

理論と仮定, 事象とモデル

藤井 堅
広島大学 名誉教授

研究歴

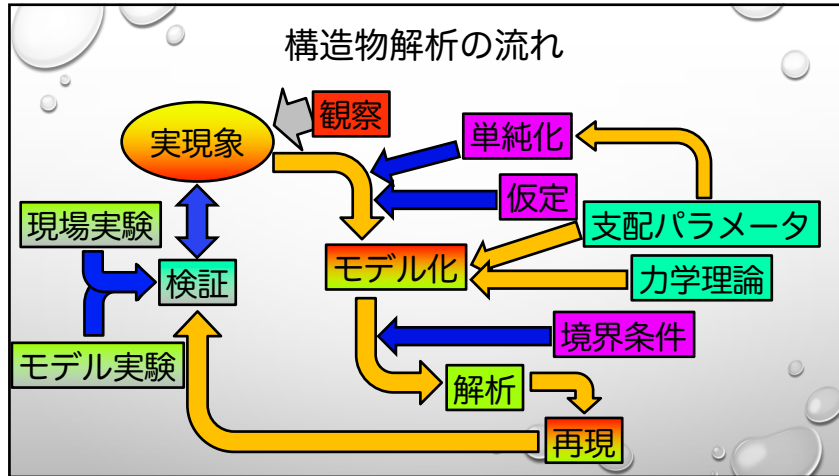
1. 鋼橋の座屈と耐荷力に関する研究
曲線桁および直線桁の断面変形挙動と曲げ耐荷力
マンホールを有する鋼製橋脚の耐荷力と変形能
ステンレスクラッド鋼の橋梁適用に関する研究
2. 鋼構造物の維持管理に関する研究
腐食鋼構造物の残存強度評価
腐食鋼構造物の強度低下の将来予測
3. 複合構造物の設計法に関する研究
コンクリート充填鋼管柱の力学特性と終局耐力
孔あき鋼板ジベルのずれ耐力評価
4. 腐食した鋼構造物の性能回復
鋼板接着による鋼構造物の性能回復

本日の話題提供

1. 構造解析とモデル化
 - ・腐食した鋼構造物の残存耐荷力評価
 - ・直線および曲線プレートガーダー(はり理論と板殻理論)
 - ・給水塔の有限要素解析(境界条件)
2. 孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力評価
3. コンクリート充填鋼管の圧縮座屈

本日の話題提供

1. 構造解析とモデル化
 - ・腐食した鋼構造物の残存耐荷力評価
 - ・直線および曲線プレートガーダー(はり理論と板殻理論)
 - ・給水塔の有限要素解析(境界条件)
2. 孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力評価
3. コンクリート充填鋼管の圧縮座屈



- ### 構造物解析の流れ
1. 実状の把握
実構造物の現状，構成材料，外力状態，境界条件などを把握
 2. 解析モデルの構築・作成
構造物の単純化，材料特性の仮定，境界条件の設定，解析条件の決定
 3. 適用する力学理論，解析法の選定
はり理論，板理論，シェル理論，FEM(はり，シェル，立体・・・)
線形解析，弾塑性解析，座屈，大たわみ解析，複合非線形解析
 4. 境界条件
単純支持，固定，バネ支持，接触・摩擦

- ### 解析モデルの作成
- 実現象の構成要因を分解
実現象を，種々の事象に分解(分類)
 - 目的とする事象
実現象の様々な事象のうち，どの事象を表現するか
 - 目的とする事象を支配するパラメータ
目的とする事象の支配パラメータを推察・把握する
 - 目的とする事象を表現できる力学理論の選択
線形解析 OR 非線形解析，座屈・後座屈など

- ### モデル化のあり方
- 目的とする事象を表現できるモデルでなくてはならない。
 - 事象は工学的に無視し得るものか無視できないものか？無視できるなら敢えてそれを考慮する必要は無い(支配パラメータの選択)
 - モデルはできる限り簡単な方がよい(適切な仮定と単純化)。
 - モデルは説得力のある(まわりが納得する)ものがよい (力学的に理屈に見合っている)。
 - 解法は簡単かつ正確な(信頼性のある)ものがよい。

構造解析のためのモデル化

板にモデル化

はりにモデル化

板理論による解析

ねじりモーメントも含めて板の正解（主モーメント）が得られるが、解析は複雑。また、解析法（ガレルキン法など）による誤差が発生。
どのようなアスペクト比でも正解を与える。

はり理論による解析

解析は容易であるが、正解は得られない。1辺が長い長方形板の場合には、利用可能。ねじりモーメントは考慮できない。

構造解析とモデル化のまとめ

「与えられた課題に対して、どのようにモデル化して解くか」が肝要である。

このとき、

「そのモデル化が、**適用範囲**も含めて、実用可能な解を提供するかどうか**(使えるか否か)**」を判断しないとイケない。さらに、それを使用すると「どこが実現象と異なるか**(仮定の成立)**」、また、どのような問題が発生するか」を知って利用しないとイケない。

本日の話題提供

1. 構造解析とモデル化
 - ・ 腐食した鋼構造物の残存耐荷力評価
 - ・ 直線および曲線プレートガーダー(はり理論と板殻理論)
 - ・ 給水塔の有限要素解析(境界条件)
2. 孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力評価
3. コンクリート充填鋼管の圧縮座屈

腐食した鋼構造物の残存耐荷力解析

起こり得る様々な破壊のトリガー

曲げ座屈 ねじれ座屈 横ねじれ座屈 飛び移り座屈 せん断座屈 局部座屈
降伏、延性破壊 疲労破壊 クリープ破壊 脆性破断 遅れ破壊 応力腐食割れ
.....

(仮定) 各破壊形式の破壊荷重のうち、破壊は最小値で起こる

ばらつき
の
要因

初期不整
応力集中
腐食形状

↓
最小値
↓

破壊プロセス
連成効果
リダンダンシー

↓
実際の破壊

残存耐荷力評価のための基本

- 破壊形式の推定・把握

要求する破壊モードを表現できる解析モデルを作成しなくてはならない
でないと正確な評価は不可能

【例】はり要素を用いた非線形有限要素解析では、局部座屈破壊は把握できない

- 破壊を支配する指標を考慮する

破壊モードに応じた支配パラメータ

(断面積, 曲げ剛性, 腐食凹凸)を把握する

【例】座屈破壊する場合は、断面積ではなく剛性が現象を支配する

破壊モードを推定し、その支配指標を把握・計測して
適切な解析モデルを用いて解析する

→ 的をはずすと危ない

腐食した鋼構造物の残存耐荷力評価の留意事項

腐食進行にともない、破壊モードが初期に想定したものと異なる可能性がある。

荷重状態と破壊を支配する要因

荷重状態	破壊形式	破壊の主要因
圧縮	座屈	剛性
引張	降伏 塑性変形	断面積 表面凹凸形状
疲労	腐食表面形状	応力集中

本日の話題提供

1. 構造解析とモデル化

- 腐食した鋼構造物の残存耐荷力評価
- 直線および曲線プレートガーダー(はり理論と板殻理論)
- 給水塔の有限要素解析(境界条件)

2. 孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力評価

3. コンクリート充填鋼管の圧縮座屈

はり理論(平面保持の仮定)

- 断面剛の仮定

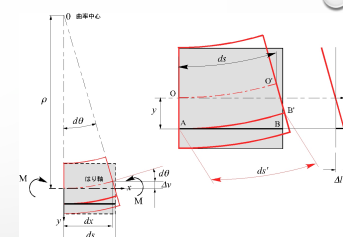
はりの断面形状は、変形後も変化しない

(断面形状不変)

- 平面保持の仮定

はりの断面は、変形後も平面を保持する

はりの断面は、変形後もはり軸に直交する



【仮定の成立条件】

- ポアソン効果を無視
- はりのせん断変形を無視

はり理論の解析結果は正しいか?

微小変位理論に基づくはり理論

平面保持の仮定：

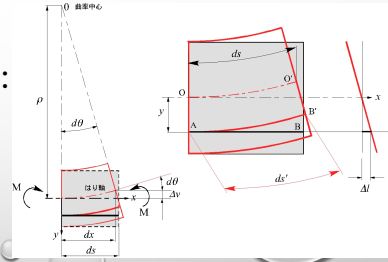
$$u = -y \frac{dv}{dx}$$

変位-ひずみ関係式(軸ひずみ)：

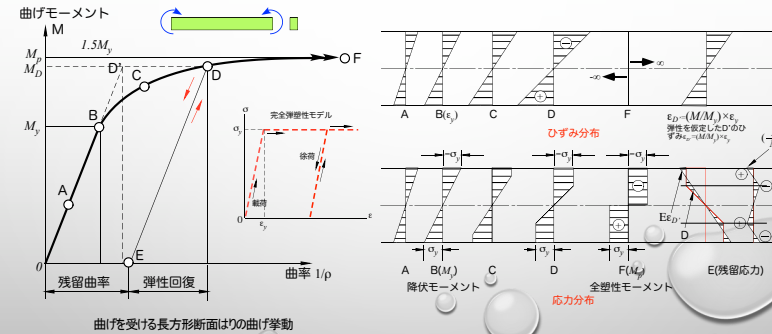
$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = -y \frac{d^2v}{dx^2}$$

応力-ひずみ関係式：

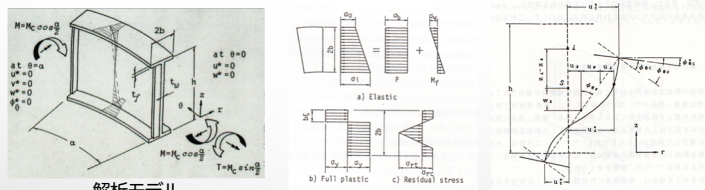
$$\sigma = E\varepsilon = -Ey \frac{d^2v}{dx^2}$$



曲げを受ける長方形断面はりの弾塑性解析



曲面板要素と扇形板要素を用いた曲線桁の有限要素解析



解析モデル
扇板と曲面板の立体解析

フランジの応力

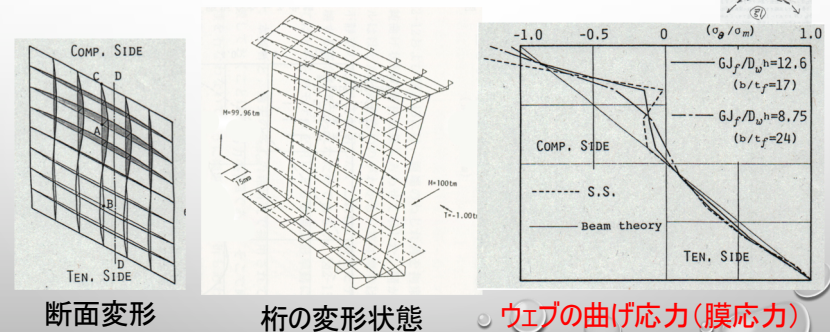
断面の変形

曲線プレートガーダーの特徴

- ・ 曲げ・せん断・ねじりが連成する。通常、フランジにはそり応力が生じる
- ・ ウェブは、引張側では曲率中心側へ、圧縮側では曲率外側へ面外たわみを生じる
- ・ その結果、ウェブの曲げ応力分布は直線とはならない。
- ・ また、極めて幾何学的非線形性の強い挙動を示す。(後座屈後の座屈)

曲面板要素と扇形板要素を用いた曲線桁の有限要素解析

はり理論は、曲線桁には適用できないのか?



断面変形

桁の変形状態

ウェブの曲げ応力(膜応力)

本日の話題提供

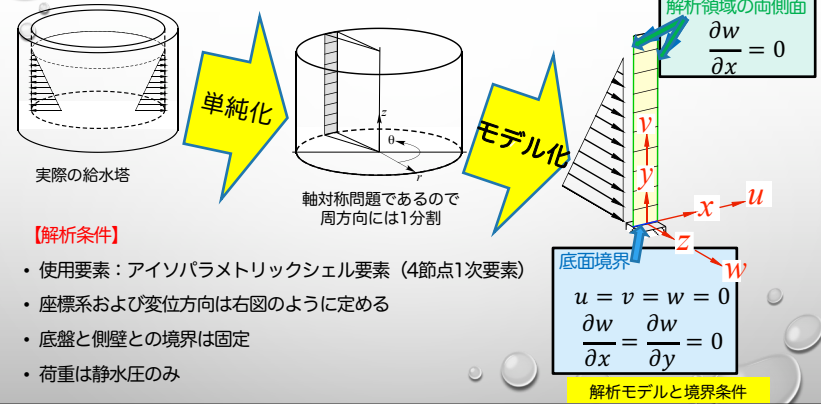
1. 構造解析とモデル化

- ・ 腐食した鋼構造物の残存耐力評価
- ・ 直線および曲線プレートガーダー(はり理論と板殻理論)
- ・ 給水塔の有限要素解析(境界条件)

2. 孔あき鋼板ジベルのずれ耐力評価

3. コンクリート充填鋼管の圧縮座屈

モデル化と境界条件 (給水塔の解析)



モデル化と境界条件 (給水塔の解析)

前ページの解析結果は、正しいでしょうか?
そうでない場合、どこが誤りでしょうか!?

本日の話題提供

1. 構造解析とモデル化

- ・ 腐食した鋼構造物の残存耐力評価
- ・ 直線および曲線プレートガーダー(はり理論と板殻理論)
- ・ 給水塔の有限要素解析(境界条件)

2. 孔あき鋼板ジベルのずれ耐力評価

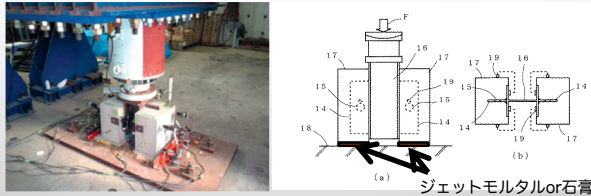
3. コンクリート充填鋼管の圧縮座屈

ずれ耐力評価のための 要素試験

観察

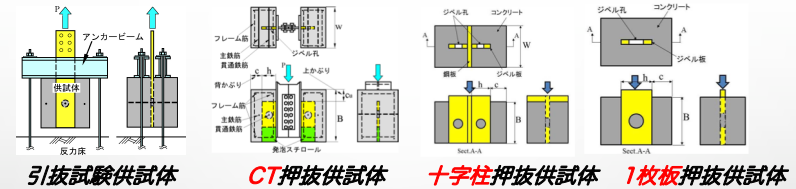
JSSC「頭付きスタッドの押し抜きせん断試験方法(案)」(1996)

我が国の要素試験はこれに準拠



CT鋼押抜試験

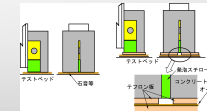
要素試験の供試体



従来のPBLせん断試験

- ほとんどの実験が
- ・2列配置されたPBL
 - ・貫通鉄筋を有す
 - ・JSSC試験法に準拠

松井先生編「頭付きスタッドの押し抜きせん断試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状」, 1996.



従来型 本実験

コンクリートの破壊に起因する PBLのずれ耐力評価式

- ・ LEONHALDT

$$V_u = 1.7d^2 f_c$$

- ・ 複合構造標準示方書(NEXCO波形鋼板ウェブ橋)
貫通鉄筋あり

$$V_u = 1.45 \{ (d^2 - \phi^2) f_c + \phi^2 f_s \} - 26100$$

- 貫通鉄筋無し

$$V_u = 3.38d^2 \left(\frac{t}{d} \right)^{\frac{1}{2}} f_c - 39000$$

V_u : 1孔当たりのずれ耐力(N), d PBL孔径(mm)
 ϕ : 貫通鉄筋径(mm),
 f_c : コンクリート基準強度(圧縮強度) (N/mm²)
 f_s : 鉄筋基準強度(降伏応力) (N/mm²)

コンクリートの破壊に起因する PBLのずれ耐力評価式

- ・ 鋼・合成構造標準示方書
貫通鉄筋あり

$$V_u = 1.45 \{ (d^2 - \phi^2) f_c + \phi^2 f_s \} - 106100$$

- 貫通鉄筋無し

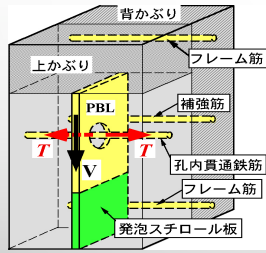
$$V_u = 3.38d^2 \left(\frac{t}{d} \right)^{\frac{1}{2}} f_c - 121000$$

その他 ・鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物, ETC.があるが, 概ね, PBL孔の換算断面積を基本とする複合構造標準示方書の形が踏襲されている.

疑問点

- 1) 貫通鉄筋の有無で別々のずれ耐力方式
- 2) 式内に定数が含まれる
- 3) 実験結果に基づく回帰解析

PBLずれ耐荷力に及ぼす影響因子



要素試験供試体の概要

試験条件：

- 1) 孔径
- 2) ジベル板の板厚
- 3) かぶり (背かぶり, 上かぶり)
- 4) 貫通鉄筋の有無
- 5) フレーム筋や補強筋の有無
- 6) 底面の条件
(モルタル, 石膏, テフロン)
- 7) 試験条件 (一枚板, CT, 十字柱)
- 8) 側圧

破壊状態



貫通鉄筋無場合の
コンクリートの割れ

貫通鉄筋が無い場合：

- コンクリートが2つに割れて破壊
- 破壊後は耐荷力が急激に低下
- 破壊時のずれ量はせいぜい1ミリ程度

貫通鉄筋がある場合：

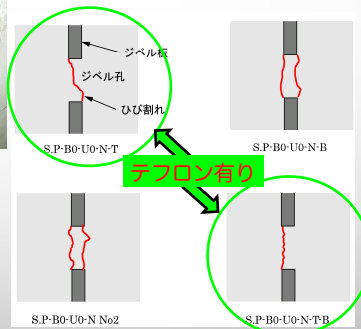
- ひび割れが生じてても、ずれ耐荷力の低下はごくわずか
- ずれ量は鉄筋が破断するまで大きくなる (50ミリ以上のずれ)

破壊状態



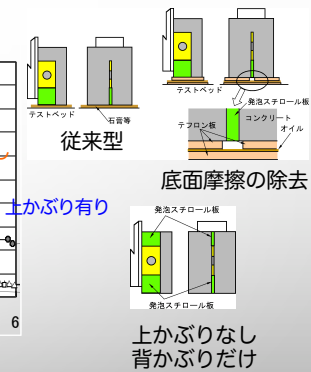
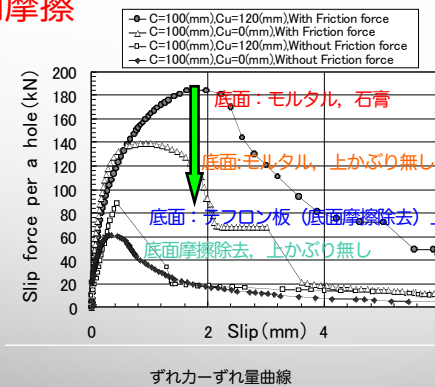
2面せん断破壊

PBL孔内部にコンクリートが残る2面せん断破壊と残らない1面せん断破壊



かぶりと底面摩擦

荷重-ずれ曲線(CT鋼)



かぶりと底面摩擦

実験結果(CT鋼のまとめ)

ずれ耐力は、従来型に比べて

- 1) 底面摩擦を除くと1/2
- 2) 上かぶりを除くと3/4
- 3) 底面摩擦と上かぶりを除くと1/3

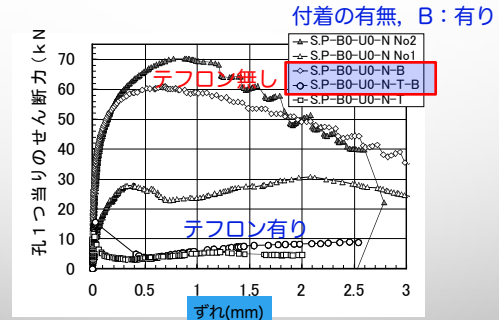
に低下



- ・押し抜き要素試験は、**底面摩擦**に大きく依存する
- ・合成桁等の**実構造物**では**底面摩擦は無い**
- ・従来型(断面積に比例する)評価式では、この現象は表現できない

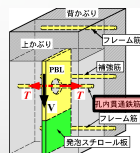
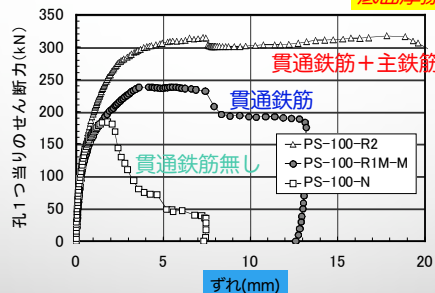
荷重-ずれ曲線(1枚板押し抜き) (追加検証)

底面摩擦



貫通鉄筋 貫通鉄筋の有無 (押し抜き試験)

底面摩擦有り



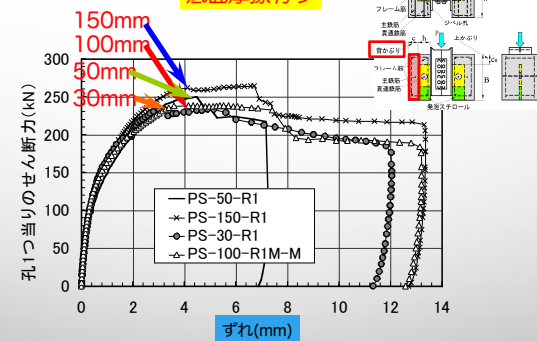
貫通鉄筋があると

- ・ずれ耐力は**低下しない**。ずれは大きい
- ・鉄筋断面積が大きいほど、ずれ耐力大

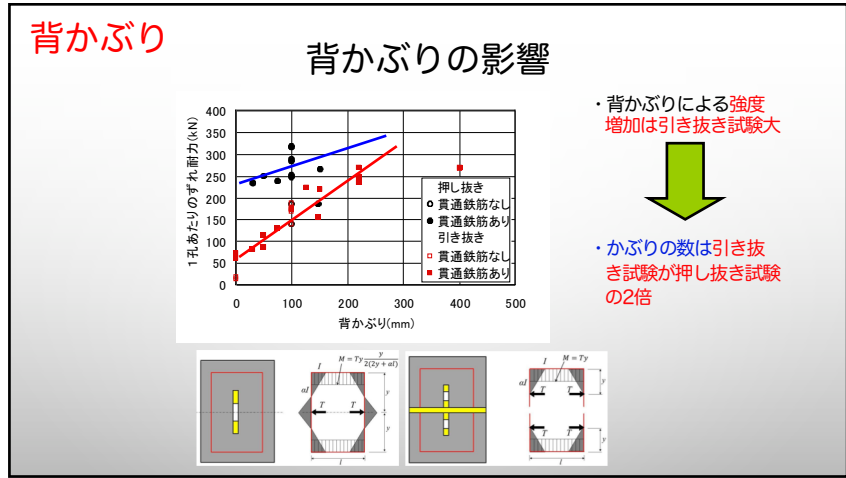
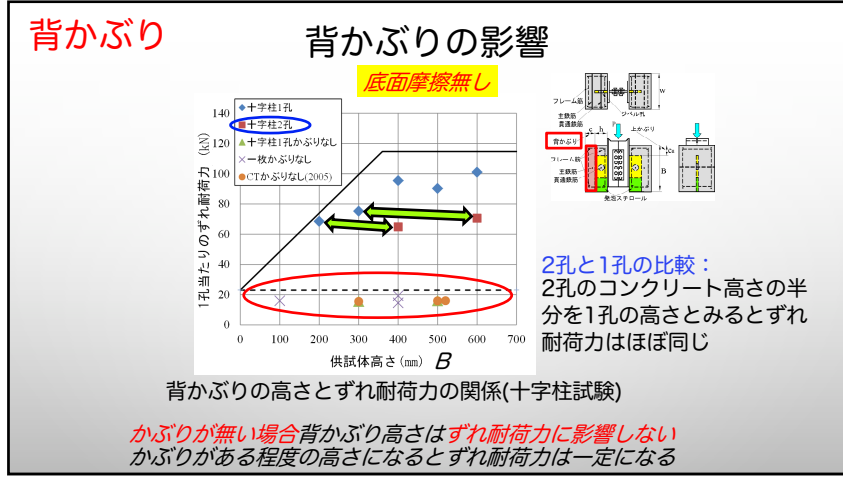
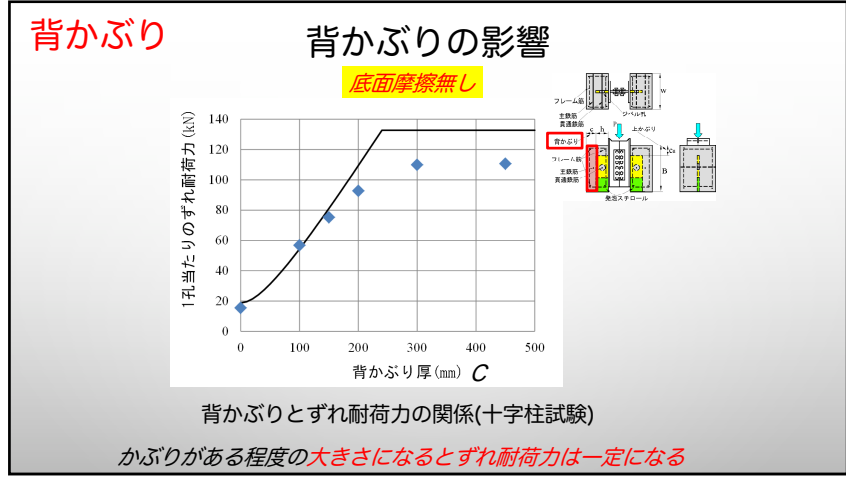
背かぶり

背かぶりの影響

底面摩擦有り



かぶり厚いほどずれ耐力は大きくなる



- ### 観察結果
- #### 押し抜き試験と引き抜き試験のまとめ
- 貫通鉄筋がある場合、無い場合よりずれ耐力は大きい。主鉄筋があるとさらに大きい。
 - 貫通鉄筋がある場合、最高荷重後の耐力低下が緩やかである。貫通鉄筋が無い場合は、コンクリートのひび割れ発生後急激な耐力低下を起こす。
 - 背かぶりが大きいほどずれ耐力は大きくなる。その増加率は、引き抜き試験の方が大きい。
 - 最高荷重時のずれは、押し抜き試験では数ミリ~10MM程度と大きいのに対して、引き抜き試験では、せいぜい1MM未満である。
 - 押し抜き試験の最高荷重後の耐力低下は緩やかであるが、引き抜き試験では耐力低下は急である。

観察結果

押し抜き試験と引き抜き試験のまとめ

- 6) 背かぶりがある場合、かぶりの厚さが大きくなるとずれ耐荷力は大きくなるが、かぶり厚がある程度大きくなると、ずれ耐荷力は一定となる。
- 7) 背かぶりがある場合、かぶりの高さが大きくなるとずれ耐荷力は大きくなるが、かぶり高さがある程度大きくなると、ずれ耐荷力は一定となる。
- 8) 背かぶりが無い場合、ずれ耐荷力はコンクリートのサイズに関係なく一定である。

終局ずれ挙動の解釈 仮定とモデル化

- 破壊時にはPBLプレートに平行なひび割れ（背中のひび割れ）が発生



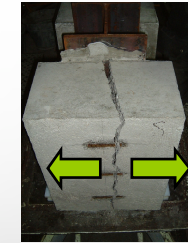
- 割裂力が作用しているに違いない



- コンクリートの強度は拘束状態に依存する



- せん断強度は拘束状態によって変化するのでは？



破壊状態

仮定とモデル化

PBLの破壊メカニズム

- 1) 孔あき鋼板ジベルにずれ力 I が作用すると、孔付近の割裂力やコンクリートの変形、微細ひび割れ発生後の骨材間の噛み合いなどによって、周辺のコンクリートを割裂させようとする力（押し広げ力） I が発生する。
- 2) 押し広げ力は、ずれ力の増加とともに増加し、これがコンクリートの破壊に起因するジベルの破壊（孔内および孔周辺のコンクリートのひび割れ）を発生させる。
- 3) 押し広げ力に対して、コンクリートの拘束因子による抵抗力が発生する。
拘束因子：ずれ耐力試験においては、孔内貫通鉄筋、上かぶり、背かぶり、かぶり内に配置された補強筋やフレーム筋、押し抜き試験ではコンクリートとテストベッドの間の摩擦力がある。もし、これらの拘束がなければ、ずれ耐力は、ジベル孔面のコンクリートのせん断強度のみで決まる。

仮定とモデル化

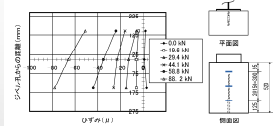
PBLの破壊メカニズム

- 4) PBLの破壊は、押し広げ力が種々の拘束因子による抵抗力を上回ったときに起こる。PBLのずれ耐力(最高荷重)は、ジベル孔コンクリートにひび割れが発生した時点、あるいは孔あき鋼板ジベルプレートの天端にひび割れが発生した時点に対応する。
- 5) ひび割れ発生後、ジベル孔内コンクリートは周辺のコンクリート中を移動する。このとき、ひび割れ面の骨材の噛み合いも押し広げ力の発生要因となる。
- 6) 最高荷重後は、押し広げ力がその時点での拘束因子が保有する抵抗力に釣り合うまで、ずれ耐力は低下し、ずれは増加する。もしも、最高荷重後において、抵抗力がなければ急激なずれ耐力低下を起こす。貫通鉄筋などにより抵抗力が持続できる場合には、ずれ耐力は緩やかに低下する。

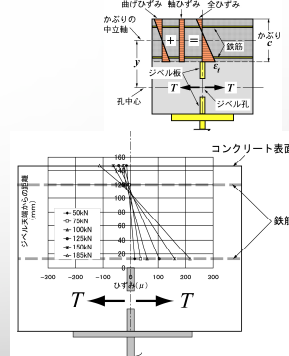
破壊メカニズムの検証

検証

- ・PBLの孔に押し広げ力が作用するならば、かぶりのコンクリートには、引張力と曲げモーメントが発生しているはず



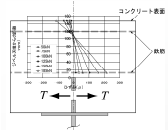
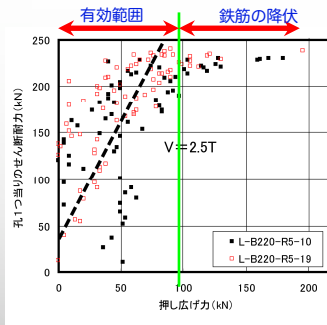
背かぶり部コンクリート表面のひずみ分布 (S-B100-U120-N-T) (圧縮ひずみが出ている)



背かぶり内部コンクリートのひずみ分布 (S-B147-U120-R5-13)

押し広げ力とずれ力の関係

検証

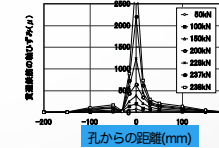
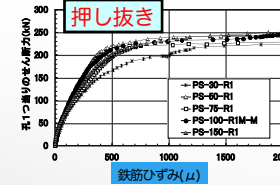


弾性を仮定して算出したので、100kN程度以下が有効範囲である。

$$V_u = V_{int} + 2.5T$$

貫通鉄筋の効果

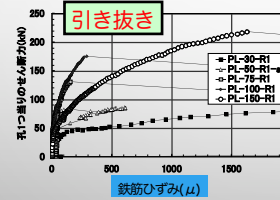
検証



ひずみ分布 (押し抜き)

押し抜き引き抜きとも：
300~500μから急増
→ このあたりが最高荷重

最高荷重後、鉄筋はV字形に変形し、急激な耐力低下を防止する

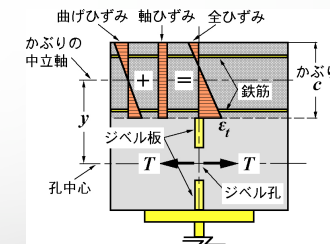


PBLのずれ耐荷力評価式(1)

仮定

【仮定】

- 1) コンクリートは全断面有効
- 2) PBLの天端がコンクリートの引張強度 σ_{ct} (引張りひずみが ε_{ct})になったときにPBLが破壊する
- 3) 押し広げ力 T がコンクリート拘束力を越えたときに破壊する



PBLのずれ耐荷力評価式(2)

$$V_u = V_{int} + 2.5T$$

V_{int} : コンクリート拘束の無いせん断強度

$$V_{int} = 2 \left\{ \frac{\pi d^2}{4} + (n-1)A_s \right\} \tau_{ct}$$

$n = E_s/E_c$, τ_{ct} : せん断強度(=引張強度(= σ_{ct})), d : PBL孔径
 A_s : 貫通鉄筋断面積

PBLずれ耐荷力評価式(3)

$$V_u = V_{int} + 2.5T$$

T : コンクリート拘束力

$$T = T_s + T_{cb} + T_{cu} + T_f$$

- T_s : 貫通鉄筋の拘束力
- T_{cb} : 背かぶりによる拘束力
- T_{cu} : 上かぶりによる拘束力
- T_f : 底面摩擦による拘束力

PBLのずれ耐荷力評価式(4)

$$T = T_s + T_{cb} + T_{cu} + T_f$$

T_s : 貫通鉄筋の拘束力

$$T_s = E_s A_s \varepsilon_s$$

$\varepsilon_s = 400 \mu$: ひび割れ拘束ひずみ
 最高荷重では、ひずみは300~500 μ を考慮

PBLのずれ耐荷力評価式(5)

T_{cb} : 背かぶりコンクリートの拘束力

$$T_{cb} = \frac{f_{ct}}{\frac{e_b y_b}{I_{cb}} + \frac{1}{A_{cb}}}$$

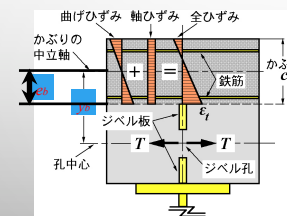
f_{ct} : コンクリート引張強度

I_{cb} : 背かぶりの断面2次モーメント

$$I_{cb} = Bc^3 / 12$$

A_{cb} : 背かぶりの断面積

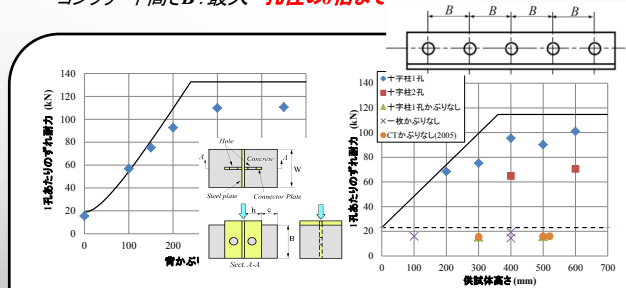
$$A_{cb} = Bc$$



背かぶりの効果

かぶり厚c: 最大 **孔径の5倍まで**

コンクリート高さB: 最大 **孔径の6倍まで**



背かぶり厚とずれ耐力の関係 コンクリート高さBとずれ耐力の関係

PBLのずれ耐荷力評価式(6)

T_{cu} : 上かぶりコンクリートの拘束力

$$T_{cu} = \frac{f_{ct}}{\frac{e_u y_u}{I_{cu}} + \frac{1}{A_{cu}}}$$

合成桁などは上かぶりは無い

e_u : 上かぶりの中立軸からジベル上縁までの距離

I_{cu} : 上かぶりの断面2次モーメント

y_u : ジベル孔中心から上かぶりの中立軸までの距離

$$I_{cu} = hc_u^3 / 12$$

A_{cu} : 上かぶりの断面積

$$A_{cu} = hc_u$$

PBLのずれ耐荷力評価式(7)

T_f : 底面摩擦による拘束力

$$T_f = \mu N$$

μ : 摩擦係数

N : 垂直抗力

上式をずれ耐力式に代入して

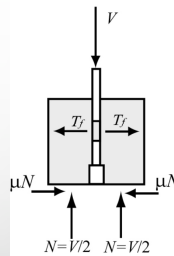
$$= V_u / 2$$

$$V_u = V_{int} + 2.5T$$

$$= V_{int} + 2.5(T_s + T_{cb} + T_{cu} + \mu V_u / 2)$$

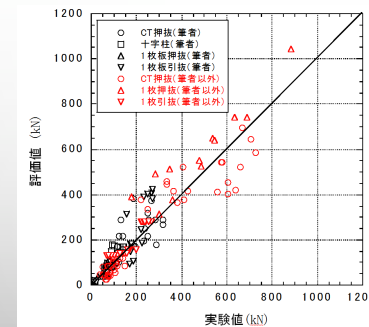
となるから、最終的に次式を得る。

$$V_u = \frac{V_{int} + 2.5(T_s + T_{cb} + T_{cu})}{1 - 1.25\mu}$$

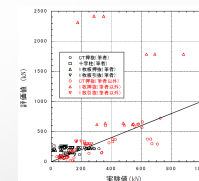


せん断耐荷力評価式の比較

検証



本提案式



Leonhardt

本日の話題提供

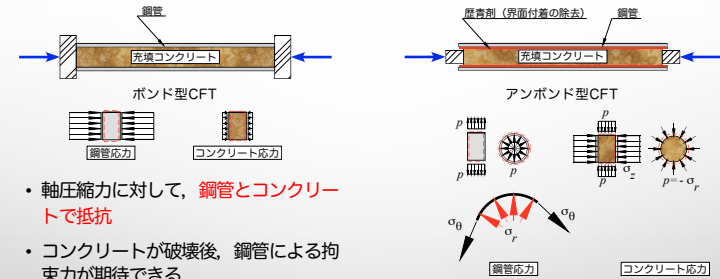
1. 構造解析とモデル化

- ・ 腐食した鋼構造物の残存耐力評価
- ・ 直線および曲線プレートガーダー(はり理論と板殻理論)
- ・ 給水塔の有限要素解析(境界条件)

2. 孔あき鋼板ジベルのずれ耐力評価

3. コンクリート充填鋼管の圧縮座屈

コンクリート充填鋼管の圧縮耐力



- ・ 軸圧縮力に対して、**鋼管とコンクリートで抵抗**
- ・ コンクリートが破壊後、鋼管による拘束力が期待できる
- ・ 曲げに対して優れた変形能を発揮

- ・ 軸圧縮力に対して**コンクリートのみで抵抗**
- ・ **鋼管は周方向引張応力しか発生しない**
- ・ コンクリートは鋼管による拘束力を受ける

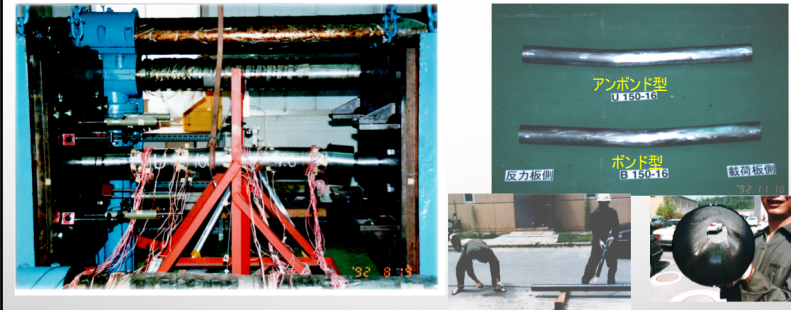
アンボンド型充填鋼管柱は座屈するか？

- ・ 軸圧縮力により、**コンクリートは体積膨張**して、鋼管（円筒シェル）の内側を押しつけ、**鋼管に内圧**を発生させる。
- ・ 鋼管は、コンクリートの膨張に抵抗し、コンクリートを拘束する。
- ・ コンクリートは、**鋼管からの外圧と軸圧縮力**を受けて3軸応力状態となり、コンクリートの見かけの強度は上昇する。
- ・ 鋼管には、コンクリートからの内圧により周方向応力（**引張膜応力**）しか発生しない。

座屈は**圧縮**で発生するから、**鋼管は座屈しないのでは!?**

アンボンド型CFTは座屈しないのか?

CFTの圧縮耐力実験



- ・ 実験結果は、ボンド型、アンボンド型ともに、曲げ座屈が発生した。
- ・ 座屈荷重は、両者ともほぼ同じであった。

何故アンボンド型充填鋼管柱が座屈するのか？

• 「コンクリート柱が座屈する」と、鋼管は、コンクリート柱の座屈に抵抗するはずである。

そもそも座屈は圧縮により発生するから、鋼管は座屈しないはず!

• コンクリートはコンファインド効果により強度上昇するので、座屈後はボンド型CFTよりも優れているのではないかな?

そこで

以下の解析モデル

内圧を受ける鋼管(円筒シェル)の座屈解析(シェル解析)

軸力と側圧を受ける中実棒の座屈解析(3次元立体解析)

を実施した

内圧を受ける鋼管(円筒シェル)の座屈解析(シェル解析)

解析結果は、座屈固有値は負になり(外圧による座屈が現れ)、棒としての曲げ座屈モードは現れなかった

Galambosによる説明：等方応力状態(b)が基準となるので、右図のように、応力状態(a)は母線方向に圧縮応力作用する場合(c)と同じであるので、

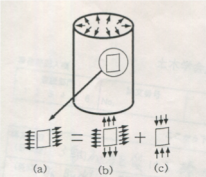
$$P_{cr} = Ap_{cr}$$

となったときに座屈する。ここに、

P_{cr} : 円筒シェルが軸力を受けて座屈するときの座屈荷重

p_{cr} : 円筒シェルの内圧

A : 円筒シェルの断面積



実現象としては正しいように思えるが、なぜ「等方応力状態が基準となる」のか理解できない

*) ed. By Galambos, I. V. "Guilde Stability Design Criteria for Metal Structures", 4th ed., John Wiley & sons, 1976.

軸力と側圧を受ける中実棒の座屈解析

仮想仕事の原理による3次元弾性体の座屈問題解析

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_V \sigma_{ij}^{(0)} \frac{1}{2} \delta (u_{k,i} u_{k,j}) dV = 0$$

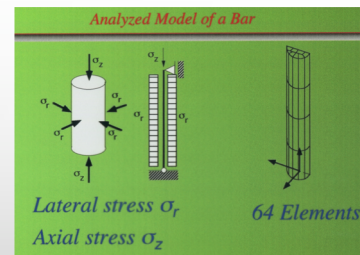
$$|K + \lambda K_\sigma| = 0$$

$$K = \int_V B^T D B dV, \quad K_\sigma = \int_V G^T S^{(0)} G dV$$

$$S^{(0)} = \begin{bmatrix} \sigma_x^{(0)} & \tau_{xy}^{(0)} & \tau_{xz}^{(0)} \\ \tau_{xy}^{(0)} & \sigma_y^{(0)} & \tau_{yz}^{(0)} \\ \tau_{xz}^{(0)} & \tau_{yz}^{(0)} & \sigma_z^{(0)} \end{bmatrix}$$

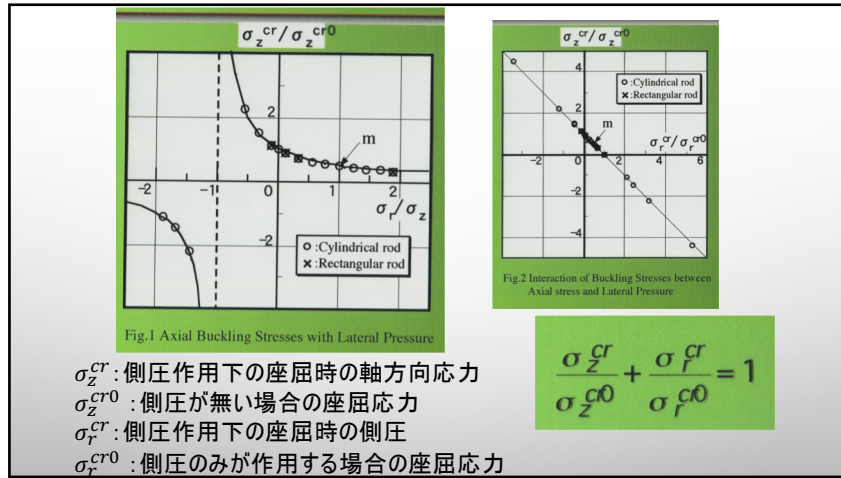
要素：20節点アイソパラメトリック2次要素，固有値解析による座屈荷重解析

解析結果



Stress state	Buckling stress	Buckling mode
	188.3 (KPa)	
	190.2 (KPa)	
	95.0 (KPa)	

座屈モードはいずれも棒の曲げ座屈であるが、側圧にが作用すると座屈荷重が低下する



一方、実験もしてみました

供試体：直径1cmのウレタンゴム

3軸圧密試験機

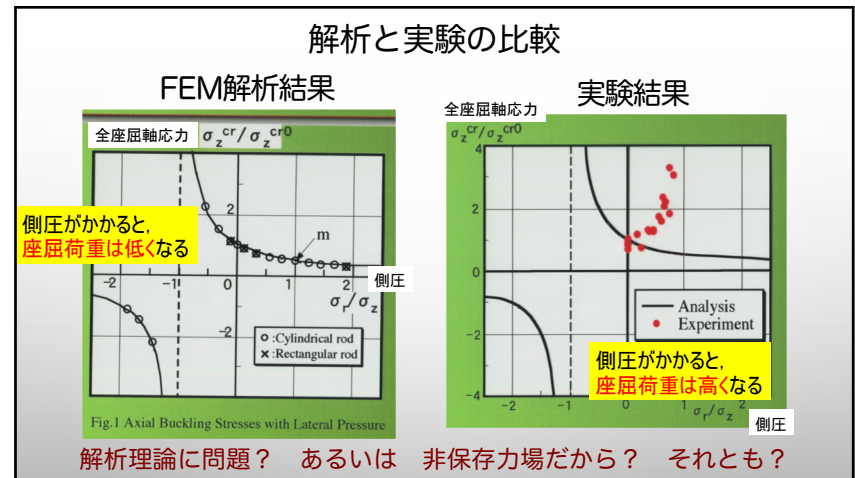
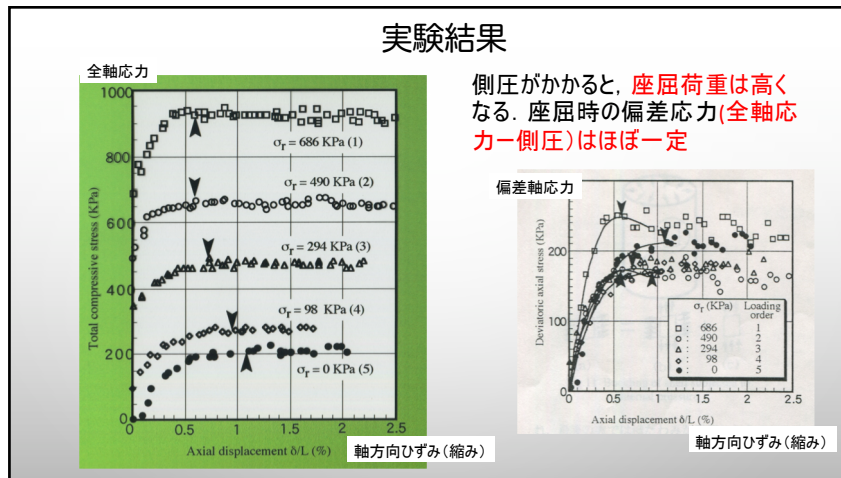
載荷風景

引張試験結果

応力(kPa)

ひずみ

引張試験結果



最後に

アンボンド型充填鋼管柱は、施行実績は少なく現在ではほとんど採用されていないようですが、この種の円形柱は、コンファインド効果を大変合理的に利用できる構造形式と考えています。今後の構造物への応用技術の開発を期待しているところです。

ただ、この場合でも、載荷実験では通常のボンド型CFTと同様に、圧縮軸力に対して曲げ座屈が発生しました。しかし、その座屈メカニズムについては、登壇者は未だ説明できていません。

さらに、円筒シュル構造とした内圧を受ける鋼管、および側圧を受ける立体棒について、有限要素解析から得た座屈荷重は、実験結果と真逆の性状を示したことの理由も、現在のところ説明できていません。