

第5回 複合構造セミナー(土木学会) 2021.12.14

四十どころか、
いまだに「惑いまくり」です、、、
— 鉄筋コンクリート構造から脱皮して —

浙江大学 趙 唯堅

略歴



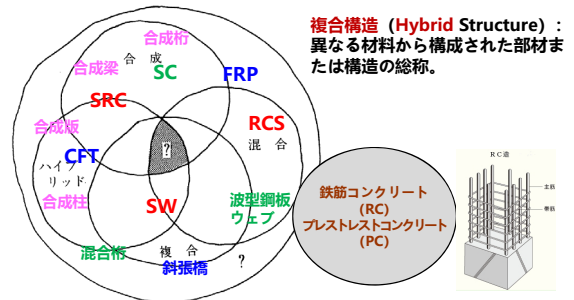
- 1982年 上海同济大学 卒業
- 1982年 瀋陽建築大学 助教/講師
- 1988年 中国政府派遣研究者 長岡技術科学大学
- 1993年 長岡技術科学大学 修士修了
- 1996年 長岡技術科学大学 博士修了
(丸山久一先生に師事)
- 1996年 大成建設(株) 技術研究所/技術センター
研究員/主任研究員/首席研究員
- 2018年 浙江大学 教授

研究経歴

- ★鉄筋コンクリート構造基礎理論
鉄筋コンクリート柱主筋の座屈 / 鉄筋コンクリート部材のひびわれ幅の算定方法 / 鉄筋コンクリートフレーム構造の非線形解析方法 / 鉄筋コンクリート構造の耐震性能
- ★複合材料およびそれを用いた構造の設計方法
FRP補強材を用いた部材の力学性能及び設計方法 / 超高強度繊維補強コンクリートUFCの力学性能および設計方法 / 波型鋼板ウェブ手延術の研究 / UFC-PC床版の疲労性能
- ★各種構造および施工法の技術開発
Strand場所打ち杭工法 / プレート定着型せん断補強鉄筋Head-bar / 巨大断面シールドトンネルMMST工法 / 新幹線PCまくら木の開発 / プレキャスト床版接合方法の開発 / 高速道路更新技術 / 東京外かく環状道路地中拡幅部の構造検討

— 鉄筋コンクリート構造から脱皮して —

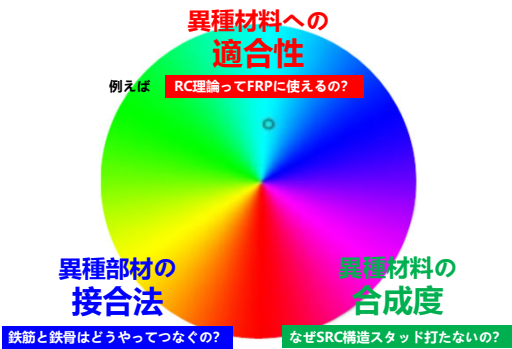
複合構造



複合構造 (Hybrid Structure) :
異なる材料から構成された部材または構造の総称。

異なる材料の断面内での複合は合成構造 (Composite Structure)
部材または構造レベルでの組合せは混合構造 (Mixed Structure)

複合構造理論の3本柱



(1) RC理論ってFRP部材に適用できるの?

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

ガラス繊維

炭素繊維

Composites Solutions Applied Throughout the World

アルテック FRP

(株) 光レジン工業

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

新宮橋 (石川県, 1989年)
世界発, FRPケーブル使用

小松マテール(株)の取組み (2015年)

SABKOMA
カーボンファイバー

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

CFRPロッド AFRPロッド CFRPグリッド CFシート

1980年代後半～, 鉄筋代替・既設構造物補強

- FRP補強コンクリート部材
 - 曲げ補強
 - ロッド補強
 - シート接着
 - せん断補強
 - スターラップ
 - シート巻き接着

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

応力

ひずみ

FRP, 破断

鉄筋降伏強度 $f_y=400 \text{ N/mm}^2$
鉄筋降伏ひずみ $s_y=0.002$

コンクリート圧縮強度 $f_c=30 \text{ N/mm}^2$
コンクリート圧縮ひずみ $e_c=0.003$

異方性

鉄筋代替 既設構造物補強

鉄筋コンクリート (降伏する材料)

FRP補強コンクリート (降伏しない材料)

コンクリート構造

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

- FRP補強コンクリートはり
 - 曲げ補強
 - ロッド補強
 - シート接着
 - せん断補強
 - スターラップ
 - シート巻き接着

CFRPグリッド

題: 「格子状連続繊維補強コンクリートはりの曲げひび割れ幅とたわみ評価」 (1998)

FRPロッド FRPロッド+鉄筋 CFRPグリッド

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

- FRP補強コンクリートはり
 - 曲げ補強
 - ロッド補強
 - シート接着
 - せん断補強
 - スターラップ
 - シート巻き接着

室園工大 岸徳光教授: 「AFRPロッドを埋設したRC梁の曲げ耐力性状に関する実験的研究」 (2003)

FRP+鉄筋の混合配置
FRPはロッド埋めとシート接着
計算は非線形性を考慮した断面分割法

R 試験体 S 試験体 計算結果

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

FRP補強コンクリートは

曲げ補強

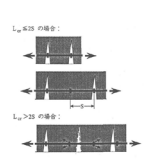
せん断補強

ロッド補強

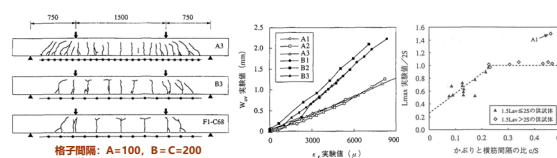
シート接着

スターラップ

シート巻き接着



超: 「格子状連続繊維補強コンクリートはりの曲げひび割れ幅とたわみ評価」(1998)



格子間隔: A=100, B=C=200
かぶり: A=B=43, C=68

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

FRP補強コンクリートはり

曲げ補強

せん断補強

ロッド補強

シート接着

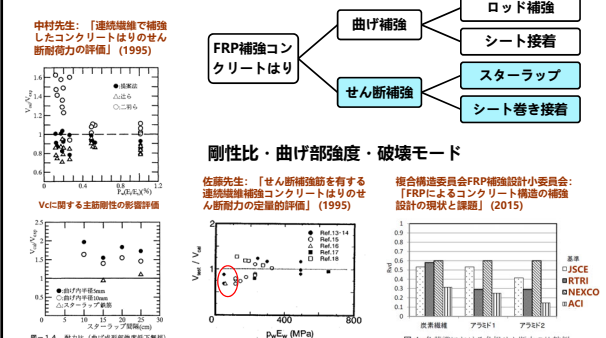
スターラップ

シート巻き接着

剛性比・曲げ強度・破壊モード

佐藤先生: 「せん断補強を有する連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力の定量的評価」(1995)

橋本先生: 「FRPによるコンクリート構造の補強設計の現状と課題」(2015)



RC理論ってFRP部材に適用できるの？

せん断耐力 修正トラス理論 (累加強度)

$$V_u = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = 0.2(p_f f_c')^{1/3} (d/1000)^{-1/4} [0.75 + 1.4(a/d)] b_w d \quad (2)$$

$$V_s = A_w f_{wy} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \cdot z / s \quad (3)$$

V_c について:

- ①主筋比の影響: 1/3乗法則, 1/4乗法則
- ②主筋が連続繊維補強材の場合, 弾性係数比(E_f/E_c)で修正, 検討の余地
- ③せん断補強された場合, V_cに対するせん断補強の影響は
- ④a/dによって積数の算定式, 境界不明確, 使用不便

V_s について:

- ①鉄筋でせん断補強の場合, 降伏と仮定している
- ②連続繊維でせん断補強の場合, 終局時の応力は一律でない
- ③連続繊維でせん断補強の場合, V_sに対する主筋の影響は
- ④せん断補強筋が降伏しない場合, 破壊形式の判定とせん断耐力算定

➡ 補強筋材料の種類によらない統一的なせん断耐力評価方法?

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

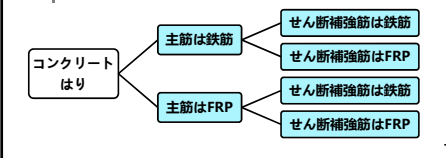
コンクリートはり

主筋は鉄筋

せん断補強筋は鉄筋

主筋はFRP

せん断補強筋はFRP



超: 「連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力評価とせん断耐力評価」(1997)

それまでせん断問題に関する研究, 特に実験的研究では, せん断領域の変形性状を詳しく検討したものは少なかった。

梁諸元:
断面高さ300-850mm, a/d=2-4, ノッチ有無
主筋: 格子状CFRP, せん断筋: ループ状C/GFRP, 鉄筋
主筋比1.0-3.2%, せん断補強筋比0.21-0.86%
FRP弾性係数0.3-1.1, 強度600-1300MPa, 伸び1.2-2.8%

破壊形式:
斜め引張破壊S₁, せん断圧縮破壊S₂, せん断補強筋破壊S₃

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

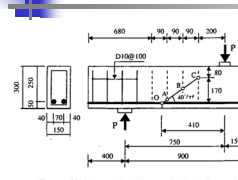


図-1 供試体の形状寸法および配筋例 (No.5A)

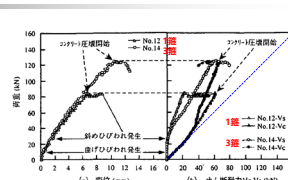


図-3 コンクリートの圧縮軟化による破壊の進行

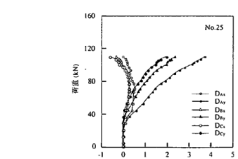


図-8 荷重-主せん断開口ひび割れ変位の関係

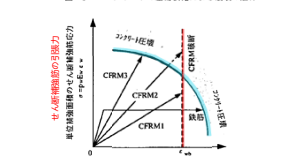


図-4 せん断破壊モードの概念図

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

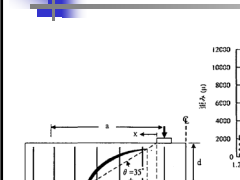
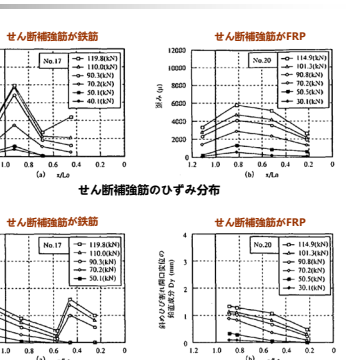


図-5 せん断破壊領域の長さL₀および角度θ



せん断補強筋のひずみ分布

せん断補強筋のひずみ成分

RC理論ってFRP部材に適用できるの?

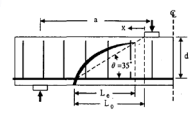


図-5 せん断破壊領域の長さL₀および角度θ

$L_0 = d / \tan(35^\circ)$
 $L_c = 0.85L_0$
 $\eta_w = 1 - 3.3(x/L_0 - 0.7)^2$

L_0 : 35°せん断破壊領域の水平投影長さ
 L_c : せん断補強筋の有効区間の長さ
 η_w : せん断補強筋ひずみの分布係数 (形状関数)

■形状関数の特徴:
 ①せん断補強筋の有効区間長さL_c=0.85L₀
 ②頂点位置がx/L₀=0.7にある2次放物線分布
 ③有効区間長さL_cにおけるη_wの平均値は0.75

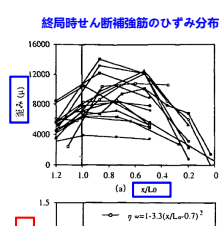


図-13 せん断補強筋の終局歪み分布

RC理論ってFRP部材に適用できるの?

トラス機構におけるせん断耐力V_sの定式化

■諸要因がせん断補強筋終局ひずみに及ぼす影響:
 (せん断圧縮破壊した試験体を用いてひずみ最大値を整理)
 $\epsilon_t = 0.009$
 $\lambda_w = 1.8 / (1.6p_w' + 1)$
 $\lambda_s = 1.8 - 0.225a/d$

■破壊領域のせん断補強筋終局ひずみの最大値と平均値:
 $\epsilon_{w,max} = \epsilon_t \lambda_w \lambda_s = 0.0023(8-a/d) / (0.625 + p_w') \leq \epsilon_{wb}$
 $\sigma_{w,max} = E_w \epsilon_{w,max} = 0.0023E_w(8-a/d) / (0.625 + p_w') \leq f_{wb}$
 f_{wb} と ϵ_{wb} : せん断補強筋曲げ加工部の破壊強度とひずみ

■上式は変形条件および破壊モードの判別条件

■トラス機構におけるせん断耐力V_s:
 $V_s = \int (\sigma_w A_w / s) dx$ (←L_c区間内σ_wの積分)
 $= A_w \sigma_{w,max} / s \cdot \int \eta_w dx$ (←L_c区間のη_w平均は0.75)
 $= 0.91 A_w \sigma_{w,max} d / s$ (←L_cとL₀とd(35°)の関係)
 $= A_w \sigma_{w,max} z / s$ (←z=d/1.1と仮定)

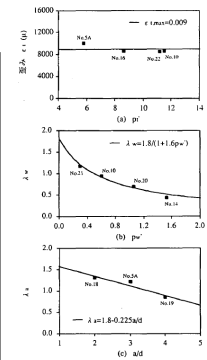


図-14 諸要因がせん断補強筋終局歪みの最大値に及ぼす影響
 図-15 諸要因がせん断補強筋終局歪みの平均値に及ぼす影響

RC理論ってFRP部材に適用できるの?

補強筋材料によらない統一的なせん断耐力評価方法

$V_u = V_c + V_s$
 $V_c = 0.07 p_t^{1/3} f_c^{2/3} (d/1000)^{1/4} [0.34 + 3(a/d)] b_w d$
 $V_s = A_w \sigma_{w,max} z / s$

σ_{w,max}: せん断補強筋応力分布の最大値 (MPa)
 $\sigma_{w,max} = 0.0023 E_w (8-a/d) / (0.625 + p_w') \leq f_{wb}$ または f_{wy}
 p_t' : 軸方向引張補強筋の引張剛性比 (%)
 $p_t' = 100 A_w / (b_w d) \cdot (E_w / E_c)$
 p_w' : せん断補強筋の引張剛性比 (%)
 $p_w' = 100 A_w / (b_w s) \cdot (E_w / E_c)$
 E_c と E_w と E_s : 主筋とせん断補強筋とコンクリートの弾性係数 (MPa)
 $E_c = 8500 f_c^{1/3}$
 f_{wb} : せん断補強FRP曲げ加工部の破壊強度 (MPa)
 f_{wy} : せん断補強鉄筋の降伏強度 (MPa)

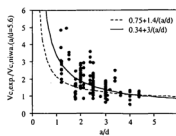


図-20 せん断力/軸力比較に関する再検証

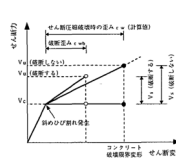


図-15 せん断耐力評価方法の概観図

RC理論ってFRP部材に適用できるの?

钢筋混凝土とFRP筋混凝土の統一抗剪設計理論

■V_cはせん断補強筋の引張剛性比p_t'の影響を受けない; V_sは主筋の引張剛性比p_t'の影響を受けない。V_cとV_sを切り離す。

■せん断補強筋が鉄筋の場合、式V_s=A_wσ_{w,max}z/sにおいて、σ_{w,max}が一律にf_{wy}、破壊領域が0.75倍に減少: 45度トラス。

■破壊モードはσ_{w,max} ≤ f_{wb}, f_{wy} (ε_{w,max} ≤ ε_{wb}, ε_{wy})より判定。
 σ_{w,max} > f_{wb}はFRP破壊; σ_{w,max} > f_{wy}は鉄筋降伏。

■提案方法は、異なる補強材と異なる破壊モードを統一的に評価できる。FRPのみならず、高強度鉄筋にも適用可能。

■設計への提言:
 ①斜め引張破壊とせん断補強筋破壊は設計上避けるべき。
 ②FRPせん断補強筋の配置方向を部材軸と90°としてよい。

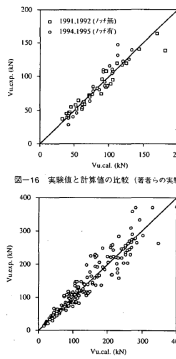



図-16 実験値と計算値の比較 (要するの実験)
 図-18 実験値と計算値の比較 (現地の実験)

語: 丸山 (1997.11): 「連続縦補強コンクリートはりのせん断耐荷機構とせん断耐力評価」

RC理論ってFRP部材に適用できるの?



FRP補強コンクリート部材

- 曲げ補強
 - ロッド補強
 - シート接着
- せん断補強
 - スターラップ
 - シート巻き接着

○ 曲げ変形条件あり
 ・中立軸繰返し計算
 ・Fiberモデル解析

× せん断変形条件なし
 ・耐力算定式
 ・非線形FEM解析

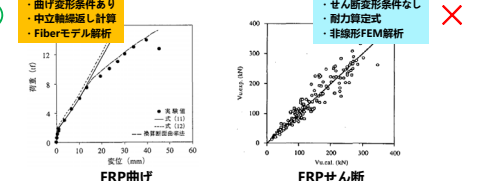


図-19 FRP曲げとせん断

(2) なぜSRC鉄骨柱にStud 打たないの?

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

CFT

SRC

合成桁
コンクリート床版

合成版
コンクリート
鋼板

どこが違う?

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

異種材料間の応力伝達:
ずれ止め (シアコネクタ)

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

ストランド場所打ち杭工法
つくばエクスプレス建設に伴うJR秋葉原駅改良
第3回国土技術開発賞, H16土木学会技術賞

従来の鉄筋建て込み作業

本工法によるコリテッキン建設

多段引出

細径異形PC鋼棒

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

$a/d=3.6$

No.1-異形鉄筋
14-D16

No.2-SRD
12-φ12.4mm
インデントあり

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

No.1-異形鉄筋

No.2-SRD

ひびわれ幅の比較

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

No.1 (異形鉄筋, 泥水10%)

No.2 (SRD, 泥水10%)

付着実験 (C36, SRD)

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

コンクリートBeam 主鉄筋Truss

軸直角Beam(剛体)

付着バネSpring

主鉄筋Truss

BeSTモデルを開発

コンクリート断面, 主鉄筋, 付着滑りをビーム, トラス, パネ要素でモデル化した曲げ解析モデル (付着滑りを考慮したFiberモデル)

- 付着滑りによる曲げ剛性の低下
- 付着滑りによる曲げ耐力の低下

付着の影響 (No.2)

荷重 (tonf)

スパン中央たわみ (mm)

— 実験
--- Fiberモデル
--- BeSTモデル, 付着有
--- BeSTモデル, 付着無

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

①長と短 (端部拘束よりアーチ機構を形成)
②単独役と共同役 (コンクリートの貢献が少ない)
③使用状態と終局状態 (耐力への付着の貢献が少ない)

摩擦係数0, 蓋なし

摩擦係数0.3, 蓋なし

摩擦係数0, 蓋あり

荷重 (tonf)

変位 (mm)

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

①CFT部材の鋼管とコンクリート付着の解析的検討

水平力-水平変位関係

μ=1.0

μ=0.0

柱基部

μ=0.0

μ=1.0

コンクリートの最小主応力 (最大耐力時)

⇒ 鋼管とコンクリート界面にジョイント要素
接触時: 法線方向⇒剛; 接線方向⇒クーロン摩擦
乖離時: 法線方向も接線方向も荷重伝達しない
⇒ 摩擦係数を0.0と1.0で解析, 違いを検討
⇒ 結果: 剛性や最大耐力に大きな違いはない
付着の影響は少ない。

(橋構造委員会, コンクリート充填鋼管部材の活用に関する調査研究小委員会 報告書より)

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

②CFT部材の充填コンクリート空隙の影響の解析的検討

水平力-水平変位関係

空隙なし

空隙あり

完全充填

空隙あり

コンクリートの最小主応力 (最大耐力時)

⇒ 上端コンクリートを1層分割除, 未充填を模擬 (摩擦係数は0.4)
⇒ 完全充填と未充填を解析, 違いを検討
⇒ 結果: 最大耐力が完全充填に比べ低い
空隙により一体性が確保されず
充填コンクリートに圧縮応力が伝達されない

(橋構造委員会, コンクリート充填鋼管部材の活用に関する調査研究小委員会 報告書より)

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの?

①長と短 (材端拘束, 梁とアーチ機構)
②梁と柱 (常時の応力状態)
③非拘束状態と拘束状態 (摩擦条件)
④単独役と共同役 (逆向と同向)
⑤使用状態と終局状態 (付着貢献度)

付着の影響 (No.2)

荷重 (tonf)

スパン中央たわみ (mm)

— 実験
--- Fiberモデル
--- BeSTモデル, 付着有
--- BeSTモデル, 付着無

図-24 中央集中荷重を受ける合戦ばり

スタッド
コンクリートスラブ
鉄骨はり
ひずみ度分布

番外編: ずれ止め (1)

型鋼ずれ止め, SSSコネクタ (大成建設) Shape-Steel Shear Connector

プレキャスト床版 主桁接合 箱抜き 欠損対策:
①箱抜きを小さくしたい
②高耐力・高剛性のずれ止め
方法: コンクリートの支圧効果の活用

形鋼を寸切り, 鋼桁に溶接

コンクリート床版

充填コンクリート

孔あき鋼板

形鋼ずれ止め

側面せん断伝達 (コネクタ)

前面支圧効果

スタッド

孔あき鋼板

形鋼ずれ止め

ずれ止めのせん断伝達機構

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

主要な実験結果

- ①エンドプレート： 接続鉄筋が降伏する前に降伏。
- ②コンクリート： 許容荷重でひびわれが発生。接続鉄筋が降伏する前に隅部が同所を破壊開始。
- ③接続鉄筋： フープ補強の場合、接続鉄筋は降伏。
- ④フープ鉄筋： 接続鉄筋が降伏する時に降伏直前。
- ⑤支持板： 部分的に降伏に達した。
- ⑥支圧板： 接続鉄筋降伏応力の2/3は支圧板分担。

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

主要な実験結果

- ①エンドプレート： 接続鉄筋が降伏する前に降伏。
- ②コンクリート： 許容荷重でひびわれが発生。接続鉄筋が降伏する前に隅部が同所を破壊開始。
- ③接続鉄筋： フープ補強の場合、接続鉄筋は降伏。
- ④フープ鉄筋： 接続鉄筋が降伏する時に降伏直前。
- ⑤支持板： 部分的に降伏に達した。
- ⑥支圧板： 接続鉄筋降伏応力の2/3は支圧板分担。

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

主な解析結果

- ①解析における破壊のプロセスは、隅角部コンクリート降伏⇒エンドプレート降伏⇒接続鉄筋降伏となっている。
- ②接続部耐力はエンドプレートの物性に支配されている。設計ではエンドプレート降伏を避けるべきである。
- ③本解析は、設計へ適用の観点から、2次元モデルを使用した。3次元解析や支点次下、フープ補強効果の評価は課題である。

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

隅角接続部正負交番荷重試験

直線接続部曲げ荷重試験

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

第二東名富士川橋

鋼：コンクリート接合アーチ橋、スパン265.0mは橋台構造世界一、RCアーチリブ、RC直線橋、鋼2主桁およびPC採版の橋台構造

鋼桁とRC支柱剛結構造
経済性、維持管理および耐震性の向上

R: 剛結構造, E: ゴム支承

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

剛結構造の課題

- 従来の剛結構造は、桁の応力は横桁を介して下部構造へ伝達
- 本橋では横桁を介さず、桁に配置した孔あき鋼板ジベルによって直接橋脚へ伝達させる機構が特徴であるが、設計手法が確立していない
- 3次元FEM解析を行い、各部位の応力を算出して寸法配当を決定
- 設計の妥当性を検証するため確認実験

試験体形状 (上下を逆さま)

試験体設置状況 (上下を逆さま)

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

伝達経路	伝達内容
床版	合流時の軸力・せん断力
鋼筋-孔あき鋼板シール-鋼脚	合流時の軸力・曲げモーメント
鋼筋-ベースプレート-鋼脚	合流時の曲げモーメント・せん断力

桁回転する際、下フランジ周辺に3方向の引張・せん断応力が発生

③ 鉛直方向
④ 鉛直方向
⑤ 鉛直方向

桁周辺部の補強

鋼筋の軸力と曲げモーメントの70%以上はPBLからRC構造へ、孔あき鋼板シールの設置方向は水平65%有効に対し鉛直は5%

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

性能確認実験

- 設計想定荷重に対して、剛結部の応力が解連りに現れている
- 想定外の荷重に対して、剛結部は脆性的な破壊が生じていない
- 剛結部周辺は顕著な損傷が認められず、適切補強された
- PBLによる鋼筋とRC構造の剛結構造は良好な耐荷性能

試験体および荷重方法

荷重-変位履歴曲線

孔あき鋼板の構軸方向ひずみ分布

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

- ① 鉄筋と鉄骨の直接接合はまれ
- ② コンクリート介在の接合が多い
- ③ 剛結は剛域より確保される
- ④ 剛域とはコンパウンドコンクリート
- ⑤ 閉鎖鋼版では剛域を形成しやすい

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

鋼部材とRC部材の接合には種々の形態が考えられ、その形態ごとに照査を行う必要がある。しかし現状では、種々の接合部に対して照査を行う方法は一般化されていない。

土木学会 複合構造標準示方書【異種部材接合部編】では:

- 1) ずれ止めや支圧などにより応力を伝達する構成要素を「伝達要素」と定義、適切な力学モデルを用いて、接合部の設計断面力を伝達要素の伝達力に変換して照査する。
- 2) 複数の伝達機構がある場合、変形の適合条件を考慮して各伝達要素の分担割合を求める。それが困難な場合、主要な1つの伝達要素のみを考慮して照査を行うものとする。

まだまだ感います

- ? 主筋座屈とコアコンクリート圧壊はどっちが先なの？
- ? 鉄筋コンクリート造と鉄骨造って、どっちが安いの？
- ? 鉄筋の太さって、どれくらいでいいの？
- ? ラーメン構造と耐震壁構造の耐震性能って、どっちがいいの？
- ? 鉄筋の付着強度って、どのくらいで足りるの？
- ? コンクリート構造のFEM解析って、要素分割は細かいほどいいの？
- ? なぜ道路橋のコンクリート床版は許容応力度設計なの？
- ? 断面塑性設計と骨組み弾性計算の矛盾って、いつ解消できるの？
- ? ずれ止めの押し抜き試験では、試験体の下面の境界条件はどうすべきか？
- ? プレキャスト工法って、環境メリットはどれだけのもの？

.....

まとまらない話でsumimasendesita!

ご清聴ありがとうございました!