list-style-type: none"> ダイヤフラムとコンクリートは接触設定 (圧縮のみ伝達) 付着は無視 		
材料力学特性	<p>PBL: 非線形バネ (トリリニア) 鋼材・コンクリート材料: 記載なし</p>		

解析結果

解析結果

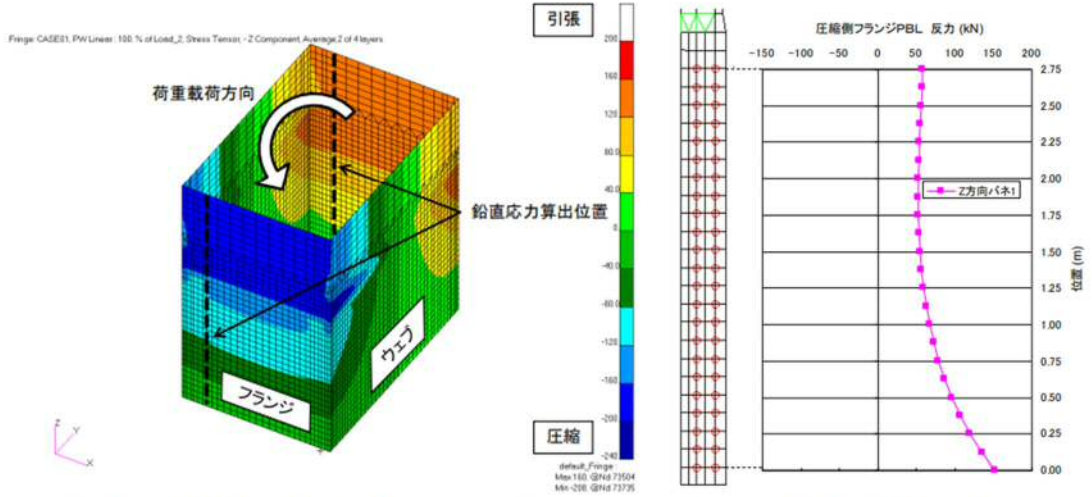


図-4 鋼製部鉛直方向応力コンター図

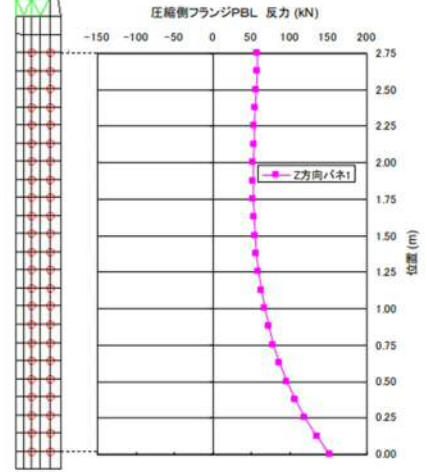


図-6 PBL 鉛直方向ばね反力分布

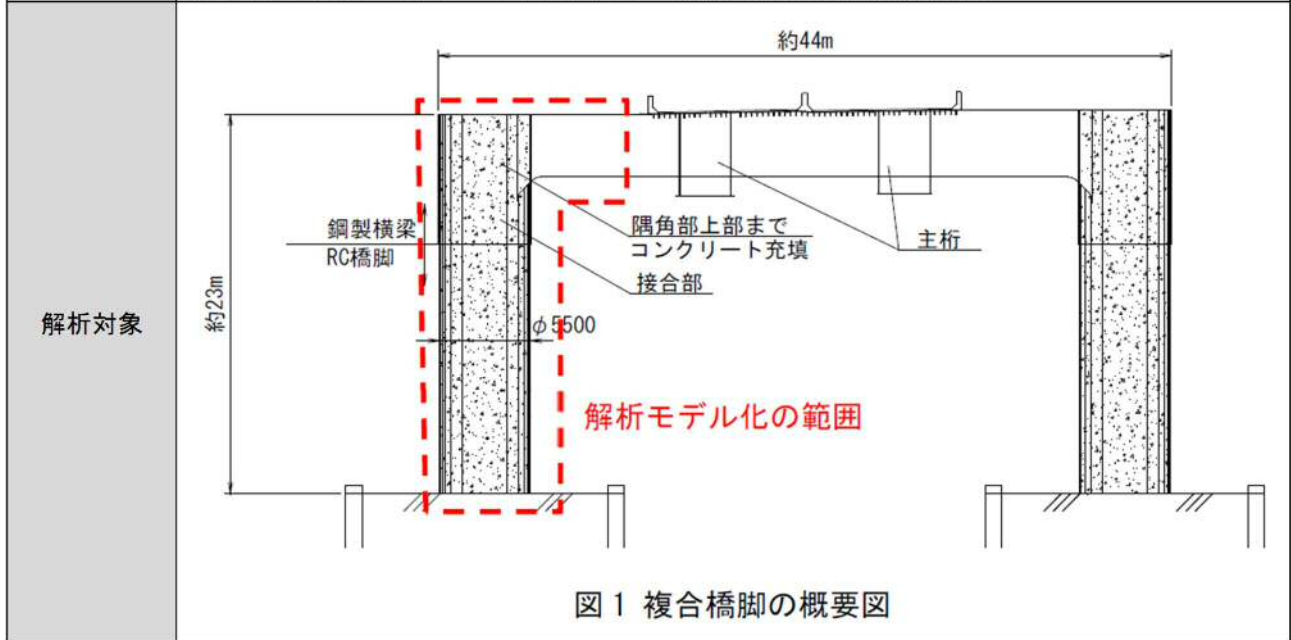
結果概要

接合部では、鋼製柱からの作用力がPBLとダイアフラムにそれぞれ分担されていることがわかる。
PBLの反力は、上端・下端でおおきくなるが、弾性範囲内に収まる。

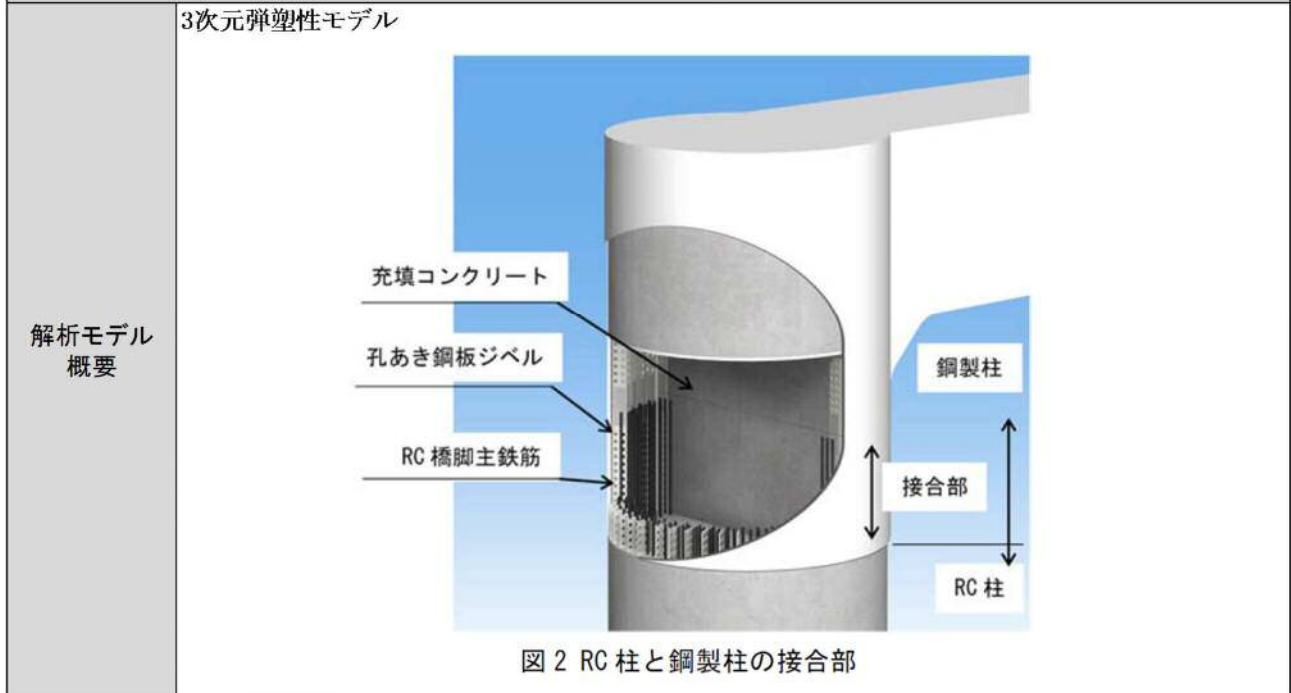
備考

ウェブ側のPBLも少なからず荷重を分担しており、設計法を見直すことでPBLの枚数や板厚の減少などの接合部構造の合理化が可能になると考えられる。

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	弾塑性有限変位FEM解析を用いた複合橋脚の終局限界状態に関する一考察		
著者	磯部龍太郎, 副島直史, 水口知樹, 志治謙一, 大嶋雄		
公開年次	2017年	出典	土木学会第72回年次学術講演会
解析の目的	複合橋脚の各部材間の破壊順序, および構造物全体の終局強度に対する材料強度のばらつきおよび隅角部中詰めコンクリートの影響について3次元FEM解析にて検討する.		



解析モデルの概要



要素	PBL: バネ要素 鋼材: シェル要素 コンクリート: ソリッド要素
付着	鋼とコンクリートの付着と摩擦は無視, 接触考慮
材料力学特性	PBL: 非線形バネ (パイリニア) 鋼材: パイリニア コンクリート: 道示単純コンクリート

解析結果

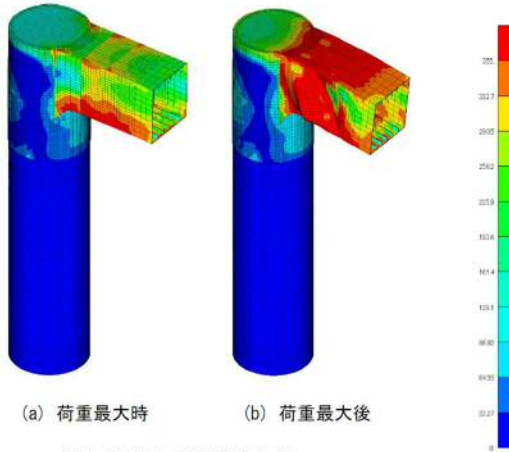


図4 変形図 (変形倍率 3.0)

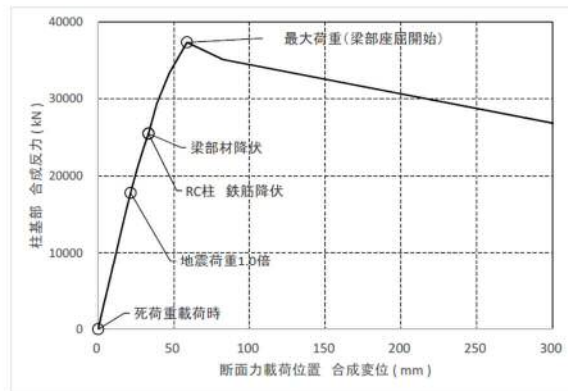


図3 荷重-変位図 ($\sigma_{ck}=30N/mm^2$,
面内曲げモーメント着目, 中詰めコンあり)

解析結果

結果概要

地震時荷重の1.0倍までは各部材は弾性範囲であり、非線形時刻歴応答解析と整合している。荷重を増加させ続けると、まずRC柱基部の鉄筋の降伏と鋼製梁部の降伏がほぼ同時に発生し、その後、鋼製梁ウェブに座屈変形が生じた時点で荷重が最大となった。補修が難しいことから損傷を生じさせないことを耐震設計性能目標とした接合部および隅角部は荷重最大時でも弾性範囲に収まっている。降伏を示す赤色が鋼製梁ウェブ下方に主に生じているものの、隅角部の発生応力は比較的小さい。鋼製梁ウェブの座屈変形が進行した後は、隅角部の一部にも塑性化が見られる。

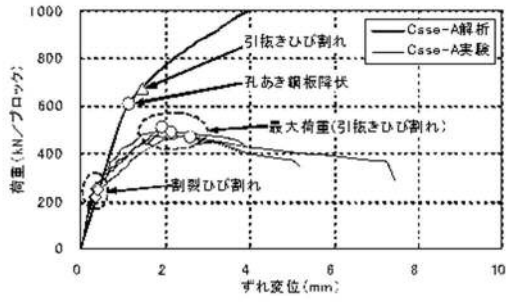
備考

本検討で対象とした複合橋脚に対してプッシュオーバー解析を行ったところ、損傷を生じさせたくない部位を弾性範囲で収めたまま構造物全体の終局限界状態を迎え、設計思想と整合した破壊シナリオであることを確認できた。

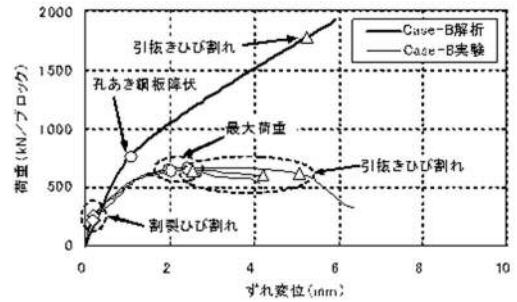
大分類	孔あき鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	孔あき鋼板リブの直交方向ずれ止め特性に関する実験的研究		
著者	谷中聡久, 平嶋健太郎, 春日井俊博, 森下泰光		
公開年次	2016年	出典	第6回複合構造の活用に関するシンポジウム
解析の目的	孔あき鋼板ジベルと直交する方向せん断耐力等のずれ止め特性が明確でない点や, 合成床版の底鋼板厚は薄いため, 水平せん断力作用時に孔あき鋼板リブの取り付け底鋼板が面外変形し, ずれ止めのせん断耐力の低下が懸念される点などを明確にするために, 載荷実験を行いずれ止めのせん断耐力およびせん断耐力におよぼす影響を確認することを目的とする。		
解析対象	<p style="text-align: center;">(a) 引抜き実験 (b) 押し抜き実験</p> <p style="text-align: center;">図2 載荷/法模式図</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	<p>2次元平面モデル</p>		
解析モデル	<p>鋼材：2次元平面ひずみ要素 コンクリート：2次元平面ひずみ要素 PBL：バネ要素</p>		
付着	鋼とコンクリートの付着, 摩擦は無視, 接触考慮		
材料力学特性	<p>PBL：非線形バネ 鋼材：バイリニア コンクリート：完全弾性体</p>		

解析結果

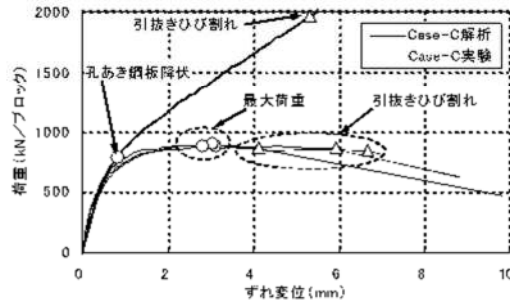
実験結果との比較



(a)Case-A



(b)Case-B



(c)Case-C

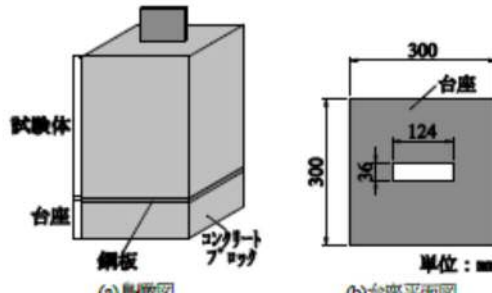
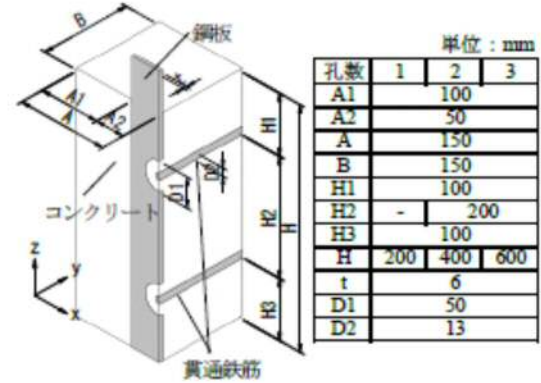
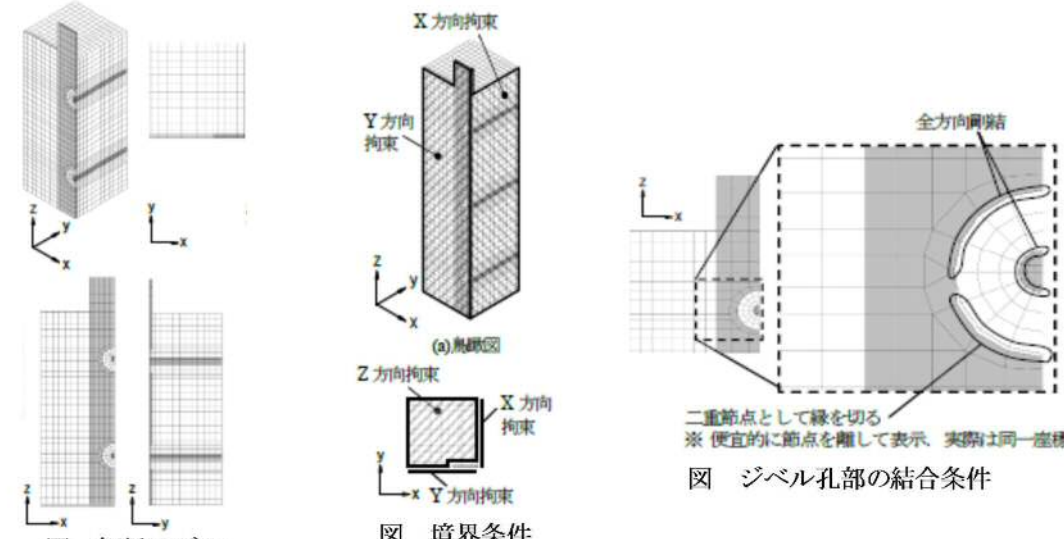
図-14 各ケースの荷重とずれ変位の関係

結果概要

合成床版のように、孔あき鋼板リブよりも薄い底鋼板にずれ止めとして適用すると、板厚の厚い場合に比較してせん断耐力は低下するが、孔あき鋼板リブのリブ方向と同等の最大せん断耐力を有していることが明らかになった。

備考

孔あき鋼板の直交方向ずれ止め特性について、今後はコンクリートの引抜きひび割れ、孔あき鋼板の降伏、孔あき鋼板溶接部の降伏等が生じるせん断耐力を明らかにし、設計方法を検討することが課題。

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合																																																																									
論文題目	複数配置した孔明き鋼板ジベルのせん断力分担特性に関する解析検討																																																																											
著者	久保典之, 酒井武志, 大口真司, 梅原郁弘, 中島章典																																																																											
公開年次	2013年	出典	土木学会論文集A2, Vol. 69, No. 2																																																																									
解析の目的	複数配置した孔明き鋼板ジベルのせん断力分担特性に着目し, 既往の押抜き試験結果を再現するFEM解析を実施し, せん断力-ずれ変位関係, せん断力分担率, 鋼板のひずみなどを試験結果と比較し, 解析モデルおよび解析結果の妥当性を確認する。																																																																											
解析対象	<p>孔数 (1~3) と貫通鉄筋の有無をパラメータとした6ケースの押抜き試験用供試体</p>  <p>図 試験体概要図</p> <p>表 試験ケース</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>孔数</th> <th>貫通鉄筋</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>タイプ1</td> <td>1</td> <td>なし</td> </tr> <tr> <td>タイプ2</td> <td>1</td> <td>あり</td> </tr> <tr> <td>タイプ3</td> <td>2</td> <td>なし</td> </tr> <tr> <td>タイプ4</td> <td>2</td> <td>あり</td> </tr> <tr> <td>タイプ5</td> <td>3</td> <td>なし</td> </tr> <tr> <td>タイプ6</td> <td>3</td> <td>あり</td> </tr> </tbody> </table>  <p>図 試験体寸法図</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">単位: mm</th> </tr> <tr> <th>孔数</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1</td> <td></td> <td>100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td></td> <td>50</td> <td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td></td> <td>150</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B</td> <td></td> <td>150</td> <td></td> </tr> <tr> <td>H1</td> <td></td> <td>100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>H2</td> <td>-</td> <td>200</td> <td></td> </tr> <tr> <td>H3</td> <td></td> <td>100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>200</td> <td>400</td> <td>600</td> </tr> <tr> <td>t</td> <td></td> <td>6</td> <td></td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td></td> <td>50</td> <td></td> </tr> <tr> <td>D2</td> <td></td> <td>13</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				孔数	貫通鉄筋	タイプ1	1	なし	タイプ2	1	あり	タイプ3	2	なし	タイプ4	2	あり	タイプ5	3	なし	タイプ6	3	あり	単位: mm				孔数	1	2	3	A1		100		A2		50		A		150		B		150		H1		100		H2	-	200		H3		100		H	200	400	600	t		6		D1		50		D2		13	
	孔数	貫通鉄筋																																																																										
タイプ1	1	なし																																																																										
タイプ2	1	あり																																																																										
タイプ3	2	なし																																																																										
タイプ4	2	あり																																																																										
タイプ5	3	なし																																																																										
タイプ6	3	あり																																																																										
単位: mm																																																																												
孔数	1	2	3																																																																									
A1		100																																																																										
A2		50																																																																										
A		150																																																																										
B		150																																																																										
H1		100																																																																										
H2	-	200																																																																										
H3		100																																																																										
H	200	400	600																																																																									
t		6																																																																										
D1		50																																																																										
D2		13																																																																										
解析モデルの概要																																																																												
解析モデル	<p>3次元非線形モデル (押抜き試験用供試体と同サイズの1/4モデル)</p>  <p>図 解析モデル</p> <p>図 境界条件</p> <p>図 ジベル孔部の結合条件</p> <p>二重点点として縁を切る ※ 便宜的に節点を離して表示, 実際は同一座標</p>																																																																											
解析モデル	鋼材 (鋼板, 鉄筋) : ソリッド要素 コンクリート : ソリッド要素																																																																											
付着	鋼板-コンクリート : 考慮しない 鋼板 (ジベル孔部) -コンクリート : 上半分は全方向剛結, 下半分は全方向自由 貫通鉄筋-コンクリート : 完全付着																																																																											
材料力学特性	コンクリート (圧縮側) : 圧縮強度まで修正Ahmadモデル, 圧縮強度以降はジベル孔部一定, それ以外は中村・松貝モデル コンクリート (引張側) : 非線形 (コンクリート標準示方書の破壊エネルギー考慮モデル) 鋼材 : パイリニア (降伏後の剛性は初期剛性の2%)																																																																											

解析結果

実験結果との比較

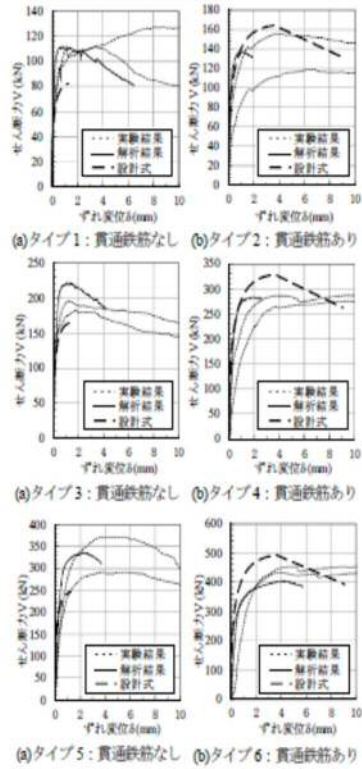


図 せん断力-ずれ変位関係

表 最大せん断力時のせん断力分担率

タイプ	孔数	位置	貫通鉄筋なし			解析結果
			実験結果			
			試験体1	試験体2	平均値	
3	2	上段	63%	69%	66%	50%
		下段	37%	31%	34%	
5	3	上段	46%	53%	50%	39%
		中段	33%	25%	29%	
		下段	21%	22%	22%	
タイプ	孔数	位置	貫通鉄筋あり			解析結果
			実験結果			
			試験体1	試験体2	平均値	
4	2	上段	61%	62%	62%	50%
		下段	39%	38%	39%	
6	3	上段	45%	48%	47%	36%
		中段	32%	32%	32%	
		下段	23%	20%	22%	

結果概要

- ・解析により、実験に近い最大せん断力が得られた
- ・貫通鉄筋の有無による最大せん断力の倍率は実験と解析でほぼ同じ1.2~1.3倍であった
- ・最大せん断力時のせん断力分担率は、実験では上段が大きく負担するのに対し、解析ではそれぞれ同程度に分担した
- ・貫通鉄筋の有無によるせん断力分担の傾向に差は認められなかった

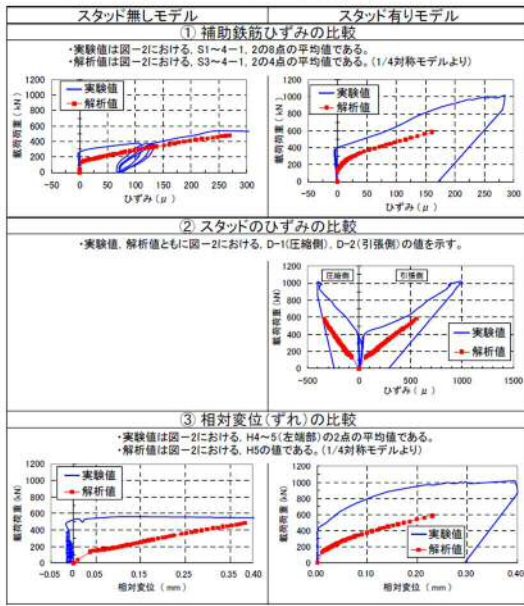
備考

メッシュサイズ、ジベル径、ジベル間隔、鉄筋径などのパラメータに関する検討が今後の課題

大分類	孔明き鋼板ジベル	小分類	鋼コンクリート接合
論文題目	複数配置した孔明き鋼板ジベルのせん断分担特性に関する解析検討		
著者	松村達也, 倉田幸宏, 鈴木統, 古内仁, 上田多門		
公開年次	2008年	出典	構造工学論文集, Vol. 54A
解析の目的	孔明き鋼板ジベルとスタッドジベルを併用する合成床版を対象に, 設計荷重レベルにおける孔ジベルとスタッドジベルのせん断力の文負担機構について考察する.		
解析対象	<p>孔明き鋼板ジベルとスタッドジベルを併用した合成床版の静的曲げ荷重試験用供試体</p> <p>図 試験体概要図</p>		
解析モデルの概要			
解析モデル	<p>3次元非線形モデル (供試体の1/4モデル)</p> <p>図-5 解析モデル</p> <p>図 型鋼・ジベル孔部の結合条件</p>		
解析モデル	<p>コンクリート：ソリッド要素 鋼板（型鋼含む）：シェル要素 スタッド，鉄筋：トラス要素</p>		
付着	<p>鋼板，型鋼-コンクリート：付着無視</p>		
材料力学特性	<p>コンクリート（圧縮側）：道路橋示方書Ⅲの応力-ひずみ関係 コンクリート（引張側）：コンクリート標準示方書の引張軟化特性 鋼材（鋼板，型鋼）：バイリニア（降伏後の剛性が初期剛性の1/100） 鋼材（鉄筋，スタッド）：線形</p>		

解析結果

表 スタッド有無によるひずみ、相対変位の比較



実験結果との比較

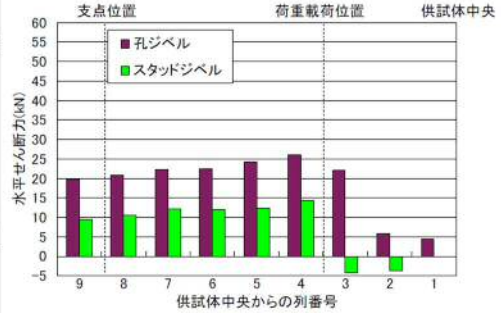
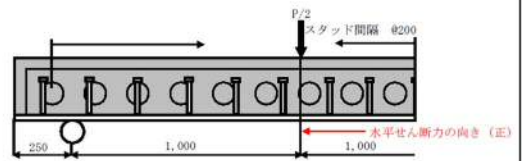


図 孔ジベルとスタッドジベルの水平せん断力分担比率 (設計荷重時)

結果概要

- ・今回の解析手法で静的曲げ載荷試験の挙動を近似的に再現できることが確認できた。鋼板-コンクリート間の付着・すべり摩擦については考慮していないが、付着切れ後のずれ挙動やスタッドの変形挙動は実験結果と近似的に一致した。
- ・曲げせん断区間の孔ジベルとスタッドジベルの水平せん断力分担率は平均で74.0%、26.0%となり、孔ジベルの分担率が高くなることが確認できた。

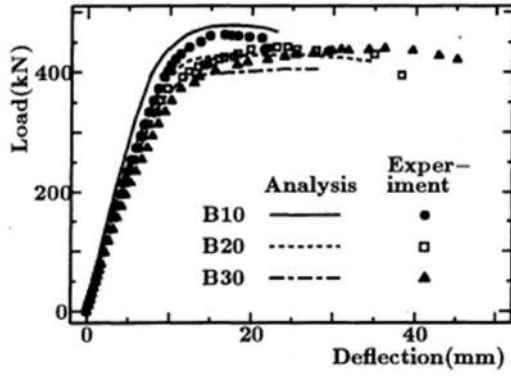
備考

1列あたりのスタッド本数やスタッド径、孔ジベルの孔径や孔間隔等のパラメータが、水平せん断力の分担割合に与える影響については検討が必要。

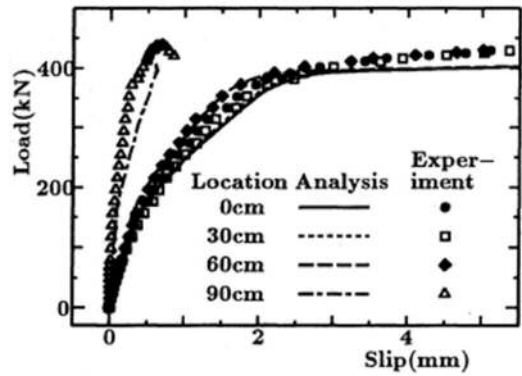
大分類	鋼とコンクリート	小分類	不完全合成桁
論文題目	ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全合成桁の弾塑性解析		
著者	中島章典, 池川真也, 山田俊行, 阿部英彦		
公開年次	1996年4月	出典	土木学会論文集, No. 537/I-35, pp. 97-106
解析の目的	ずれ止めの挙動が非弾性領域にまで及ぶ不完全合成桁を対象として, 押し抜き試験より得られたずれ止めの非線形荷重-ずれ関係を, 剛体ばねモデルにおけるずれ止め要素の水平ばね特性に導入した弾塑性解析を行い, 対応する桁試験の結果と比較して解析法の有効性を検証する.		
解析対象	<p>不完全合成桁: 桁高さ250mm, 軸径13mm, 全高70mmのスタッド2列, 床版厚さ90mm スタッドの橋軸方向の配置間隔: 100, 200, 300mmの3試験体 (ケース名...B10, B20, B30)</p> <p>(Dimensions in mm)</p>		
解析モデルの概要			
使用要素	<p>桁, 床版: 剛体要素 (要素間に各材料の弾塑性挙動を反映した軸・せん断ばねを設定) スタッド: ばね要素 (押し抜き試験での荷重-ずれ関係を反映した水平・鉛直ばねを設定)</p>		
解析モデル	<p>桁試験体および断面の要素分割</p> <p>要素間の剛体ばねモデル</p>		

解析結果

実験結果との比較



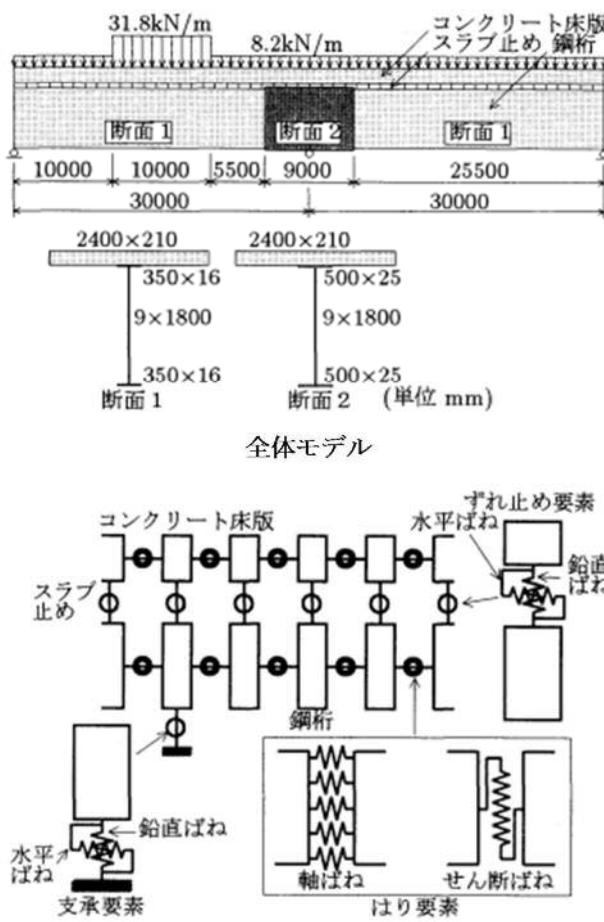
【荷重-載荷点でのたわみ】



【荷重-桁・床版のずれ (B30試験体)】

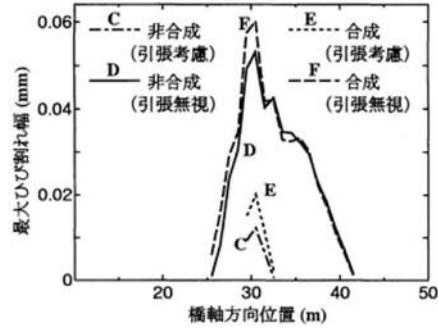
結果概要

- ①本解析法による不完全合成桁の荷重-たわみおよび荷重-ずれ関係は、対応する実験結果に良好に一致した。
- ②鋼桁をはり要素としてモデル化しているため、スタッドが伝達する水平せん断力の影響による桁フランジの応力集中の影響などは考慮できない。そのため、桁フランジのひずみ分布の実験結果と解析結果には多少の差異が認められた。しかし、荷重載荷点の床版のひずみ分布の解析結果は実験結果によく一致した。
- ③スタッドに作用する軸ひずみは、桁と床版の鉛直方向の結合条件と水平方向の変位の影響を受けるが、本解析結果において、水平変位も考慮してスタッドの軸ひずみを算定することによって、この軸ひずみもある程度追跡できる。

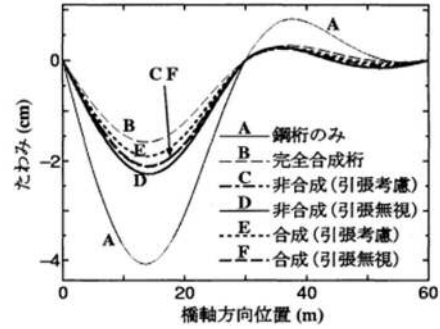
大分類	鋼とコンクリート	小分類	連続非合成桁
論文題目	活荷重レベルにおける連続非合成桁橋の挙動に関する一考察		
著者	中島章典, 溝江慶久		
公開年次	1999年7月	出典	土木学会論文集, No. 626/I-48, pp. 163-172
解析の目的	スラブ止めを有する連続非合成桁橋の活荷重レベルにおける実挙動を再現し, 設計値と比較することを目的として, 剛体ばねモデルを用いた非線形解析によりコンクリート床版のひび割れ, たわみ, スラブ止めに作用する水平せん断力の大きさを検討する.		
解析対象	1スパン30m, 2車線当たりで鋼4本主桁を有する2径間連続非合成桁橋		
解析モデルの概要			
使用要素	桁, 床版: 剛体要素 (要素間に各材料の弾塑性挙動を反映した軸・せん断ばねを設定) ずれ止め (スラブ止めやスタッド): ばね要素 (水平ばねは, 押抜き試験での水平せん断力-ずれ変位関係を反映) 支承: 水平ばねと鉛直ばねでモデル化した支承要素		
解析モデル	 <p style="text-align: center;">全体モデル</p> <p style="text-align: center;">要素間の剛体ばねモデル</p>		

解析結果

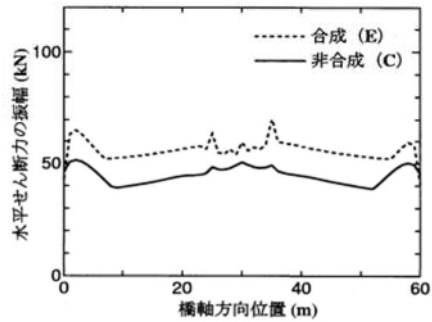
解析結果



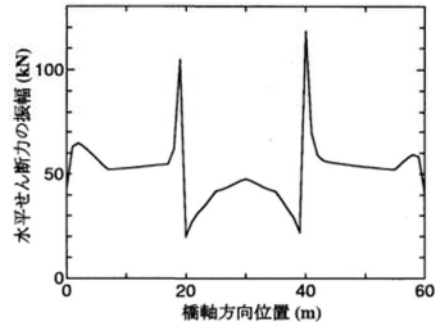
【橋軸方向最大ひび割れ幅分布】



【橋軸方向たわみ分布（ケースA, Bは設計値）】



【ずれ止めに作用する水平せん断力の振幅分布】



【ずれ止めに作用する水平せん断力の振幅分布】
(中間支点付近スラブ止めの配置を1/2とした断続合成桁)

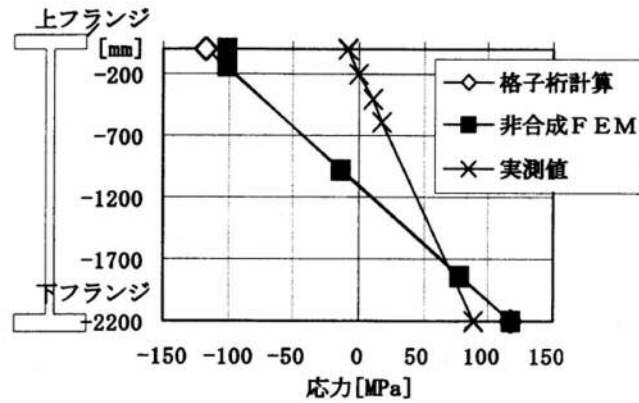
結果概要

- ①連続非合成桁橋では、スラブ止めの合成効果を考慮することにより、支間中間部の最大たわみは、非合成桁橋の設計値よりもかなり低減される。
- ②スラブ止めを有する連続非合成桁橋あるいはずれ止めを十分に配置した連続合成桁橋では、活荷重の作用により中間支点付近のコンクリート床版にひび割れが生じる。しかし、乾燥収縮および温度差による影響の概算値を考慮しても、そのひび割れ幅は、一般的な諸元の解析モデルについてのコンクリート標準示方書に規定されるひび割れ幅の許容値より小さくなると予想される。
- ③スラブ止めを有する連続非合成桁橋あるいは断続合成桁の考えを取り入れた連続桁橋のずれ止めは、疲労の観点からは好ましくない場合もあると考えられ、スタッドを十分に配置した連続合成桁橋の場合の方がずれ止めの疲労の観点からは好ましい。

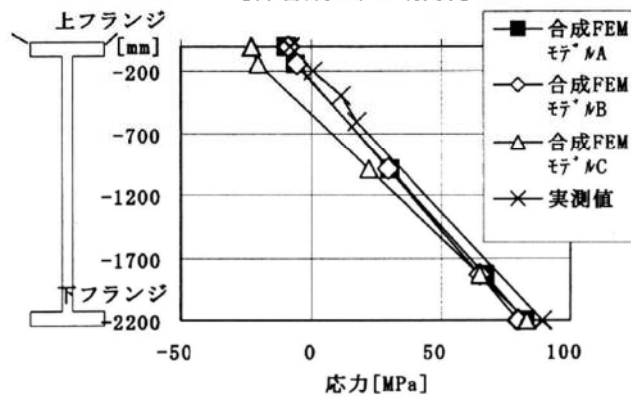
大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁				
論文題目	既設非合成連続桁橋の活荷重応答の実態とその評価						
著者	三木千壽, 山田真幸, 長江進, 西浩嗣						
公開年次	2000年4月	出典	土木学会論文集, No. 647/1-51, pp. 281-294				
解析の目的	道路橋非合成桁橋で設計荷重相当の大きな荷重を載荷する実橋載荷試験で得られた挙動（桁たわみ, 桁ひずみ, 床版と上フランジのずれ等）と非合成桁の合成効果を考慮したFEM解析による挙動を対比し, 両者に差異が生じる要因を検討する.						
解析対象	<p>RC床版非合成4径間連続4主桁橋：主桁高さ2200mm, 上フランジには16φ×600mm丸鋼のスラブアンカー, RC床版厚さ220mm, アスファルト舗装厚さ75mm.</p>						
解析モデルの概要							
解析コード	MARC K6. 2						
使用要素	主桁, RC床版, 地覆, 壁高欄：シェル要素 対傾構, 下横構, 縦補剛材：ビーム要素 主桁とRC床版の間の結合：ビーム要素で表現						
合成作用の解析的表現	主桁とRC床版間のビーム要素の断面2次モーメントIを変化（合成モデルではI=無限大, 非合成モデルではI=0）						
合成モデル解析での床版剛性	<p>2方向直交異方性を持つものとして扱う.</p> <ul style="list-style-type: none"> 橋軸直角方向では, 引張を受けるコンクリート断面を無効とした剛性 橋軸方向の正曲げ区間では, 全横断面でコンクリートを有効とした剛性 橋軸方向の負曲げ区間では, コンクリートを無効とし配力筋・引張補強筋のみを有効とする合成モデルAと全横断面でコンクリートを有効とする合成モデルB 						
解析モデル	<p>二次部材まで詳細にモデル化</p> <p>結合要素の断面2次モーメントを変化させ合成・非合成を表現する</p> <table border="1"> <tr> <td>合成モデル</td> <td>$I = \infty$</td> </tr> <tr> <td>非合成モデル</td> <td>$I = 0$</td> </tr> </table>			合成モデル	$I = \infty$	非合成モデル	$I = 0$
合成モデル	$I = \infty$						
非合成モデル	$I = 0$						

解析結果

主桁応力の
実測値と
解析値の比較



【非合成モデル解析】



【合成モデル解析】

結果概要

【非合成モデル解析】

- ①主桁のたわみの実測値は解析値の半分以下である。
- ②主桁の応力分布について、実測値における中立軸は解析の場合よりもはるか上方に位置する。
- ③上記①②より、実橋では合成作用が生じている。

【合成モデル解析】

- ①主桁のたわみや応力の解析値が実測値に近づく。
- ②床版のコンクリートが橋軸方向の引張応力を負担するモデル（合成モデルB）の解析値が最も実測値に近い。

備考

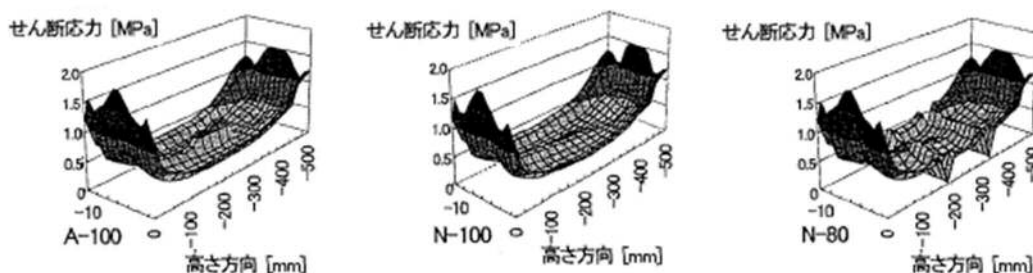
既設桁橋での疲労照査等で、非合成桁橋梁での合成効果を見込むことができれば、構造補強が過大にならずコストを低減できる。

大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	RC床版と鋼フランジ間の付着とスラブアンカーによるせん断抵抗の評価		
著者	山田真幸, サトーンペンポン, 三木千壽, 市川篤司, 入部孝夫		
公開年次	2001年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 1161-1168
実験の目的	既設のRC床版非合成桁橋梁を対象とし, スラブアンカーおよび付着による床版と上フランジとの結合のメカニズム, 耐荷力, 疲労特性等を明らかにする.		
解析の目的	上記のモデル実験に関連して, 付着面におけるせん断応力分布を求める.		
実験方法／ 解析対象	RC床版と上フランジとの結合の破壊性状, 疲労特性等を検討するための押し抜き試験体(せん断面500mm×200mm)にせん断面での特性(付着面積の大小, アンカーの有無)を変えた6ケースを設定して単調荷重の押し抜き試験と繰り返し荷重試験を実施する.		
解析は, 付着の破壊の発生箇所特定のため, せん断面でのせん断応力分布を求める.			
実験の概要			
試験装置と 測定項目			
解析モデルの概要			
解析コード	MARC 6.3		
使用要素	H型鋼, RCブロック: ソリッド要素 (両者の境界での要素厚の比は弾性係数比 $n = E_s/E_c = \text{約}7$ を考慮してコンクリートの要素厚: 鋼の要素厚 = 約7:1, 剥離面は二重節点) アンカー・鉄筋: トラス要素	解析モデル	

解析結果と実験結果

【上記ケースに対応した解析でのせん断面上下方向せん断応力分布】

解析結果



- ①せん断面上端と下端で平均せん断応力よりも大きなせん断応力が生じており、H型鋼の変形や試験体全体の変形によるものと考えられる。
- ②実際の橋梁で、端部の応力集中が少ない場合の付着のせん断強度は、このような端部の応力集中が発生する実験の場合よりも大きい可能性がある。

実験結果

表-1 静的押抜き試験体結果

試験体	付着面	アンカー	初期ずれ剛性* [MPa/mm]
A-100	100%	有	40.9
N-100	100%	無	33.6
A-NB	0%	有	6.7

*剥離面積を考慮せず約0~40kNで計算

表-2 アンカー無試験体静的押抜き試験結果

試験体	最大荷重 [kN]	最大せん断 応力*[MPa]	初期ずれ剛性 **[MPa/mm]
N-100	105	0.53	33.6
N-90	88	0.49	34.5
N-80	81	0.51	36.4

*剥離面積を考慮し付着面のみで計算
**剥離面積を考慮せず約0~40kNで計算

表-3 アンカー有り試験体静的押抜き試験体結果

試験体	付着の破壊 荷重[kN]	最大せん断 応力*[MPa]	アンカーが降伏 した荷重[kN]
A-100	160	0.80	240
A-80	105	0.63	180
A-NB	—	—	150~200

*剥離面積を考慮し付着面のみで計算

表-4 押抜き試験体疲労試験結果

試験体	スラブ アンカー	人工 剥離面	荷重範囲 [kN]	せん断応力 範囲*[Mpa]	スラブアンカー破壊 までの繰返し回数
A-100	有り	無し	10-130	0.05-0.65	122.5万回で破壊
A-100	有り	無し	10-80	0.05-0.4	200万回で破壊せず
A-80	有り	20%	10-80	0.0625-0.5	600万回で破壊せず
A-NB	有り	全て	10-80	—	147万回で破壊

*剥離面積を考慮し付着面積のみで計算

- ①スラブアンカーと床版・フランジの付着結合では付着のずれ剛性が非常に大きく、アンカーがある場合では付着の破壊まではアンカーに応力は発生しない。
- ②付着が破壊する平均せん断応力は0.5MPa程度であるが、応力集中を考えるとさらに大きな耐荷力を持つ可能性がある。
- ③床版・フランジの付着結合は、静的破壊に至る載荷力の半分程度での200万回の繰返し載荷で破壊しなかった。
- ④付着の破壊後も床版・フランジ間のずれ剛性は比較的大きく、摩擦等の影響が考えられる。

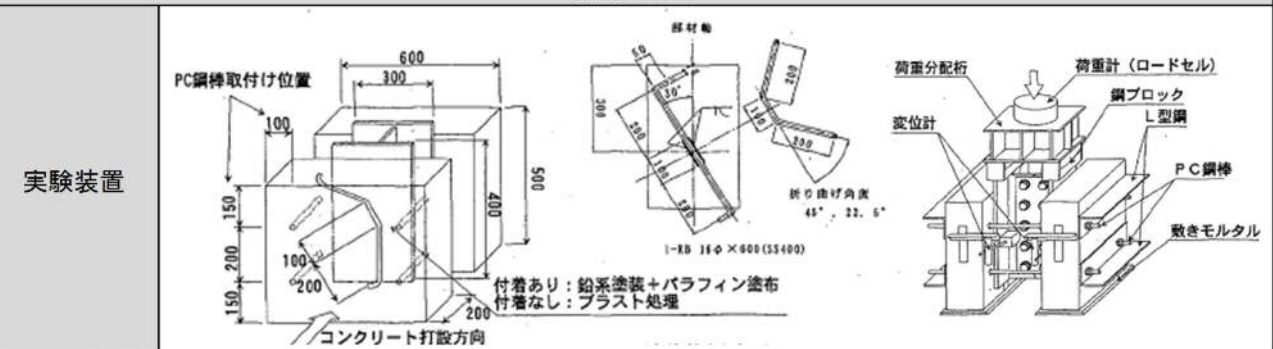
大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	スラブアンカーの静的ずれ耐荷力特性に関する実験的研究		
著者	梶田智子, 平城弘一, 渡辺滉, 高田嘉秀, 宮地真一, 牛島祥貴		
公開年次	2001年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 1373-1380

実験の目的
非合成桁橋にずれ止めとして多用されているスラブアンカーに着目し、ずれ止めに影響する死荷重（床版+舗装）を考慮するためのPC鋼棒による拘束圧を加えたRC床版と鋼桁上フランジ面の付着に対する静的押抜きせん断試験を行い、せん断耐力、ずれ定数、破壊形状を確認する。

右表の橋梁を想定

橋梁諸元	
橋梁形式	RC床版非合成箱桁 (3BOX)
設計荷重	B活荷重 (4車線)
交通量	23,900台/日/車線
大型車混入率	21.40%
総幅員	22.000 m
試験体に換算した幅員	3.700m
床版厚	230 mm
舗装厚	75 mm
床版の橋直方向の付着幅	300 mm
スラブアンカー配置間隔	1000 mm
1箱桁の断面剛度I	40,045,800 cm ⁴
1箱桁の断面係数Q	142,909 cm ³
鉄筋コンクリート単位体積重量	24.5 kN/m ³
アスファルト単位体積重量	22.5 kN/m ³

実験の概要



縦断面図	試験体タイプ						P	B	SIB
	SLP1	SLP2	SLP3	SLB1	SLB2	SLB3			
平面図									
断面図									
付着	なし	なし	なし	あり	あり	あり	なし	あり	あり
曲げ上げ角度	45°	45°	22.5°	45°	45°	45°	なし	なし	スタッドジベル 耐径φ=19mm 高さh=110mm
鉄筋径	φ16	φ17	φ16	φ16	φ16	φ16	なし	なし	
繰返し	なし	なし	なし	あり	あり	なし	なし	なし	あり
締め込み	あり	あり	あり	なし	なし	あり	なし	なし	あり

SLB2：繰返しせん断力の作用で、コンクリート接触面の付着が切れるか確認のため、押抜き試験前に供用荷重レベルの繰返し荷重を実施

SLB3：PC鋼棒による死荷重相当の拘束圧なし

実験結果

実験結果

タイプ	諸元	試験体 No.	最大せん断耐力 (kN/面)		ずれ発生荷重 Q _s (kN/面)	ずれ定数 K (kN/mm)
			実測値Q _{max}	補正値Q _{max}		
タイプSLP1	付着なし スラブアンカー 鉄筋径φ16 角度45°	No. A	375.0	268.3	35.0	405
		No. B	389.3	295.8	38.0	418
		No. C	361.5	251.8	45.0	376
		平均	375.3	272.0	39.7	400
タイプSLP2	付着なし スラブアンカー 鉄筋径φ13 角度45°	No. A	311.3	268.3	45.0	269
		No. B	305.5	203.8	55.3	309
		No. C	305.8	226.2	40.3	354
		平均	307.5	232.3	46.3	311
タイプSLP3	付着なし スラブアンカー 鉄筋径φ18 角度22.5°	No. A	347.5	222.8	40.3	510
		No. B	404.5	277.4	65.3	377
		No. C	324.5	220.5	50.5	480
		平均	358.8	240.2	52.0	456
タイプSLB1	付着あり スラブアンカー	No. A	387.0	295.8	184.8	59
		No. B	365.8	302.4	170.0	158
		No. C	428.5	327.3	130.3	141
		平均	393.8	308.5	161.7	119
タイプSLB2	付着あり スラブアンカー 繰返し載荷あり	No. A	455.0	337.2	60.3	1000
		No. B	413.2	299.1	130.3	474
		No. C	497.0	418.7	20.0	994
		平均	455.1	351.7	30.2	823
タイプSLB3	付着あり スラブアンカー 締め込みなし	No. A	333.0	—	126.0	147
		No. B	274.3	—	113.5	190
		No. C	299.5	—	119.3	480
		平均	302.3	—	119.6	272
タイプSLPB	付着半分 スラブアンカー	No. A	387.8	279.6	125.3	184
		No. B	375.3	242.3	135.3	121
		No. C	402.0	314.2	155.3	168
		平均	388.4	278.7	138.6	158
タイプP	付着なし 折り曲げなし	No. A	237.5	140.6	62.0	—
		No. B	225.5	119.7	62.0	—
		No. C	230.3	118.7	38.0	—
		平均	231.1	126.3	54.0	—
タイプB	付着あり 折り曲げなし	No. A	277.3	143.4	145.0	—
		No. B	278.3	134.6	81.8	—
		No. C	297.3	177.1	160.3	—
		平均	284.3	151.7	129.0	—
タイプSTB	付着あり スタッドジベル	No. A	626.3	536.8	190.3	132
		No. B	509.5	390.2	208.3	130
		No. C	638.3	505.2	205.3	131
		平均	591.4	477.4	201.3	131

最大せん断耐力の補正値
Q_{max} : 試験体に拘束圧を与えるPC鋼棒の付加張力により分担されるせん断力と摩擦力を、実測のせん断力から控除したものの。

ずれ定数K :
試験体のコンクリート接触面の相対ずれ量と作用せん断力の関係において、相対ずれが発生し始めるときの荷重(ずれ発生荷重)を原点とし、実測の最大せん断力との差の1/3の点を結ぶ割線の傾き。

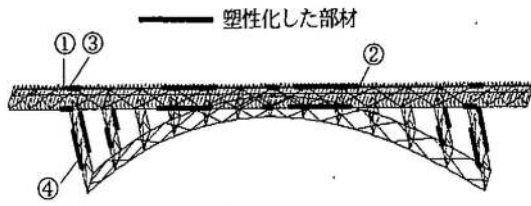
結果概要

- ①スラブアンカーの径が、最大せん断耐力とずれ定数に与える影響は大きい (SLP1~SLP3) . しかし、折り曲げ角度はそれほど大きく影響しない (SLP1とSLP3) . スラブアンカー (φ16mm) 1個当たりの最大せん断耐力は、スタッドジベル (d=19mm) 2本に相当する (SLB1とSTB) .
- ②スラブアンカーを溶接した鋼フランジ面の付着により、最大せん断耐力が大きくなるが、付着がある場合のずれ発生後のずれ定数は付着がない場合よりも小さくなる (SLP1とSLB1) .
- ③疲労設計荷重レベルで繰返し載荷を200万回作用させると、RC床版と鋼桁上フランジ面の付着は切れやすくなる (ずれ発生荷重は小さくなる) が、最大せん断耐力は大きくなる (SLB2とSLB1) . これは繰返し載荷により、作用せん断力が試験体のスラブアンカーに均等化されたためと推定される。

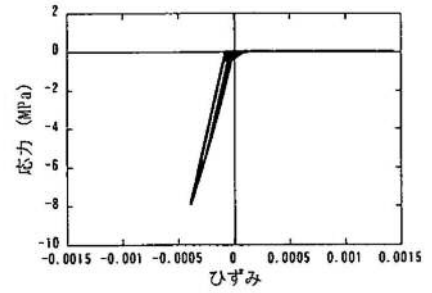
大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	上路式鋼アーチ橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究		
著者	野中哲也, 宇佐美勉, 吉野広一, 坂本佳子, 鳥越卓志		
公開年次	2003年4月	出典	土木学会論文集, No. 731, I-63, pp. 31-49
解析の目的	非合成桁で設計しながら合成構造として挙動する床版と補剛桁をモデル化する場合に, スラブアンカーの非線形性を取り入れる必要があると考えられる. そこで, コンクリート及びスラブアンカーの非線形性を考慮した正確な床版と補剛桁のモデル化を提案し, 3次元モデルとして橋軸及び橋軸直角方向の動的解析を行い, 一般的な上路式アーチ橋の大地震における動的挙動を明らかにする.		
解析対象	<p>上路式鋼ローゼ橋, 橋長130m, アーチ支間100m, 全幅員8.2m (図示)</p>		
解析モデルの概要			
プログラム	-		
要素	基本:ファイバーモデル, 床版モデル比較時のみ床版:ソリッド, 補剛桁等:シェル, 上横構:梁		
床版結合条件	トリリニア非線形バネ (橋軸方向), 剛結合 (橋軸直角方向)		
解析モデル図			

解析結果

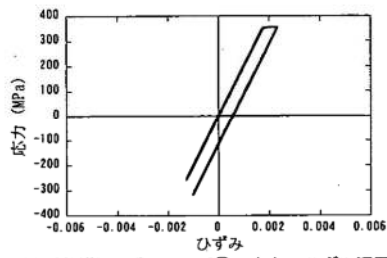
波形の応答



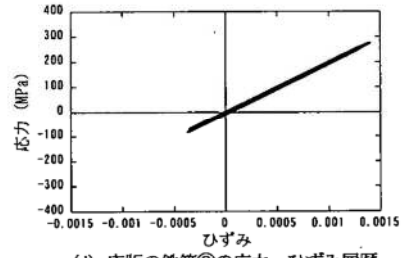
(a) 塑性化した位置



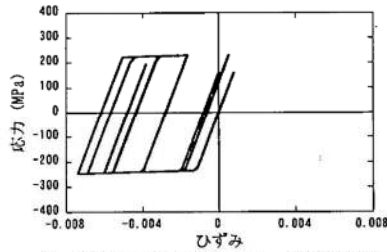
(b) 床版のコンクリート①の応力-ひずみ履歴



(c) 補剛桁の下フランジ②の応力-ひずみ履歴



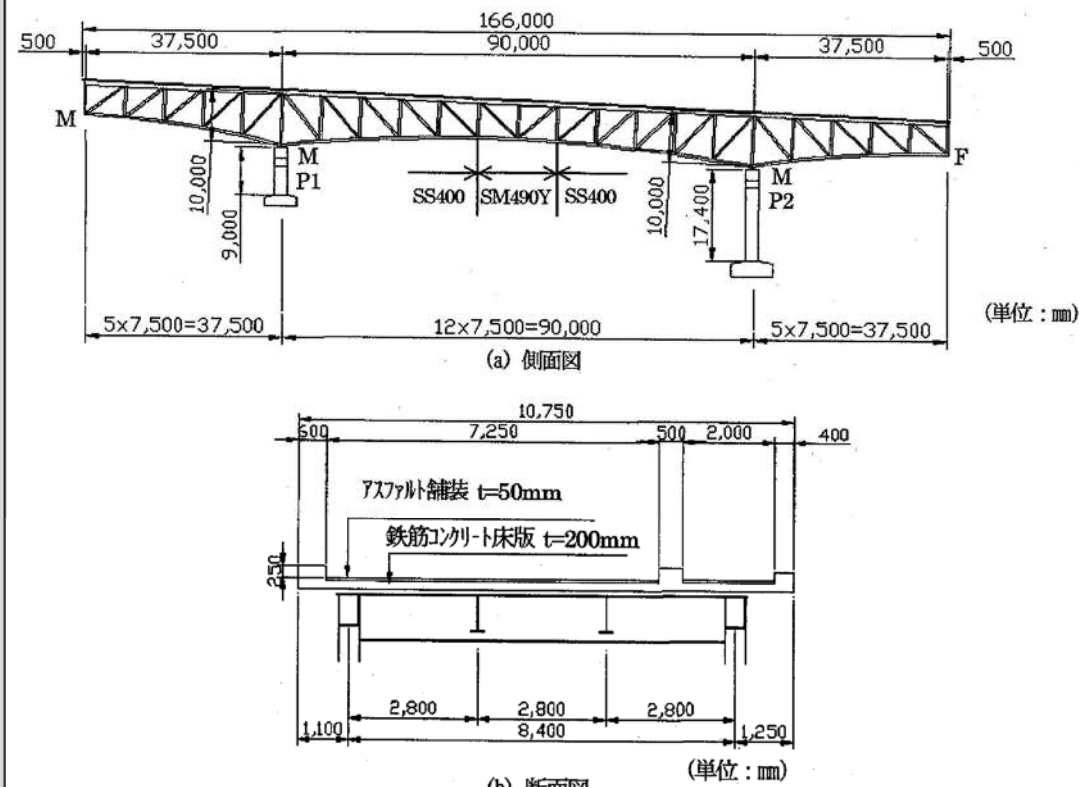
(d) 床版の鉄筋③の応力-ひずみ履歴



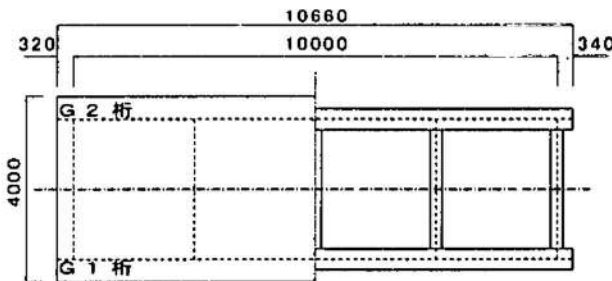
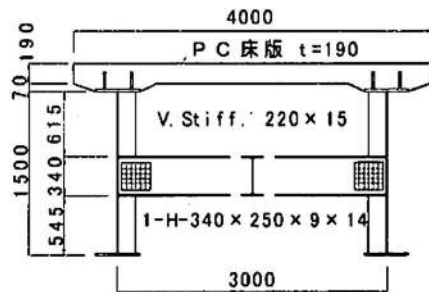
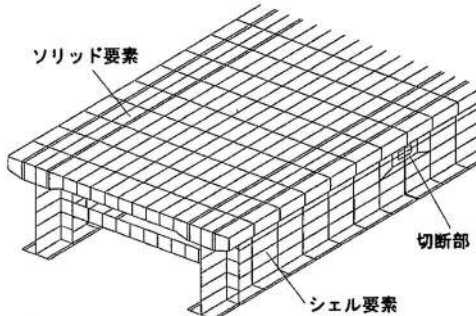
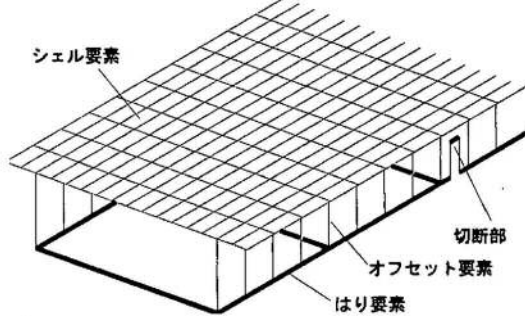
(e) 端支柱フランジ④の応力-ひずみ履歴

結論

床版と補剛桁の塑性化及びずれを考慮していない従来の床版モデルで応答解析を行ったところ、アーチリブが塑性化する結果となり、実際の挙動と異なると考えられる。このとき補剛桁には降伏応力以上の応力が発生していた。

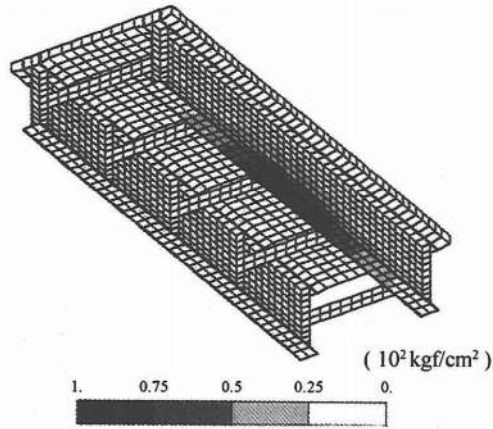
大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	上路式鋼トラス橋の大地震時弾塑性挙動及び耐震性向上に関する研究		
著者	野中哲也, 宇佐美勉, 坂本佳子, 岩村真樹		
公開年次	2003年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 531-542
解析の目的	上路式トラス橋に対して, 主部材の非線形性を考慮したモデル化以外に, 非線形性を示すコンクリートと鉄筋が考慮された床版のモデル化, 床版と上弦材を接合するスラブアンカーの非線形性を考慮したモデル化, 及び上下横構や対傾構等の2次部材の部材座屈を考慮したモデル化等を提案し, このモデルによる動的解析を行い, 大地震における一般的な上路式トラス橋の動的挙動を明らかにする。		
解析対象	<p>3径間連続上路式トラス橋, 昭和56年(昭和47年基準)橋長166m, 全幅員10.75m(図示)</p>  <p>(a) 側面図 (単位: mm)</p> <p>(b) 断面図 (単位: mm)</p>		

解析モデルの概要	
プログラム	-
要素	基本：ファイバーモデル，床版モデル比較時のみ床版：ソリッド，補剛桁等：シェル，上横構：梁
床版結合条件	トリリニア非線形バネ
解析モデル図	<p>節点数：1670 部材数：2180</p> <p>図-3 下弦材の代表的な断面のファイバー要素分割</p> <p>図-4 接合部のモデル化</p>
解析結果	
応答解析結果	<p>○ 降伏 (橋軸方向) □ 降伏 (橋軸直角方向) △ 降伏 (鉛直方向) ● 終局 (橋軸方向) ■ 終局 (橋軸直角方向) ▲ 終局 (鉛直方向)</p> <p>図-16 スラブアンカーの降伏及び終局の位置(橋軸直角方向)</p>
結論	<ul style="list-style-type: none"> ・スラブアンカーは，中間支点から中央部に向かって，中央部以外の大部分のスラブアンカーが橋軸方向に降伏し，一部終局を迎えている。 ・橋軸直角方向に地震動を作用させたときに，固定端支承部近辺の斜材や下弦材が大きく塑性し，また，支承部に大きな負反力が生じた。

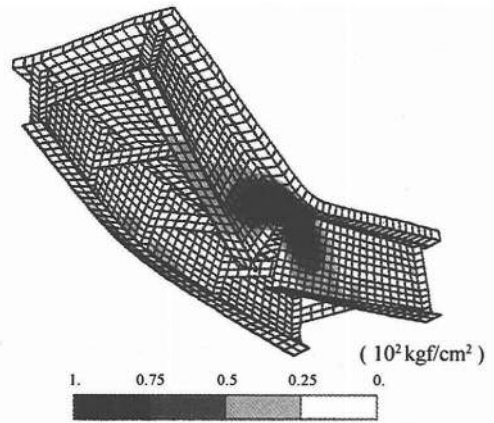
大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	主桁損傷を受けた2主桁橋の残存耐力に関する考察		
著者	橋吉宏, 辻角学, 越後滋, 高橋昭一, 三木千壽		
公開年次	2000年4月	出典	土木学会論文集, No. 647, I-63, pp. 31-49
解析の目的	損傷の程度による挙動変化の把握や崩壊機構の解明を試みることで、および解明された崩壊機構に基づいて2主桁橋の安全性の評価を行なう。		
解析対象	<p>ホロナイ川橋 PC床版2主桁 (図示) : 解析は、当該橋梁検討時の1/2スケールで実施</p>  <p>(a) 平面図</p>  <p>(b) 断面図</p>		
解析モデルの概要			
プログラム	MSC-NASTRAN		
要素	解析モデルA (床版: ソリッド, 鋼桁: シェル) 解析モデルB (床版: シェル, 鋼桁: はり要素)		
床版結合条件	完全合成 (剛体: オフセット要素)		
解析モデル図	 <p>図-20 解析モデルA概要</p>  <p>図-21 解析モデルB概要</p>		

解析結果

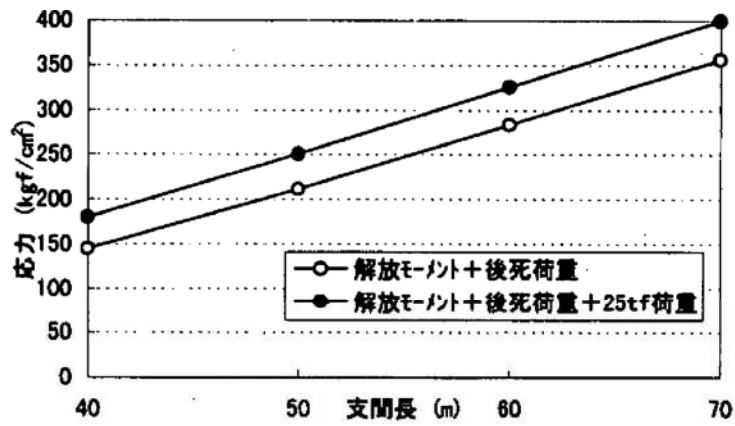
橋軸方向
引張応力の
解析結果



(a) 主桁損傷前



(b) 主桁損傷④



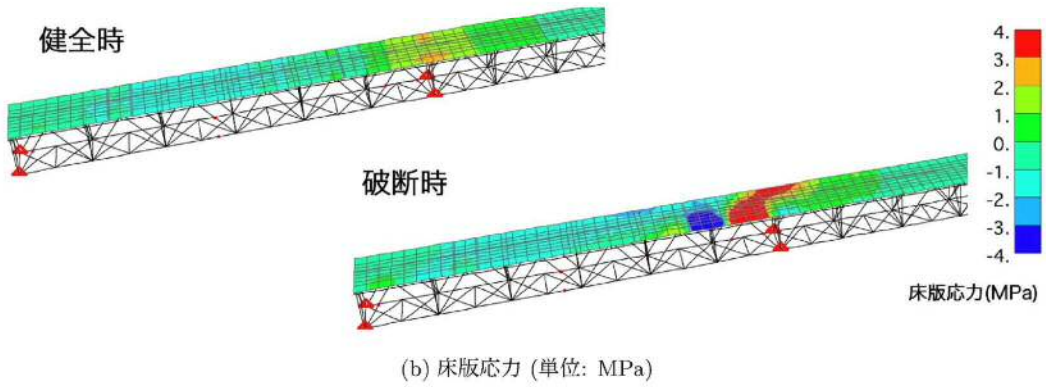
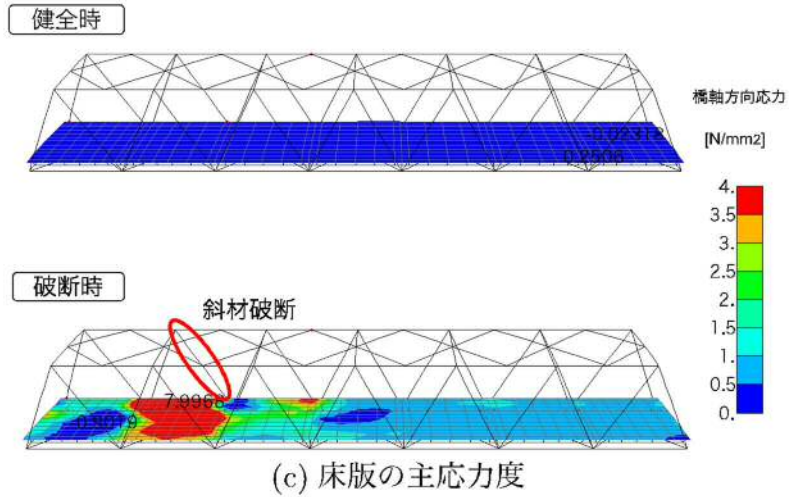
結論

主桁損傷前後でねじりモーメントが作用して断面全体の回転変形が顕著化する。極限解析の下限定理を適用すれば、終局荷重が予測できる。
有効幅員10m, 連続2主桁橋で支間70m以下であれば、主桁が切断された状態で床版に発生する応力度はコンクリート強度以下であり、2主桁橋の終局耐力に至らない。

大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討		
著者	永谷秀樹 他8名		
公開年次	2009年5月	出典	土木学会論文集A, No. 65, No. 2, pp. 410-425
解析の目的	<ul style="list-style-type: none"> ・リダンダンシーの評価手法検討 ・国内の鋼トラス橋がどの程度のリダンダンシーを有しているか、最も危険な損傷シナリオを明らかにする。 		
解析対象	<p>木曽川大橋（左図），3径間連続上路トラス橋（右図：旧道路公団の標準図集）</p> <p>The figure shows three technical drawings of a truss bridge. The top drawing is a side view of a three-span continuous truss bridge with a total length of 210,000 mm. Each span is 70,000 mm long. The bridge has a fixed support (Fix) at the left end and three movable supports (Mov) at the span boundaries. The deck height is 8,000 mm. The bottom-left drawing is a side view of a single span with a total length of 706,300 mm, supported by a fixed support (Fix) and a movable support (Mov). The deck height is 10,000 mm. The bottom-right drawing is a cross-section of the bridge deck, showing a width of 10,690 mm and a height of 8,000 mm. It includes details for the asphalt paving (75 mm thick) and the reinforced concrete deck (220 mm thick). The cross-section shows a truss structure with a height of 1,900 mm and a width of 6,600 mm at the base.</p>		
解析モデルの概要			
プログラム	-		
要素	床版：シェル要素，主構等：梁要素		
床版結合条件	線形バネ要素		
解析モデル図	<p>The figure shows a 3D wireframe model of the bridge structure. A circular inset provides a magnified view of the deck and truss connection. The legend indicates the following element types: 床版: シェル要素 (Deck: Shell element), 主構, 床組, 横桁: はり要素 (Main structure, Deck, Cross beam: Beam element), and スラブアンカー: バネ要素 (Slab anchor: Spring element).</p> <p>Below the model, two diagrams illustrate the modeling of the truss joints. The left diagram shows the physical joint with a truss member and a deck slab. The right diagram shows the modeled joint, labeled 'ケース1: ピン結合' (Case 1: Pin joint) and 'ケース2: 剛結' (Case 2: Rigid joint). An arrow labeled 'モデル化' (Modeling) points from the physical joint to the modeled joint.</p>		
図-6 格点部のモデル化			

解析結果

健全状態と
破断時の比較

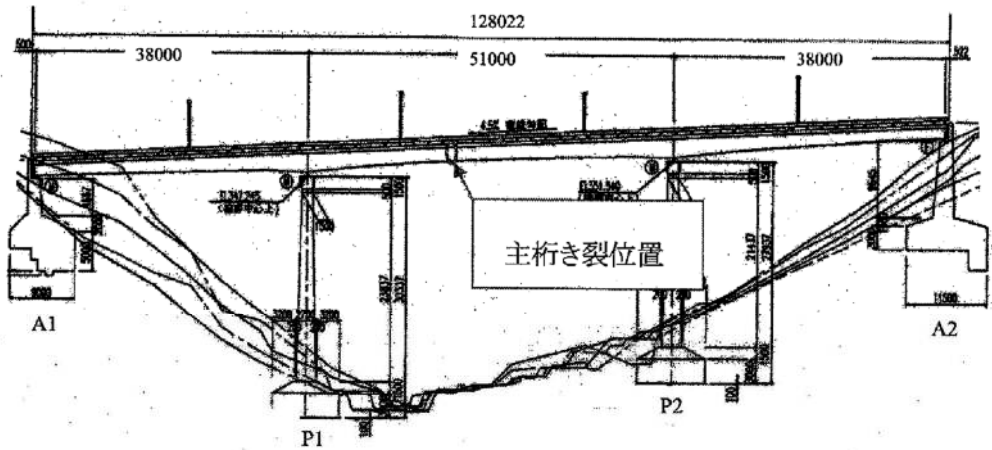
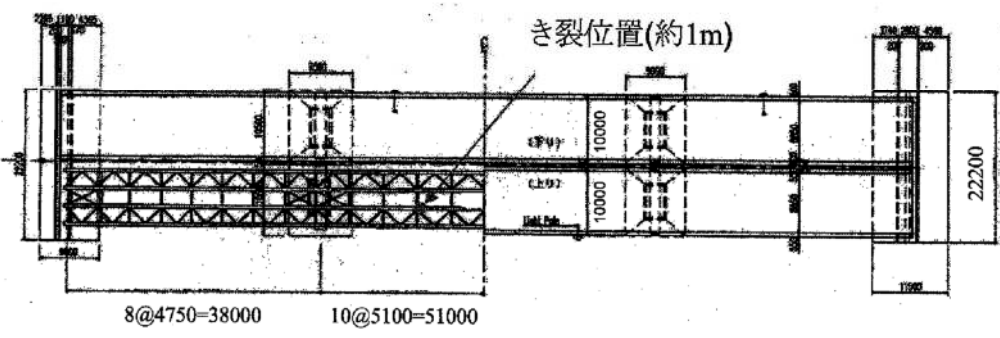
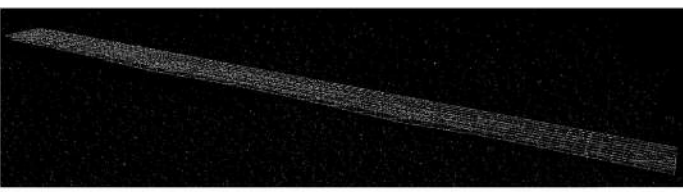
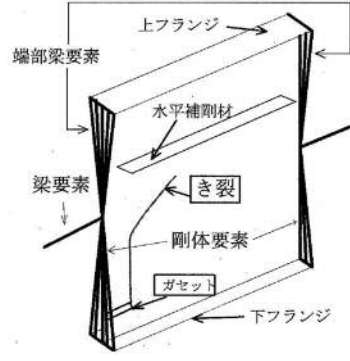


結論

- ・ 支点付近の斜材が損傷すると橋全体の崩壊につながる可能性が高い
- ・ 単純下路トラスでは、上弦材は圧縮部材であるので、破断する可能性は低いですが、破断した場合、他の部材への影響度が高い
- ・ 3径間トラスは、単純トラスよりリダンダンシーが高い
- ・ 床組、床版の耐力が橋全体の安全性評価に与える影響は大きい

備考

FEM解析のモデル化で省略した添接部のリベットの耐荷力や回転変形性能の評価も必要

大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	大きなき裂損傷が発生した鋼桁橋の全体残存耐荷力に関する解析検討		
著者	山口隆司, 金仁浩, 北田俊行, 村本和之		
公開年次	2009年9月	出典	鋼構造論文集, 第16巻, 第63号
解析の目的	疲労き裂に着目して, それに伴う桁橋全体の残存耐荷性能の変化や, き裂損傷による主桁の応力分布の変化を解析的に調べる.		
解析対象	4主桁, 鋼3径間連続非合成鉄桁橋, 橋長128.02m, 全幅員9.9m, 昭和47年竣工		
	 <p>(a) 側面図</p>		
解析対象	 <p>(b) 平面図</p>		
	解析モデルの概要		
プログラム	EPASS-USSP		
要素	床版: シェル要素, 主構等: 梁要素		
床版結合条件	水平バネ, 鉛直バネ		
解析モデル図	 <p>全体モデル</p>		
	 <p>き裂箇所モデル</p>		

解析結果

面外変形の比較

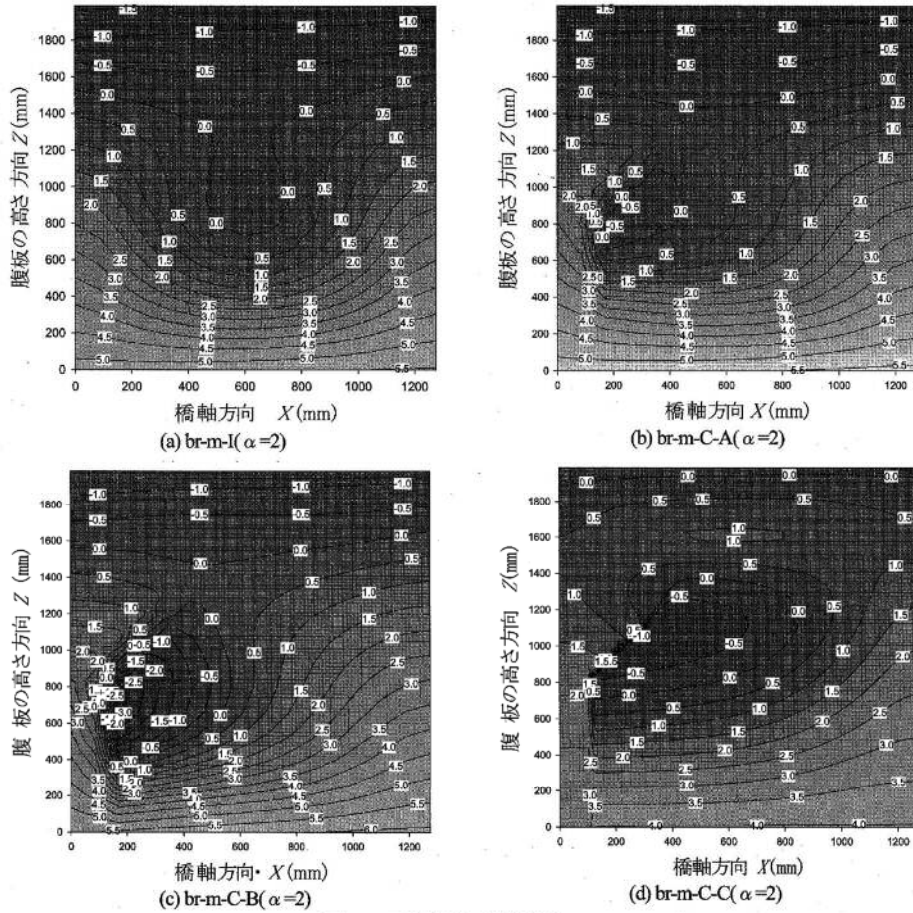
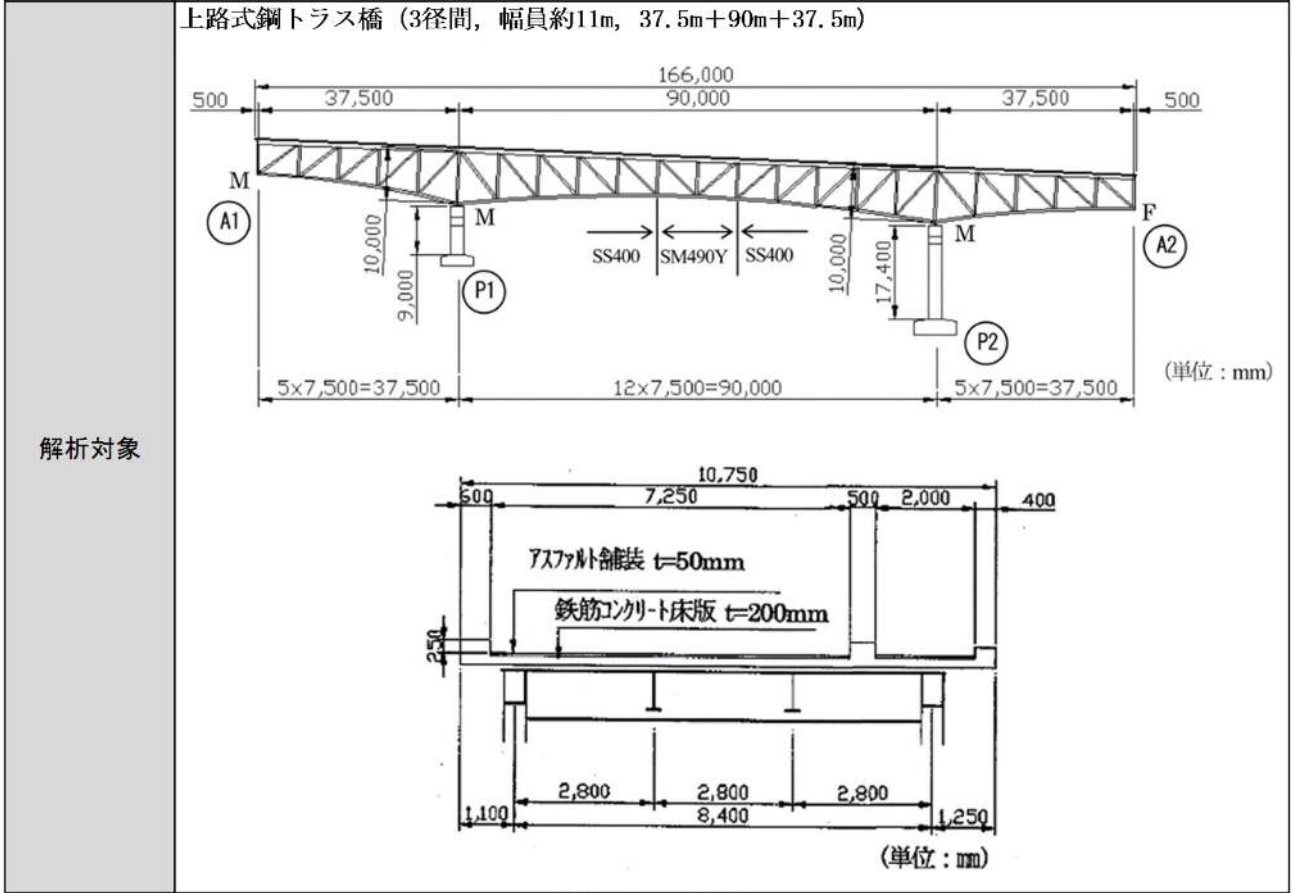


図-14 面外変形の比較(単位:mm)

結論

着目部材にき裂損傷が発生した場合の橋梁全体の耐荷力については、き裂が主桁の腹板のみにあるケースでは全体の耐荷力には大きな変化はなかった。これは、下フランジにより荷重伝達がされること、および他の主桁に荷重が配分されることによることがわかった。

大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成 (トラス)
論文題目	連鎖的な部材破壊を考慮した鋼橋のリダンダンシー解析法の提案		
著者	野中哲也, 宇佐美勉, 岩村真樹, 廣住敦士, 吉野廣一		
公開年次	2010年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 779-791
解析の目的	正確なリダンダンシーの評価のため, 部材の破壊による構造系の変化を考慮可能な動的解析を含む解析法を提案する.		



解析モデルの概要

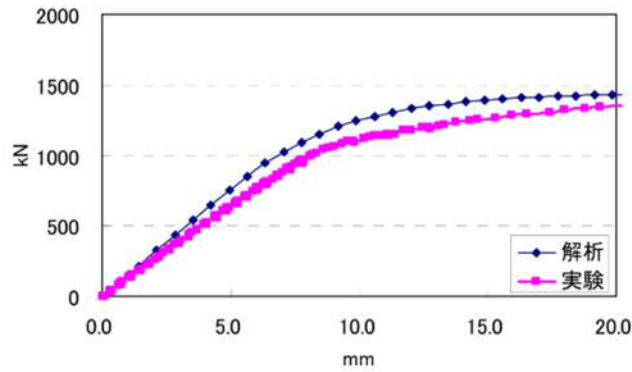
要素	梁要素 (トラス部材), 積層シェル要素 (床版)
床版フランジ間	実験結果をもとにした非線形 (トリリニア) ばね (文献3.1.3.7)

トラス部材はファイバー梁要素, 床版を鉄筋を考慮した積層シェル要素でモデル化。
 スラブアンカーを下図のような非線形ばねでモデル化。
 キャンパーと床版打設を考慮。

節点数: 4915
 要素数: 5940
 (ファイバー要素: 2854, シェル要素: 1408)

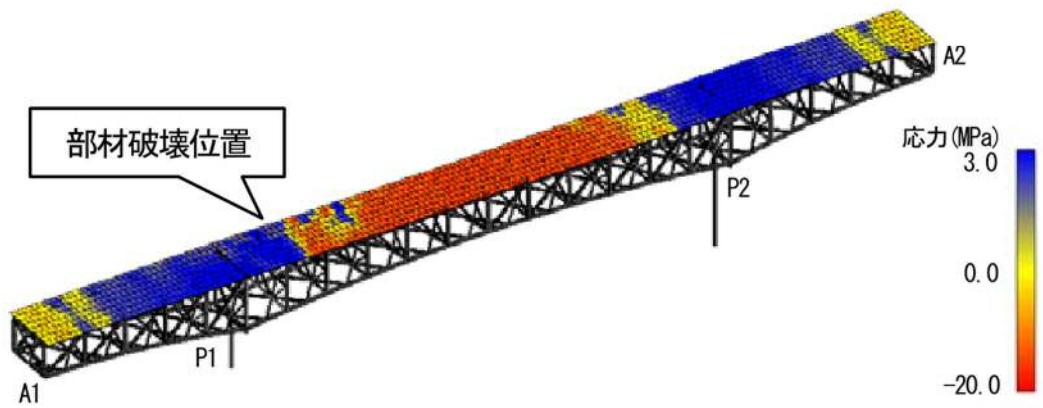
解析結果

床版のモデル化の際、妥当性確認のための実験結果と荷重-たわみ関係の比較。



たわみと応力
の実測とFE解
析結果の比較

健全時の終局限界における崩壊直前の床版応力分布図。



結論

- ・部材の連鎖的な破壊まで考慮したリダンダンシー解析法を提案し、橋梁全体のリダンダンシーを定量的に評価できることを示した。
- ・上路式鋼トラス橋を例にして、本提案の終局強度解析により、崩壊に対する余裕度を算定すると共に、連鎖的な部材破壊を起こす橋梁全体の崩壊シナリオを明確にできることを示した。

備考

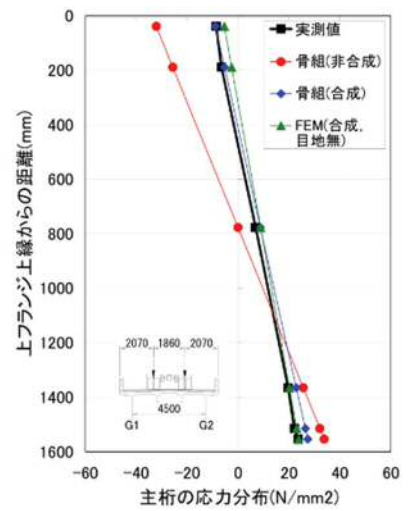
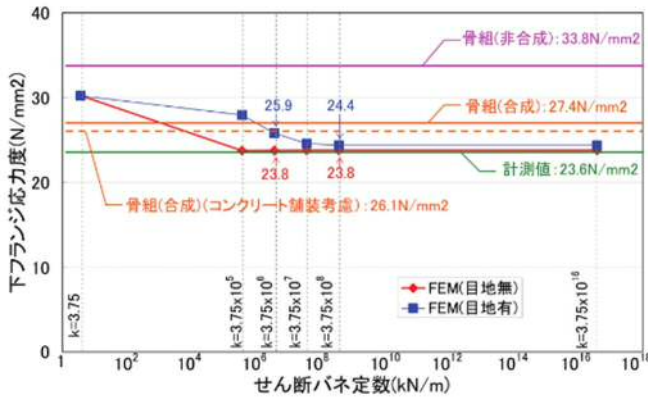
床版とトラス部材との結合は1種類のみで、各ずれ止めがどのような状態になっているかについて言及はない。

大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	約50年間供用された床版目地を有する連続非合成鋼I桁橋の損傷状況と現地载荷試験		
著者	村越潤, 梁取直樹, 澤田守, 前田和裕, 西弘明, 三田村浩		
公開年次	2010年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 710-721
解析の目的	約50年間供用され撤去に至った連続非合成鋼I桁橋を対象として, 活荷重に対する全体挙動の把握及び各種解析手法の適用性の検討を行う。		
解析対象	<p>北海道芦別市連続非合成桁橋 (2主桁3径間, 幅員6m, 24.6m+32.8m+24.6m, 設計荷重14tf) 張出部床版等に凍害による剥落・鉄筋の露出が見られた。</p>		
解析モデルの概要			
要素	梁要素 (主桁, 縦桁, 横桁), シェル要素 (床版)		
床版フランジ間	せん断ばねのばね定数を実験結果を基本としてパラメトリックスタディ		
解析モデル	<p>(1) 格子桁モデル: 床版を考慮しないモデルと, 有効幅を考慮して桁断面に組み込んだモデル. (2) 有限要素モデル: 主桁・縦桁・横桁を梁要素, 床版をシェル要素としてモデル化。</p>		

解析結果

FE解析において合成に近いばね定数のモデルが応力の
 実測値と近い結果となった。
 たわみや固有振動数においても実測
 と解析結果を比較しており、
 いずれも合成に近いモデル
 と実測値の一致が見られた。

応力の実測と
 FE解析結果の
 比較



結論

- ・計測結果と合成・非合成挙動を想定した解析結果の比較より、床版と鋼桁間に関して、完全な合成挙動ではないものの合成桁に近い挙動を示していることが確認された。
- ・床版と鋼桁間の相対変位は、荷重車の载荷・除荷に対して弾性的な挙動を示すものの、スラブアンカーから想定されるせん断バネ定数と比較してずれ剛性は非常に大きい。
- ・合成に近い場合は床版目地が全体挙動に与える影響は小さかった。

備考

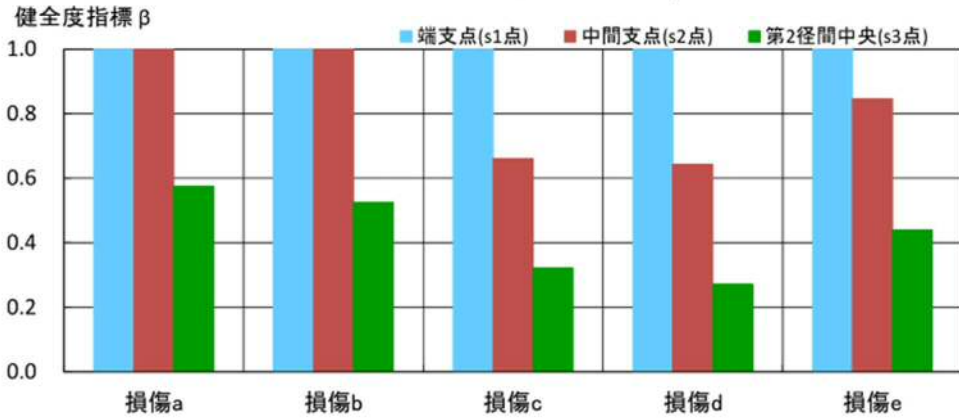
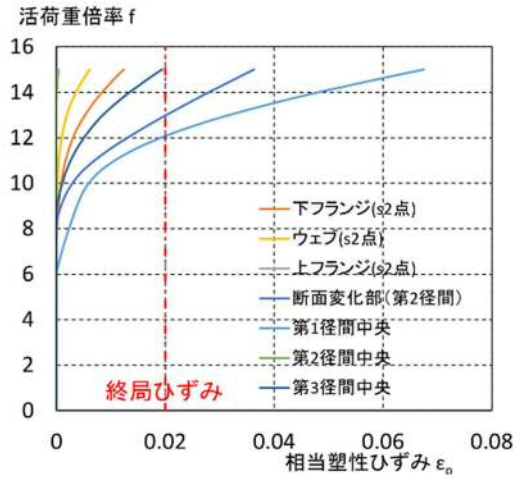
コンクリート舗装も床版の断面の一部として機能しているかもしれない。

大分類	鋼とコンクリート	小分類	合成桁
論文題目	少数主桁連続橋でのリダンダンシー解析の試み		
著者	岩坪要, 斉木功, 寺本有優美		
公開年次	2015年11月	出典	鋼構造年次論文報告集, 第23巻, pp. 378-385
解析の目的	連続少数主桁橋のリダンダンシーの定量評価を行う。 リダンダンシー評価のためのモデル化および解析方法と評価方法について検討する。		
解析対象	<p>連続合成桁橋 (3主桁3径間, 幅員約13m, 42m+54m+42m)</p> <p>(a) 一般図 (Unit mm)</p> <p>(b) 断面図</p>		
解析モデルの概要			
要素	シェル要素 (床版, 主桁, 横桁)		
床版フランジ間	剛結		
解析モデル	<p>壁高欄・中央分離帯の有無別にモデル化。 端支点・中間支点・中央径間中央の3点で損傷を仮定。 損傷は程度により5パターン。</p> <p>○ 損傷が発生した場所</p> <p>s1 死荷重 s2 s3</p> <p>A M_{max} B C D</p> <p>第1径間 第2径間 第3径間</p> <p>aパターン bパターン cパターン</p> <p>dパターン eパターン</p> <p>a: ウェブ半分 b: ウェブ全体 c: 下フランジのみ d: 下フランジ+ウェブ半分 e: 下フランジ+ウェブ全体</p> <p>※疲労により, クラックが入った状態を想定</p> <p>G-3桁 (損傷させる桁)</p> <p>G-2桁</p> <p>G-1桁</p> <p>支点A側</p>		

解析結果

左は損傷aで第一径間に活荷重があるときの荷重-塑性ひずみ関係。
 下は第二径間に活荷重があるときの耐荷力（健全時との比）。

ひずみと終局時の荷重のFE解析結果同士の比較

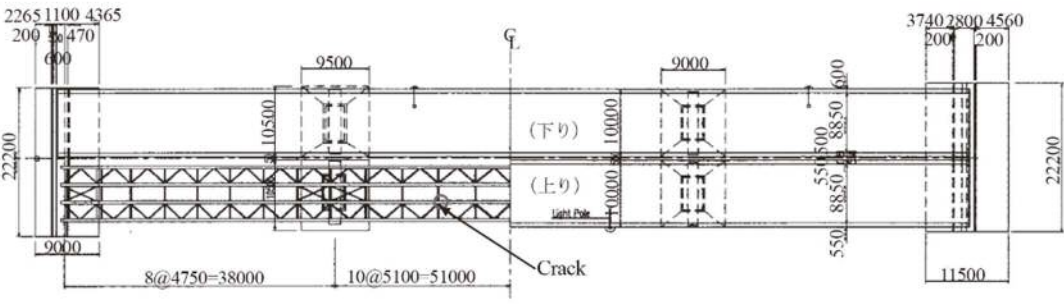
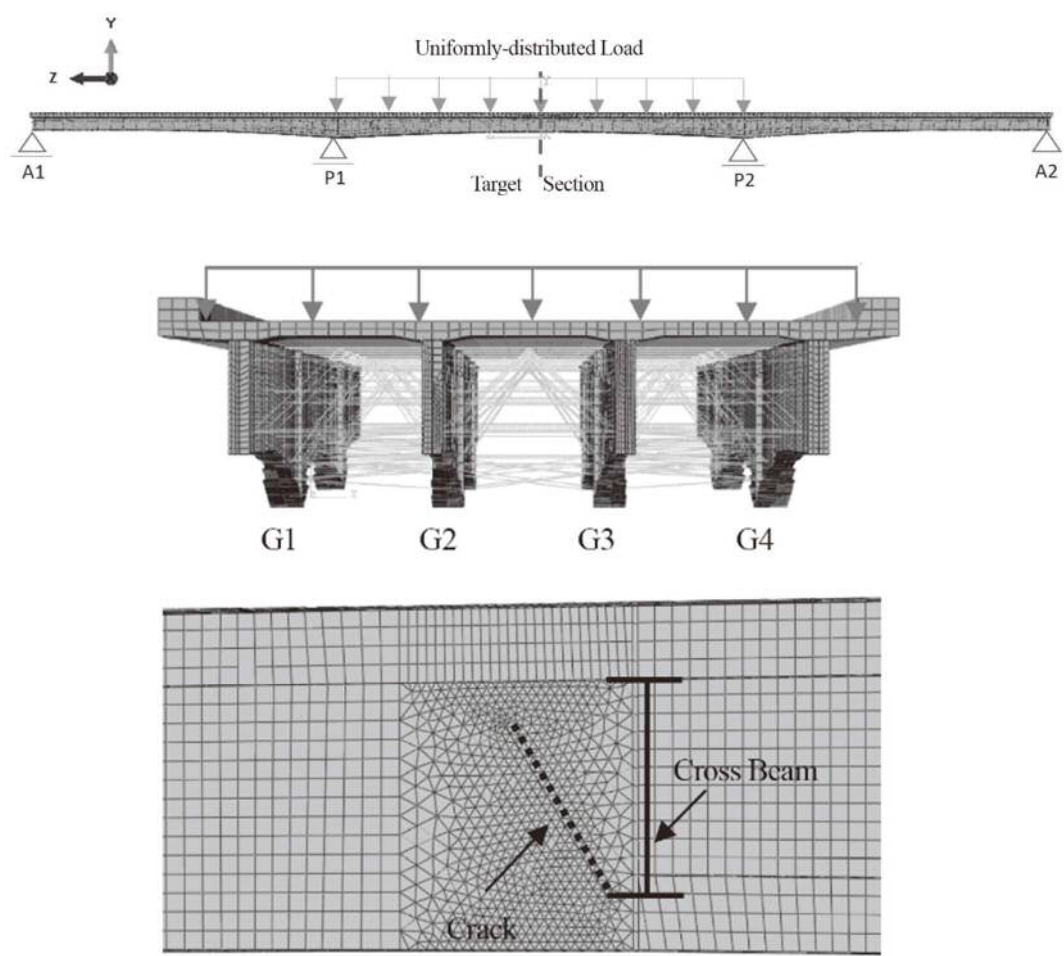


結論

損傷部および損傷部付近の断面変化部で塑性変形が進展する。
 支点付近に損傷がある場合、終局ひずみを2%としても活荷重倍率が10を超える程度の耐荷力を有する。これには床版と桁の合成作用が寄与している。
 径間中央部に損傷が生じる場合、健全時に比べ耐荷力が30%程度まで低下する。

備考

壁高欄が曲げ耐力に寄与する可能性が示唆されている。PC床版のモデル化についてはさらに検討が必要。

大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	疲労き裂を有する連続鋼桁橋の残存性能に関する解析的研究		
著者	橋本国太郎, 茅野牧夫, 鈴木康夫, 杉浦邦征, 渡邊英一		
公開年次	2015年3月	出典	鋼構造論文集, Vol. 22, No. 85, pp. 111-120
解析の目的	主桁に発生した疲労き裂に着目し, 定期点検で実際に疲労き裂が確認された鋼橋を対象に, 模擬したき裂の程度や位置によって橋梁全体およびき裂が確認された桁の耐荷性能や使用性能の変化, 補強の緊急性および必要性について検討することを目的とする.		
解析対象	<p>主桁腹板に約1.1mの疲労き裂が発生し, E判定を受けた非合成3径間連続鋼桁橋 (4主桁, 幅員10m, 38m+51m+38m)</p> 		
解析モデルの概要			
要素	ソリッド要素 (コンクリート床版), シェル要素 (主桁, 補剛材), ビーム要素 (横桁, 対傾構, 横構)		
床版フランジ間	剛結		
解析モデル			

解析結果

耐力力と
たわみ

C0は健全時、最大でも10%程度の低下。

表5 耐力力解析結果

Analysis Case	Max. Reaction Force (kN)		
	ALL	G3 (ALL)	G3 (P1)
C0	12,294	3,425	1,916
C1-W1100	12,239	3,366	1,863
C1-WLF300	12,114	3,289	1,809
C1-WLF1400	11,680	3,079	1,666
C1-WUF1900	12,194	3,342	1,848
C2-WLF1400	11,413	3,020	1,691
C3-WUF1900	12,248	3,375	1,866

許容たわみ (L/500) は102mm. いずれも下回る。

表6 設計荷重時のたわみ (単位: mm)

Analysis Case	Displacement at Middle of Span				
	G1	G2	G3	G4	Slab
C0	33.0	34.0	34.0	33.0	33.7
C1-W1100	33.1	34.0	34.0	33.1	33.7
C1-WLF300	33.2	34.1	34.1	33.3	33.8
C1-WLF1400	33.6	34.7	34.7	34.3	34.4
C1-WUF1900	33.1	34.0	34.0	33.1	33.7
C2-WLF1400	34.4	36.4	38.8	36.1	36.7
C3-WUF1900	33.1	34.0	34.0	33.1	33.7

結論

- ・大きな引張応力が作用する部材や位置にき裂がある場合は、そのき裂が橋梁全体系および桁の耐力性能に影響を及ぼす。
- ・き裂が生じた桁で支点反力が減少した場合、隣の桁や床版に応力が流れ、荷重を負担する。
- ・許容たわみは満足する。

備考

床版のコンクリート材料のひび割れやき裂の延性的な進展のモデル化が現実的なモデルではなかったため、今後はそれらを踏まえた解析の高精度化が必要であると述べている。
(委員会) 実測値はない。

大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	非線形有限要素解析による連続非合成多主桁橋の冗長性に関する考察		
著者	斉木功, 熊谷宏之, 岩坪要, 岩熊哲夫		
公開年次	2018年4月	出典	構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 12-25
解析の目的	床版と主桁の合成作用を考慮しない場合の鋼多主桁橋の冗長性の発揮メカニズムを明らかにすること, および, それを踏まえて冗長性を向上する可能性を検討すること.		
解析対象	連続非合成桁橋 (宮城県内A橋 (下図)) : 5主桁4径間, 幅員約10m, 39m+49.6m+53.0m+40.6m		
	<p>図-1 一般図 (単位 : m)</p>		
	<p>図-2 断面図 (単位 : mm)</p>		
解析モデルの概要			
要素	シェル要素 (床版, 主桁, 補剛材, 横桁), ビーム要素 (対傾構, 下横構)		
床版フランジ間	冗長性に及ぼす床版の寄与を無視するために床版-主桁間の荷重伝達を計算後, 床版を消去.		
解析モデル			
	<p>I. 荷重により床版を介して主桁に伝達する荷重を主桁に载荷している. 横倒れを防止するために主桁間の橋軸直角水平方向をばねで結合.</p> <p>端支点 (S5) 付近の損傷 (A) と中間支点 (S4) 付近の損傷 (B) を考慮. それぞれ支点せん断力最大と径間中央部曲げ最大の2つの荷重パターン.</p> <p>横桁・対傾構の配置を変化させた4モデルを用いている.</p>		

解析結果

損傷シナリオと荷重パターンによる曲げ応力の比較 (表-11) .
横桁配置の違いによるたわみの比較 (図-33) .

表-11 G2 桁に生じる軸方向応力 ($f = 1.0$)

荷重ケース	$ \sigma_{xmax} $	σ_Y	$ \sigma_{xmax} /\sigma_Y$
A1	218 MPa	355 MPa	0.61
A2	181 MPa	355 MPa	0.51
B1	227 MPa	335 MPa	0.68
B2	268 MPa	335 MPa	0.80

たわみと応力のFE解析結果
同士の比較

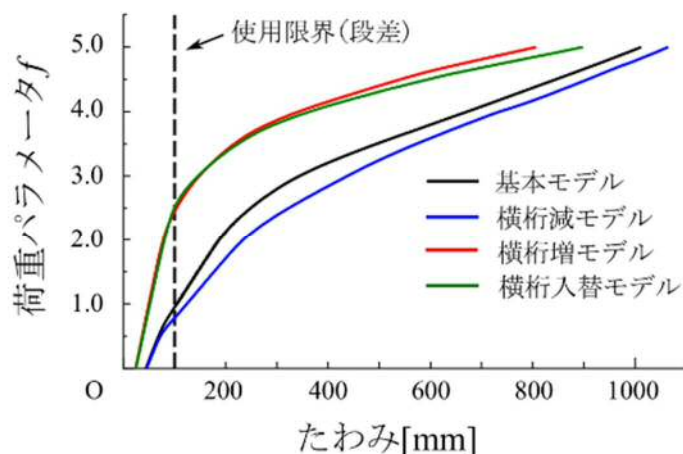


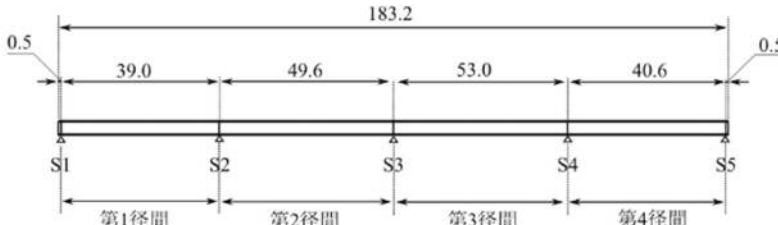
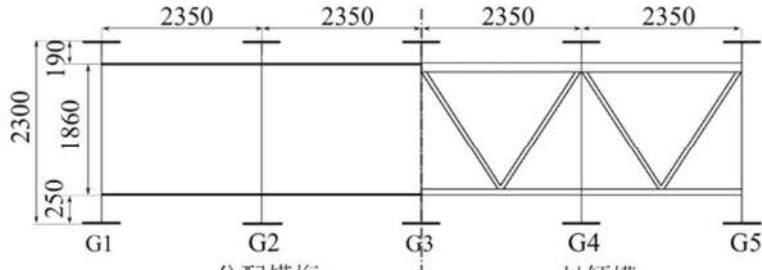
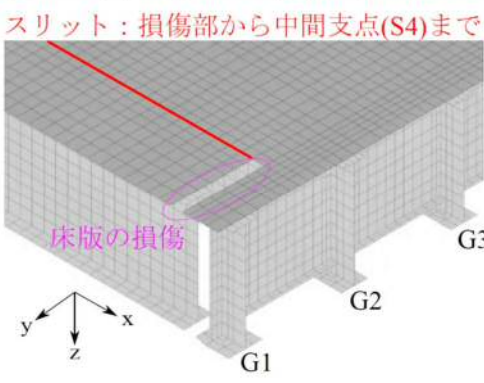
図-33 各モデルの損傷部先端における荷重-たわみ関係 (荷重ケース A1)

結論

- ・主桁損傷時は、分配横桁・対傾構が代替荷重経路として機能する。主桁が支点との連続性を完全に失っても設計荷重レベルでは不安定構造にならず、正曲げを受け持つ機能を維持する。
- ・外桁の端部損傷時、損傷部先端におけるたわみがモデル内で卓越する。このような変形は路面に段差を生じさせる可能性が高いので、使用性への影響が大きい。
- ・主桁端部損傷時には、損傷した主桁に隣接する主桁の正曲げ変形が支配的となる。一方、中間支点部損傷時は、隣接する主桁の中間支点における負曲げ応力が支配的となる。どちらの場合においても活荷重レベルで降伏応力を超えることはなかった。

備考

実情に即した床版の合成効果が冗長性に及ぼす影響の解明が今後期待される。

大分類	鋼とコンクリート	小分類	非合成桁
論文題目	非合成連続多主桁橋の冗長性評価に及ぼすスラブアンカーの合成効果の影響		
著者	竹田翼, 斉木功, 山本剛大, 岩坪要		
公開年次	2018年12月	出典	土木学会論文集A2, Vol.74, No.2, pp. I_579-I_590
解析の目的	スラブアンカーの非線形挙動を考慮した数値モデルに加え, 床版と主桁を剛結したモデル, 合成効果を考慮しないモデルによる数値解析を行い, それらを相互比較することで, スラブアンカーによる合成効果のモデル化が連続多主桁橋の冗長性評価に及ぼす影響を考察すること。		
解析対象	<p>連続非合成桁橋 (宮城県内A橋 (下図) : 5主桁4径間, 幅員約10m, 39m+49.6m+53m+40.6m)</p>  <p>図-1 一般図 (単位 : m)</p>  <p>図-2 断面図 (単位 : mm)</p>		
解析モデルの概要			
要素	シェル要素 (床版, 主桁, 補剛材, 横桁), 梁要素 (対傾構, 下横構)		
床版フランジ間	完全合成 (剛結), 不完全合成 (スラブアンカーをモデル化した非線形ばね), 非合成 (微小剛性の線形ばね), 床版なし (床版を取り除いたモデル) の4通りのモデル化を相互比較。		
解析モデル	 <p>スリット : 損傷部から中間支点(S4)まで</p> <p>床版の損傷</p> <p>図-11 床版の損傷のモデル化とスリット</p> <p>端支点 (S5) 付近の損傷を要素除去により考慮. 床版に変形が集中するため, 床版にもあらかじめ損傷を考慮し, かつ, 床版による荷重分配の影響を排除するため, スリットを設けている.</p> <p>対傾構の梁要素を弾性体および弾塑性体の2通りでモデル化し, 結果の比較を行っている.</p> <p>活荷重はL荷重とし, 損傷部のせん断力が最大となる载荷パターンを採用している.</p>		

解析結果

たわみと応力のFE解析結果同士の比較

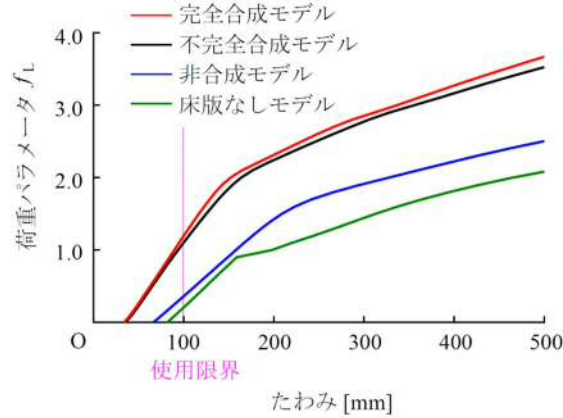


図-20 損傷部先端における荷重-たわみ関係

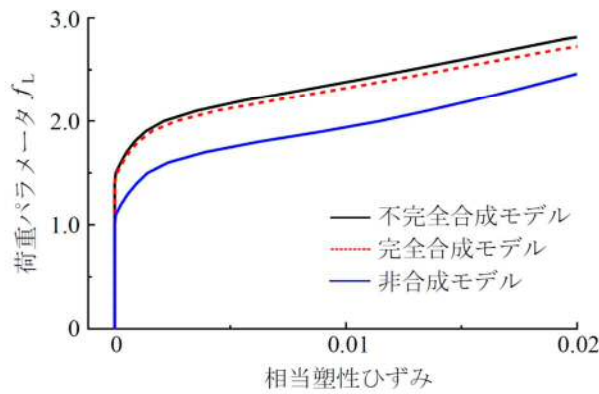


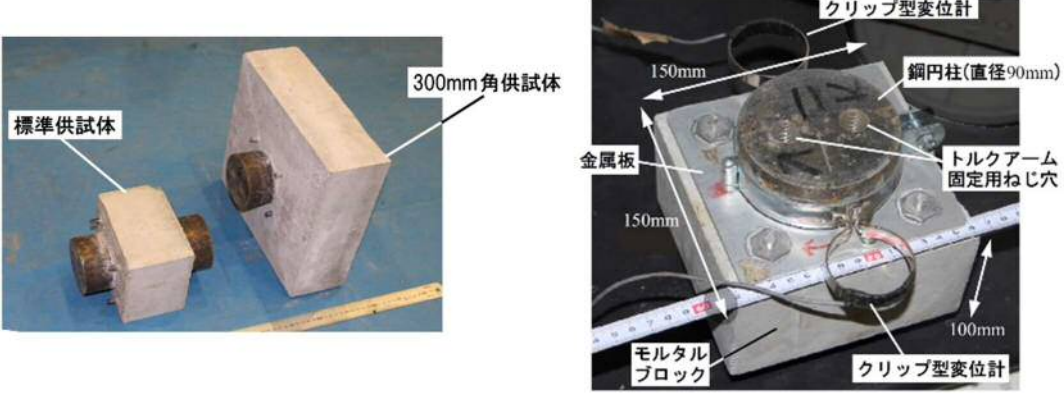
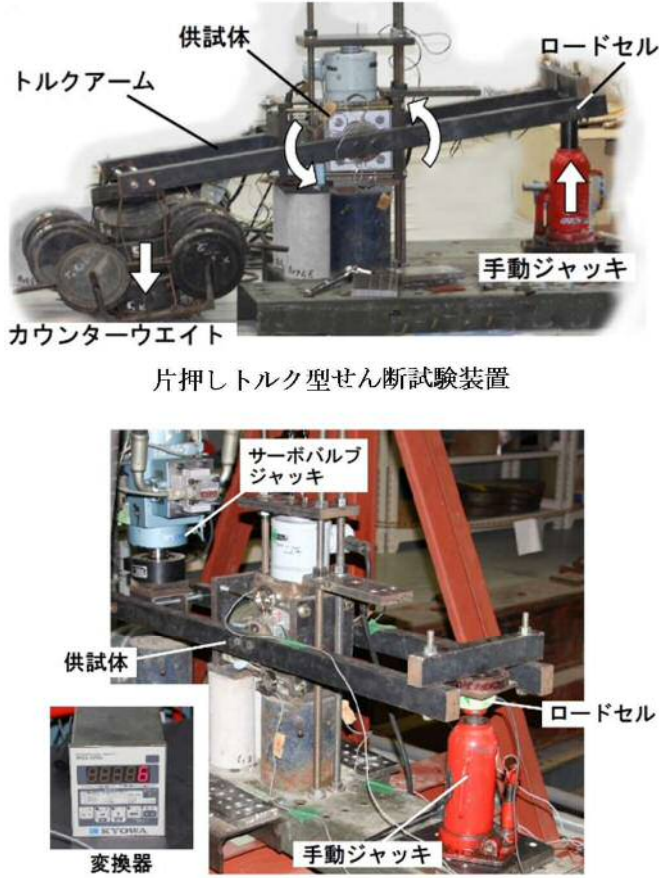
図-22 横桁における荷重-相当塑性ひずみ関係

結論

- ・主桁損傷時は設計荷重前であっても損傷部付近のスラブアンカーが降伏し、荷重が大きくなるにつれて塑性硬化の状態にあるスラブアンカーの範囲は拡大する。
- ・主桁上部に生じる圧縮応力は、スラブアンカーの非線形挙動を考慮した場合に対して完全合成を仮定した場合は最大で 60%程度の過小評価となる。
- ・使用限界として設定した基準である段差100mmに達する荷重は、合成効果を無視した非合成モデルの場合は設計荷重の0.4倍であったが、スラブアンカーの非線形挙動を考慮した場合は1.2倍まで大きくなる。

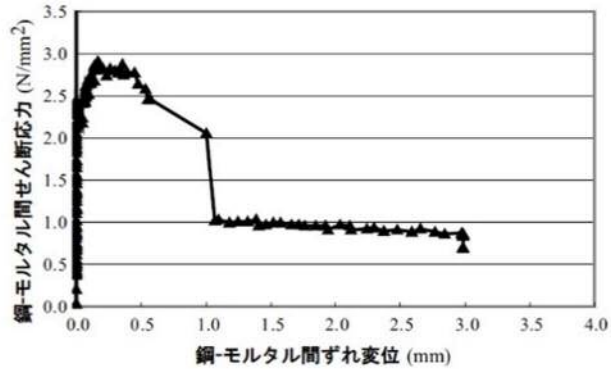
備考

主桁の損傷に伴う床版の破壊の進展までは追跡できていない。

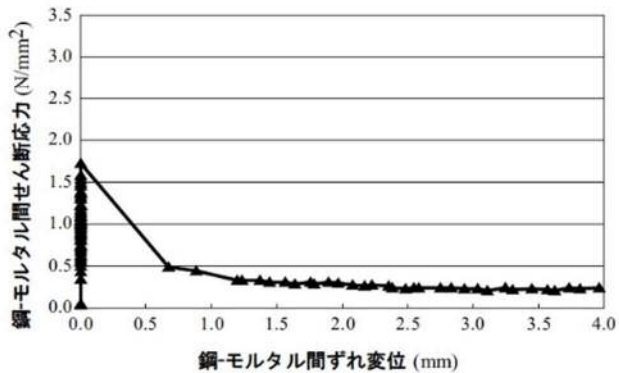
大分類	鋼とコンクリート	小分類	付着
論文題目	鋼コンクリート界面の付着強度評価のためのトルク型せん断試験に関する基礎的検討		
著者	山田真幸, 斉木功, 岩熊哲夫		
公開年次	2013年9月	出典	構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 37-46
実験の目的	鋼コンクリート複合構造の強度や力学特性を得ることを目的とした, 鋼円柱とモルタルを用いた供試体を用いた試験方法の開発.		
供試体	<p>トルク型せん断試験用供試体 約80体 (鋼円柱製の直径90mm, モルタルブロックサイズ150mm×150mm, 300mm×300mm, モルタル内に鉄筋の有り・無し他)</p> 		
試験方法の概要			
載荷境界	荷重制御漸増載荷, 付着破壊後は摩擦の特性として計測.		
試験装置	<p>円筒面状. 円周方向に載荷することでせん断面端部に生じる応力集中の影響を避ける.</p> <p>トルク型せん断装置. 供試体中の鋼円柱にトルクを与えて鋼モルタル界面の力学特性を得る.</p> 		

実験結果

たわみと応力
の実測とFE解
析結果の比較



300 mm 角供試体を用いた両押しトルク型せん断試験による鋼モルタル界面応力とずれ変位



無筋供試体を用いた両押しトルク型せん断試験の鋼モルタル界面応力とずれ変位 (No.77 供試体)

結論

- ・ 付着破壊が生じるまでずれ変位は生じず，破壊時にせん断応力は最大値となる．ただし付着破壊時にモルタルブロックに割れが生じた場合は真値より小さい可能性がある．
- ・ 鋼モルタル界面の破壊は常に脆性的に生じるものではない可能性があり，その場合の最大せん断応力 3N/mm^2 程度の可能性がある．

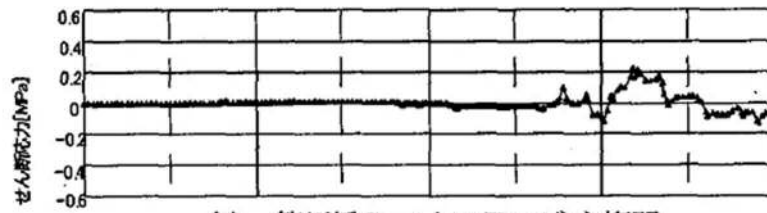
備考

無視されることが多かった鋼板面に打設されたコンクリートが硬化する際に生じる鋼板への付着力の力学的特性が得られ，数値解析に利用できる．

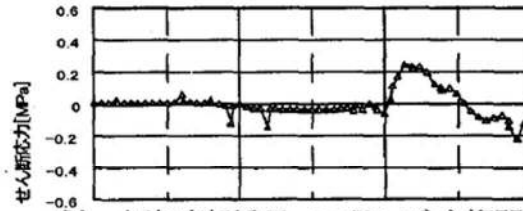
大分類	鋼とコンクリート	小分類	付着
論文題目	既設非合成桁橋梁のRC床版と主桁上フランジ間で生じるせん断応力と実耐荷力評価		
著者	山田真幸, 三木千壽, 市川篤司		
公開年次	2013年9月	出典	構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 37-46
解析の目的	非合成桁橋梁の合成効果のキーとなる床版と主桁上フランジとの境界面でどの程度のせん断応力が生じているかFEM解析により求め, 実耐荷力の評価を行う。		
解析対象	<p>連続非合成桁橋 (常川橋 : 4主桁, 幅員10m, 4@47.65m, 坂部高架橋P5-P8 (下図) : 4主桁, 幅員10.95m, 3@25.18m)</p>		
解析モデルの概要			
要素	シェル要素 (床版, 主桁, 地覆, 壁高欄), ビーム要素 (床版フランジ間の結合, 対傾構, 下横構, 縦補剛材)		
床版フランジ間	合成桁としてモデル化するためにビーム要素で合成とした。		
解析モデル	<p style="text-align: center;">※文献3.1.3.3中の合成モデルB</p>		

解析結果

フランジ-主桁
間平均せん断
応力のFE解析
結果



(a) 筈川橋Ga-4上フランジ-主桁間
平均せん断応力 (载荷パターン1)



(b) 坂部高架橋Gb-4フランジ-主桁間
平均せん断応力 (载荷パターン6)

結論 設計荷重レベルの载荷で生じる活荷重による最大せん断応力は0.5MPa程度である。

備考

主桁上フランジの要素から直接せん断応力を得るのではなく、主桁の応力分布を求めて数値積分で上フランジ面で生じるせん断応力を推定している。

事例編 2 : 高力ボルト継手部

1. 文献検索条件

収集した文献の主な検索条件を以下に示す。次節では以下の条件に該当する文献を中心に一覧表を整理（「2. 収集文献一覧表」参照）し、特に参考になると考えた文献の内容を個票に整理（「3. 個別文献の内容」参照）した。

1.1 国内文献

1.1.1 調査対象

国内文献では以下の資料を主な調査対象とした。

- ・ 土木学会論文集
- ・ 構造工学論文集
- ・ 鋼構造論文集

1.1.2 検索キーワード

国内文献収集時の主な検索キーワードを以下に示す。

- ・ ボルト
- ・ 摩擦・引張・支圧
- ・ 解析

1.2 海外文献

「Connections in Steel Structures」における高力ボルト接合関連資料を主な対象文献とした。

2. 収集文献一覧表

次ページ以降に収集した文献の一覧表を示す。なお、一覧表中の文献番号は本編 3.2 節中の文献番号と対応しており、一覧表において欠番となっている文献番号は、本編中のみで参照とした文献である。なお、文献番号 57 は一覧表に掲載しているが、本編では参照していない。

表 5.2.1 収集文献一覧表 (その1)

文献番号	論文題目	著者	公開年次	出典	継手種別	解析対象	解析モデル概要						備考	
							使用要素	モデル化している接触面	モデル化している接触挙動	摩擦力の算定	静止摩擦係数	応力-ひずみ関係		使用ソフト
3.2.1	被接合材片に板厚差を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力	秋山寿行, 木村充, 小澤克郎, 西村宣男	2007	土木学会論文誌A, Vol.63, No.1, pp.66-74	摩擦接合	標準すべり試験 (厚膜型無機ジンクリッチペイント)	20節点アイソパラメトリック要素, 節点ばね	連結板-母材	固着～主すべり発生	クーロン則	明示されていないが, すべり係数が0.60 (実験結果から設定) となるように設定	公称値を降伏強度としているが, 詳細は不明	SABOL	フィルタープレートは母材と一体化してモデル化
3.2.2	千鳥配置された高力ボルト摩擦接合継手の強度と荷重伝達機構	石川誠, 亀井義典, 西村宣男, 秋山寿行	2002	構造工学論文集, Vol.48A	摩擦接合	ボルトを千鳥配置した鋼桁フランジ	20節点アイソパラメトリック要素, 節点ばね	連結板-母材, 連結板-座金	固着～主すべり発生	クーロン則	明示されていない	完全弾塑性	不明	千鳥配置とすることで, 5%程度の強度低下を確認
3.2.3	高力ボルト摩擦接合部の弾塑性挙動に関する研究	江見卓郎, 田淵基嗣, 田中剛, 難波尚, 長谷洋司	2003	鋼構造論文集, 第10巻第39号	摩擦接合	標準すべり試験, 曲げ試験	8節点または6節点のソリッド要素, 節点ばね	連結板-母材 (標準すべり試験), 梁ウェブ-シェアプレート (曲げ試験), ボルト軸-添接板, ボルト軸-母材, ボルト軸-梁ウェブ, ボルト軸-シェアプレート	固着～主すべり発生～すべり～支圧	クーロン則	標準すべり試験: 0.63~0.67 (付録において連結板-座金の摩擦係数を連結板-母材の1/2と仮定), 曲げ試験: 0.72	試験結果に基づく多直線近似 (von Misesの降伏条件, 塑性域では連合流れ則と等硬化則)	ABAQUS (Ver. 6.2)	接触挙動はマスタースレイブ法によるラグランジュの未定数法により接触圧を評価
3.2.4	低材質フィルタープレートを用いた高力ボルト摩擦接合継手の限界状態	亀井義典, 池端文哉, 西村宣男	1997	構造工学論文集, Vol.43A	摩擦接合	フィルタープレートを用いた接手部 (2行1列)	20節点アイソパラメトリック要素, 節点ばね	連結板-母材, フィラープレート-連結板・母材, 座金-連結板	固着～主すべり発生	クーロン則	全ての摩擦面: 0.5	完全弾塑性	不明	フィルタープレートに母材よりも低強度の材料を使用しても, 道示に規定しているすべり係数は確保できるとしている
3.2.5	高力ボルト摩擦接合引張継手の限界状態区分に関する解析的研究	亀井義典, 池端文哉, 西村宣男	1998	土木学会論文誌, No.584/1-42, pp.243-253	摩擦接合	標準すべり試験体, ボルト列数1×4列	20節点アイソパラメトリック要素, 節点ばね	連結板-母材, 連結板-座金	固着～主すべり発生	クーロン則	明示されていないが, すべり係数が0.4となる静止摩擦係数を与えている.	実測の降伏応力度を用いたバイリニア (von Misesの降伏条件, Prandtl-Reussの塑性流れ則)	不明	降伏先行型にも着目
3.2.6	多列高力ボルト摩擦接合引張継手のすべり強度に関する解析的研究	亀井義典, 松野正見, 西村宣男	2000	土木学会論文誌, No.640/1-50, pp.49-60	摩擦接合	SM570, ボルト列数1×2列～9列	20節点アイソパラメトリック要素, 節点ばね	連結板-母材, 連結板-座金	固着～主すべり発生	クーロン則	明示されていないが, すべり係数が0.4となる静止摩擦係数を与えている.	公称値に基づく完全弾塑性体 (von Misesの降伏条件, Prandtl-Reussの塑性流れ則)	不明	多列のときの強度低減係数を提案
3.2.7	高力ボルト摩擦接合継手の主すべり以降の挙動	亀井義典, 西村宣男	2001	鋼構造論文集, 第8巻第31号	摩擦接合	ボルト列数1×2列	20節点アイソパラメトリック要素, 節点ばね	連結板-母材, ボルト孔-ボルト軸部	固着～主すべり発生～すべり～支圧	クーロン則	連結板-母材: 0.5	降伏棚まではバイリニア, ひずみ硬化域に対してはB-n曲線で表されるひずみ硬化則	不明	接触圧を要素に作用する板厚方向の力によって評価 接触判定された節点間に接触要素を挿入 動摩擦係数は静止摩擦係数と同じ
3.2.8	超高強度ボルトの鋼桁橋への適用性に関する検討	亀井義典, 石川誠, 西村宣男, 桐生真司, 竹内修治	2003	鋼構造論文集, 第10巻第38号	摩擦接合	超高力ボルト (F15T級), ボルト列数1×2列	20節点アイソパラメトリック要素, 節点ばね	連結板-母材, 連結板-座金	固着～主すべり発生	クーロン則	明示されていないが, 解析結果からすべり係数を算定し, 道示の規定以上の値であることを確認.	降伏棚まではバイリニア, ひずみ硬化域に対してはB-n曲線で表されるひずみ硬化則	不明	超高力ボルトを使用した場合の経済的効果を確認
3.2.9	ボルト間隔および縁端距離が小さい高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数とすべり後耐力に関する検討	清川昇悟, 館石和雄, 判治剛, 清水優	2017	鋼構造論文集, 第24巻第95号, pp.95-110	摩擦接合	ボルト間隔および縁端距離の小さい摩擦接合継手 (最小ボルト間隔: 53mm, 縁端距離: 25mm)	8節点ソリッド要素 (曲げせん断変形が卓越する部位には20節点ソリッド完全積分要素)	連結板-主板, ボルト孔-ボルト軸部, 座金-連結板	固着～主すべり発生～すべり～支圧	クーロン則	0.64	実測値に基づくマルチリニア 母材・連結板: 実測値に基づくトリリニア	MSC/Marc 2013.1	すべり中にも着目しており, 動摩擦係数を「0.001, 0.128」に設定
3.2.10	ボルト軸方向の繰返し引張荷重作用下のねじの回転ゆるみ機構	酒井智次	2012	日本機械学会論文誌 (A編), 78巻785号, pp.125-136	-	座面とねじ面のすべり問題	-	-	-	-	-	-	-	ボルト・ナットで絞められた締結体に作用する繰返し荷重下での, ボルト回転によるゆるみ条件を定式化
3.2.11	実腐食減肉形状を有する摩擦接合用高力六角ボルトの残存軸力特性	下里哲弘, 田井政行, 長嶺由智, 有住康則, 矢吹哲哉	2016	構造工学論文集, Vol.62A	摩擦接合	腐食したボルトの残存軸力, ねじ山までモデル化	明示されていないが, 6面体要素を使用	座金-連結板, 連結板-母材	固着	なし	-	公称値に基づく完全弾塑性体 (von Misesの降伏条件, Prandtl-Reussの塑性流れ則)	MSC.Nastran 2012	接触は直接拘束法で評価 (接触方向の自由度を拘束) 腐食した高力ボルトの残存軸力を評価
3.2.12	打込式高力ボルト支圧接合継手の耐荷力性状とFEM解析モデルの提案	下里哲弘, 木ノ本剛, 三木千壽	2008	土木学会論文誌A, Vol.64, No.2, pp.167-178	支圧接合	既設鋼製橋脚隅角部の疲労対策	当て板: シェル要素, 剛体棒要素 ボルト: トリリニアばね要素	なし (接触挙動はばね要素の剛性変化で考慮)	すべり	摩擦力はばね要素の剛性で考慮	-	完全弾塑性	HKS-ABAQUS (ver6.3)	
3.2.13	各種のばらつきが厚板鋼板の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に与える影響に関する研究	高井俊和, 彭雪, 山口隆司, 山階清水	2014	鋼構造論文集, 第21巻第82号	摩擦接合	母材厚75mmの極厚板	8節点ソリッド低減積分要素	連結板-母材, ボルト軸部-ボルト孔, 連結板-座金	固着～主すべり発生	等方性クーロン摩擦モデル	0.72 (対象は不明)	母材, 連結板: 材料試験結果に基づくマルチリニア ボルト, 座金: 公称値を基にしたマルチリニア	ABAQUS (Ver. 6.9)	ヤング係数, 摩擦係数, ボルト軸力のばらつきはすべり耐力への影響が大きく, ボアソン比, 板厚, 板幅のばらつきは影響が小さい
3.2.14	フィルタープレートの板厚が高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達に与える影響に関する解析的研究	高井俊和, 彭雪, 山口隆司	2015	土木学会論文誌A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.1, pp.1-9	摩擦接合	フィルタープレートを使用する継手, ボルト列数: 1×3または5列	8節点ソリッド低減積分要素	連結板-母材, 連結板-フィルター (ただし, 厚板側は連結板と母材を一体化)	固着～主すべり発生	クーロン則	すべり先行型となるように調整 (解析ケースごとに異なる)	母材, 連結板: 材料試験結果に基づくマルチリニア ボルト, 座金: 公称値に基づくマルチリニア	ABAQUS (Ver. 6.9)	フィルターが厚いほどすべり耐力は低下
3.2.15	高力ボルト摩擦接合継手の目違いがすべり耐力に与える影響に関する解析的研究	高井俊和, 山口隆司, 山階清水	2015	構造工学論文集, Vol.61A	摩擦接合	厚板を用いた場合の目違い, 目違い量: 0~5mm, 標準すべり試験体	6節点ソリッド完全積分要素, 8節点ソリッド完全積分要素	連結板-母材, ボルト軸部-母材・連結板	固着～主すべり発生～すべり～支圧	クーロン則	すべり側の接触面: 0.72 固定側の接触面: 1	公称値に基づくマルチリニア (降伏後の2次勾配はヤング係数の1/100)	ABAQUS (Ver. 6.13)	目違いがあっても適切なフィルタープレートを配置することですべり係数を確保
3.2.16	皿型高力ボルトを用いた摩擦接合継手のボルト形状及び継手特性に関する解析的検討	田畑晶子, 金治英貞, 黒野佳秀, 山口隆司	2013	鋼構造論文集, 第20巻第79号	摩擦接合	皿型高力ボルト	平面要素, ソリッド要素	連結板-母材, ボルト-連結板	固着～主すべり発生	クーロン摩擦	連結板-皿頭部: 0.5, 0.1, 0.001 連結板-母材: 0.5	母材, 連結板: 弾塑性構成則	ABAQUS (Ver. 6.9)	皿型高力ボルトを使用すると, ザグリ部が塑性化 六角ボルトよりも接触面圧の分布範囲が狭い
3.2.17	拡大孔を有する皿型高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関する研究	田畑晶子, 黒野佳秀, 金治英貞, 山口隆司	2014	構造工学論文集, Vol.60A	摩擦接合	皿型高力ボルト, 拡大孔	8節点ソリッド低減積分要素	連結板-母材, 連結板-座金	固着～主すべり発生	クーロン則	皿頭部-ザグリ面: 0.1 連結板-母材: 0.5	鋼板: 公称値に基づくマルチリニア (von Misesの降伏関数) ボルト: ひずみ硬化の無いバイリニア則	ABAQUS (Ver. 6.9)	設計すべり係数の低減が必要ない拡大孔を提案

：詳細な内容を整理した文献

表 5.2.2 収集文献一覧表 (その2)

：詳細な内容を整理した文献

文献番号	論文題目	著者	公開年次	出典	継手種別	解析対象	解析モデル概要						備考	
							使用要素	モデル化している接触面	モデル化している接触挙動	摩擦力の算定	静止摩擦係数	応力-ひずみ関係		使用ソフト
3.2.18	高力ボルト摩擦接合のボルト軸力導入に着目した解析モデルに関する研究	玉越隆史, 石尾真理, 横井芳輝, 山崎健次郎, 水口知樹	2014	鋼構造論文集, 第21巻第84号	摩擦接合	標準すべり試験, 曲げ試験	6節点ソリッド完全積分要素, 8節点ソリッド完全積分要素	連結板-母材, 連結板-座金, ボルト軸部-ボルト孔 (マスターズレイブ法)	固着~主すべり発生~すべり~支圧	クーロン則	全接触面, 試験結果から設定標準すべり試験の再現: 0.55 多列すべり試験の再現: 0.64 曲げ試験の再現: 0.56	鋼板: 実測値に基づくトリリニア ボルト: 実測値に基づくバイリニア	ABAQUS (Ver. 6.11-1)	ボルト軸力の導入方法を比較し, 締結力モデルが最もよく実験を再現
3.2.19	剛体-ばねモデルを用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動解析	長嶋文雄, 伊藤文人	1984	土木学会論文集, 第350号/I-2	摩擦接合	SM58材に無機ジンクリッチペイントを塗布した試験体, ボルト列数1×10列	剛体要素, 非線形ばね要素	連結板-母材	固着~主すべり発生	クーロン則	実験で得たμを用いて算定	鋼板の剛性に基づく力-変位関係を線形ばねで付与	不明	FEM解析ではなく, 平衡方程式の解を数値計算により算定
3.2.20	プレートガーダー継手のすべり強度試験および解析	長嶋文雄, 山田稔, 長島和男, 成田信之	1991	構造工学論文集, Vol. 37A	摩擦接合	プレートガーダー (I断面)	2次 (8節点) アイソパラメトリック要素, せん断ばね	連結板-母材	固着~主すべり発生	クーロン則	ウェブ: 0.30 フランジ: 0.23	不明	不明	曲げ部材のすべり荷重を解析により再現
3.2.21	引張を受ける高力ボルト鋼板当て板接合部の荷重伝達機構に関する解析的検討	永田和寿, 町田幸大, 小川麻実, 山口隆司	2016	鋼構造論文集, 第23巻, 第90号, pp. 27-37	摩擦接合	母材は均一な両面腐食を想定	8節点ソリッド要素	連結板-母材, ボルト孔-ボルト軸部, 高力ボルト-連結板	固着~主すべり発生	クーロン則	全接触面: 0.31 (すべり係数が0.30となるよう予備解析から決定した値)	公称値に基づくマルチリニア (完全弾塑性)	ABAQUS	別途, 接触面を完全結合したモデルの解析も実施 (母材と当て板の荷重分担率に及ぼすボルト本数の影響に違いがみられた)
3.2.23	高力ボルト摩擦接合とする既設リベット継手の部分取替え補修に関する解析的検討	橋本国太郎, 山口隆司, 北田俊行	2008	構造工学論文集, Vol. 54A	摩擦接合	リベット-高力ボルト (摩擦接合) への取替え	8節点または6節点のソリッド要素, 節点ばね	連結板-母材, ボルト-ボルト孔, リベット-リベット孔	固着~主すべり発生~すべり~支圧	クーロン則	連結板-母材: 0.28 (劣化による低減を想定)	公称値に基づくバイリニア	ABAQUS	実験による検証は未実施
3.2.24	高力ボルト摩擦接合されたGFRP部材の摩擦挙動および最大強度に関する力学的考察	橋本国太郎, 杉浦邦征	2012	構造工学論文集, Vol. 58A	摩擦接合	GFRP部材	ソリッド要素	連結板-母材, 連結板-座金, 座金-ボルト	固着~主すべり発生	クーロン則	連結板-母材: 0.386または0.500 上記以外: 0.150	材料試験結果を基に弾性体としてモデル化	ABAQUS (Ver. 6.10)	リラクゼーションが鋼材よりも大きい
3.2.25	ねじ山らせん形状の高精度なモデリングと有限要素解析	福岡俊道, 野村昌孝, 森本雄哉	2006	日本機械学会論文集 (A編), 72巻723号, pp. 45-51	-	並目ねじM16 (はめあいねじ山数5)	8節点ソリッド要素	めねじ-おねじ	-	-	0.05~0.2	-	ABAQUS	ねじ谷底の応力分布等も評価
3.2.26	鋼橋の桁連結工の地震時挙動の評価方法	福本守, 齊藤雅充, 和田一範, 池田学	2015	鉄道総研報告, Vol. 29, No. 3	支圧接合	桁連結工の地震時挙動	ソリッド要素, 接触要素	連結板-母材, 連結板-ボルト	支圧	-	-	材料試験結果に基づくマルチリニア	ABAQUS (静的解析) LS-DYNA (動的解析)	桁連結工に着目した詳細解析結果を橋梁全体の解析に非線形ばねとしてフィードバック
3.2.28	厚板多列高力ボルト摩擦接合継手の構造諸元がすべり挙動に与える影響に関する解析的研究	彭雪, 山口隆司, 高井俊和, 村越潤, 澤田守	2013	土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 3, pp. 452-466	摩擦接合	厚板+多列	8節点ソリッド低減積分要素, 節点ソリッド完全積分要素	連結板-母材, ボルト軸部-ボルト孔, 連結板-座金	固着~主すべり発生	等方性クーロン摩擦モデル	全ての摩擦面: 0.5	母材, 連結板: 材料試験結果に基づくマルチリニア ボルト, 座金: 公称値 (降伏後の2次勾配はヤング係数の1/100) に基づくマルチリニア	ABAQUS (Ver. 6.9)	接触圧と相当せん断力を線形でモデル化
3.2.29	腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部の圧縮耐力に着目した載荷試験	村越潤, 遠山直樹, 澤田守, 有村健太郎, 郭路, 依田照彦, 笠野英行, 野上邦栄	2013	構造工学論文集, Vol. 59A	支圧接合	既設鋼トラス橋格点部 (リベット接合)	シェル要素	斜材-ガセットプレート	固着	- (備考欄参照)	-	材料試験結果に基づくトリリニア 2次剛性 ($\sigma_y \sim 1.5\sigma_y$): E/100 3次剛性 ($1.5\sigma_y \sim \sigma_u$): E/700	LS-DYNA DIANA4.3	リベットを線形ばね要素でモデル化したが, ばね剛性が部材耐力へ与える影響が小さいため, 完全剛結としてモデル化 載荷試験における最大荷重と解析における最大荷重の差は3%程度
3.2.30	ボルト締めした円孔の応力集中と疲労強度	森猛	1996	土木学会論文集, No. 543/1-36, pp. 123-132	摩擦接合	亀裂に対するボルト締めストップホール	8節点固体要素	座金-母材	固着	クーロン則 (備考欄参照)	-	弾性係数: 2.06E+5	不明	接触面に弾性係数の低い要素 (厚さ0.1mm) を挿入 弾性係数は接触面圧に比例
3.2.31	千鳥配置された高力ボルト摩擦接合継手の荷重伝達メカニズム	山階清永, 山口隆司, 高井俊和, 彭雪	2015	土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 2, pp. 221-233	摩擦接合	砲台配置された継手, ボルト列数: 8×11列	6節点ソリッド完全積分要素, 8節点ソリッド完全積分要素	連結板-母材, ボルト軸部-座金・母材・連結板, 座金-連結板	固着~主すべり発生~すべり~支圧	クーロン則	全接触面: 0.5	母材, 連結板: 材料試験結果に基づくマルチリニア ボルト, 座金: 公称値に基づくマルチリニア	ABAQUS (Ver. 6.9)	列数が多いほどすべり係数が低下, 格子配置と千鳥配置では同程度のすべり係数を確保
3.2.32	高力ボルト摩擦接合継手のすべり強度/降伏強度比とすべり係数に関する検討	山口隆司, 森猛, 橋本国太郎	2005	構造工学論文集, Vol. 51A	摩擦接合	標準すべり試験	8節点または6節点のソリッド要素, 節点ばね	連結板-母材	固着~主すべり発生~すべり~支圧	クーロン則	連結板-母材: 0.5 連結板とボルトヘッドの摩擦係数は明示されていないが, 連結板-母材と比べて無視できるくらい小さい値を採用	SS400~SM570: トリリニア型 高張力鋼: バイリニア型 高力ボルト: 完全弾塑性 (降伏点などは公称値)	ABAQUS (Ver. 6.4)	すべり強度/降伏強度 (β) が大きくなるに従い, すべり係数の低下率が大きくなる
3.2.33	圧縮力を受けるF18T級超高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動に関する解析的研究	山口隆司, 北田俊行, 池田敬之, 吉岡夏樹	2009	構造工学論文集, Vol. 55A	摩擦接合	F18T級超高力ボルト	8節点ソリッド要素 (ボルトの一部には6節点ソリッド要素)	連結板-母材, ボルト孔-ボルト軸部, 高力ボルト-座金, 座金-連結板	固着~主すべり発生~すべり~支圧	クーロン則	連結板-母材: 0.45 ボルト孔-ボルト軸部: 0.45 高力ボルト-座金: 1 座金-連結板: 0.01	母材, 連結板, 高力ボルトそれぞれの公称値に基づくバイリニア	ABAQUS (Ver. 6.7)	
3.2.35	Development of I-beam to CHS column moment connections with external diaphragms for seismic applications	A. B. Sabbagh and T. M. Chan	2012	Connections in Steel Structures VII	摩擦接合	鉄骨の柱-はり接合部	8節点低減積分シェル要素, コネクタ要素	柱のダイアフラム-はりフランジ	固着~主すべり発生~すべり~支圧	コネクタ要素に作用するせん断力から算定	設定なし	バイリニア	ABAQUS	各ボルトは二つのコネクタ要素 (固着状態・すべり状態を再現するCARTESIAN要素と支圧状態を再現するSTOP要素) でモデル化
3.2.36	Steel brace-to- RC frame post-tensioned bolted connection	Adrian Dogariu, Sorin Bordea and Dan Dubina	2012	Connections in Steel Structures VII	摩擦接合	RCラーメンに設置した座屈拘束ブレース	8節点低減積分ソリッド要素, 2節点はり要素	ボルト頭-鋼板, ナット-鋼板	固着~主すべり発生	不明	0.45	不明	ABAQUS	陽解法を用いているため, ボルト軸力の導入にはABAQUSのボルト荷重ではなくコネクタ要素を使っている
3.2.38	Low cycle performance of T-stub components of bolted moment beam-to-column connections	A. M. Pop, D. Grecea and A. Ciutina	2012	Connections in Steel Structures VII	引張接合	鉄骨の柱-はり接合部	8節点低減積分ソリッド要素	はりのエンドプレート-柱 (それ以外は不明)	密着~離間	なし	設定なし	不明	ABAQUS	
3.2.42	NUMERICAL SIMULATIONS OF BOLTED CONNECTIONS: THE IMPLICIT VERSUS THE EXPLICIT APPROACH	G. J. van der Vegte	2004	Connections in Steel Structures V - Amsterdam - June 3-4, 2004	摩擦接合	さまざまな文献を紹介 (エンドプレート継手, T継手, 鉄骨建築物の柱-はり接合部)	-	-	-	-	-	-	ABAQUS	ある自由度を超えるると陰解法の方がCPU時間が上回ることなどが示されている
3.2.45	Prediction models for calculating bolted connections using data mining techniques and the finite element method	J. Fernández, A. Perniá, F. J. Martínez-de-Pisón, R. Lostado	2010	Engineering Structures, Vol. 32, pp. 3018-3027	摩擦接合	継手試験体	8節点ソリッド要素	連結板-母材, ボルト孔-ボルト軸部, 高力ボルト-連結板	固着~主すべり発生	クーロン則	0.2, 0.3, 0.4, 0.5	バイリニア	ABAQUS	

表 5.2.3 収集文献一覧表 (その3)

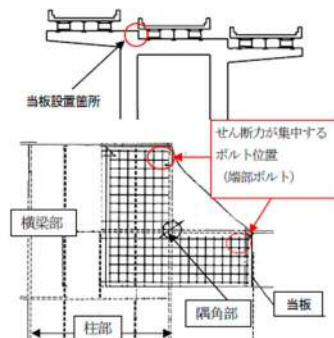
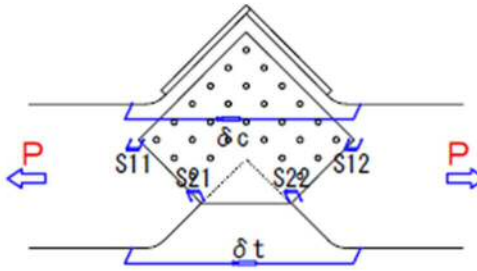
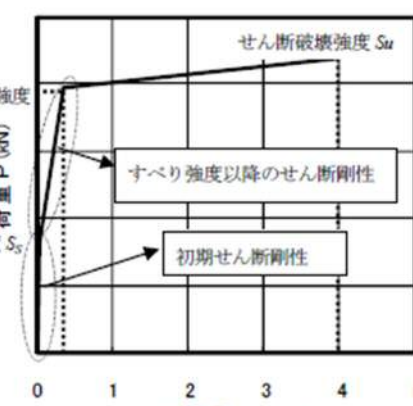
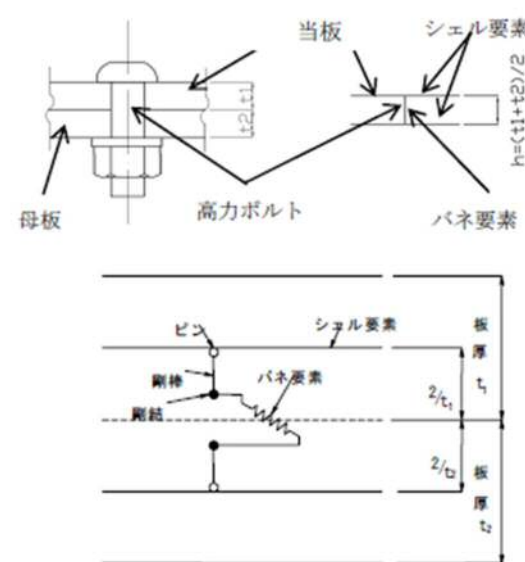
：詳細な内容を整理した文献

文献 番号	論文題目	著者	公開 年次	出典	継手種別	解析対象	解析モデル概要						備考	
							使用要素	モデル化している接触面	モデル化している接触挙動	摩擦力の算定	静止摩擦係数	応力-ひずみ関係		使用ソフト
3.2.46	Structural assessment of the tension capacity of carbon & stainless steel plates with staggered bolts	J.J. dos Santos, A.T. da Silva, L.R.O. de Lima, P.C.G. da Silva Vellasco, S.A.L. de Andrade and J.G.S. da Silva	2012	Connections in Steel Structures VII	支圧接合	千鳥配置の支圧接合継手	8節点ソリッド要素, コンタクト要素	鋼板間, ボルト孔-ボルト軸部	支圧	不明	不明	実測値に基づくマルチリニア	Ansys 11	
3.2.48	Static resistance of bolted circular flange joints under tensile force	M. Couchaux, M. Hjiat and I. Ryan	2010	Proc. 13rd International Symposium on tubular structures, Vol.1	引張接合	軸力を受ける鋼管フランジ	ソリッド要素, 接触要素	ボルト-フランジ, フランジ-対称面	固着～すべり発生, 密着～離間	クーロン則	ボルト-フランジ: 0.25 (フランジ-対称面では摩擦力を無視)	フランジ, 鋼管, ボルトともにマルチリニア	ANSYS V11.0	
3.2.49	ELASTO-PLASTIC FE ANALYSIS ON MOMENT-ROTATION RELATIONS OF TOP- AND SEAT-ANGLE CONNECTIONS	M. Komuro, N. Kishi and W.F. Chen	2004	Connections in Steel Structures V	引張接合	鉄骨の柱-はり接合部	8節点ソリッド要素	ボルト孔-ボルト軸部, ボルト頭-アングル材, ナット-アングル材, アングル材-フランジ	すべり～支圧	なし	設定なし	実測値に基づくマルチリニア	ABAQUS	
3.2.50	Experimental and numerical investigation on unstiffened and stiffened T-stubs	N. Baldassino, V. Mancini and R. Zandonini	2012	Connections in Steel Structures VII	引張接合	鉄骨の柱-はり接合部	8節点ソリッド要素	ボルト頭-座金, 座金-T-stub, T-stub-境界面, 座金-ナット	密着～離間	なし	設定なし	ボルト, T-stubともに引張試験に基づく	Abaqus v. 6.8	
3.2.51	Benchmarks for finite element modelling of bolted steel connections	OS Bursi, JP Jaspart	1997	Journal of construction steel research, Vol.43, Nos.1-3, pp.17-42	引張接合	引張力を受けるT継手	8節点ソリッド要素	座金なし: ボルト-フランジ 座金あり: 座金-フランジ	固着～すべり発生, 密着～離間	クーロン則	0.25	実測に基づくマルチリニア	-	
3.2.52	TESTS ON BOLTED SHEAR CONNECTION IN HIGH-STRENGTH STEEL WITH THREE OR FOUR BOLTS IN LONGITUDINAL DIRECTION	Primož Može and Darko Beg	2008	Connections in Steel Structures VI	摩擦接合	高張力鋼S690の継手試験体	ソリッド要素	連結板-母板, ボルト孔-ボルト軸部	すべり～支圧	不明	母板-連結板: 0.25 (実験結果に基づき設定)	不明	ABAQUS v6.7	
3.2.53	DESIGN OF INNOVATIVE SMA PR CONNECTIONS BETWEEN STEEL BEAMS AND COMPOSITE COLUMNS	Roberto T. Leon and Jong Wan Hu	2008	Connections in Steel Structures VI	引張接合	鉄骨の柱-はり接合部	ソリッド要素	はりのエンドプレート-柱 (それ以外は不明)	密着～離間	なし	設定なし	不明	ABAQUS Version 6.6-1	
3.2.54	Three-dimensional finite elements of steel bolted connections	S.-H. Ju, C.-Y. Fan, G.H. Wu	2004	Engineering Structures, Vol.26, pp. 403-413	支圧接合	middle plateと2枚の side platesからなる3部材ボルト継手	8節点非適合ソリッド要素, 3次元接触要素	ボルト-サイドプレート, サイドプレート-ミドルプレート	密着～離間	不明	不明	バイリニア	-	3次元接触要素は, Hermit双3次補完表面に基づくnode-to-Hermit-surface要素
3.2.56	Friction Connections with Slotted Holes for Wind Towers	William Husson	2008	Licentiate Thesis 2008:	摩擦接合	風力タワーの継手	8節点ソリッド要素	鋼板間, ボルト頭-鋼板, ナット-鋼板, ボルト孔-ボルト軸部	固着～主すべり発生～すべり～支圧	クーロン則	0.36, 0.45, 0.61, 0.84	不明	Abaqus 6.7.1	低減積分要素と非適合要素, ペナルティ法と直接法, 有限すべりと微小すべりで解析に要する時間を比較している
3.2.57	Finite element evaluation of the rotation capacity of partial strength steel joints	A. M. Girao Coelho, F.S.K. Bijlaard	2012	Connections in Steel Structures VII	引張接合	鉄骨の柱-はり接合部	8節点完全積分ソリッド要素, 非線形コンタクト要素	はりのエンドプレート-柱 (それ以外は不明)	密着～離間	なし	設定なし	実測値に基づくマルチリニア	LUSAS	ボルトはequivalent bolt (Girao Coelho et al, 2006) によりモデル化

3. 個別文献の内容

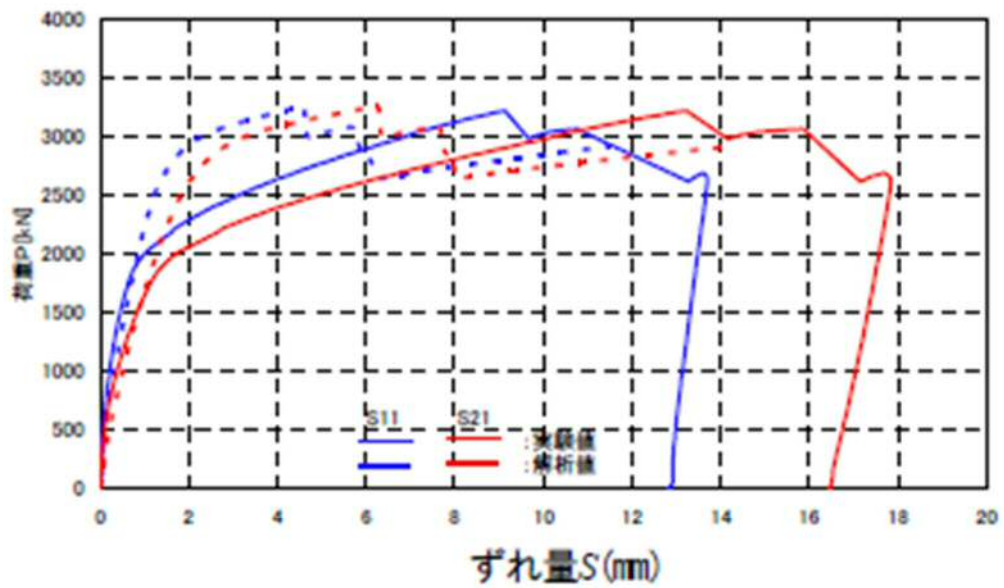
収集した文献の中から、解析モデルを作成する上で特に参考にできると考えた文献の内容を示す。なお、抽出した文献は、継手方式、解析対象などを網羅するように抽出しており、似通った解析手法を採用している文献が複数ある場合には、文献中の解析モデルに関する記述がより詳細であると考える文献を対象に個票で整理した。

文献3.2.12

大分類	高力ボルト	小分類	支圧接合
論文題目	打込式高力ボルト支圧接合継手の耐荷力性状とFEM解析モデルの提案		
著者	下里哲弘, 木ノ本剛, 三木千壽		
公開年次	2008年	出典	土木学会論文集A, Vol. 64, No. 2
解析の目的	既設鋼橋の補修補強法に用いられる打込式高力ボルト支圧接合継手の耐荷力性状を、解析的に評価し得る簡易なモデルの開発を目的としている。		
解析対象	 <p>既設鋼製橋脚隅角部の疲労損傷対策としての当板補強を対象としている。</p> 		
解析モデルの概要			
解析コード	HKS-ABAQUS (ver6.3)		
使用要素	隅角部・当て板：シェル要素・剛体棒要素，ボルト：トリリニアばね要素		
対象接触面	なし（接触挙動はばね要素の剛性変化で考慮）		
接触挙動	すべり	摩擦力	摩擦力はばね要素の剛性で考慮
摩擦係数の設定	なし		
応力-ひずみ関係	弾完全塑性		
ボルトのモデル化	各ボルトは二つのコネクタ要素（固着状態・すべり状態を再現するCARTESIAN要素と支圧状態を再現するSTOP要素）でモデル化		
解析モデル	<p>隅角部および当板はシェル要素でモデル化し、母板と当板を接合する支圧接合継手は、当板面内方向の荷重-ずれ関係をトリリニアばね要素でモデル化している。</p>  <p>せん断破壊強度 S_u せん断降伏強度 すべり強度 S_y 初期せん断剛性 すべり強度以降のせん断剛性</p> <p>トリリニアばね要素による荷重-ずれ関係の再現</p>  <p>当板 高力ボルト バネ要素 母板 ピン 剛棒 剛結 シェル要素 板厚 t_1 板厚 t_2</p> <p>ボル1本のモデル化</p>		

解析結果

実験結果との比較



結果概要

- ・実験結果とほぼ同様な荷重分配特性が再現可能である
- ・最大荷重およびずれ量は解析結果の方が実験結果より若干低かった。

備考

今なお全体系解析はボルトの簡易なモデル化が求められてるため、この事例を紹介した。ボルトを二つのコネクタ要素（固着状態・すべり状態を再現するCARTESIAN要素と支圧状態を再現するSTOP要素）を組み合わせでモデル化した報告もある（A. B. Sabbagh and T. M. Chan, 2012）。

大分類	高力ボルト	小分類	摩擦接合
論文題目	高力ボルト摩擦接合のボルト軸力導入に着目した解析モデルに関する研究		
著者	玉越隆史, 石尾真理, 横井芳輝, 山崎健次郎, 水口知樹		
公開年次	2014年12月	出典	鋼構造論文集, 第21巻第84号
解析の目的	超高力ボルトの実用化のため, 実物大の桁の高力ボルト継手部の挙動を再現できる解析モデルの構築を目的とした。特に, 導入軸力の影響を確認することに留意した。		
解析対象	標準すべり試験体, 多列すべり試験体, 桁モデル試験体を解析対象とした。		
解析モデルの概要			
解析コード	ABAQUS (Ver. 6.11-1)		
使用要素	6節点ソリッド完全積分要素, 8節点ソリッド完全積分要素		
対象接触面	連結板-母材, 連結板-座金, ボルト軸部-ボルト孔 (マスタースレイブ法)		
接触挙動	固着~主すべり発生~すべり~支圧	摩擦力	クーロン則
摩擦係数の設定	全接触面, 試験結果から設定 標準すべり試験の再現: 0.55 多列すべり試験の再現: 0.64 曲げ試験の再現: 0.56		
応力-ひずみ関係	鋼板: 実測値に基づくトリリニア ボルト: 実測値に基づくバイリニア		
解析モデル			

解析結果

結果概要

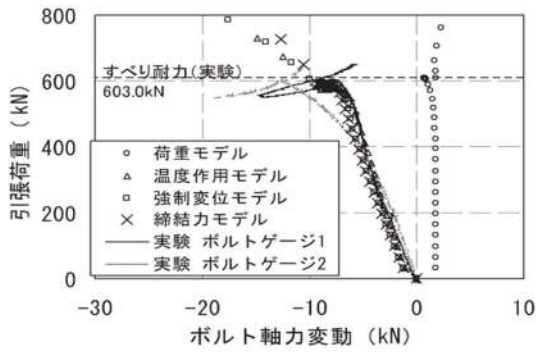


図9 ボルト軸力の変動

標準すべり試験体

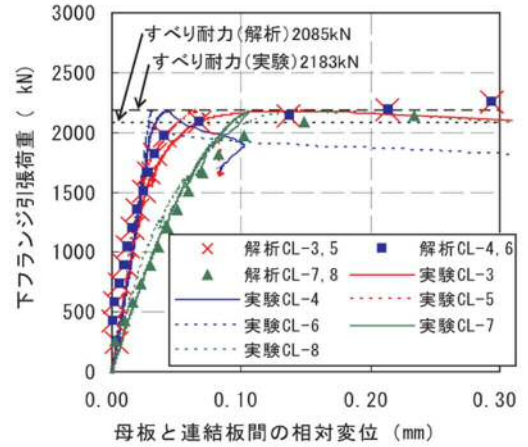


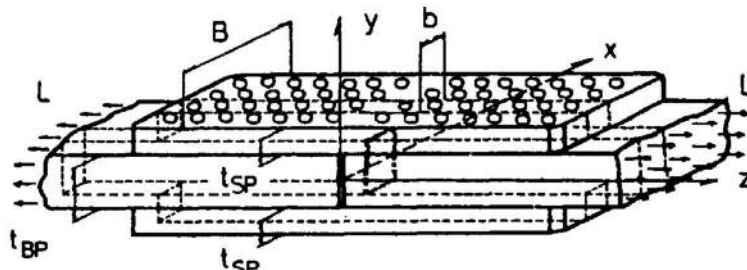
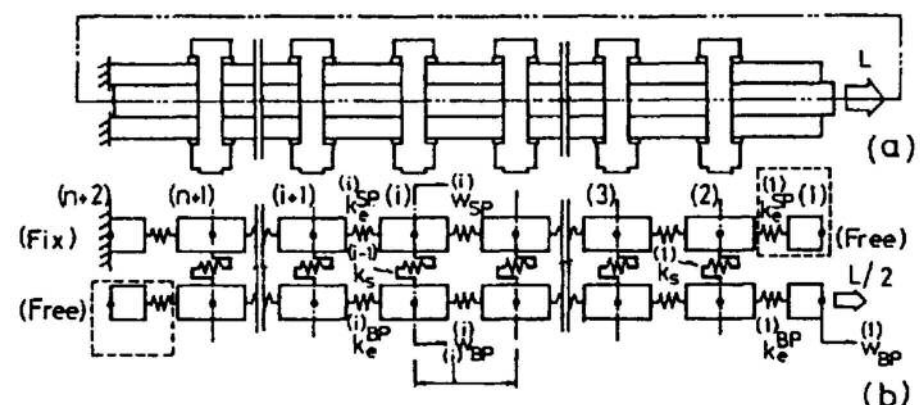
図17 母板と連結板間の相対変位と引張荷重 (桁曲げ)

桁モデル試験体

- ・ボルト軸力の導入導入方法として荷重モデル、温度作用モデル、強制変位モデル、縮結力モデルの4つを比較した結果、「縮結力モデル」が最も精度よく実験結果を再現できた。
- ・多列すべり試験においては、一部、解析結果と実験結果に乖離がある。

備考

すべり以後の再現に課題がある。

大分類	高力ボルト	小分類	摩擦接合
論文題目	剛体-ばねモデルを用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動解析		
著者	長嶋文雄, 伊藤文人		
公開年次	1984年	出典	土木学会論文集, 第350号/I-2
解析の目的	剛体-ばねモデルにより, ボルト孔による断面欠損, 初期せん断ばね定数の補正, ポアソン効果による板厚減少を考慮した摩擦接合継手の主すべりまでの解析手法を提示している. 多列継手の1列分を取り出している.		
解析対象	 <p style="text-align: center;">Fig. 1 Butt joint with plural gage strips.</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	不明		
使用要素	剛体要素, 非線形ばね要素		
対象接触面	連結板-母材		
接触挙動	固着~主すべり発生	摩擦力	クーロン則
摩擦係数の設定	実験で得た μ を用いて算定		
応力-ひずみ関係	鋼板の剛性に基づく力-変位関係を線形ばねで付与		
解析モデル			

解析結果

結果概要

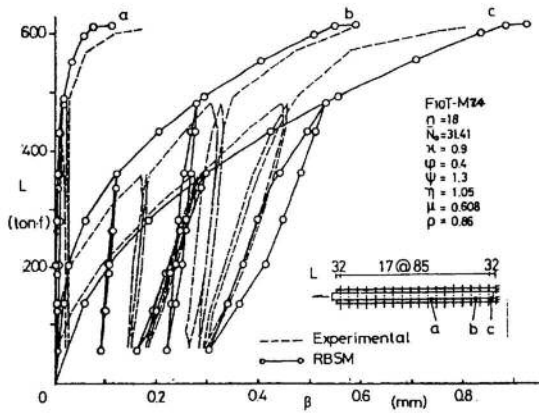


Fig. 17 Load-displacement relation of the joint fastened with M 24 bolts under cyclic loading.

荷重変位関係
M24 : 繰返し荷重

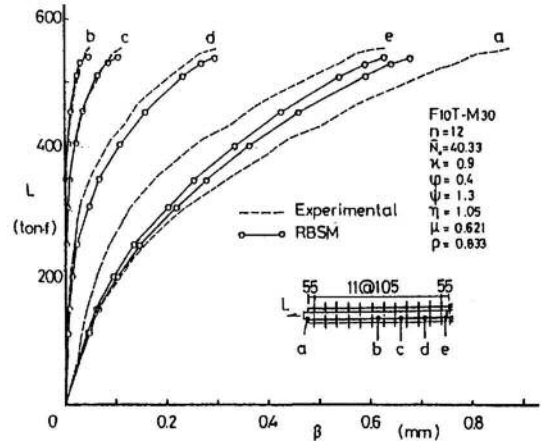


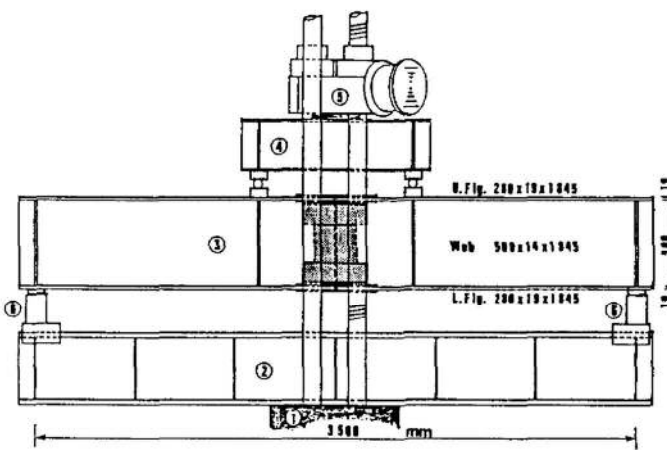
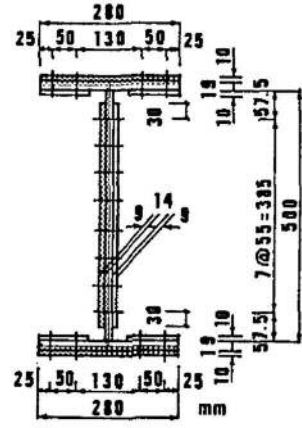
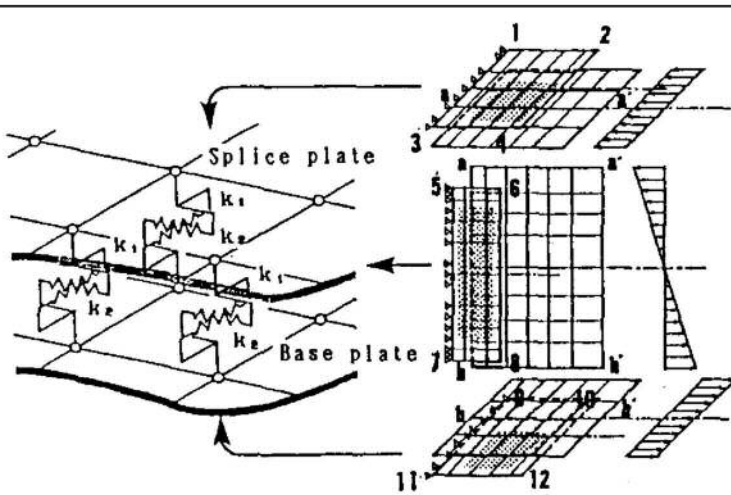
Fig. 16 Load-displacement relation of the butt joint fastened with M 30 (F 10 T) bolts.

荷重変位関係
M30 (F10T)

- ・ 接触面のせん断ばね特性を算出するにあたり、せん断ひずみエネルギーに基づいた2つの補正係数を考慮することで、実験結果と整合し、解析手法の妥当性を確認している。
- ・ ボルト列数とすべり係数との直接的相関はなく、ボルト本数の増加に伴う試験体断面寸法の変化により見かけのすべり係数が変わるものと考察している。

備考

継手のマクロな挙動は追跡できるが、細部の応力度やひずみは計算できない。

大分類	高力ボルト	小分類	摩擦接合
論文題目	プレートガーダー継手のすべり強度試験および解析		
著者	長嶋文雄, 山田稔, 長島和男, 成田信之		
公開年次	1991年	出典	構造工学論文集, Vol. 37A
解析の目的	曲げモーメントとせん断力が同時に作用する部材の摩擦接合継手におけるすべり強度特性の把握 1桁の摩擦接合継手（上下フランジ, ウェブを含む）を対象としている。		
解析対象	  <p>Fig. 1 Schematic of the test apparatus</p> <p>Fig. 3 Cross section of the plate girder</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	不明		
使用要素	2次 (8節点) アイソパラメトリック要素, せん断ばね		
対象接触面	連結板-母材		
接触挙動	固着~主すべり発生	摩擦力	クーロン則
摩擦係数の設定	ウェブ : 0.30 フランジ : 0.23		
応力-ひずみ関係	不明		
解析モデル	 <ul style="list-style-type: none"> ・ 添接板と母材の間にせん断ばねを配置 ・ 上下フランジとウェブの接合部では節点を共有せず, 2重節点でモデル化したうえで, 水平方向のみ剛性の高いばねで連結 → 曲げは伝わるが, せん断はウェブだけで抵抗 <p>Fig. 10 Quasi 3D model for slip problem of the plate girder connection</p>		

解析結果

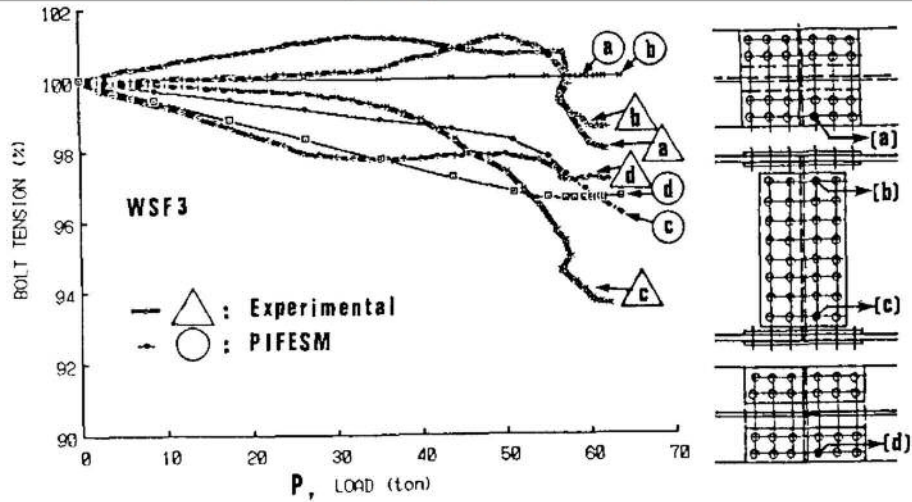


Fig. 13 Bolt tension (%) - load relationship

結果概要

P, ton	Experimental	PIFESM
WS	17.3	17.8
F 2	30	30.7
F 3	47	46.2
F 4	59.9	61.2
WSF 2	45	48.4
WSF 3	60	63.6
WSF 4	74	78.6

Table 4 Comparison of experimental and computed major slip loads

- ・ウェブ継手の曲げに対するすべり強度を、フランジとの曲げ剛性の比 (I_W/I_F) 以上に強くした場合は、微小すべり発生以後の応力分担の割合が変化し、それだけウェブ添接板に多くの応力が伝達される。
- ・桁全体のすべり荷重は、ウェブ継手とフランジ継手のすべり荷重の合計値より小さい。

備考

境界条件を工夫することで、力学モデルを明確化した疑似立体解析を行い、実験結果とよく合致したとしている。

大分類	高力ボルト	小分類	摩擦接合
論文題目	高力ボルト摩擦接合とする既設リベット継手の部分取替え補修に関する解析的検討		
著者	橋本国太郎, 山口隆司, 北田俊行		
公開年次	2008年	出典	構造工学論文集, Vol. 54A
解析の目的	リベット接合における一部のリベットを高力ボルト摩擦接合に取替えることが可能か否かを明らかにするために, 力学的な挙動をFEM解析により検討している。		
解析対象	<p>腐食により損傷が発生したリベット継手の一部を高力ボルトに取り替える際の継手耐力を算出している。</p> <p>(a) Longitudinal cross section</p> <p>(b) Plan view</p> <p>図-3 解析モデル (例: B-R2B1-O, 寸法単位 mm)</p>		

解析モデルの概要

解析コード	ABAQUS
使用要素	8節点または6節点のソリッド要素, 節点ばね
対象接触面	連結板-母材, ボルト-ボルト孔, リベット-リベット孔
接触挙動	固着~主すべり発生~すべり~支圧
摩擦係数の設定	摩擦係数: クーロン則 連結板-母材: 0.28 (劣化による低減を想定)
応力-ひずみ関係	公称値に基づくバイリニア

解析モデルは上図に示すとおりである。ここでは、解析ケース一覧表を示す。

表-4 解析ケース

破壊モード	ケース名	リベット本数 (本)	ボルト本数 (本)	取替え位置	導入軸力 (kN)	母材板厚 (mm)	すべり耐力/降伏耐力比 β	継手耐力の簡易計算値 (kN)	継手耐力の解析値 (kN)
支圧先行型	B-R3B0	3	0	—	—	12	—	231.7	230.8
	B-R2B1-O	2	1	外側1本	205	12	—	256.9	220.7
	B-R2B1-M	2	1	中間1本	205	12	—	256.9	240.1
	B-R2B1-I	2	1	内側1本	205	12	—	256.9	239.2
	B-R1B2-OM	1	2	外中2本	205	12	—	282.0	265.5
	B-R1B2-MI	1	2	内中2本	205	12	—	282.0	278.4
	B-R0B3	0	3	全て	205	12	0.871	307.2	314.1
せん断先行型	S-R3B0	3	0	—	—	28	—	355.8	373.8
	S-R2B1-O	2	1	外側1本	273	28	—	373.7	368.3
	S-R2B1-M	2	1	中間1本	273	28	—	373.7	373.2
	S-R2B1-I	2	1	内側1本	273	28	—	373.7	359.7
	SR1B2-OM	1	2	外中2本	273	28	—	391.7	397.5
	S-R1B2-MI	1	2	内中2本	273	28	—	391.7	397.0
	S-R0B3	0	3	全て	273	28	0.492	409.6	421.3

解析結果

結果概要

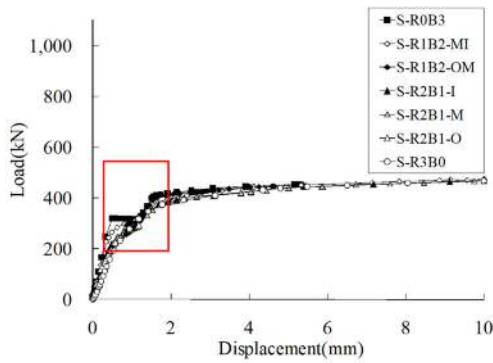


図-5 荷重-変位関係 (支圧先行型)

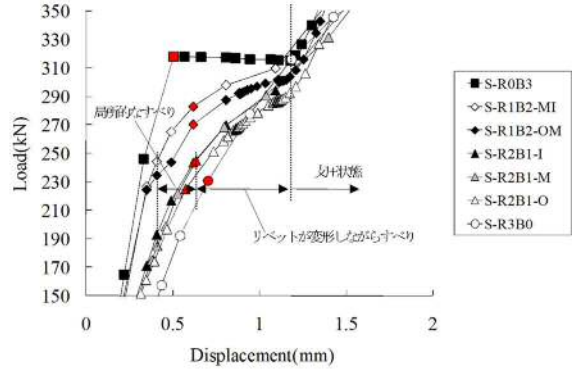


図-6 耐力付近の拡大図 (支圧先行型)

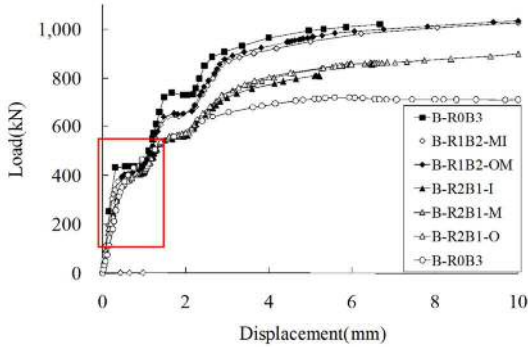


図-7 荷重-変位関係 (せん断先行型)

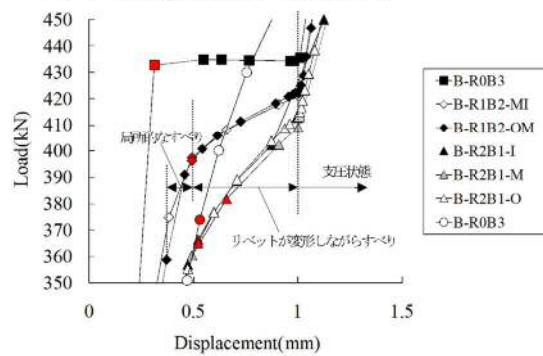
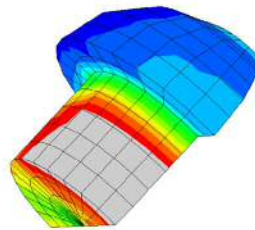
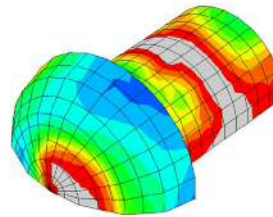


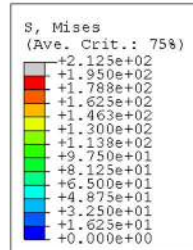
図-8 耐力付近の拡大図 (せん断先行型)



(a) Bearing precedence type



(b) Shear precedence type



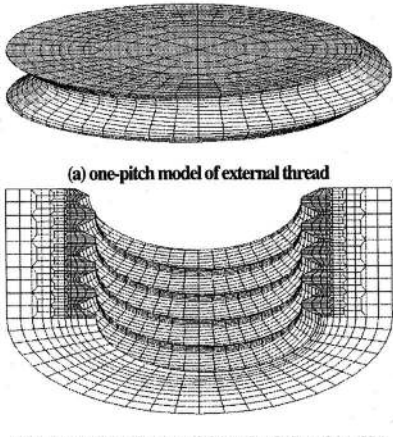
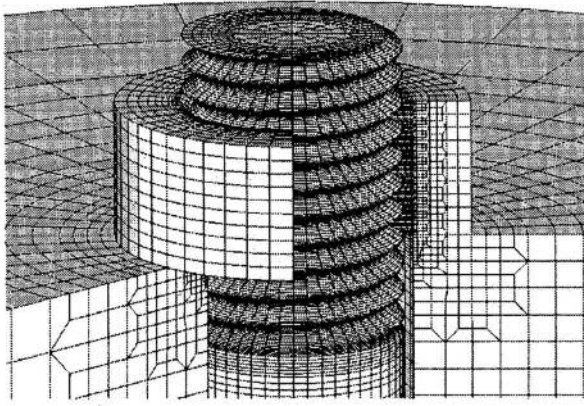
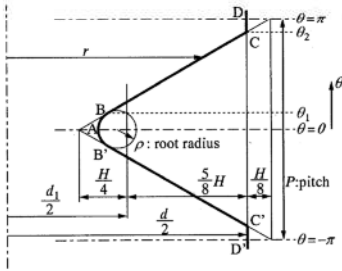
(単位: N/mm²)

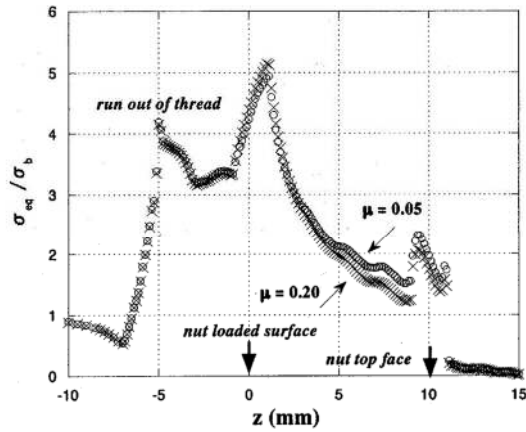
図-9 リベットの相当応力コンター図 (降伏時)

- ・部分的にリベットを高力ボルト摩擦接合に取り替えたケースでは、高力ボルトの周辺ですべりが生じており、1本取替えのケースでは、ボルト孔周辺の局所的なすべり→リベットの降伏→リベットの変形とともに継手全体のすべり発生、という挙動を確認している。
- ・同様の部分取替えにおいて、2本取替えのケースでは、局所的なすべり発生と同時にリベットが降伏→リベットの変形とともに継手全体のすべり発生、という挙動を確認している。

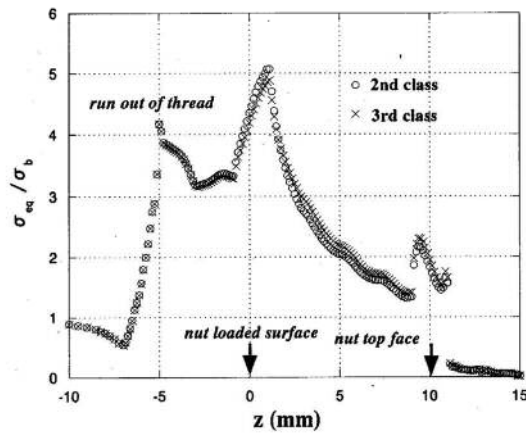
備考

リベット継手のすべり係数、高力ボルトのすべり係数、リベット材の降伏点などの値は設計基準類を参考に設定している。今後は、载荷試験によりこれらの仮定値による解析結果の検証が必要としている。

大分類	高力ボルト	小分類	-
論文題目	ねじ山らせん形状の高精度なモデリングと有限要素解析		
著者	福岡俊道, 野村昌孝, 森本雄哉		
公開年次	2006年	出典	日本機械学会論文集 (A編), 72巻723号, pp. 45-51
解析の目的	ねじの軸直角断面形状が軸方向のいずれの位置においても同じである点に着目し, その形状を表す式を用いてねじ山らせん形状を高い精度で再現し, かつ計算効率の高いモデルを作成する手法を提案している.		
解析対象	<p>被締結体は直径130mm, 厚さ46mmの円板とし, ボルトの呼び径はM16, ボルト穴径は17.5mmと18.5mmとしている.</p>  <p>Fig.4 External thread model with one-pitch height and nut model</p>  <p>Fig.5 Finite element model of bolted joint (M16)</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	ABAQUS		
使用要素	8節点ソリッド要素		
対象接触面	めねじ-おねじ		
接触挙動	-	摩擦力	-
摩擦係数の設定	0.05~0.2		
応力-ひずみ関係	-		
解析モデル	<p>ねじ山の形状を数式で表し, 以下の手順で解析モデルを作成している.</p> <p style="text-align: center;">解析モデル作成手順</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 真の軸直角断面を適切に分割した二次元モデルを作成し, これを基準分割モデルとする. (2) 基本分割モデルを $z = 0$ の位置に置く. (3) 基本分割モデルを反時計回りに $2\pi/n$ 回転させて, それを軸方向に P/n だけ離れた位置に置く. (4) $z = 0$ と $z = P/n$ に置かれた基本分割モデルの対応節点を結ぶと, $1/n$ ピッチ分の三次元モデルが得られる. (5) 上記の(3)と(4)を n 回繰り返すことにより, 1山の三次元らせんモデルが完成する. (6) ねじ山数に応じて(5)で作成したモデルを積み上げる. <p style="text-align: center;">おねじの形状</p> $r = \begin{cases} \frac{d}{2} - \frac{7}{8}H + 2\rho - \sqrt{\rho^2 - \frac{P^2}{4\pi^2}\theta^2} & (0 \leq \theta \leq \theta_1) \\ \frac{H}{\pi}\theta + \frac{d}{2} - \frac{7}{8}H & (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) \\ \frac{d}{2} & (\theta_2 \leq \theta \leq \pi) \end{cases}$ $\theta_1 = \frac{\sqrt{3}\pi}{P}\rho, \quad \theta_2 = \frac{7}{8}\pi, \quad H = \frac{\sqrt{3}}{2}P \quad (1)$  <p>(a) cross section of external thread along bolt axis</p>		

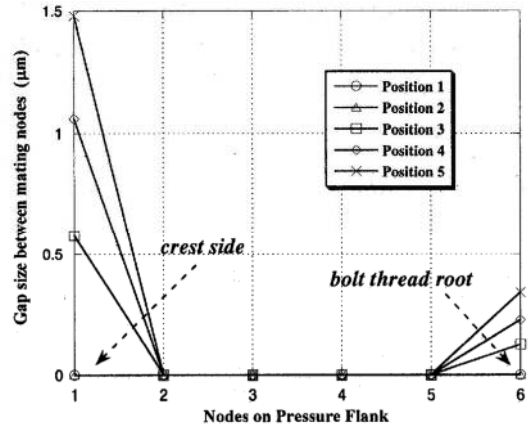


(a) Effects of friction coefficient



(b) Effects of bolt hole diameter

Fig.6 Stress distributions along thread root



(b) Gap size on the pressure flank at selected positions

Fig.7 Contact pressure distributions on the pressure flank along the helix

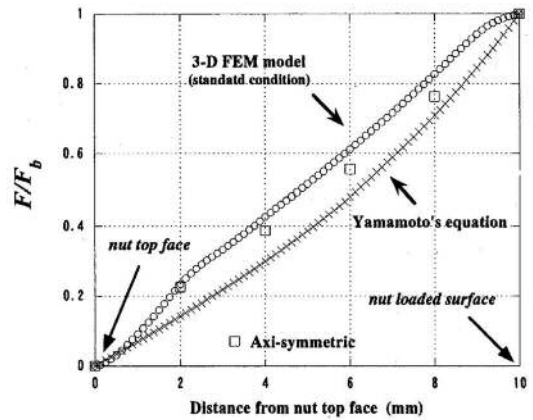


Fig.8 Axial load distribution along engaged threads

結果概要

- ・提案しているモデリング手法により、ナット座面に向かってねじ山が次第に消えていく部分を幾何学的に正確に再現することができたとしている。
- ・はめあいねじ部、遊びねじ部、ねじの切り上げ部について、つる巻き線に沿ったねじ谷底応力の分布特性を解析し、摩擦係数、ボルト穴径の影響を明らかにしたとしている。
- ・ナット座面の面圧は、ねじ山のらせん形状に起因して円周方向に非軸対称な分布を示し、その傾向はボルト穴周辺とナット外延部でやや顕著に現れる。

備考

ボルトねじ山のらせん形状を精緻にモデル化することで、ボルト・ナットの谷底部の応力分布を評価している。

大分類	高力ボルト	小分類	支圧接合
論文題目	鋼橋の桁連結工の地震時挙動の評価方法		
著者	福本守, 斉藤雅充, 和田一範, 池田学		
公開年次	2015年	出典	鉄道総研報告, Vol. 29, No. 3
解析の目的	ボルトのせん断や支圧抵抗に期待する桁連結構造の剛性や非線形挙動を部分解析モデルにより明確にし, 橋梁全体系の解析へ反映させることを目的とする。		
解析対象	<p>「ボルト方式」の桁連結構造, および桁連結構造を適用した橋梁の耐震設計</p> <p>(a) ボルト方式 (単位:mm) (b) ピン方式</p> <p>図1 桁連結工の例</p>		

解析モデルの概要			
解析コード	ABAQUS (静的解析) LS-DYNA (動的解析)		
使用要素	ソリッド要素, 接触要素		
対象接触面	連結板-母材, 連結板-ボルト		
接触挙動	支圧	摩擦力	-
摩擦係数の設定	-		
応力-ひずみ関係	材料試験結果に基づくマルチリニア		

桁連結構造を取り出した部分モデル

図4 FEM 解析モデル (単位:mm)

橋梁全体モデル

図13 桁連結工を有する橋梁の地震応答解析モデル

解析モデル

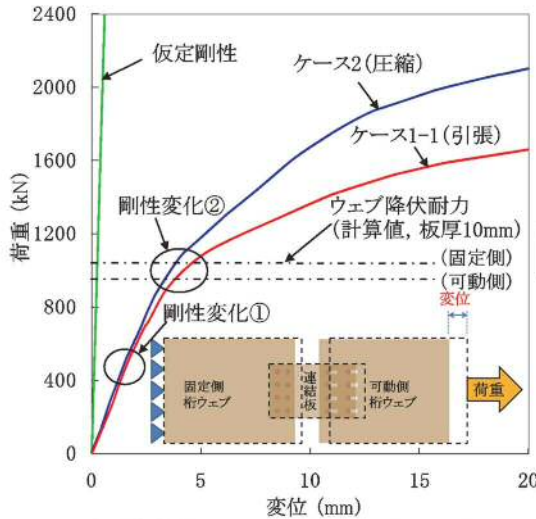
鋼材の応力ひずみ関係

図5 鋼材の応力ひずみ関係

ひずみ速度 - 降伏強度関係

図6 ひずみ速度 - 降伏強度関係

解析結果



(a) 荷重方向の影響と仮定剛性との比較

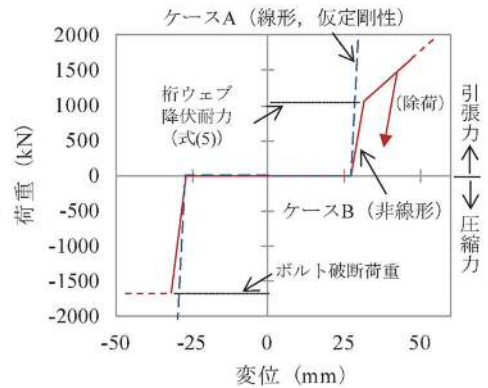


図14 桁連結工のばねのモデル化

FEM解析を再現できる非線形ばねの構成則を提案

結果概要

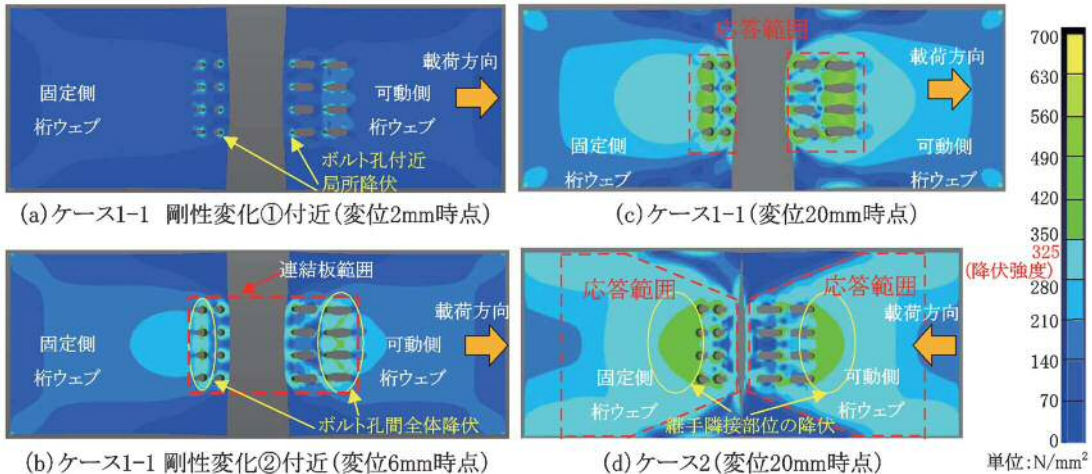


図8 桁ウェブの変形・応力状態 (変形図: 変位3倍, コンター: Von-Mises 応力)

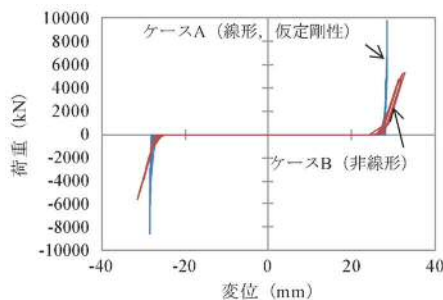


図15 桁連結工の荷重-変位関係 (連結工2)

橋梁全体モデルの解析結果

・桁連結工を線形・仮定剛性でモデル化した場合より、応答変位は大きい、最大荷重は小さい。

- ・桁連結構造の非線形性として、初期剛性、降伏耐力、降伏後の剛性をFEM解析で算出
- ・全体系の解析では、桁連結構造を非線形ばね要素としてモデル化し、従来の設計手法と比較して上部構造の応答値が3~4割程度低減することを確認している。

備考

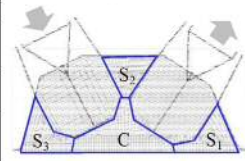
- ・実験での検証は今後の課題としている。
- ・構造諸元が変わっても提案している非線形ばね要素のモデル化手法が適用できるかどうかの検証が必要と考える。

大分類	高力ボルト	小分類	支圧接合
論文題目	腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部の圧縮耐荷力に着目した荷重試験		
著者	村越潤, 遠山直樹, 澤田守, 有村健太郎, 郭路, 依田照彦, 笠野英行, 野上邦栄		
公開年次	2013年	出典	構造工学論文集, Vol. 59A
解析の目的	約50年間供用され腐食損傷により架け替えに至った鋼トラス橋の撤去部材から切り出したトラス格点部を用いて, 圧縮荷重試験と弾塑性有限変位解析を行い, 腐食が破壊性状および残存耐荷力に及ぼす影響を検討		
解析対象	<p>撤去橋梁から格点部を切り出し, 実験と解析を行っている。</p> <p>図-1 対象橋梁</p> <p>(a) 格点部 P25d の位置</p> <p>(b) 格点部の構造概要図</p> <p>(c) 切り出された格点部試験体 P25d</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	LS-DYNA4. 3		
使用要素	シェル要素		
対象接触面	斜材-ガセットプレート		
接触挙動	固着	摩擦力	-
摩擦係数の設定	-		
応力-ひずみ関係	<p>材料試験結果に基づくトリリニア</p> <p>2次剛性 ($\sigma_y \sim 1.5\sigma_y$) : $E/100$</p> <p>3次剛性 ($1.5\sigma_y \sim \sigma_u$) : $E/700$</p>		
解析モデル	<p>リベットと鋼部材を線形ばね要素で接合した解析を行ったが, ばね剛性が最大荷重に与える影響が小さいことを確認したうえで, 完全剛結合としている。</p> <p>図-12 解析モデルの概要</p>		
		<p>(a) ガセット部</p> <p>(b) 斜材部</p> <p>図-13 格点材料の応力-ひずみ関係 (赤: 計測値, 青: トリリニア型モデル)</p>	

解析結果

表-3 解析ケース

解析ケース	部材の板厚(mm)					
	斜材		ガセット			
	フランジ	ウェブ	圧縮部 C	自由端部 S ₁	自由端部 S ₂	自由端部 S ₃
健全ケース (リベット:剛結)	12	14	12	12	12	12
腐食(平均)ケース (リベット:剛結)	図-3 参照	図-3 参照	9.2	9.2	9.2	9.2
腐食(部位別)ケース (リベット:剛結)	図-3 参照	図-3 参照	上流8.1 下流8.9	上流7.3 下流9.6	上流10.4 下流10.0	上流10.8 下流9.6



ガセットの領域名称 (mm)

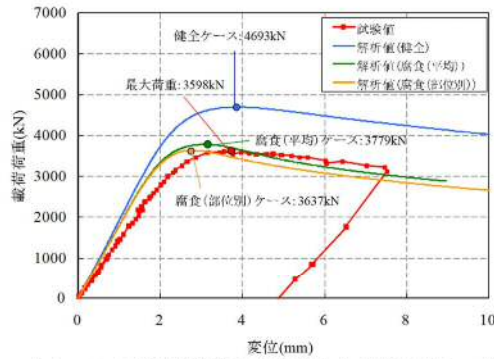


図-14 圧縮載荷荷重と載荷方向鉛直変位との関

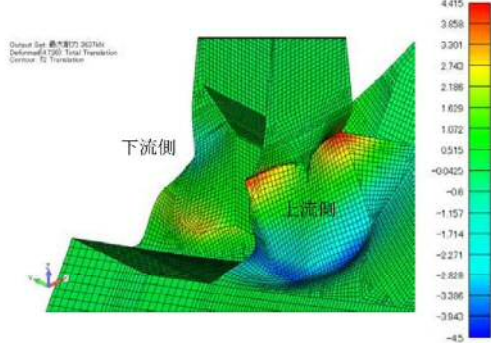
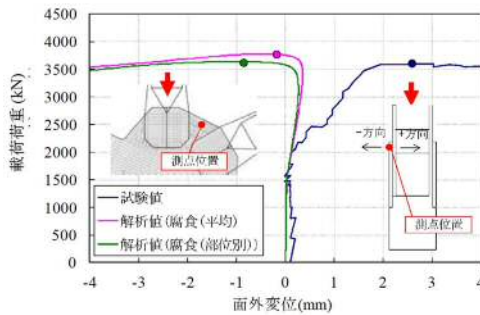
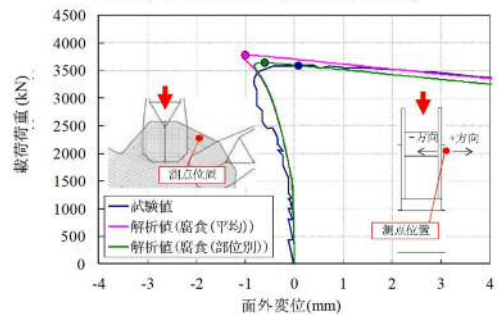


図-16 腐食(部位別)ケースの最大荷重時におけるガセットの変形図(変形倍率:20倍)

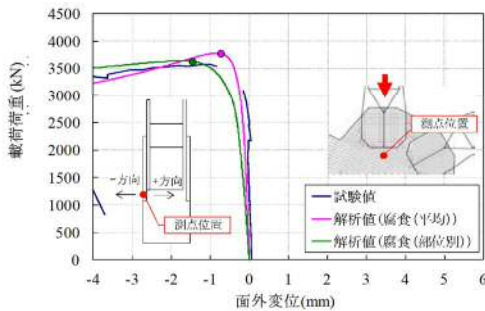
結果概要



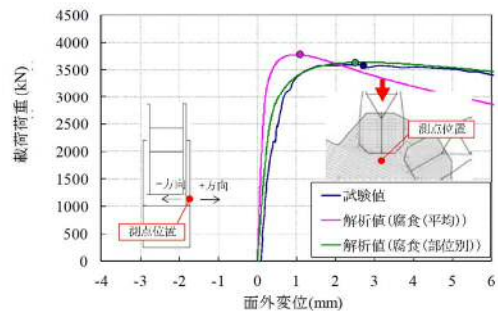
(i)下流側



(ii)上流側



(i)下流側



(ii)上流側

(c) 斜材先端部(図-6中Z4位置)

図-17 ガセットの面外変位の試験値と解析値の比較(図中丸印は最大荷重点を示す)

- ・最大荷重や全体挙動は、継手部を剛結合とし、部位別の平均残存板厚を考慮することで概ね一致している。
- ・腐食状態を60mm×60mm程度の小領域に分割して考慮することで、実験における変形モードを含めて一致することを確認している。

備考

リベットを線形ばね要素でモデル化したが、ばね剛性が部材耐力へ与える影響が小さいため、完全剛結としてモデル化している。格点部の耐力がガセットプレートや斜材の座屈で決定する際には完全剛結合でも影響は小さいと考える。

大分類	高力ボルト	小分類	引張接合
論文題目	Low cycle performance of T-stub components of bolted moment beam-to-column connections		
著者	A.M. Pop, D. Grecea and A. Ciutina		
公開年次	2012年	出典	Connections in Steel Structures VII
解析の目的	Tフランジを有する引張継手において、実験結果の検証、およびボルトの最適な配置について検討している。		

解析対象

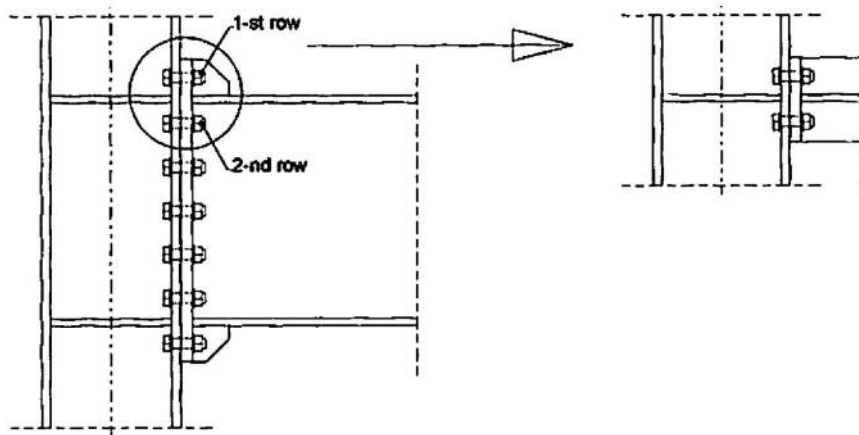
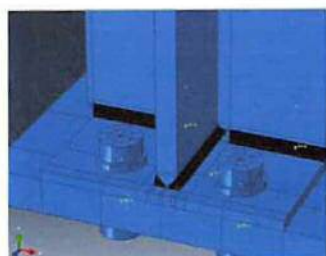


Figure 1. End-plate connection: T-stub element

解析モデルの概要

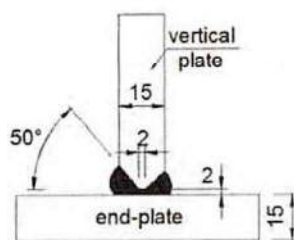
解析コード	ABAQUS		
使用要素	8節点低減積分ソリッド要素		
対象接触面	はりのエンドプレート-柱 (それ以外は不明)		
接触挙動	密着～離間	摩擦力	なし
摩擦係数の設定	設定なし		
応力-ひずみ関係	不明		

解析モデル

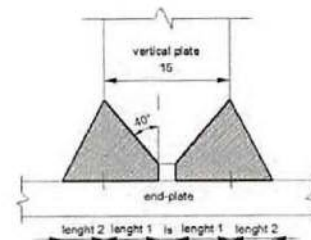


c) FEM disposition of welds

Figure 4. Double bevel welding of element.



a) weld requirement



b) FEM weld dimensions

溶接ビードもモデル化している

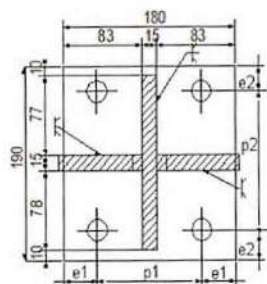


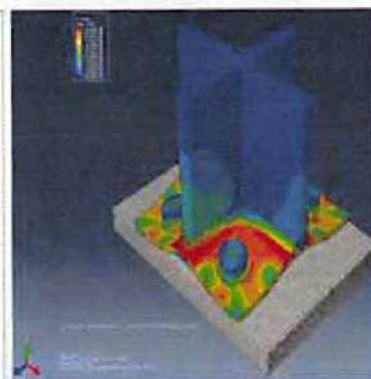
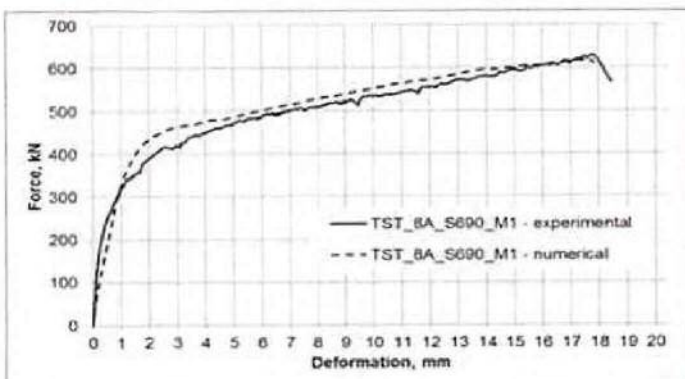
Figure 6. Values for e and p used for parametric study

	Initial case	Case 1	Case 2
e1	35	40	30
p1	120	110	130
e2	45	50	35
p2	90	80	110

ボルトの縁端距離とボルト間隔をパラメータとした解析

解析結果

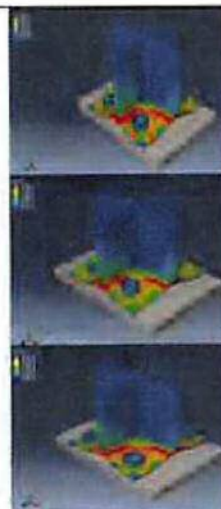
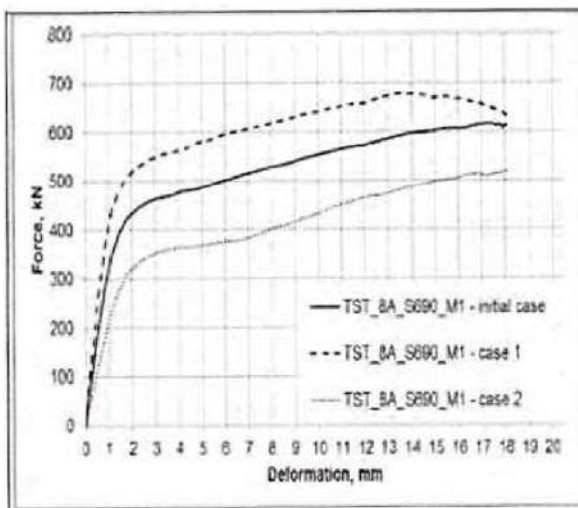
実験結果との比較



パラメトリック解析の結果

- ・溶接部の溶け込み長：6.5mm
 - ・溶接部の脚長：2.5mm
- とした場合の例

結果概要



TST_8A_S690
Initial case -
Failure mode 2

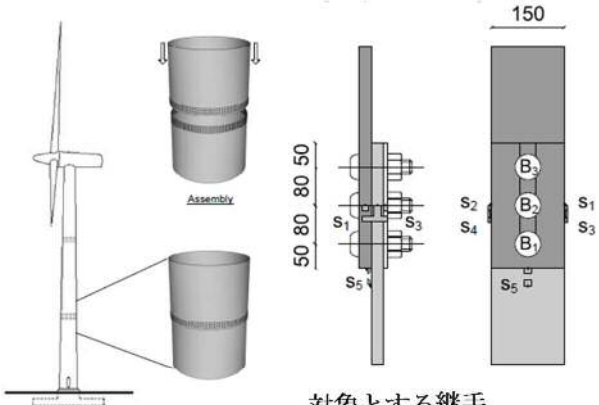
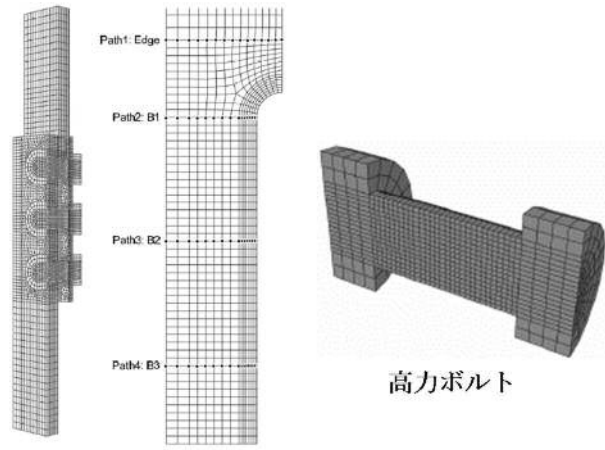
TST_8A_S690
Case 1 -
Failure mode 2

TST_8A_S690
Case 2 -
Failure mode 2

- ・溶接ビードの形状を正しくモデル化することで、実験結果との整合性が改善されるとしている。
- ・エンドプレートの厚さ・鋼種を変更することで、破壊モードを制御できるとしている。
- ・引張継手部の延性と最大耐力は、ボルト配置によって制御できるとしている。

備考

接触面については詳細が記載されていない（一般的な接触タイプ、という記載のみ）。

大分類	高力ボルト	小分類	摩擦接合 (風力タワー)
論文題目	Friction Connections with Slotted Holes for Wind Towers		
著者	Wylliam Husson		
公開年次	2008年	出典	LICENTIATE THESIS 2008
解析の目的	風力発電タワーへの摩擦接合継手の導入を解析的に検討するにあたって、計算の精度とコストの観点から、高力ボルトの妥当なモデル化手法を検討している。		
解析対象	<p>ボルト列数1×3列の継手を対象に、計算の精度とコストの観点から妥当なモデル化を検討している。すなわち、要素の種類に関して8節点低減積分要素と8節点非適合要素を、接触方向挙動に関して剛接触と指数関数型柔接触を、接触の追跡方法に関して有限すべりと微小すべりを、接触拘束に関して直接法とペナルティ法を、要素分割に関して35031要素と69779要素を、弾性すべりに関して1μmから10μmを対象とし比較をしている。</p>  <p>対象とする継手 (タワーの継手の一部)</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	Abaqus 6.7.1		
使用要素	8節点ソリッド要素		
対象接触面	鋼板間, ボルト頭-鋼板, ナット-鋼板, ボルト孔-ボルト軸部		
接触挙動	固着~主すべり発生~すべり~支圧	摩擦力	クーロン則
摩擦係数の設定	0.36, 0.45, 0.61, 0.84		
応力-ひずみ関係	不明		
解析モデル	<p>固定側母板, すべり側母板 (ボルト孔はスリット型), 高力ボルトを個別にモデル化し, それらが接触するすべての表面に接触条件を付与している。表面はマスター-スレイブ法によりモデル化し, 解析対象で述べた種々のモデル化手法を採用している。解析にはAbaqus 6.7.1を使用している。</p>  <p>モデル全体 すべり側母板 高力ボルト</p>		

解析結果

検討したモデル化手法の組み合わせと計算に要した時間を左表に示す。C3D8RとC3D8IはAbaqusにおける8節点低減積分要素と8節点非適合要素を，“hard”は剛接触を，Exp. は指数関数型柔接触を，coarseは要素数35031の要素分割を，fineは要素数69779の要素分割を表す。このように計算コストを比較し，さらに計算結果も比較した結果，右表に示す組み合わせが計算コストの削減を実現しつつ十分な精度の有するモデル化手法であると評価され，以降の章における摩擦接合継手のモデル化に採用するに至った。

Model reference	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Element type	C3D8R					C3D8I			
Contact formulation	“hard”	Exp. ¹	Exp. ²	“hard”					
Tracking method (F: finite sliding, S: small sliding)	F			S	F				
Constraint method (D: direct, P: penalty)	D	P			D				
Mesh density* (C: coarse, F: fine)	C								F
Elastic slip [μm]	1					5	10	1	
Running time [min]	211	134	135	149	118	344	-	321	700
Exp. ¹ : P ₀ =500MPa and c ₀ =1μm / Exp. ² : P ₀ =250MPa and c ₀ =5μm / * See Appendix F									

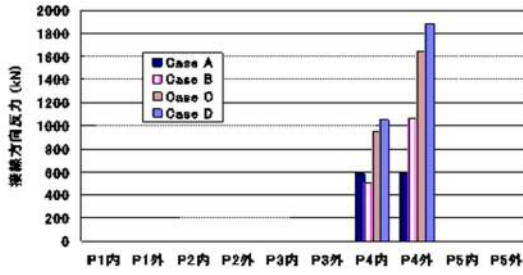
Element type	C3D8I
Contact formulation	“hard”
Tracking method	Small sliding
Constraint method	Linear penalty
Mesh density	Coarse*
Elastic slip	1μm
* See Appendix F	

備考

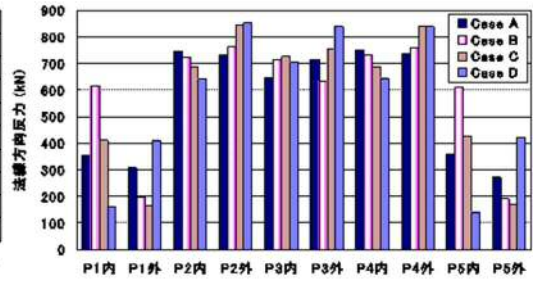
現在の汎用構造解析ソフトウェアには，様々な接触解析手法が実装されている反面，選択を誤ると再現性の低下や計算コストの増大を招く。種々の手法の比較検討結果は有用であると考えられる。

大分類	支承部	小分類	橋梁全体系の解析												
論文題目	4径間連続曲線箱桁橋における金属支承の地震時応答特性に関する研究														
著者	崔準祐，大塚久哲														
公開年次	2007年9月	出典	土木学会第62回年次学術講演会												
解析の目的	曲線橋の金属支承が地震時にどのような応答特性を示すのかを明らかにすることを目的に，4径間曲線桁橋における金属支承の地震時応答特性に関する基礎的研究を行った。														
解析対象	<p>曲率半径が異なる4ケースの橋梁を対象とした。</p> <p>(a) 直線橋 ($R = \infty$) (Case_A) (b) 交角40度 ($R = 289.8\text{m}$) (Case_B) (c) 交角76度 ($R = 150.0\text{m}$) (Case_C) (d) 交角108度 ($R = 106.1\text{m}$) (Case_D)</p>														
解析モデルの概要															
構成モデル	<p>支承は弾性バネ要素，主桁と橋脚ははり要素でモデル化した。 RC橋脚柱部の非線形復元力特性は武田型モデルを用いた。 支承の支持方向は，主桁の接線方向と法線方向に固定および可動方向を設定した。</p>														
解析モデル	<p>主桁、橋脚：はり要素 支承：弾性バネ要素 (6成分) 剛部材 橋脚柱部の非線形復元力特性：トリニア型武田モデル 地盤：固定</p> <p style="text-align: right;">(単位：kN/m)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>接線方向</th> <th>法線方向</th> <th>鉛直方向</th> <th>接線軸回り</th> <th>法線軸回り</th> <th>鉛直軸回り</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$1 \times 10^{-2} *$</td> <td>1×10^{10}</td> <td>1×10^{10}</td> <td>1×10^{-2}</td> <td>1×10^{-2}</td> <td>1×10^{-2}</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(*: P4固定支承は，1×10^{10}である。)</p>			接線方向	法線方向	鉛直方向	接線軸回り	法線軸回り	鉛直軸回り	$1 \times 10^{-2} *$	1×10^{10}	1×10^{10}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}
接線方向	法線方向	鉛直方向	接線軸回り	法線軸回り	鉛直軸回り										
$1 \times 10^{-2} *$	1×10^{10}	1×10^{10}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}										

解析結果

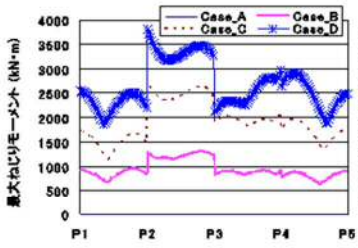


(a) 接線方向反力 (X軸方向加震)

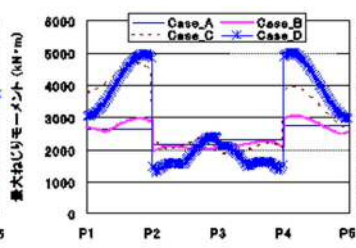


(b) 法線方向反力 (Z軸方向加震)

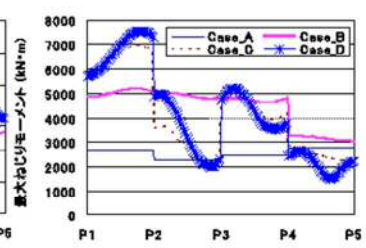
支承反力の比較



(a) X軸方向加震



(b) Z軸方向加震



(c) 3方向同時加震

主桁のねじりモーメントの比較

解析結果

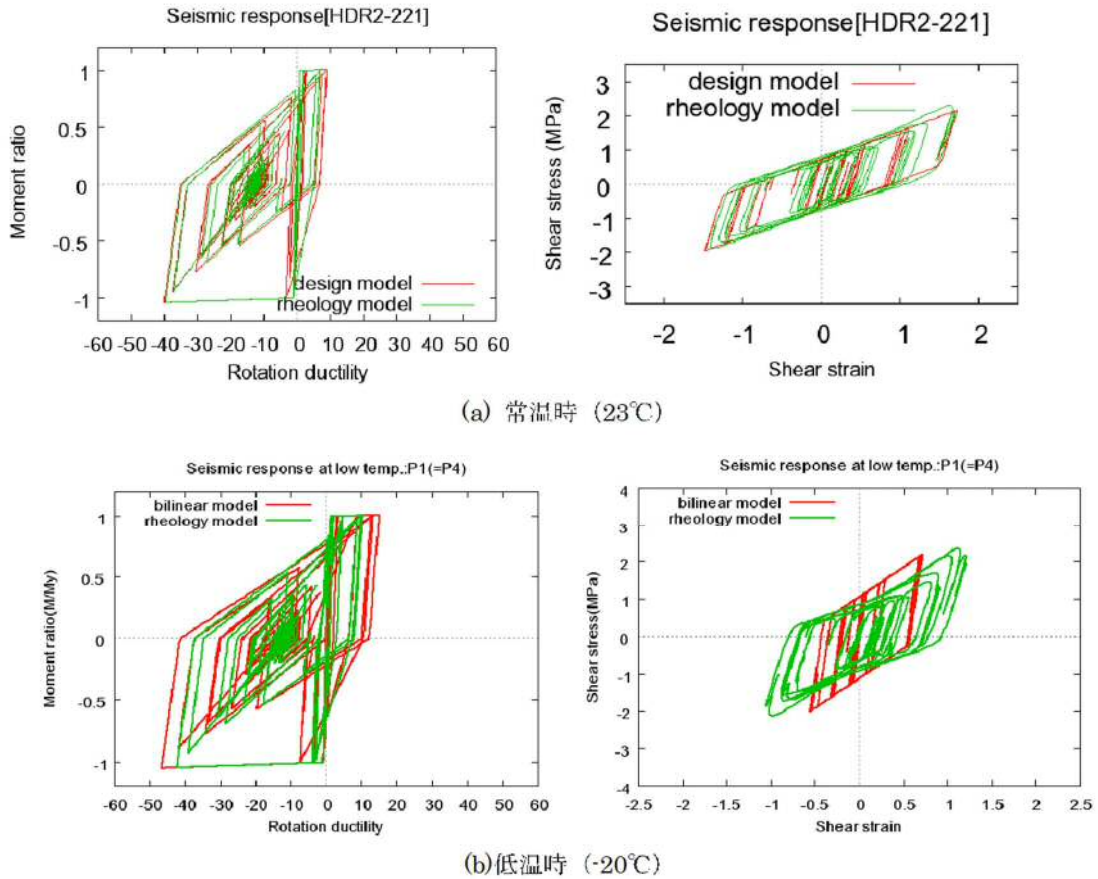
結果概要

ほとんどの支承において曲率半径が小さくなるほど支承反力が大きくなること、曲率半径の変化によって内側と外側の支承の動的応答特性が大きく変わることが確認出来た。
また、3方向同時加振を行ったところ、単独加振時に比べ、上部構造のねじりモーメントが曲率半径の減少に伴い、P1-P2径間は大きく増加、P4-P5径間は減少し、P2支承の鉛直反力が増加する結果が得られた。

大分類	支承部	小分類	橋梁全体系の解析
論文題目	高減衰ゴム支承のモデル化に違いによる橋梁応答解析結果への影響と低温時の挙動		
著者	奥井義昭, A. Rahman Bhuiyan, 三田村浩, 今井隆		
公開年次	2010年9月	出典	土木学会第65回年次学術講演会
解析の目的	粘性効果を考慮したレオロジーモデルとバイリニアモデルを用いたモデル橋梁の動的応答解析を実施し、ゴム支承のモデル化が橋梁の動的応答に及ぼす影響と低温時の挙動について検討した。		
解析対象	<p>検討に用いた高架橋は、上部構造は5径間連続鋼合成床版橋、下部構造は壁式RC橋脚と杭基礎、地盤種別はII種地盤を想定した。</p>		
解析モデルの概要			
構成モデル	<p>粘性効果を考慮したレオロジーモデルを用いて高減衰支承をモデル化した。提案するレオロジーモデルは、以下の要素から構成されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・線形バネA, C ・ハードニングを表す非線形バネB ・スライダース ・非線形速度依存性を表すダッシュポットD 		
解析モデル			

解析結果

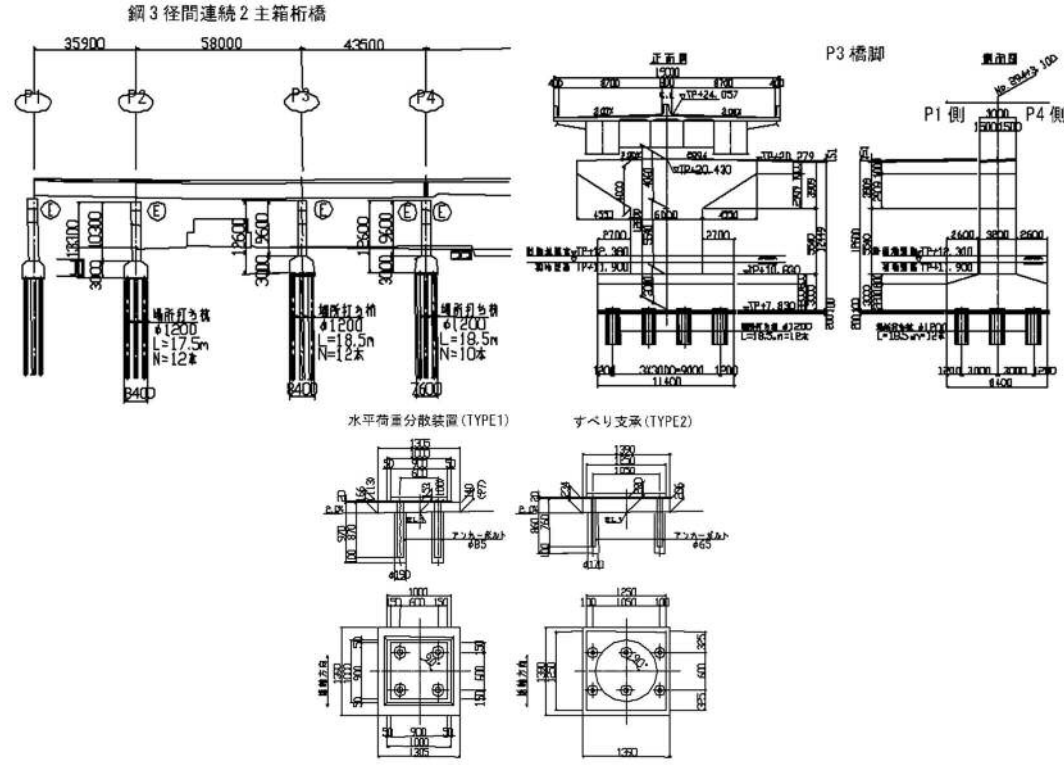
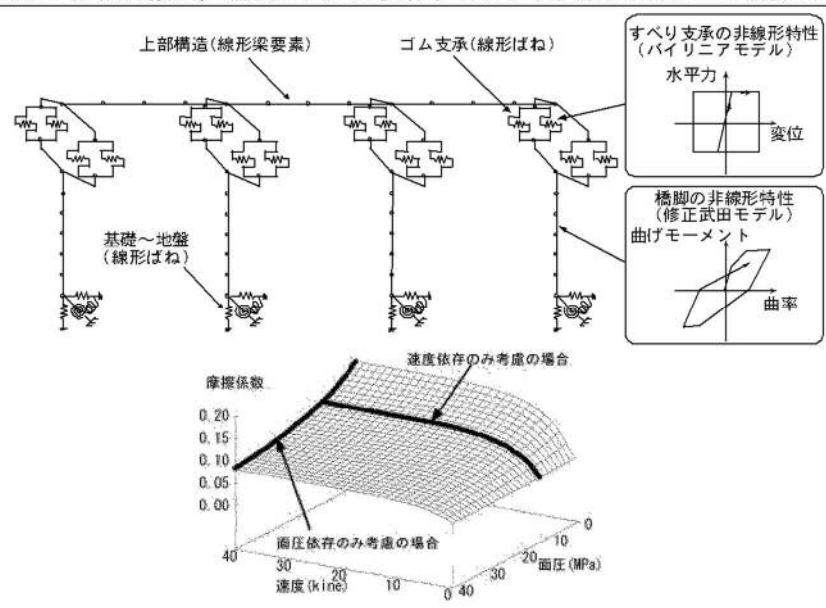
解析結果



橋脚塑性ヒンジの $M/M_y - \theta / \theta_y$ 関係とゴム支承の平均せん断応力-ひずみ関係

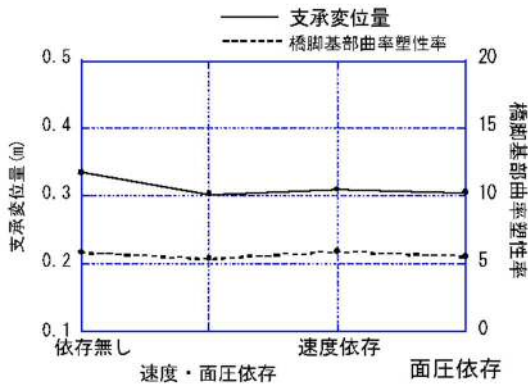
結果概要

道路橋示方書耐震設計編に規定のタイプⅡの標準地震波を入力した場合の結果を示す。バイリニアモデルとレオロジーモデルの結果を比較したところ、常温時には、履歴ループの内部はかなり応答が異なるものの、最大応答値は比較的良い一致を示した。一方、低温時には、両者の挙動は大きく異なり、バイリニアモデルでは低温時の挙動がうまく表現できていない可能性が示された。

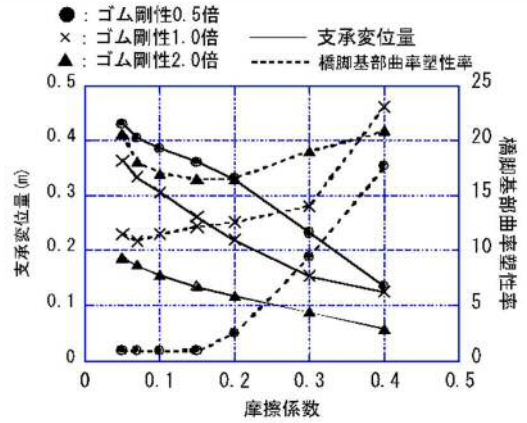
大分類	支承部	小分類	橋梁全体系の解析
論文題目	すべり免震支承システムのパラメータが橋梁応答に及ぼす影響		
著者	藤田亮一, 森敦, 金治英貞, 伊津野和行		
公開年次	2003年6月	出典	土木学会地震工学論文集
解析の目的	すべり免震支承システムを有する桁形式橋梁の応答特性に関し、摩擦係数と面圧～速度の連成依存性を考慮したパラメータスタディを行った。さらに、一般的なバイリニアモデルによるすべり免震支承システムのモデル化の可能性を検討した。		
解析対象	<p>すべり免震支承システムを有する鋼3径間連続2主箱桁橋を対象とした。下部構造はRC単柱橋脚、基礎構造は場所打ち杭基礎である。すべり支承にはPTFEとステンレス板、水平荷重分散装置には積層ゴムを用いた。</p> 		
解析モデルの概要			
構成モデル	<p>支承部は、ゴム支承を表す線形バネとすべり支承を表すバイリニア型の非線形バネでモデル化した。すべり支承の摩擦係数は、速度と面圧に依存する特性を実験式を用いて考慮した。</p>		
解析モデル			

解析結果

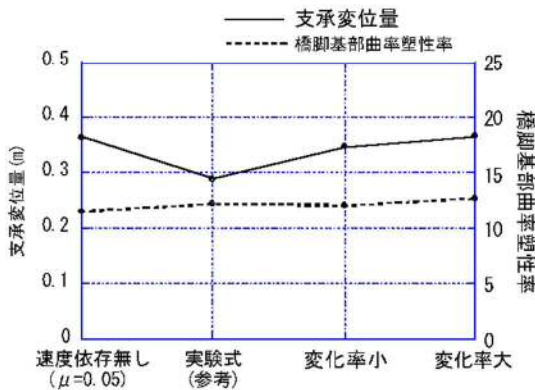
解析結果



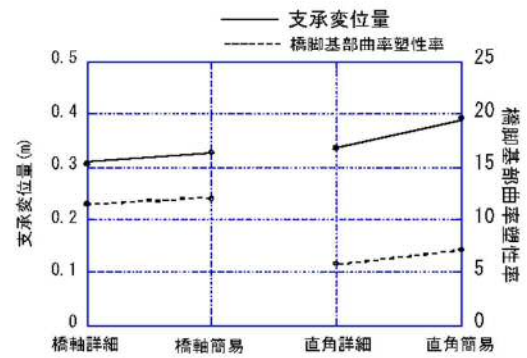
速度・面圧依存性に着目



水平荷重分散装置の剛性とすべり支承の摩擦係数に着目



速度依存特性のモデル化に着目



バイリニアモデルの適用性に着目

結果概要

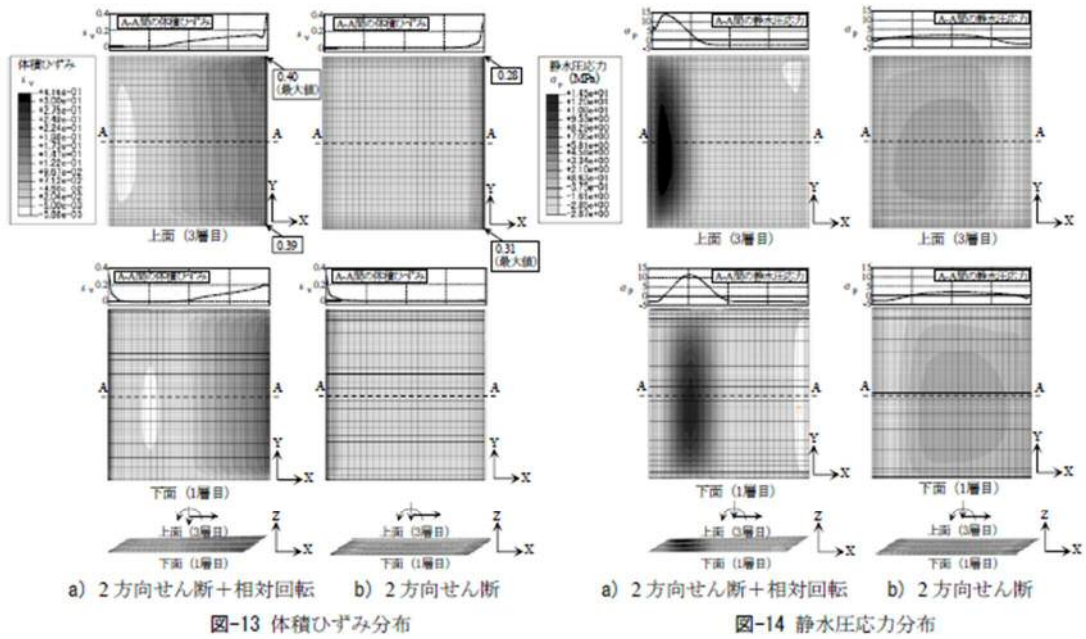
すべり支承の摩擦係数が有する速度・面圧依存性を同時に考慮して動的解析を実施した結果、各依存性の有無が橋梁全体系の最大応答値に及ぼす影響が小さいことが確認出来た。特に速度依存性については、高速度領域では摩擦係数の変動が小さいため、レベル2地震動のような大きな入力に対して最大応答値を求める場合には速度依存性を考慮する必要は低いと判断された。

また、水平荷重分散装置の剛性とすべり支承の摩擦係数を小さくすると支承変位量は増大し、橋脚塑性率は低減される傾向が確認出来た。

大分類	支承部	小分類	支承単体の解析																								
論文題目	鋼製橋脚で支持された連続高架橋における積層ゴム支承の水平2方向地震動下の挙動特性																										
著者	奥村徹, 後藤芳顕, 海老澤健正, 小畑誠, Jianzhong Li, Yan Xu																										
公開年次	2015年	出典	第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集																								
解析の目的	鋼製橋脚で支持された連続高架橋における積層ゴム支承の地震時のできるだけ正確な挙動特性を明らかにすることを目的とした。																										
解析対象	<p>鋼製橋脚で支持された連続高架橋における積層ゴム支承を対象とした。</p>																										
解析モデルの概要																											
解析コード	ABAQUS																										
構成モデル	ゴム体：超弾性体, 内部鋼板：弾塑性体 (等硬化則)																										
解析の種類	<ul style="list-style-type: none"> ・ソリッド要素でモデル化し, 模型実験および橋梁全体系の解析に基づく時刻歴応答解析により得たゴム支承の作用力と相対変位を上下鋼板に強制的に与えた静的解析を行った。 ・一般にゴム材料では3軸引張状態になった際に内部のボイド発生により剛性が低下することから, 支承内部に分布する体積ひずみと静水圧応力に着目しその分布について考察した。 																										
解析モデル	<p> $U_x = 1.45 \times 10^{-2}$ (m) $U_y = -2.37 \times 10^{-3}$ (m) $\theta_y = -2.08 \times 10^{-2}$ (rad) $F_z = -1.34 \times 10^2$ (MN) </p> <p>上面・下面を剛体として拘束</p> <p> n_1, n_2, n_3 の長さの比 $= 0.02 : 0.18 : 0.8$ </p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4">分割モデル</th> </tr> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>n0</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>n1</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>n2</td> <td>5</td> <td>8</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>n3</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table> <p>※) 要素サイズを滑らかに移行するためにn2の区間はバイアスをかけて分割</p> <p> 上鋼板 (4分割) ゴム層: 3層目 (5分割) ゴム層: 2層目 (5分割) ゴム層: 1層目 (5分割) 下鋼板 (4分割) 内部鋼板 (2分割) </p>			分割モデル					A	B	C	n0	2	2	4	n1	1	2	4	n2	5	8	10	n3	10	10	20
分割モデル																											
	A	B	C																								
n0	2	2	4																								
n1	1	2	4																								
n2	5	8	10																								
n3	10	10	20																								


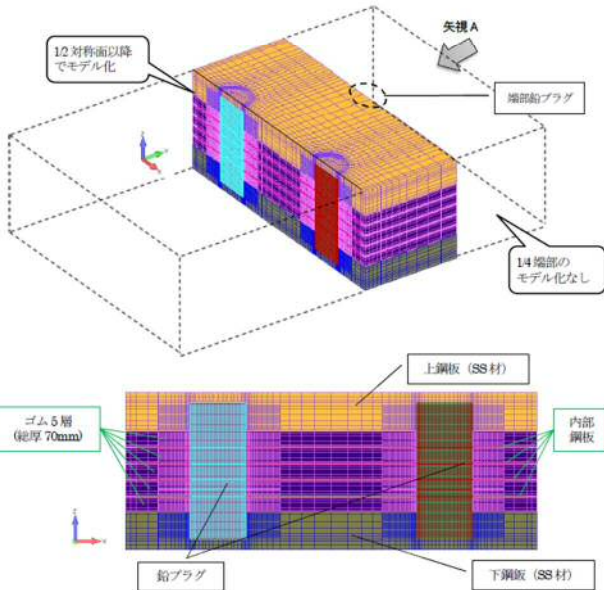
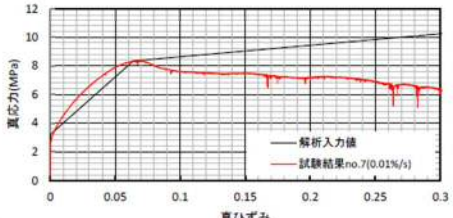
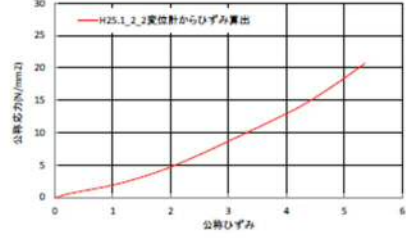
解析結果

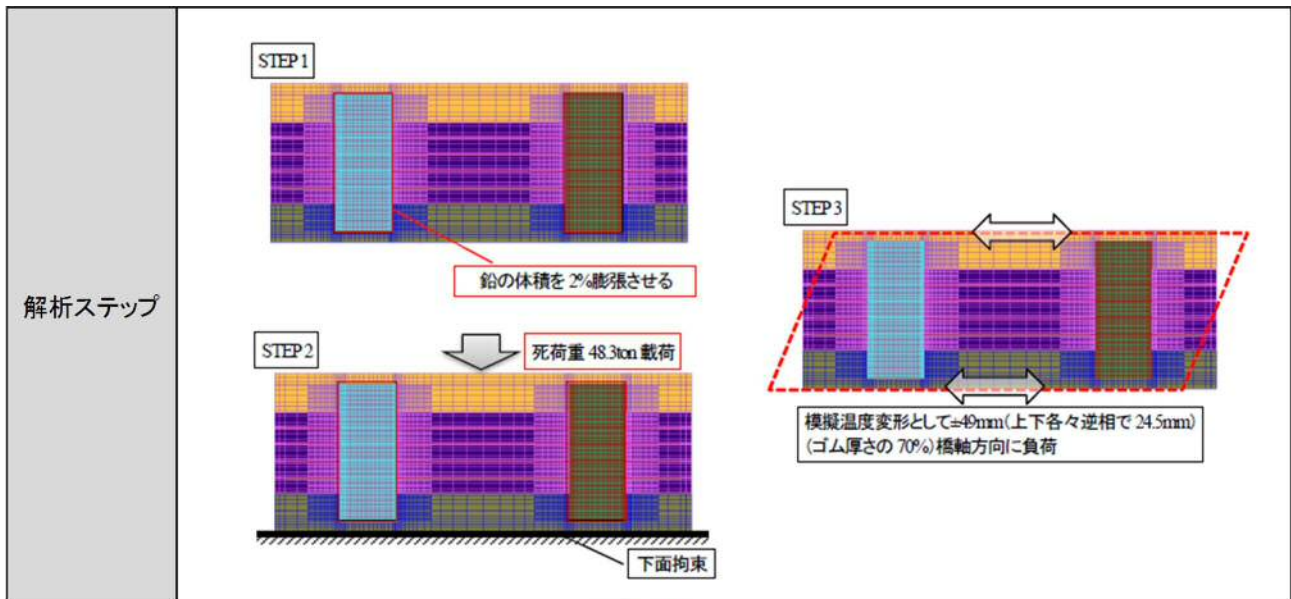
解析結果



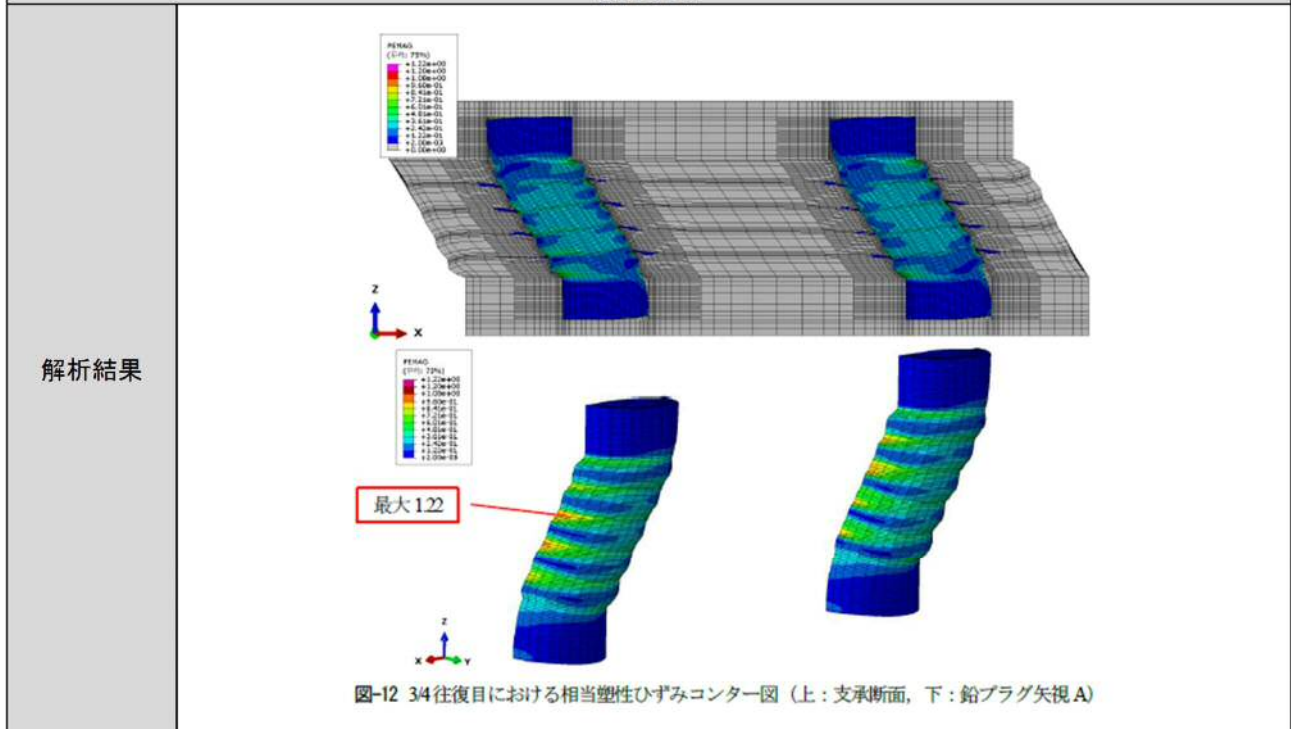
結果概要

超弾性構成側の定数はマクロ的な支承の载荷実験に基づきキャリブレーションを行ったものであり、必ずしもゴム材料の挙動を直接的に反映したものではないが、近似的には概ね挙動を再現できている。支承の相対回転角の影響により内部の体積ひずみや静水圧応力はこれを無視した場合と比べてかなり増大し、支承の性能に影響を与える可能性があると考えられる。

大分類	支承部	小分類	支承単体の解析
論文題目	ゴム支承の損傷メカニズムに関する基礎的検証		
著者	林訓裕, 足立幸郎, 坂本直太, 五十嵐晃, 党紀, 大谷修, 下池利孝		
公開年次	2015年	出典	土木学会論文集A1, Vol. 71, No. 4
解析の目的	長期間供用され劣化損傷のあるゴム支承は, 減衰性能が低下し鉛プラグが破断することがある. そこで, 鉛プラグ入り積層ゴム支承の劣化損傷に着目し, 鉛プラグの観察を行うとともに, FEMによる挙動解析により発生メカニズムを検証した. また, 実現象との妥当性も検証した.		
解析対象	供用下の鉛プラグ入り積層 ゴム支承を解析対象とした.  <p style="text-align: center;">解析対象の損傷事例</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	ABAQUS (Ver. 6. 12)		
解析の種類	弾塑性静的解析		
モデル化範囲	中央部1/4 ※端部鉛プラグは中央の鉛の変形挙動に影響を与えないと考えられるため, モデル化していない.		
構成モデル	鉛: トリリニアモデル ※引張試験結果を用いて設定し, 最大応力以降の3次勾配は2次勾配の1/10とし, 等方硬化則を用いた. ゴム: 超弾性体 ※引張試験結果を基にOgdenモデルを用いて設定した.		
接触条件	ゴムとすべての鋼板間: 固着 鉛プラグとゴムおよび鋼板間: 接触 鉛プラグ下面: 接触 ※接触部の摩擦係数は0. 8		
解析モデル	 <p>12 対称面以降でモデル化</p> <p>矢視 A</p> <p>端部鉛プラグ</p> <p>14 端部のモデル化なし</p> <p>ゴム 5層 (総厚 70mm)</p> <p>鉛プラグ</p> <p>上鋼板 (SS材)</p> <p>内部鋼板</p> <p>下鋼板 (SS材)</p>  <p>真応力(MPa)</p> <p>真ひずみ</p> <p>— 解析入力値</p> <p>— 試験結果no.7(0.01%/s)</p> <p>図-6 鉛の解析入力値 (構成モデル) の設定</p>  <p>公称応力(N/mm²)</p> <p>公称ひずみ</p> <p>— H25.1.2.2変位計からひずみ算出</p> <p>図-8 ゴムの公称応力-公称ひずみ線図</p>		



解析結果



結果概要

- ・上下鋼板および内部鋼板のエッジと接触している部分に大きな塑性ひずみが発生していることが確認された。これは、鋼板とゴムとの剛度の差が非常に大きいため、境界部の応力集中により生じるものと考えられる。
- ・鉛が鋼板で拘束されることにより、その上下で引張および圧縮場が生じた。本解析と引張試験では条件が異なるため単純な比較はできないものの、破断に至るひずみレベルに達している可能性はある。
- ・鉛は鋼板エッジとの接触位置において早いサイクルで亀裂が発生する可能性があると考えられる。温度変形の繰り返しごとに同一位置に引張場が生じることとなれば、亀裂が進展し破断へ至ることが想定される。
- ・鉛プラグに高い塑性ひずみが生じた。特に鋼板のエッジと接触している要素で大きく、その箇所は実現象で破断した箇所とよく一致した。

備考

LRBの劣化損傷評価手法としての亀裂発生時期の推定や、進展から破断へ至るメカニズムの解明が課題である。

大分類	支承部	小分類	支承単体の解析																								
論文題目	FEM解析による水平力の方向変化に伴うローラー支承の水平合成変化率の算定と実曲線橋の動的解析への適用																										
著者	崔準祐, 徳永裕二																										
公開年次	2014年	出典	土木学会論文集A1, Vol.70, No.4																								
解析の目的	<p>曲線橋の可動支承が水平斜め方向の地震力を受けたときの挙動を明らかにするため、ローラーの軸と水平力の载荷方向のなす角度を0°、30°、60°とした模型ローラー支承の破壊実験を行い、角度ごとにローラー支承の水平剛性を求めた。ここでは、これらの実験に対して3次元FEM解析により再現性を確認することを目的とした。</p>																										
解析対象	<p style="text-align: center;">破壊実験供試体概略図</p>																										
解析モデルの概要																											
解析コード	LS-DYNA																										
構成モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上下支圧板, せん断キー, ローラーをすべて6面体ソリッド要素とした。 ・ 上下支圧板は水平载荷により変形させない部材としているため剛体でモデル化した。 ・ せん断キーは上下支圧板の一部としてモデル化した。 ・ ローラーは太径部, 細径部ともに弾塑性体でモデル化した。 																										
解析モデル	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>ローラー (SUJ2)</th> <th>上下支圧板 (SKS93)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>材料モデル</td> <td>弾塑性体</td> <td>剛体</td> </tr> <tr> <td>質量密度 (g/cm³)</td> <td>7.83</td> <td>456</td> </tr> <tr> <td>ヤング率 (N/mm²)</td> <td>2.0×10^5</td> <td>2.0×10^5</td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td>0.3</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>σ_y (N/mm²)</td> <td>703</td> <td></td> </tr> <tr> <td>降伏条件</td> <td>Von Mises</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ひずみ硬化</td> <td>等方硬化則</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				ローラー (SUJ2)	上下支圧板 (SKS93)	材料モデル	弾塑性体	剛体	質量密度 (g/cm ³)	7.83	456	ヤング率 (N/mm ²)	2.0×10^5	2.0×10^5	ポアソン比	0.3	0.3	σ_y (N/mm ²)	703		降伏条件	Von Mises		ひずみ硬化	等方硬化則	
	ローラー (SUJ2)	上下支圧板 (SKS93)																									
材料モデル	弾塑性体	剛体																									
質量密度 (g/cm ³)	7.83	456																									
ヤング率 (N/mm ²)	2.0×10^5	2.0×10^5																									
ポアソン比	0.3	0.3																									
σ_y (N/mm ²)	703																										
降伏条件	Von Mises																										
ひずみ硬化	等方硬化則																										
载荷条件	<p>始めに上支圧板に対して鉛直力を与え、その後下支圧板に強制変位を与えた。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(a) 鉛直力</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(b) 水平方向速度</p> </div> </div>																										

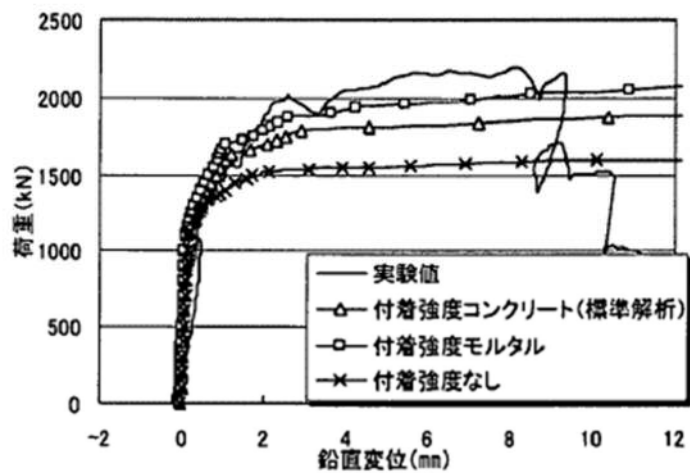
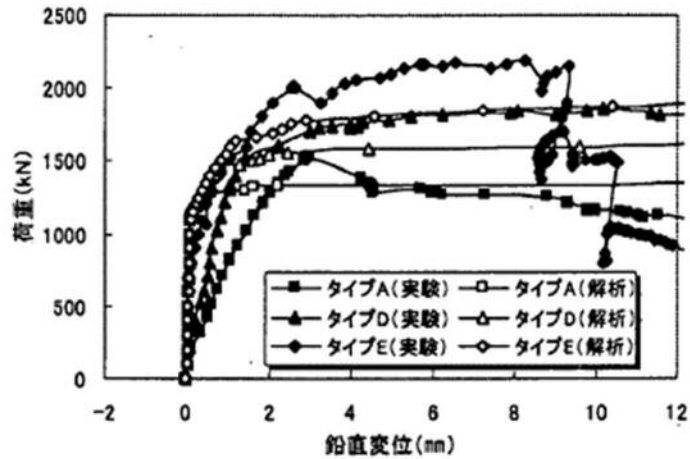
解析結果

<p>実験結果との比較</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(a) 0°</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(b) 30°</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(c) 60°</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>(a) 0°</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(b) 30°</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(c) 60°</p> </div> </div>
<p>結果概要</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ローラー軸と水平力のなす角度が0° の場合、実験を概ね再現できたと考えられる。 ・ローラー軸と水平力のなす角度が30° と60° の場合、実験の再現精度は低い結果となった。これは、解析では上支圧板を水平方向に対して完全固定としているが、実験では完全に固定されておらず、上支圧板が水平移動していたためと考えられる。 ・ローラーの変形形状についても実験結果との比較を行った結果、角度が60° の場合、ローラー細径部の変形箇所が実験と異なる位置で現れたが、角度が大きくなるにしたがい、ローラーは斜め方向に引っ張られていく現象は解析においても確認できた。
<p>備考</p>	
<p>3次元FEM解析により算定したローラー支承の剛性変化率を用いて実曲線橋の動的解析を行い、現行の設計で一般に用いられている解析モデルと地震時応答の比較を行っている。</p>	

大分類	支承部	小分類	支承単体の解析
論文題目	ゴム支承アンカー部の地震時挙動の解析的検討		
著者	幸左賢二, 安藤高士, 閑上直浩, 萩原隆朗		
公開年次	2001年	出典	第5回耐震補強・補修技術
解析の目的	ゴム支承単体の挙動は数多く把握されているものの、橋座上に設置されたゴム支承の挙動について評価した例は多くない。そこで、アンカーの補強効果を把握する目的で行った、橋座部も含めた支承部全体系の挙動を評価した実験を再現するためにFEM解析を実施した。		
解析対象			
解析モデルの概要			
使用要素	コンクリートおよび鋼板：平面応力要素 鉄筋およびアンカーボルト：埋め込み鉄筋要素 台座・モルタル接合部：バネ要素		
拘束条件	台座下端：完全固定 桁右端：ローラー支持		
材料特性	<ul style="list-style-type: none"> ・実験によると、主な損傷がモルタル・台座接合部で発生しているのので、接合部およびアンカーボルト部を弾塑性部材とし、他の部材は弾性部材とした。 ・アンカーボルトの引張試験結果から、バネ要素のバネ定数は$2.36 \times 10^7 \text{ N/mm}$となり、引張強度に達した後も同一強度を保持すると仮定した。 		
解析モデル			

解析結果

実験結果
との比較



結果概要

- ・解析ではアンカーボルトの引張に伴う付着剥離現象をモデル化していないために、アンカーボルトのひずみが集中し、実験結果と大きく異なる傾向となっているが、定性的には荷重とアンカーひずみの関係を再現できていると考えられる。
- ・解析値と実験値は一部を除きほぼ同様の初期勾配を示した。
- ・実験では浮き上がり量の増加とともに荷重が増加または減少したが、解析上では曲げ引張側の引張応力を一定値としたことで、結果に違いが生じた。
- ・最大荷重点や浮き上がり量の変曲点は概ね一致した。

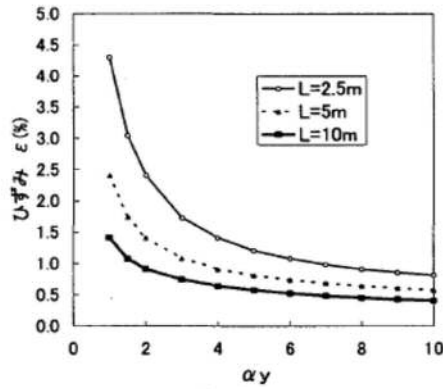
備考

- ・試験体は、アンカーなし、既設アンカーのみ、既設および補強アンカーの3種類としている。
- ・二次元でのモデル化を行っている。

大分類	支承部	小分類	落橋防止構造												
論文題目	非線形挙動を考慮した落橋防止ケーブルの要求性能に関する研究														
著者	鎌田耕平, 伊津野和行														
公開年次	2001年	出典	第26回地震工学研究発表会講演論文集												
解析の目的	桁間に設置する落橋防止ケーブルを対象にし、支承破壊等に起因する桁移動が発生した場合、落橋防止ケーブルに作用する力を解析的に検討する。														
解析対象	<p>桁間に設置する落橋防止ケーブルを運動方程式で定式化して解析を行っている。 ケーブルの諸元：〔PC鋼材〕弾性係数$E=200\text{GPa}$、降伏耐力$\sigma_y=1.6\text{GPa}$、長さ$L=5\text{m}$</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>図-1 想定図</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>図-2 耐震連結装置の詳細</p> </div> </div>														
解析モデルの概要															
解析コード	運動方程式からの数値解析														
解析条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブル剛性はBi-Linear型の復元力（二次剛性は初期剛性の1/100） ・粘性減衰（落橋防止装置に付加する減衰装置）、摩擦（桁が橋脚上に落下した時の桁と橋座との摩擦）の考慮の有無 														
解析理論	<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> <p>$0x < x_y$ の*</p> $m\ddot{x} + c\dot{x} + k_1x + \mu R_d = 0$ $\Rightarrow x = e^{-h\omega t} \left(\frac{\mu R_d}{k_1} \cos\omega't + \frac{1}{\omega'} \left(v_0 + \frac{h\omega\mu R_d}{k_1} \right) \sin\omega't \right) - \frac{\mu R_d}{k_1}$ $F = k_1x$ <p>$0x \geq x_y$ の*</p> $m\ddot{x} + c\dot{x} + k_2x + (k_2 - k_1)x_y + \mu R_d = 0$ $\Rightarrow x = e^{-h\omega t} (A \cos\omega't + B \sin\omega't) - C$ <p>ここに、$A = x_y + C$, $B = \frac{v_1 + h\omega A}{\omega'}$, $C = \frac{\mu R_d + (k_2 - k_1)x_y}{k_2}$</p> $F = k_1x + k_2(x - x_y)$ </div> <div style="flex: 1;"> <p>図-3 ケーブルの変位復元力特性</p> </div> </div> <div style="margin-top: 10px;"> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">m: 桁質量</td> <td style="width: 33%;">x: 橋脚上での装置の変形量</td> <td style="width: 33%;">α_y: ケーブルの降伏耐力と支承部の死荷重反力の比</td> </tr> <tr> <td>c: 粘性減衰係数</td> <td>x_y: 降伏時のケーブルの変形量</td> <td>E: ケーブルの弾性係数</td> </tr> <tr> <td>μ: 桁と橋座との摩擦係数</td> <td>k_1: ケーブルの初期剛性(降伏前) $k_1 = EA/L$</td> <td>A: ケーブルの断面積</td> </tr> <tr> <td>R_d: 支承部の死荷重反力</td> <td>k_2: ケーブルの二次剛性(降伏後) $k_2 = k_1/100$</td> <td>L: ケーブル長</td> </tr> </table> </div>			m : 桁質量	x : 橋脚上での装置の変形量	α_y : ケーブルの降伏耐力と支承部の死荷重反力の比	c : 粘性減衰係数	x_y : 降伏時のケーブルの変形量	E : ケーブルの弾性係数	μ : 桁と橋座との摩擦係数	k_1 : ケーブルの初期剛性(降伏前) $k_1 = EA/L$	A : ケーブルの断面積	R_d : 支承部の死荷重反力	k_2 : ケーブルの二次剛性(降伏後) $k_2 = k_1/100$	L : ケーブル長
m : 桁質量	x : 橋脚上での装置の変形量	α_y : ケーブルの降伏耐力と支承部の死荷重反力の比													
c : 粘性減衰係数	x_y : 降伏時のケーブルの変形量	E : ケーブルの弾性係数													
μ : 桁と橋座との摩擦係数	k_1 : ケーブルの初期剛性(降伏前) $k_1 = EA/L$	A : ケーブルの断面積													
R_d : 支承部の死荷重反力	k_2 : ケーブルの二次剛性(降伏後) $k_2 = k_1/100$	L : ケーブル長													

解析結果

解析結果



(a)変形量

ケーブル長の影響

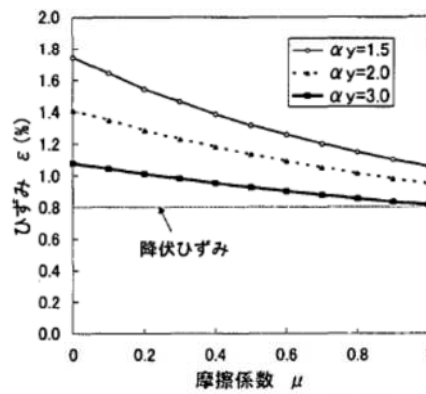


図-9 塑性化を考慮したときの摩擦係数の影響

非線形領域, 摩擦の影響

結果の概要

運動方程式から, 設計に必要な条件を見出している. ただし, 結果の一例については, ある程度の条件を絞った検討となっている.

備考

2次部材である落橋防止ケーブルの設計を力学的な運動からのアプローチ, 桁移動の捉え方に検討が必要.

大分類	支承部	小分類	落橋防止構造
論文題目	緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震時応答性状		
著者	梶田幸秀, 杉浦邦征, 渡邊英一		
公開年次	2002年	出典	土木学会論文集
解析の目的	高架橋に設置される桁間連結ケーブルの効果や桁間の衝突状況などを解析的に検討している。		
解析対象	<p>3径間連続高架橋</p> <p>桁間連結ケーブル</p> <p>緩衝型桁間連結ケーブル</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	確認できず		
解析条件	3径間連続高架橋をバネ-質点-ダッシュポッドでモデル化し、桁間に連結ケーブルを設置する。入力地震波は、1996年兵庫県南部地震のJR鷹取駅で観測されたN-S成分の波を入力する。連結ケーブルの復元力として、ケーブルの遊び量、及び桁間衝突を考慮するモデルとした。		
解析理論	<p>図-10 解析モデル</p> <p>図-11 バネ-質点-ダッシュポッド系モデル</p> <p>対象橋梁の解析モデル</p> <p>固定支承</p> <p>可動支承</p> <p>桁間連結ケーブル それぞれの復元力モデル</p>		

解析結果

解析ケース

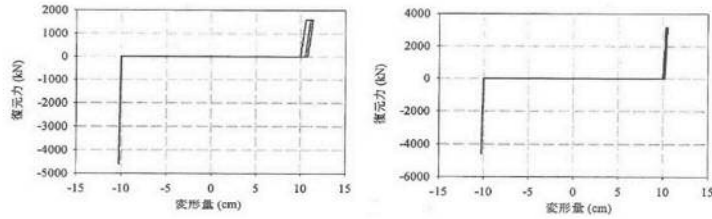
表-2 解析ケース (Case 1 から Case 4)

	桁間連結ケーブル	降伏耐力 (kN)	ケーブルの剛性 (kN/mm) 式(4)より算出
Case 1	なし	-	-
Case 2	あり	810	270
Case 3	あり	1620	540
Case 4	あり	3240	1080

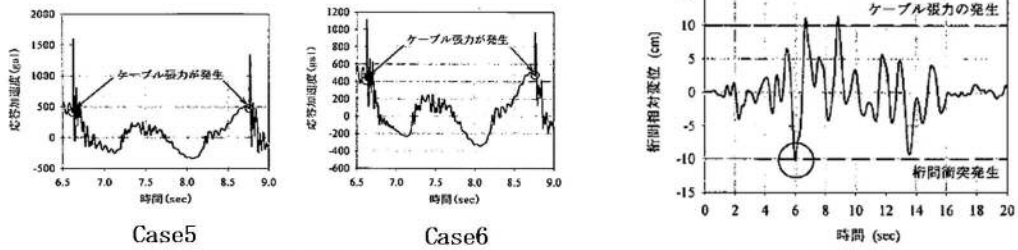
表-3 解析ケース (Case 5 から Case 7)

	桁間連結ケーブル	降伏耐力 (kN)	ケーブルの剛性 (kN/mm)
Case 5 (Case 3と同じ)	あり	1620	540
Case 6	あり (緩衝型)	1620	270
Case 7	あり (緩衝型)	1620	54

解析結果



Case3 Case4
連結ケーブルに作用する力



Case5 Case6
桁Bの応答加速度
Unit-BとUnit-Cの間の相対変位の時刻歴 (Case3)

結果の概要

橋梁全体系としては、桁間の衝突と変位応答を調べることで、損傷状況を示している。その中で、桁間連結ケーブル（従来型と緩衝型）の設置による橋脚などの応答の違いを調べている。

備考

都市部に多くある連続高架橋の地震時応答を調べるモデル化として参考になる。

大分類	支承部	小分類	落橋防止構造
論文題目	エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置の設計に関する解析的検討		
著者	竹田周平, 北浦勝, 宮島昌克		
公開年次	2006年	出典	構造工学論文集 Vol. 52A
解析の目的	従来型の落橋防止構造端部にエネルギー吸収を目的としたコントロールパイプを導入したTE型の効果の検証と, 設計方法についての検討を解析で行っている。		

解析対象

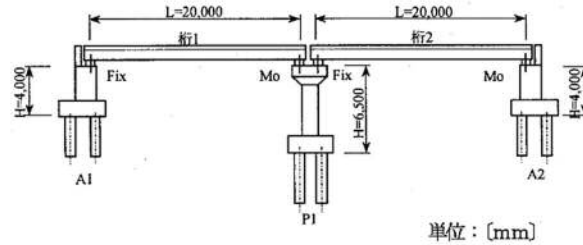


図-5 2径間単純桁橋の構造概要図

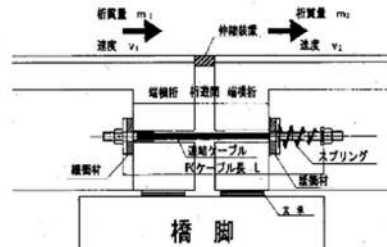
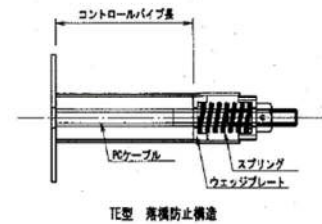
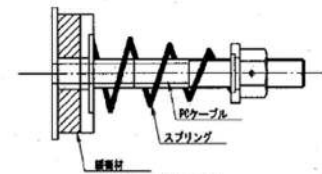


図-1 PCケーブル連結型の落橋防止構造
(速度の符号は矢印方向を+とする)

上部構造：プレテンション方式T桁 橋脚：小判型の壁式橋脚
橋台：逆T式橋台 基礎：杭基礎
支承：簡易ゴム支承による固定可動構造でアンカーバーを設置



TE型 落橋防止構造



従来型 落橋防止構造

図-2 TE型と従来型の構造

解析モデルの概要

解析コード DYNA2E

解析条件

桁, 橋脚, 基礎, 固定支承と可動支承, 落橋防止装置をモデル化している。地盤種別はⅢ種地盤, 地域別補正係数は1.0としている。入力地震波は橋軸方向のみに1995年兵庫県南部地震の東神戸大橋周辺地盤上で観測された波形を2倍にして入力している。パラメータとしては, 連結装置の有無, PCケーブルの降伏荷重の変化, 及び支承の線形・非線形モデルの違いである。

解析理論

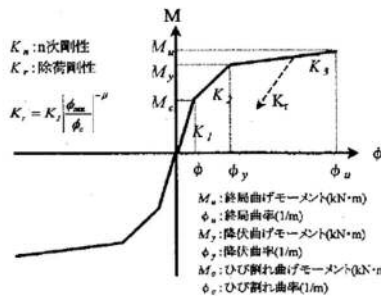


図-6 橋脚の復元力モデル

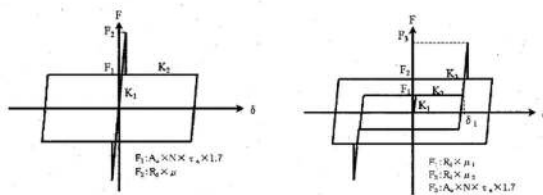


図-7 固定支承の復元力モデル

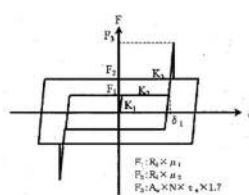


図-8 可動支承の復元力モデル

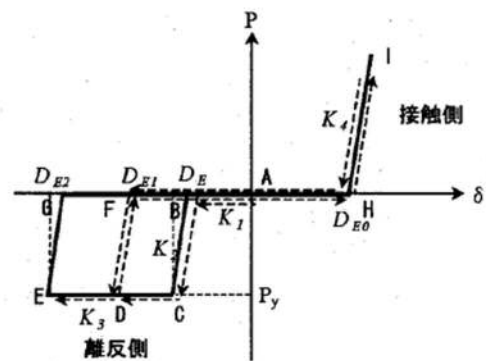


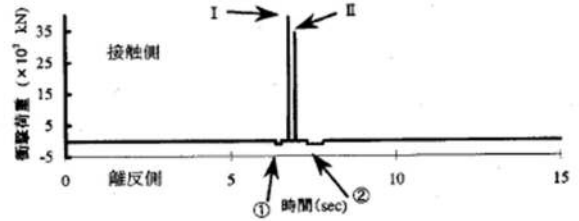
図-9 従来型の復元力モデル

従来型： P_y をPCケーブルの降伏荷重
TE型：コントロールパイプの降伏荷重

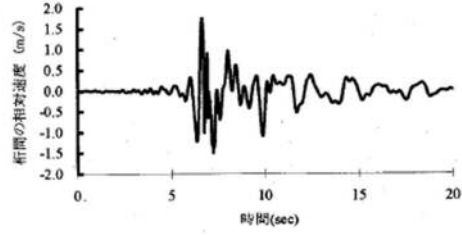
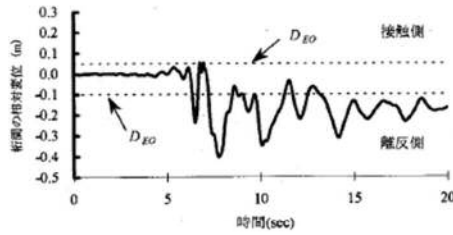
解析結果

表-4 解析ケース

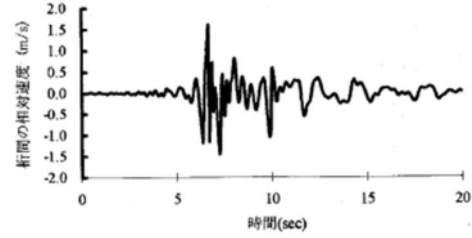
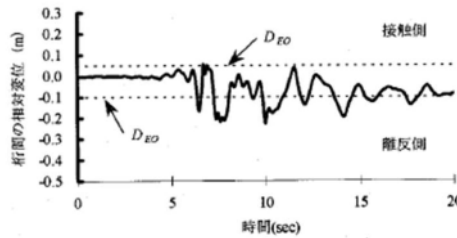
ケース名	PCケーブル 連結装置	PCケーブルの 降伏荷重 P_y	支承モデル ※2
Case1	なし	—	線形
Case2	なし	—	非線形
Case3	あり	1,197 kN ※1	線形
Case4	あり	1,197 kN ※1	非線形
Case5	あり	5,472kN	線形
Case6	あり	5,473kN	非線形
Case7	あり	649.8 kN ※1	非線形



衝撃力の時刻歴応答 (Case3)



Case3の時刻歴応答図 (TE型)



Case5の時刻歴応答図 (従来型)

支承を線形モデルにした場合の解析結果

解析結果

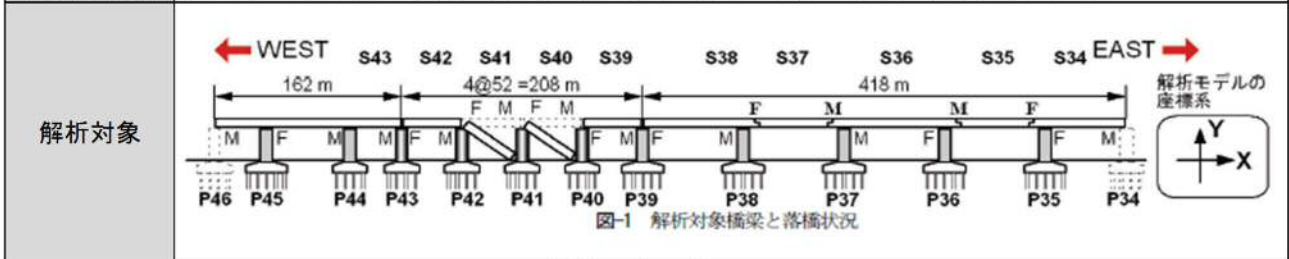
結果の概要

緩衝材を作動させる際にその変形エネルギーを吸収する装置 (コントロールパイプ) を組み込んだTE型の落橋防止装置の効果について解析で検討した結果, 相対変位は大きくなるものの, 衝撃力が緩和出来, さらにその変位量も規定以内に収まっていることが示されている。

備考

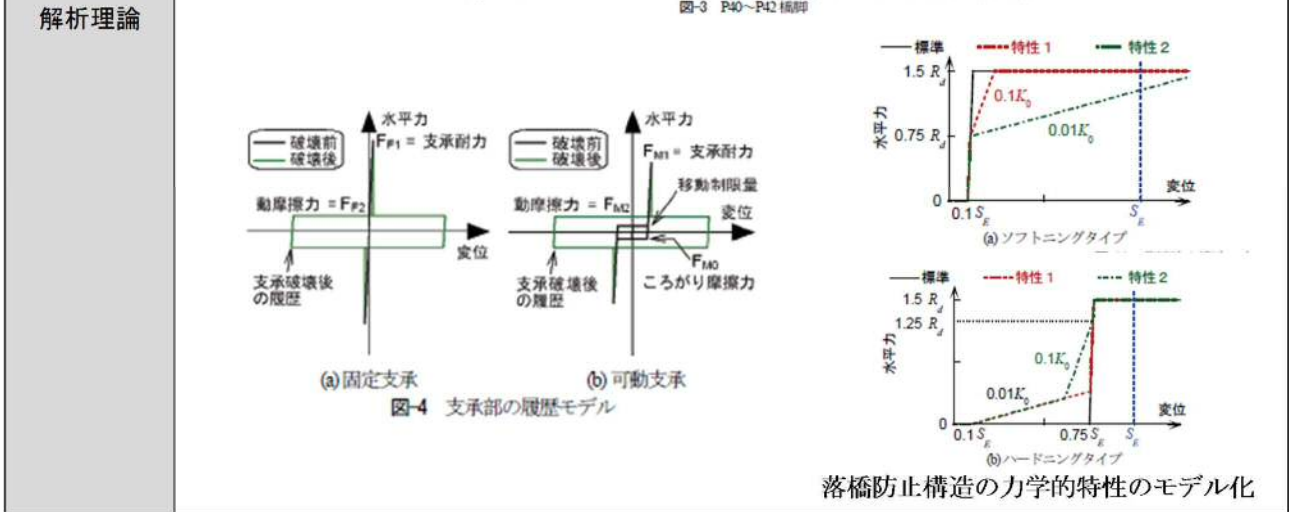
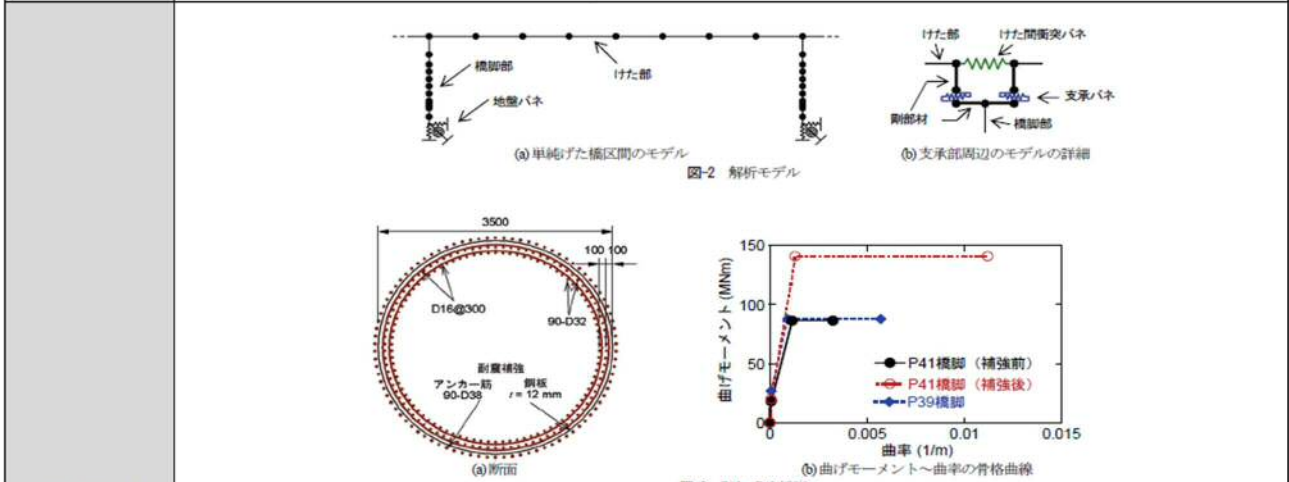
新しい落橋防止装置の考え方と, その解析方法について参考となる文献である。ただし, 解析モデルの図が省略されているため, 注意が必要。

大分類	支承部	小分類	落橋防止構造
論文題目	大規模地震における落橋メカニズムと落橋防止構造の効果に関する分析		
著者	堺淳一, 運上茂樹, 星隈順一		
公開年次	2011年	出典	土木学会論文集A1 (構造・地震工学)
解析の目的	過去の大地震における被害状況を分析し, 落橋防止構造の有効性を検証している.		



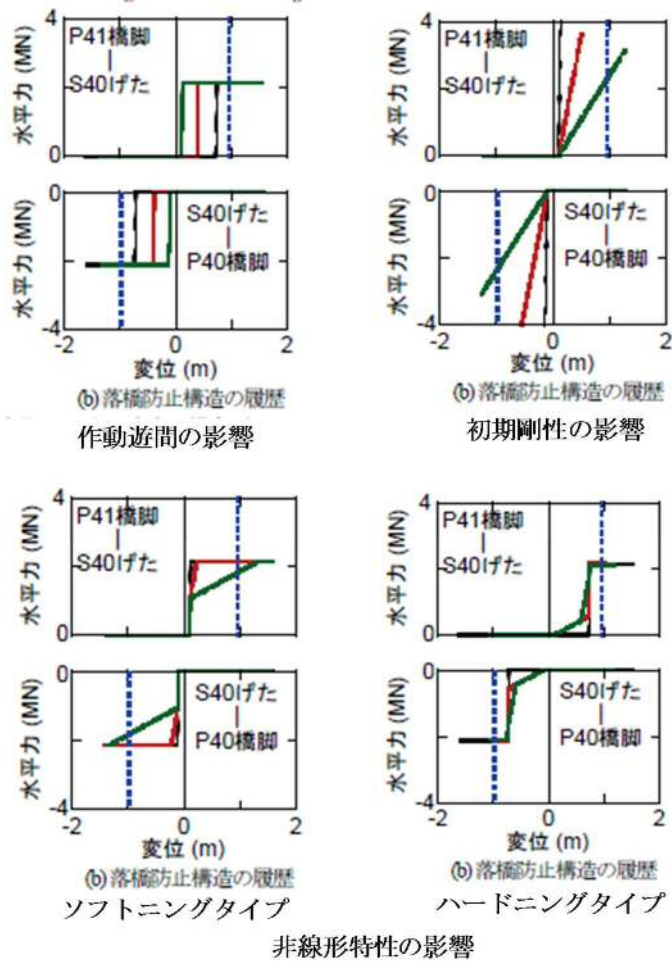
解析モデルの概要

解析コード	確認できず
解析条件	兵庫県南部地震で落橋した桁を有する橋梁の落橋した部分 (P35~P45橋脚とS34~S43桁) を選定している. 解析モデルはパネ要素, はり要素を用い, 桁間の衝突, 支承部の破壊, RC橋脚の損傷を考慮した骨組みモデル. これに落橋防止構造を2パターン of 力学特性モデルを設定し, 剛性はハードニングなどのパラメータを変化させている.



解析結果

解析結果



結果の概要

落橋を再現するためには支承破壊も想定したモデル化が必要で、破壊後の地震時挙動には落橋防止構造の影響が大きいことが示されており、加振後の早い段階から落橋防止構造を機能させることが必要との見解を示されている。

備考

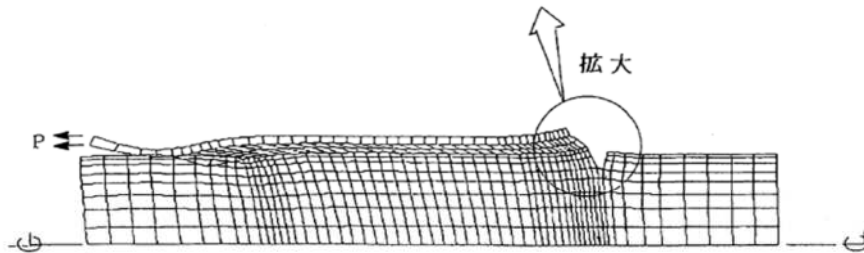
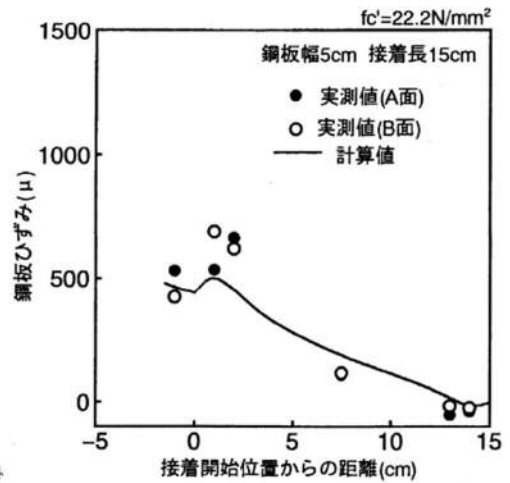
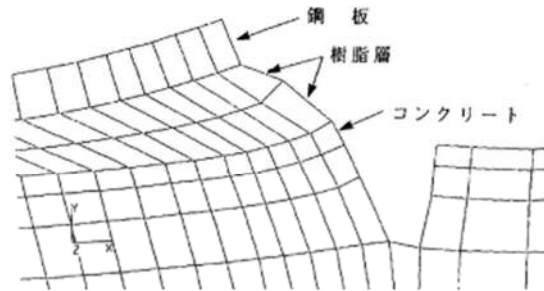
兵庫県南部地震後に増えた落橋防止構造設置対応について、その設計上の観点が整理された論文。

大分類	接着材	小分類	
論文題目	鋼板接着によるコンクリート部材の補強設計法に関する研究		
著者	佐野正, 三浦尚		
公開年次	1996年11月	出典	土木学会論文集, No. 550/V-33
解析の目的	コンクリート部材の鋼板接着による補強を対象として, 鋼板の剥離現象を明らかにするとともに, 鋼板の接着長を合理的に定める方法を提案するため, 実験とFEM解析を実施した.		
解析対象	<p>鋼板を接着したRC両引き供試体を対象としてFEM解析を実施.</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	汎用線形FEMプログラムMSC-pal2		
使用要素	シェル要素 (詳細不明, 2次元解析), 最小要素寸法2mm×2mm		
接着層のモデル化方法	鋼板, 接着層, コンクリートを2次元シェル要素でモデル化. 接着層厚は5mmで, 2層のシェル要素でモデル化している. コンクリート, 鋼板の境界とは節点を共有させている.		
解析モデル			

解析結果

実験で計測された鋼板ひずみと解析値は良く一致することが確認された。

実験結果
との比較



結果概要

- ・ FEM解析により、鋼板先端の樹脂層に接着面と垂直方向の引張応力が存在し、これが鋼板の剥離を引き起こすことが確認できた。
- ・ 鋼板定着長の合理的な算定式を提案した。

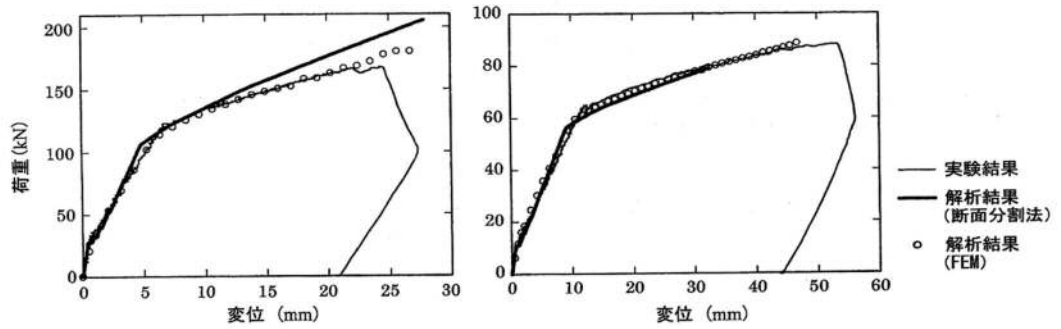
備考

FEMモデルの鋼板端部にコンクリートのひび割れを想定した切り込みを導入しており、接着層の応力評価においてシャープエッジによる要素サイズに依存する応力集中の影響をある程度緩和できている可能性はあるが、応力の絶対値は要素サイズに依存すると考えられる。

大分類	接着材	小分類	
論文題目	AFRPシートで曲げ補強したRC梁の破壊挙動に関する非線形数値解析		
著者	岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介, 張広鋒		
公開年次	2001年8月	出典	応用力学論文集, Vol. 4
解析の目的	アラミド繊維製FRPシートで補強したRC梁の耐荷性能を適切に評価可能な数値解析手法を確立することを目的として, FEM解析を実施した.		
解析対象	<p>RC梁をAFRPで曲げ補強したRC梁供試体を対象とした.</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	構造用解析汎用ソフトDIANA		
使用要素	8節点あるいは6節点ソリッド要素		
接着層のモデル化方法	コンクリートとAFRPシート間に接触面要素を配置した。接触面要素は、変位が限界変位に達すると力を伝達しない構成則としている。その他、主鉄筋とコンクリート、ひび割れ発生位置にも境界要素を配置している。		
解析モデル	<p>総節点数: 7410 総要素数: 5603</p> <p>(1): 主鉄筋 (2): 接着層 厚さ: 2 mm (3): AFRP シート (4): 接触面要素 (Bond-slip モデル) (5), (6): 接触面要素 (Discrete Cracking モデル)</p> <p>f_{ct} = コンクリート引張強度 $\Delta U_{n-ult} = f_{ct} / k_n$</p>		

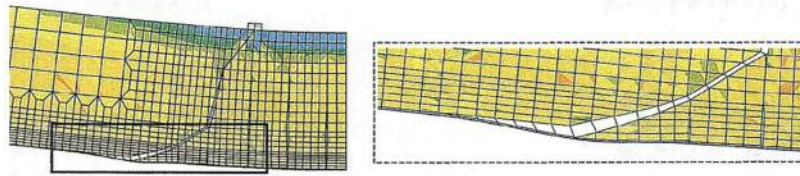
解析結果

FEM解析は非線形域においても実験結果を良くシミュレート出来ていることが確認できた。また終局状態についても、解析結果と実験結果は比較的良く一致している。

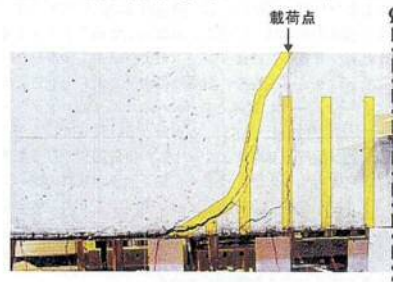


(a) 剥離破壊型試験体

(b) 曲げ圧壊型試験体



(c) 終局時 ($\delta = 24.5\text{mm}$)



実験結果との比較

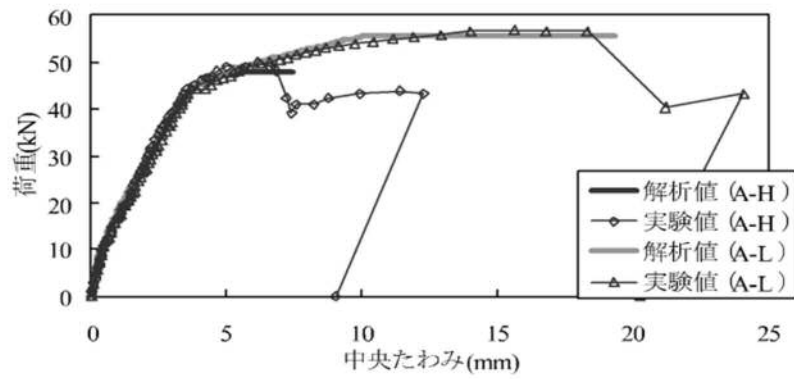
結果概要

接触面要素を用いたFEM解析を実施することで、試験体の非線形挙動、終局状態を精度よく再現することが確認できた。

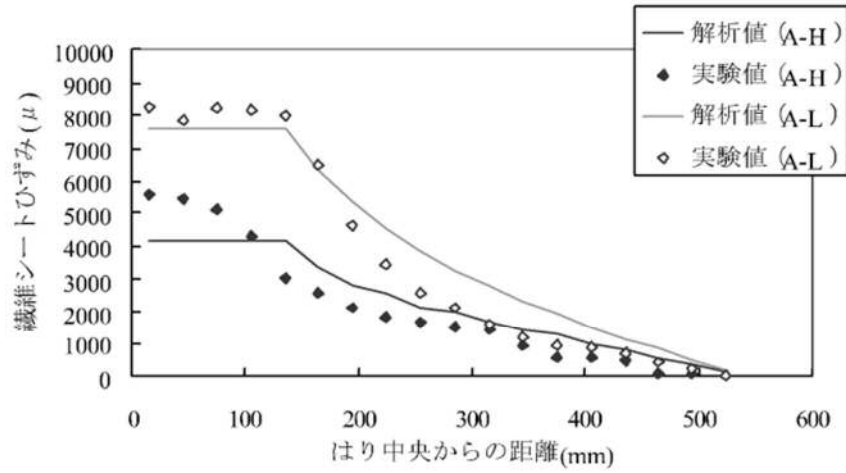
大分類	接着材	小分類	
論文題目	付着破壊特性を考慮した連続繊維シート補強RCはりの有限要素解析		
著者	杉山裕樹, 森川英典		
公開年次	2001年10月	出典	土木学会第56回年次学術講演会概要集
解析の目的	繊維シートの引張付着試験結果から付着特性のモデルを提案し, このモデルを用いて繊維シート補強したRC梁のFEM解析を行い, 耐荷性能を評価することを試みている.		
解析対象	<p>炭素繊維補強したRC梁を対象とした.</p> <p>(単位 : mm)</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	不明		
使用要素	2次元モデル, コンクリートは平面応力要素, 鉄筋, FRPは線要素		
接着層のモデル化方法	コンクリートとFRPの間に付着を考慮した非線形バネ要素を配置した.		
解析モデル	<p>単位 (mm)</p> <p>□ コンクリート要素 — 鉄筋要素 ● バネ要素 ■ 連続繊維シート要素</p> <p>解析モデル</p> <p>付着特性のモデル化</p>		

解析結果

実験結果との比較



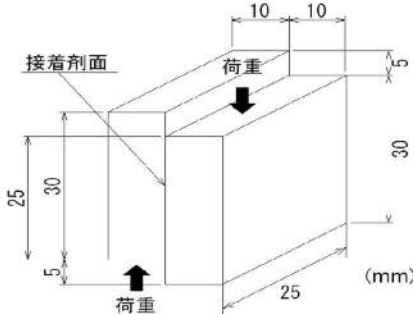
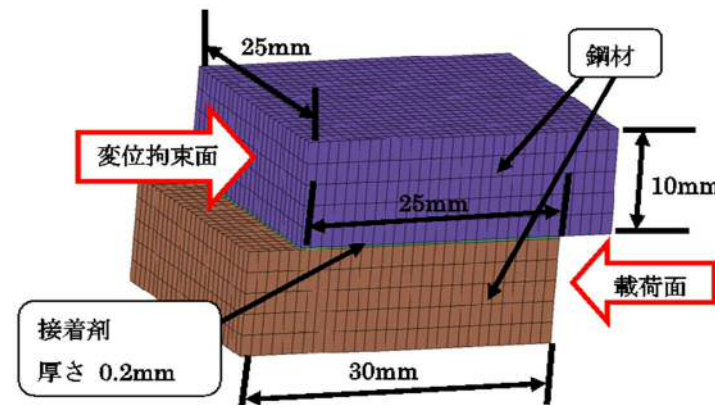
荷重-たわみ関係



繊維シートのひずみ分布

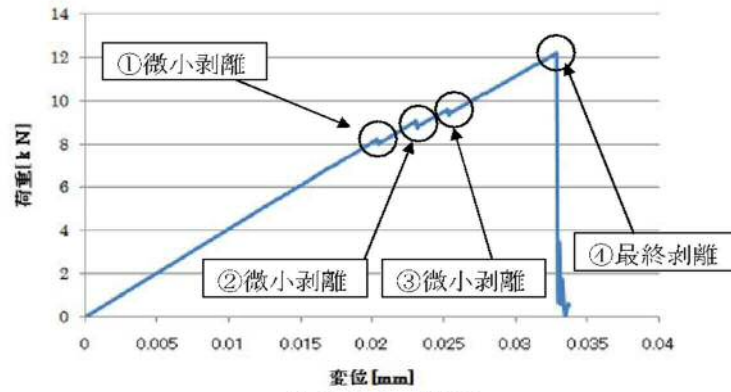
結果概要

付着力試験により得られた結果を用いた付着特性のモデル化により、繊維補強したRC梁の破壊挙動を精度よく評価できることが確認できた。

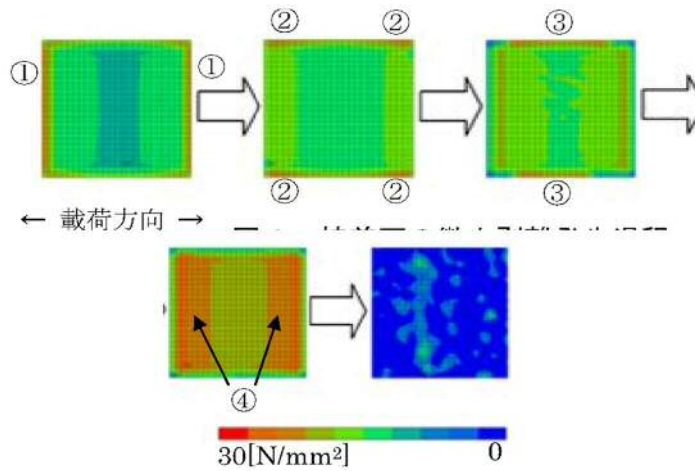
大分類	接着材	小分類	
論文題目	炭素繊維補強における接着面のせん断破壊応力に関する検討		
著者	山田稔, 白石康隆, 長嶋文雄		
公開年次	2008年9月	出典	土木学会第63回年次学術講演会概要集
解析の目的	鋼材同士を接着材で接着し, せん断破壊させるJISK6852で規定される試験をシミュレートすることを目的として, 数値解析方法を検討した。		
解析対象	<p>JISK6852で規定される接着材のせん断接着強さ試験を対象とした。</p> 		
解析モデルの概要			
解析コード	不明		
使用要素	3次元モデル, 鋼材, 接着層はソリッド要素		
接着層のモデル化方法	コンクリートとFRPの間に付着を考慮した非線形バネ要素を配置した。接触する界面には破壊を考慮できる接触条件を用いた。		
解析モデル	 <p style="text-align: center;">解析モデル</p> $\left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^2 \geq 1$ <p> τ : 接着剤の面内方向に生じるせん断応力(N/mm²), σ : 接着剤の面外方向に生じる垂直応力(N/mm²), τ_f : せん断破壊応力(N/mm²), σ_f : 垂直破壊応力(N/mm²) </p> <p style="text-align: center;">接触面の破壊の判定</p>		

解析結果

剥離挙動の
解析結果



荷重-たわみ関係



繊維シートのひずみ分布

結果概要

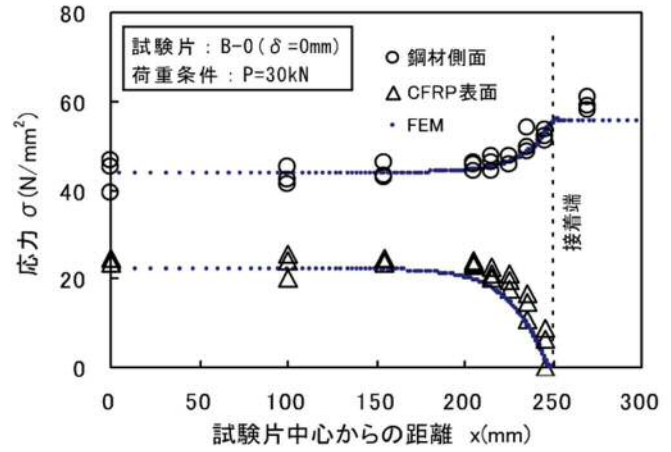
せん断力試験では荷端部の境界面に応力集中し、微小破壊が広がり最終剥離に至る過程を再現することができた。このモデルを用いて、過去の別の実験をシミュレートできることも確認した。

大分類	接着材	小分類	
論文題目	鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究		
著者	杉浦江, 小林朗, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣		
公開年次	2008年11月	出典	土木学会論文集A, Vol. 64A, No. 4
解析の目的	鋼板の腐食部に炭素繊維シートを接着して補強する工法を対象に, 鋼板およびCFRPに作用する応力状態を調べるため, 試験体をモデル化したFEM解析を実施した.		
解析対象	<p>鋼板に炭素繊維シートを接着した引張試験体を対象として, FEM解析を実施した.</p> <p>(b) B・Cシリーズ</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	汎用有限要素解析プログラムABAQUS		
使用要素	Bシリーズ: 2次元弾性体モデル, 平面ひずみ要素 Cシリーズ: 3次元弾性体モデル, ソリッド要素		
接着層のモデル化方法	鋼板 (厚さ4.5mm), プライマー (厚さ0.2mm), CFRP (厚さ0.8mm) をシェル要素 (Bシリーズ), ソリッド要素 (Cシリーズ) でモデル化. プライマー層は厚さ方向に2分割とした. 端部が応力特異場となることを承知の上, 相対比較により評価することを試みている.		
解析モデル	<p>(a) Bシリーズ (b) Cシリーズ</p>		

解析結果

実験結果
との比較

Bシリーズ, Cシリーズともに,
実験で計測されたCFRP表面,
および鋼板側面の応力とFEM解
析値は良く一致することが確かめ
られた. 左図は, Bシリーズの実
測値と解析値を比較した結果の一
例である.



結果概要

妥当性が確認されたFEM解析モデルを用いて, CFRP層をずらすことによるプライマー端部の応力低減効果について検討し, 必要なずらし量を提案した.

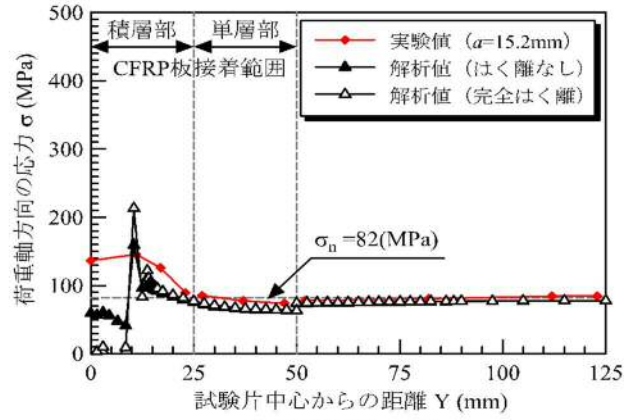
備考

シャープエッジによる応力特異場を考慮した上で, 相対比較による評価を行っている.

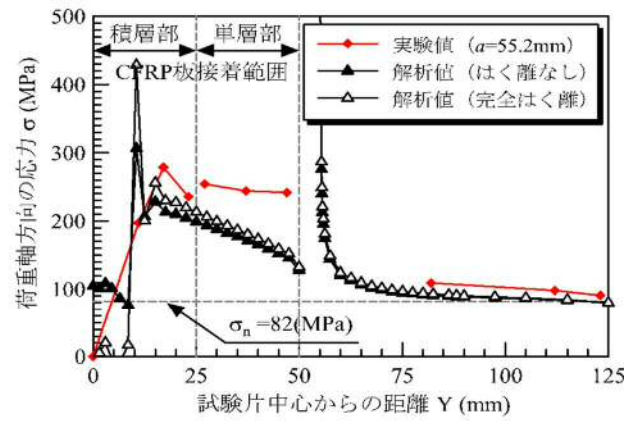
大分類	接着材	小分類	
論文題目	CFRP板接着により補修された面外ガセット溶接継手部き裂の疲労寿命予測		
著者	中村一史, 姜威, 前田研一, 鈴木博之, 入部孝夫, 福田欣弘		
公開年次	2011年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 57A
解析の目的	疲労き裂を有する面外ガセット継手をCFRP板で補強した時の延命効果を定量的に把握するため, 溶接ビードとき裂, CFRP板, 接着層をモデル化してFEM解析を行った.		
解析対象			
解析モデルの概要			
解析コード	Marc2005r3		
使用要素	8節点ソリッド要素		
接着層のモデル化方法	接着層の厚さは0.4mmとし, 厚さ方向に3分割してソリッド要素でモデル化した. 要素の最小寸法は0.05mm×0.05mmとした.		
解析モデル			

解析結果

実験結果との比較



(a) き裂長さ $a=15\text{mm}$



(b) き裂長さ $a=55\text{mm}$

図-6 M1における鋼板, CFRP 板上の応力分布の比較

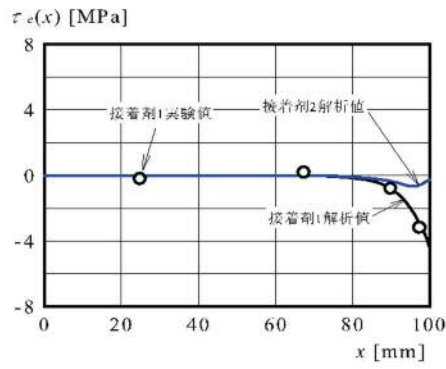
結果概要

回し溶接部付近のCFRP板の剥離を適切に考慮することによって, CFRP板によるき裂部の補修による延命効果をFEM解析を用いて評価することが可能である.

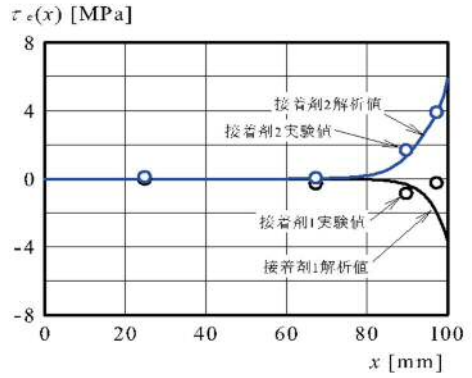
大分類	接着材	小分類	
論文題目	CFRP板が片面に接着された鋼部材に生じる熱応力の低減		
著者	石川敏之, 富田貴大, 服部篤史, 河野広隆, 長尾隆史, 小林朗		
公開年次	2012年	出典	土木学会論文集A2, Vol. 68, No. 2
解析の目的	鋼部材をCFRPで補強する際に問題となる線膨張係数の違いの影響を回避するため, CFRP板とAL板からなる積層板を用いることを提案し, その効果を確かめるために実験および数値解析を実施している. FEM解析ではないが, 理論式を導出しており, 参考になる.		
解析対象	<p>(a) 試験体 PL4.5, PL12</p> <p>(b) 試験体 H</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	—		
使用要素	—		
接着層のモデル化方法	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="width: 45%;"> <p>ここに,</p> <p>$\tau_{el}(x)$: 鋼部材から 1 層目の接着剤に生じるせん断応力.</p> <p>この式をひずみの差分の形で表すと次式になる.</p> $\tau_{el}\left(\frac{L_{k+1} + L_k}{2}\right) = -\frac{E_s A_s}{b_1} \cdot \frac{\varepsilon_{Ns}(L_{k+1}) - \varepsilon_{Ns}(L_k)}{L_{k+1} - L_k} \quad (12)$ <p>ここに,</p> <p>L_k : 試験体中央からひずみ計測位置 k までの距離,</p> <p>$\varepsilon_{Ns}(L_k)$: L_k の位置の鋼部材に生じる軸ひずみ,</p> <p>b_1 : 補強板 1 の幅.</p> </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> $\tau_{el}(x) = -\frac{1}{b_1} \cdot \frac{dN_s(x)}{dx} \quad (11)$ </div> </div>		

解析結果

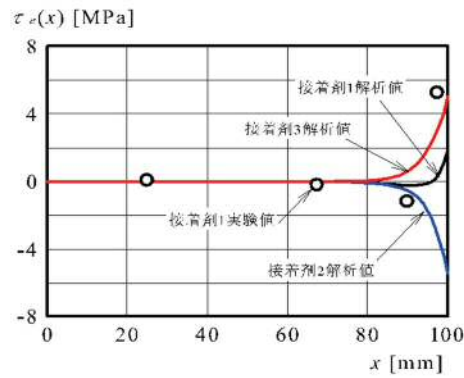
実験結果との比較



(a) CC



(b) CA

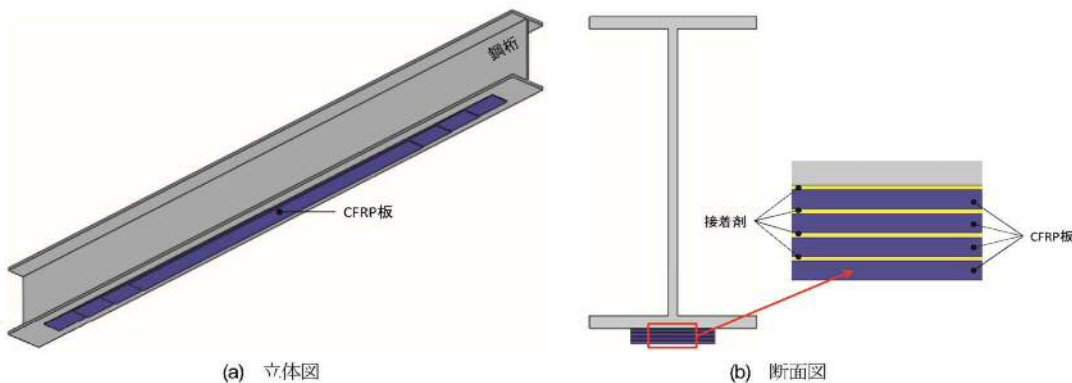
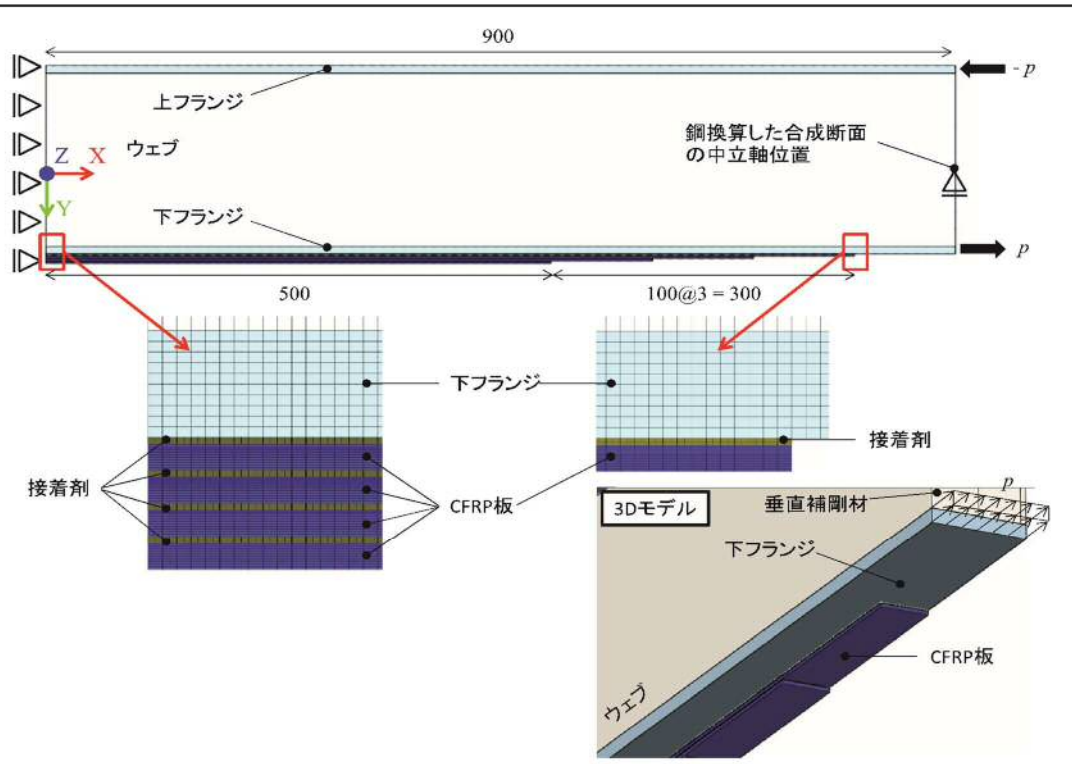


(c) ACA

図-8 試験体 PL4.5 の接着剤に生じるせん断応力分布

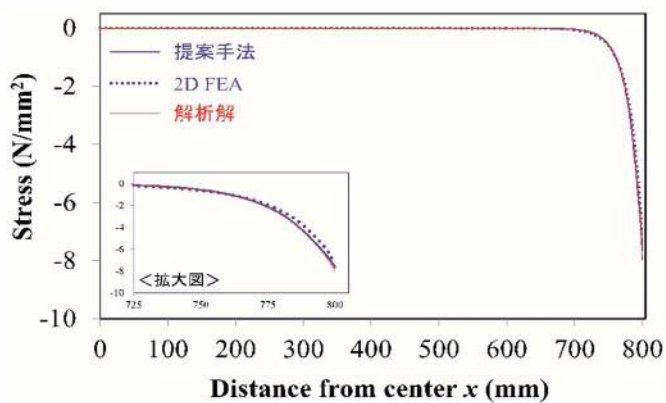
結果概要

鋼部材、接着材、補強板の微小区間の断面力の釣り合いを考慮した数値解析により、鋼部材に作用する応力や接着材に作用するせん断応力を精度よく算出できることを確認している。

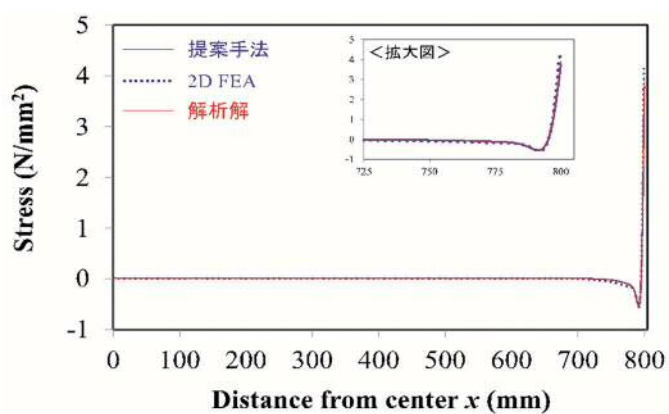
大分類	接着材	小分類	
論文題目	多層のCFRP板が積層された曲げを受ける鋼部材の応力解析		
著者	宮下剛, 石川敏之		
公開年次	2013年	出典	土木学会論文集A1, Vol. 69, No. 1, pp. 26-39
解析の目的	鋼1桁の下フランジ下面に多層のCFRP板が積層された曲げ部材を対象として, 準解析的な計算手法を確立するにあたり, そのキャリブレーションのためにFEM解析を実施した.		
解析対象	<p>下フランジ下面にCFRP板が多数積層された鋼1桁を対象とした.</p>  <p>(a) 立体図 (b) 断面図</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	DIANA9.4.3, midasFX+for DIANA Ver. 3.0.0(2)		
使用要素	8節点2次アイソパラメトリック要素 (2次元モデル) 20節点2次アイソパラメトリックソリッド要素 (3次元モデル)		
接着層のモデル化方法	鋼材, CFRP板と同様にモデル化. 鋼フランジ, CFRP板, 接着材層のいずれも厚さ方向に10分割.		
解析モデル	 <p>900 500 100@3 = 300 上フランジ ウェブ 下フランジ 鋼換算した合成断面の中立軸位置 -p p Z X Y 接着剤 CFRP板 3Dモデル 垂直補剛材 下フランジ ウェブ CFRP板</p>		
図-3 FEAモデル (単位: mm)			

解析結果

実験結果
との比較




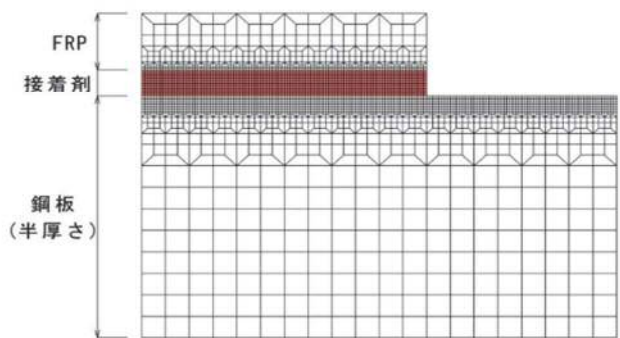
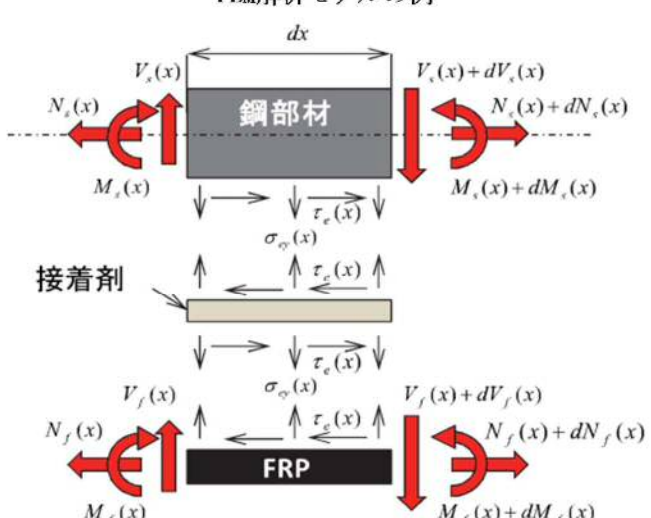
(e) 接着剤のせん断応力 (τ_1)



(f) 接着剤の垂直応力 (σ_{y1})

結果概要

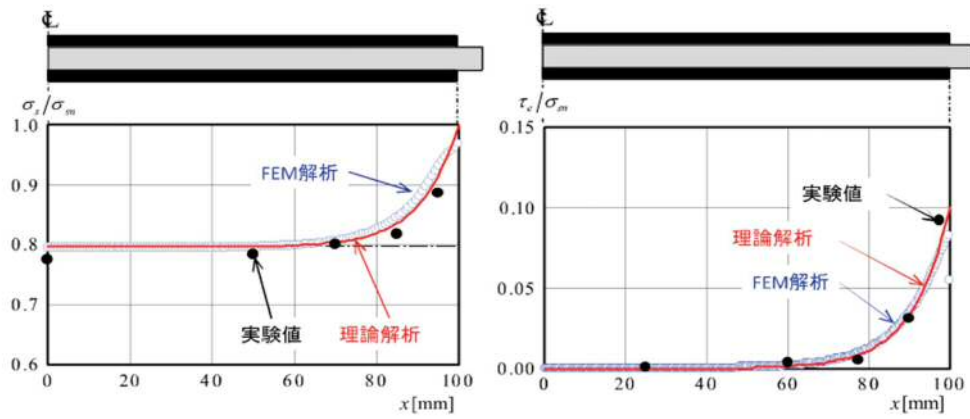
提案手法, 理論解析結果, FEM解析結果はよく一致していることが確認できた.

大分類	接着材	小分類	
論文題目	FRP部材の接合および鋼とFRPの接着接合に関する先端技術		
著者	複合構造委員会・FRPと鋼の接合方法に関する調査研究小委員会		
公開年次	2014年	出典	土木学会論文集A1, Vol. 70, No. 5
解析の目的	土木学会の小委員会で既往の研究を調査した結果をまとめている。接着層のモデル化については、端部の評価が問題となるが、FEM解析と数値解析的アプローチを調査し、比較して報告している。		
解析対象	<p>鋼板とFRPの接着接合を対象として研究事例を調査している。</p>  <p>(a) 軸力を受ける鋼部材の補修・補強の概念図</p> <p>(b) 接着剤端部の応力状態</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	記述なし		
使用要素	シェル要素，もしくはソリッド要素を想定		
接着層のモデル化方法	接着層はシェル要素，もしくはソリッド要素でモデル化することを想定している。接着層の厚さ，弾性係数が鋼やFRPと比べて2オーダーほど小さくなることを考慮すべき点としてあげており，接着層に微細な要素サイズが必要となることを注意点としてあげている。		
解析モデル	 <p style="text-align: center;">FEM解析モデルの例</p>  <p style="text-align: center;">理論解を算出するための微小区間の断面の釣り合いモデル</p>		

解析結果

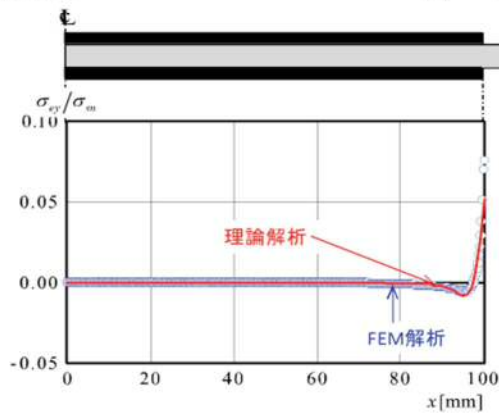
要素サイズを十分に小さくすれば、実験値、理論値、FEM解析値が良く一致することを示している。

実験結果との比較



(a) 鋼板応力

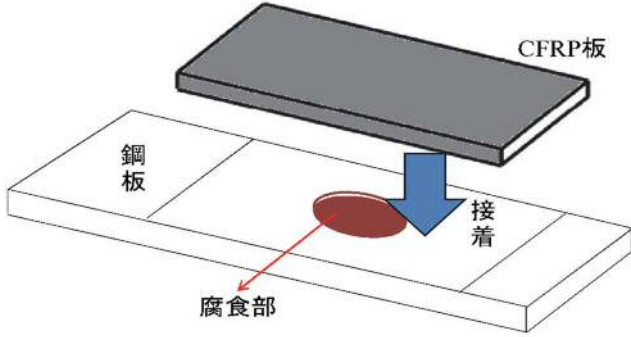
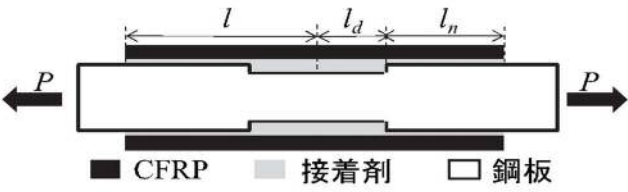
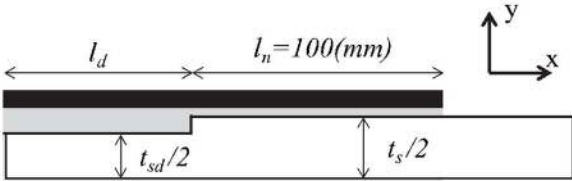
(b) せん断応力



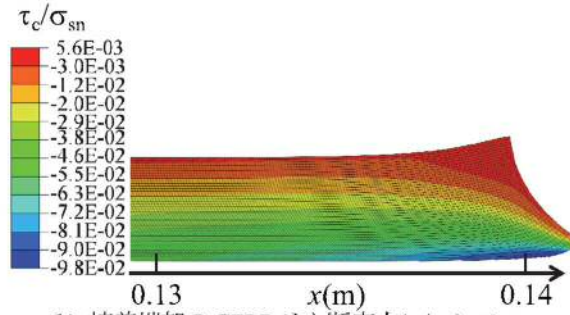
(b) 垂直応力

備考

FEM解析において、接着材の要素サイズを適切にすれば、端部付近の応力も比較的精度良く評価できることが示されており、参考になる。

大分類	接着材	小分類	
論文題目	軸力が作用するCFRP接着補修鋼板に対するCFRP板のせん断変形を考慮した理論解析		
著者	臼井瑛人, 北根安雄, 石川敏之, 伊藤義人		
公開年次	2015年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 61A
解析の目的	腐食部材のCFRP板による補強について理論式を構築するため, FEM解析を実施した. 主にCFRP板のせん断変形の影響について検討した.		
解析対象	 <p>図-1 腐食鋼板へのCFRP板接着鋼板</p>		
解析モデルの概要			
解析コード	Abaqus ver. 6.12		
使用要素	2次元平面応力要素 (CPS4)		
接着層のモデル化方法	鋼板, 接着材, CFRP板を2次元平面応力要素でモデル化. 要素のサイズは0.05mm×0.05mm.		
解析モデル	 <p> P :作用外力, l_d :断面欠損の片側長さ l_n :一般部CFRP板の片側長 l :CFRP板の片側定着長さ </p> <p>図-2 断面欠損を有するCFRP板接着鋼板</p>  <p>図-5 CFRP接着補修1/4モデル</p>		

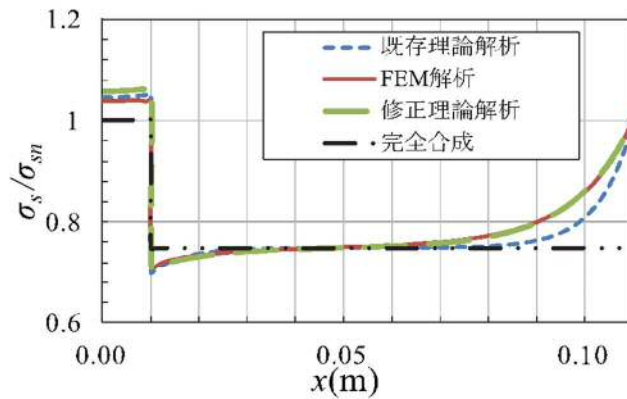
解析結果



(b) 接着端部のCFRPせん断応力(τ_c/σ_{sn})コンター図およびせん断変形

図-7 FEM解析によるCFRPに発生するせん断応力とせん断変形

実験結果との比較

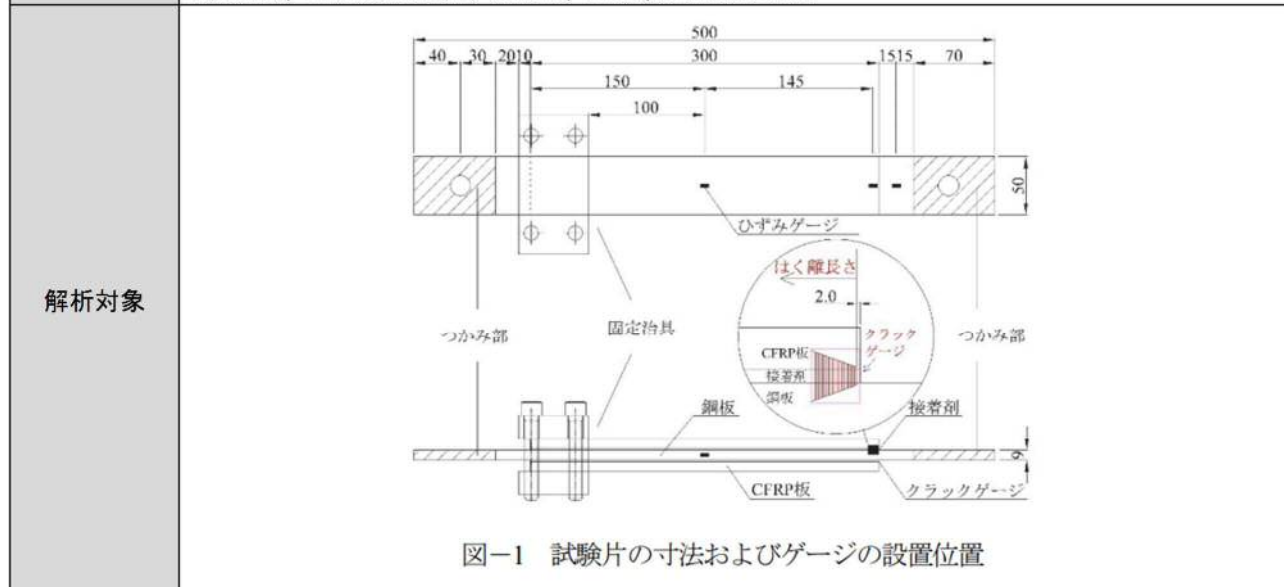


(a) 鋼板厚9mmで断面欠損半長さ10mm (ts09ld10L1)

結果概要

既存の理論解析に対し、CFRP板のせん断変形を考慮するための換算接着層厚を用いた修正理論解析を用いることで、理論解析の精度が向上することが確認できた。

大分類	接着材	小分類	
論文題目	CFRP板と鋼板の接着接合部の疲労耐久性評価		
著者	中村一史, 手塚渉太, タイウイスル		
公開年次	2016年3月	出典	構造工学論文集, Vol. 62A
解析の目的	鋼板のCFRP補強の疲労挙動（端部からの剥離挙動）について、接着材端部に生じるせん断応力、垂直応力、主応力を評価するため、FEM解析を実施した。		



解析モデルの概要

解析コード	MSC. Marc2013
使用要素	ソリッド要素
接着層のモデル化方法	鋼板, CFRP板, 接着材をすべてソリッド要素でモデル化. 要素サイズはすべて0.1mm×0.1mm.

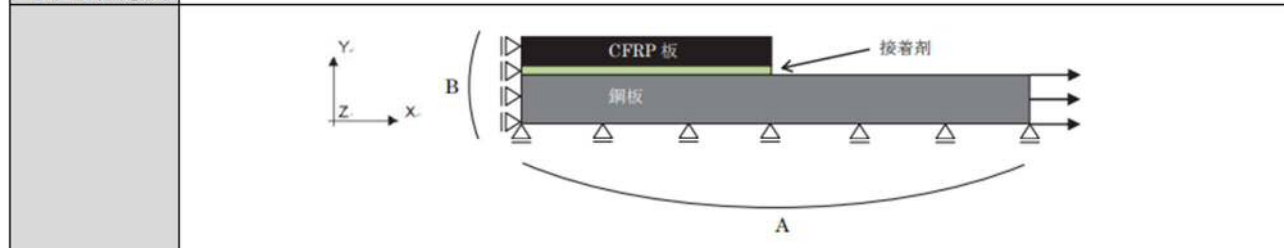


表-1 鋼板, 接着剤およびCFRP板の機械的性質

材料	弾性係数 E (MPa)	ポアソン 比 ν	せん断弾性係数 G (MPa)	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)
鋼板 (SS400)	200	0.3	76.9	320	453
接着剤 (E250)	1.5	0.3	0.58	—	—
CFRP板 (高強度 タイプ)	$E_{11}=150$	$\nu_{12}=0.34$	$G_{12}=5.2$	—	2,680
	$E_{22}=8$	$\nu_{23}=0.05$	$G_{23}=4.0$		
	$E_{33}=8$	$\nu_{31}=0.05$	$G_{31}=5.2$		

解析結果

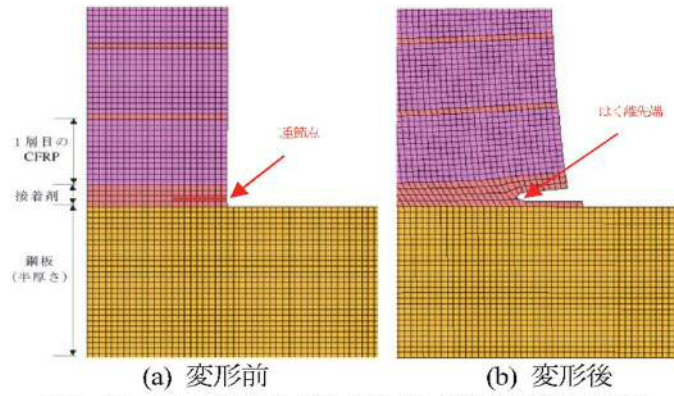


図-13 はく離のモデル化とはく離先端部の定義

実験結果との比較

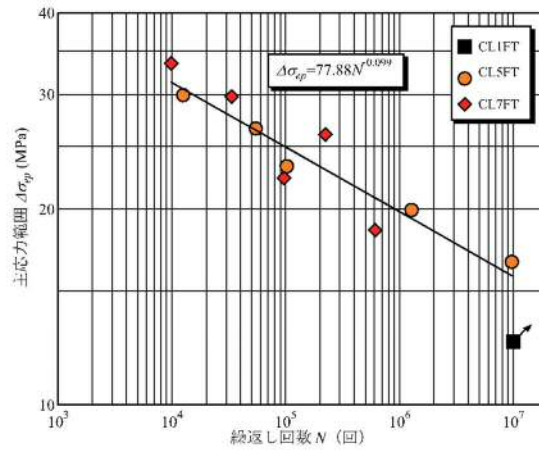


図-8 主応力範囲と初期はく離長さまでの繰返し回数との関係

結果概要

FEM解析より算出した主応力範囲を用いてS-Nデータを整理することで、精度の良い寿命予測ができる。