

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 上海同済大学 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/主席研究員
- 2018年 浙江大学 教授



Zhejiang University / 浙江大学
学部数36 (文, 理, 法, 芸術, 外国語, 工, 農, 医, 動物, 情報, 環境, 教育, ...)
教職員数約3700, 学生数約55000, うち学部生/修士/博士=2.5/2.0/1.0, 留学生約6800

College of Civil Engineering and Architecture / 建築工程学院
Department of Civil Engineering Department of Architecture
Department of Hydraulic Engineering Department of Regional and Urban Planning



研究経歴

★鉄筋コンクリート構造の基礎研究

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

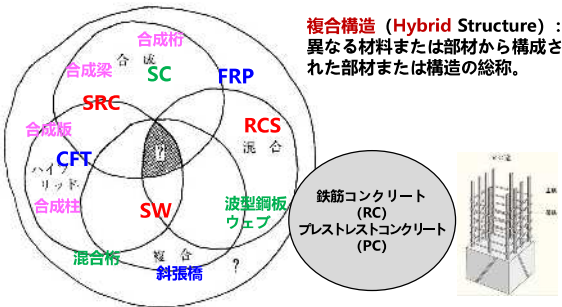
FRP補強材を用いた部材の力学性能及び設計方法 / 超高強度繊維補強コンクリートUFCの力学性能および設計方法 / 波型鋼板ウェブ手延桁の研究 / UFC-PC床版の疲労性能

★各種構造および施工法の技術開発

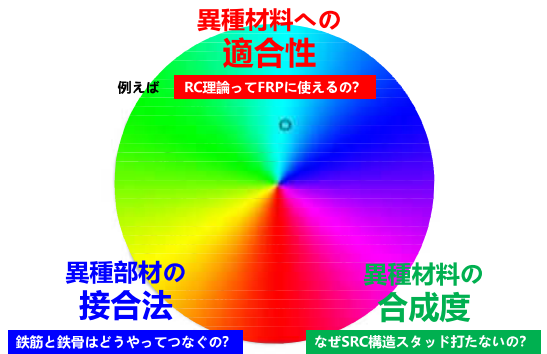
Strand場所打ち杭工法 / プレート定着型せん断補強鉄筋Head-bar / 巨大断面シールドトンネルMMST工法 / 新幹線PCまくら木の開発 / プレキャスト床版接合方法の開発 / 高速道路更新技術 / 東京外かく環状道路地中拡幅部の構造検討

— 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?

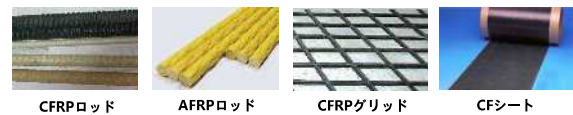
RC理論ってFRP部材に適用できるの?



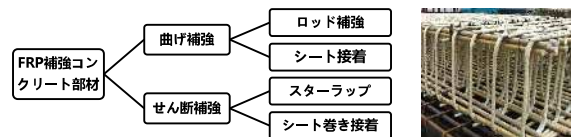
RC理論ってFRP部材に適用できるの?



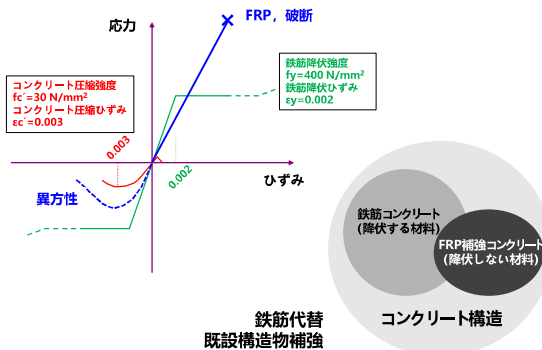
RC理論ってFRP部材に適用できるの?



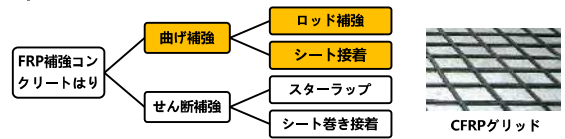
1980年代後半～, 鉄筋代替・既設構造物補強



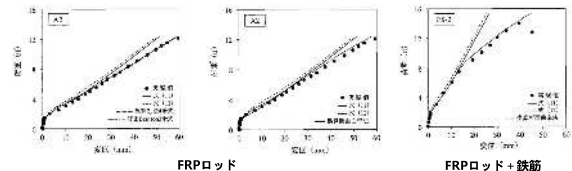
RC理論ってFRP部材に適用できるの？



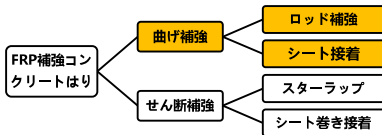
RC理論ってFRP部材に適用できるの？



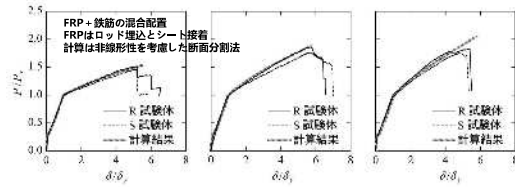
題：「格子状連続繊維補強コンクリートはりの曲げひび割れ幅とたわみ評価」(1998)



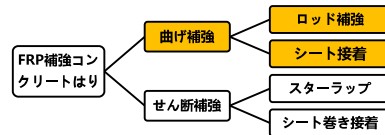
RC理論ってFRP部材に適用できるの？



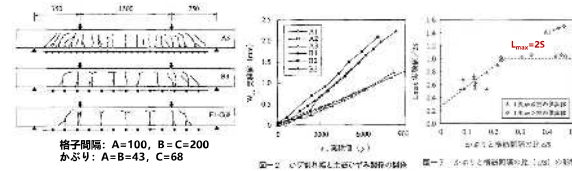
室蘭工大 岸徳光教授：「AFRPロッドを埋設したRC梁の曲げ耐力に関する実験的研究」(2003)



RC理論ってFRP部材に適用できるの？

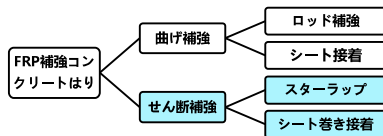
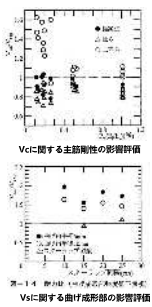


題：「格子状連続繊維補強コンクリートはりの曲げひび割れ幅とたわみ評価」(1998)



RC理論ってFRP部材に適用できるの？

中村先生：「連続繊維で補強したコンクリートはりのせん断耐力の評価」(1995)

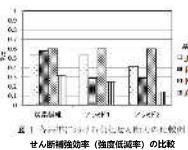


剛性比・曲げ部強度・破壊モード

佐藤先生：「せん断補強筋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)



複合構造委員会FRP補強設計小委員会：「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？

RCせん断耐力式 修正トラス理論 (経験式)

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

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

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

V_c について:

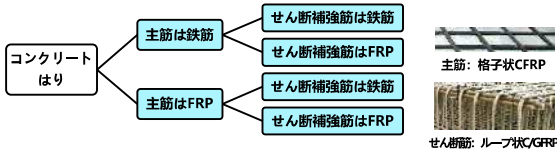
- ① 主筋比の影響: 1/3乗法則, 1/4乗法則
- ② 主筋が連続繊維補強材の場合, 弾性係数比(E_t/E_s)で修正, 検討の余地
- ③ せん断補強された場合, V_c に対するせん断補強筋の影響は
- ④ a/d によって複数の算定式, 境界不連続, 使用不便

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, 破壊形式の判定と耐力算定できない

⇒ 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？



題：「連続繊維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」(1997)

せん断補強筋の応力は変形が決まる。

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。

- 修正トラス理論では鉄筋の降伏を前提
- せん断変形の複雑さおよび測定困難

降伏しない材料、せん断変形挙動の解明は必要不可欠 → 試み

試験方法：主せん断ひびわれ支配論 → ノッチ有

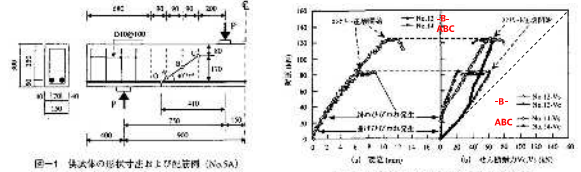
断面高さ300-850mm, a/d=2-4

主筋：格子状CFRP, せん断筋：ループ状C/FRP, 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%

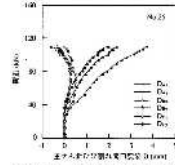
破壊形式：
斜め引張破壊, せん断圧縮破壊, せん断補強筋破断

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

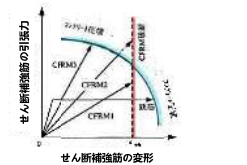


図一 供試体の形状寸法および記号 (No.5A)

図二 コンクリートの圧縮転位による破壊モード

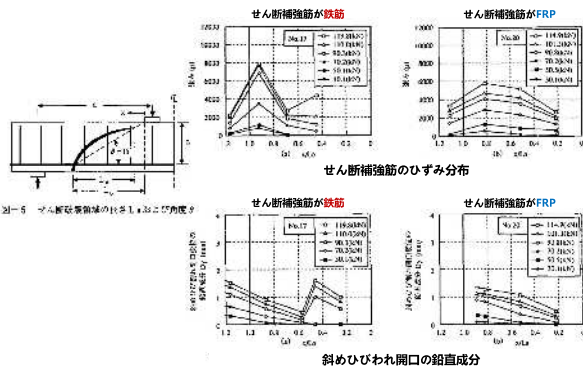


図三 主筋比1.0-3.2%のせん断ひびわれの程度

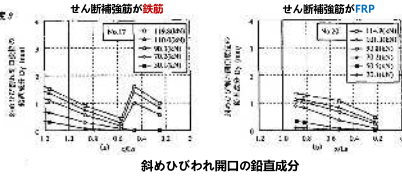


図四 せん断補強筋の引張力

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

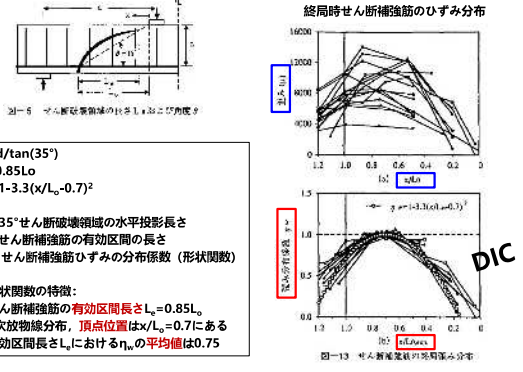


図五 せん断補強筋のひずみ分布



図六 せん断補強筋のひずみ分布

RC理論ってFRP部材に適用できるの？



図七 せん断補強筋のひずみ分布

$L_0 = d / \tan(35^\circ)$
 $L_0 = 0.85L_0$
 $\eta_w = 1 - 3.3(x/L_0 - 0.7)^2$
 L_0 : 35°せん断破壊領域の水平投影長さ
 L_0 : 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 $L_0 = 0.85L_0$
 ②2次放物線分布, 頂点位置は $x/L_0 = 0.7$ にある
 ③有効区間長さ L_0 における η_w の平均値は0.75

図八 せん断補強筋のひずみ分布

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:
(せん断引張破壊した試験体を用いてひずみ最大値を整理)

$$\epsilon_s = 0.009$$

$$\lambda_w = 1.8 / (1.6p_w + 1)$$

$$\lambda_s = 1.8 - 0.225a/d$$

■破壊領域の変形条件および破壊モードの判別条件:

$$\epsilon_{w,max} = \epsilon_s \lambda_w \lambda_s = 0.0023(8-a/d) / (0.625 + p_w) \leq \epsilon_{wb}$$

$$\sigma_{w,max} = E_w \epsilon_{w,max} = 0.0023 E_w (8-a/d) / (0.625 + p_w) \leq f_{wb}$$

$$f_{wb} \leq \epsilon_{wb} \leq E_{wb}: \text{せん断補強筋曲げ加工部の破壊強度とひずみ}$$

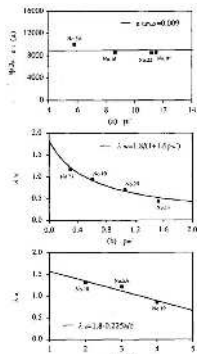
■トラス機構におけるせん断耐力 V_s :

$$V_s = \int (\sigma_w A_w / s) dx \quad (\leftarrow L_0 \text{区間内} \sigma_w \text{の積分})$$

$$= A_w \sigma_{w,max} / s \cdot \int \eta_w dx \quad (\leftarrow L_0 \text{区間の} \eta_w \text{平均は} 0.75)$$

$$= 0.91 A_w \sigma_{w,max} d / s \quad (\leftarrow L_0 \text{と} L_0 \text{と} d(35^\circ) \text{の関係})$$

$$= A_w \sigma_{w,max} z / s \quad (\leftarrow z = d/1.1 \text{と仮定})$$



図一四 諸要因がせん断補強筋終局ひずみに及ぼす影響

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

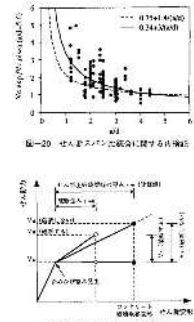
補強筋材によらない統一的なせん断耐力評価方法

$$V_u = V_c + V_s$$

$$V_c = 0.07 p_c^{1/3} f_c^{2/3} (d/1000)^{-1/4} (0.34 + 3/(a/d)) b_w d$$

$$V_s = A_w \sigma_{w,max} z / s$$

$\sigma_{w,max}$: 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_c : 軸方向引張補強筋の引張剛性比 (%)
 $p_c = 100 A_c / (b_w d) \cdot (E_c / E_s)$
 p_w : せん断補強筋の引張剛性比 (%)
 $p_w = 100 A_w / (b_w d) \cdot (E_w / E_s)$
 E_c 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筋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)



図一五 せん断耐力評価の定式化

RC理論ってFRP部材に適用できるの？

钢筋混凝土与FRP筋混凝土的统一抗剪设计理论

■ V_c はせん断補強筋の引張剛性比 ρ_w の影響を受けない； V_c は主筋の引張剛性比 ρ_s 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 $V_c = A_w \sigma_w \max z / s$ において、 σ_w, \max が一様に f_{wy} 、破壊領域が0.75倍に減少；45度トラス。

■ 破壊モードは $\sigma_w, \max \leq f_{wb} + f_{wy}$ ($\epsilon_w, \max \leq \epsilon_{wb} + \epsilon_{wy}$) より判定。
 $\sigma_w, \max > f_{wb}$ はFRP破断； $\sigma_w, \max > f_{wy}$ 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断は設計上避けるべき。
- ② FRPせん断補強筋の配置方向を部材軸と90°としてよい。

註、丸山 (1997.11) :
 「連続繊維補強コンクリートはりのせん断耐力機構とせん断耐力評価」

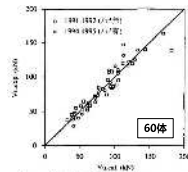


図-15 実験値と45度トラスの一致 (60体の実験)

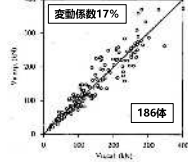
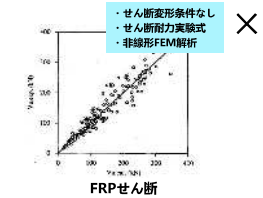
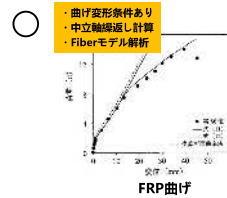
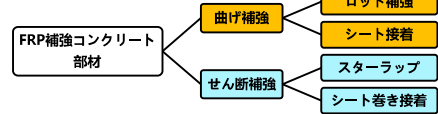


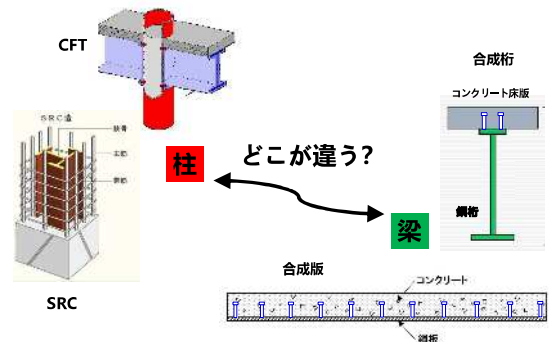
図-16 実験値と計算値の一致 (変動係数17%)

RC理論ってFRP部材に適用できるの？



(2) なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？

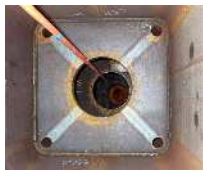
なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



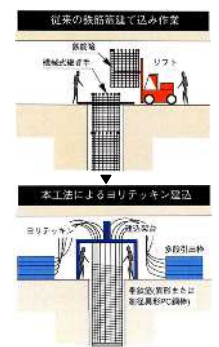
ずれ止め (シアコネクタ)



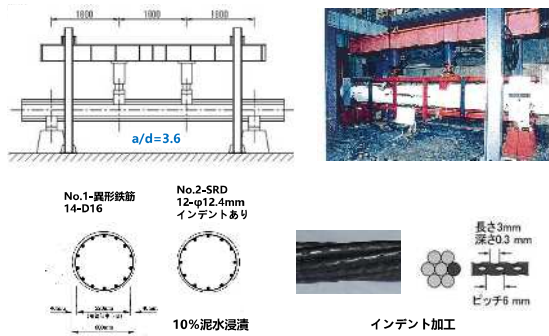
なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



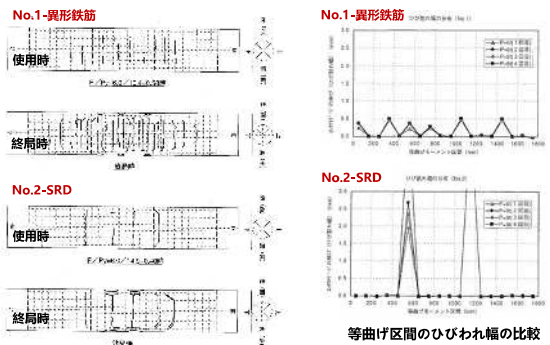
ストランド場所打ち杭工法
 つくばエクスプレス建設に伴うJR秋葉原駅改良
 第3回国土技術開発賞, H16土木学会技術賞



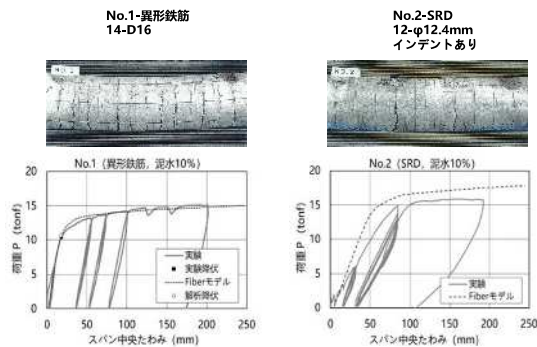
なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



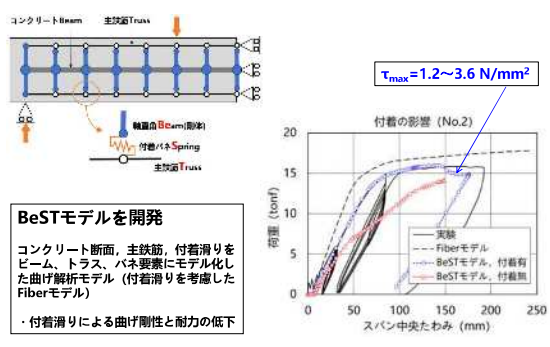
なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



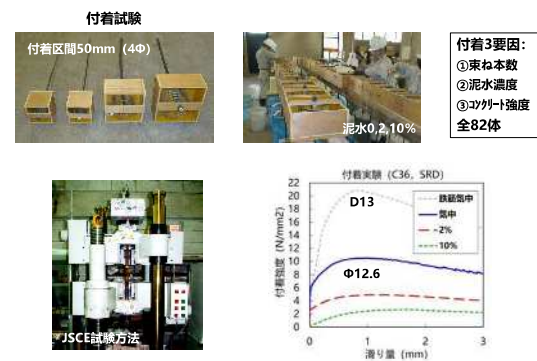
なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



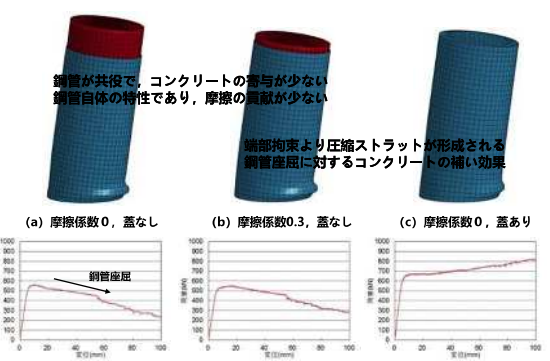
なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



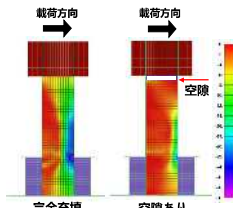
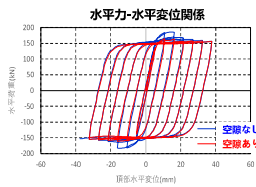
なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？

①CFT部材の充填コンクリート空隙の影響の検討

- ⇒ 上端コンクリートを1層分削除、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: 未充填の耐力が低い
空隙により一体性が確保されず
コンクリートに圧縮応力が伝達されない



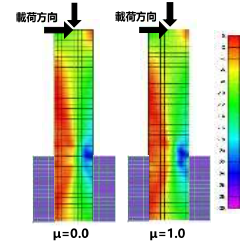
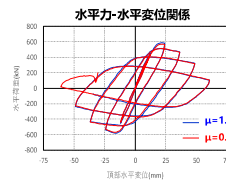
コンクリートの最小主応力 (最大耐力時)

(複合構造委員会, 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部材の鋼管とコンクリート付着の検討

- ⇒ 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
垂直時: 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 (摩擦) の影響は小さい。



コンクリートの最小主応力 (最大耐力時)

(複合構造委員会, 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 (付着と定着, 梁とアーチ)
- ②梁と柱 (応力状態, 曲げ引張と圧縮)
- ③非拘束と拘束 (摩擦条件, 離間と接触)
- ④単独役と共同役 (ずれると一体性)
- ⑤照査要求 (限界状態, 変形照査)

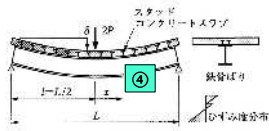
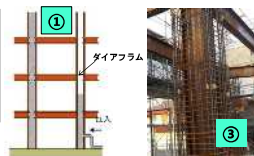
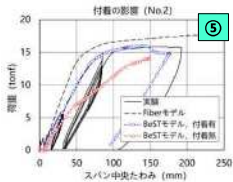
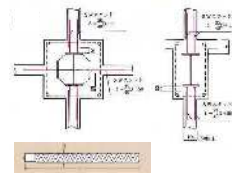


図-24 中央集中荷重を受ける合流びり

なぜSRC鉄骨柱に Stud 打たないの？



SRC建築
フレームと耐震壁の一体性



CFT橋脚
橋脚のフーチングへの定着

(3) 鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

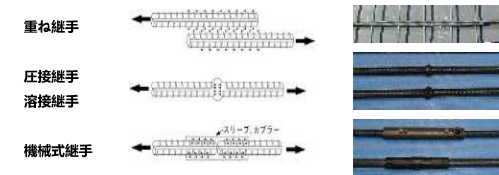
鉄筋の継手

重ね継手

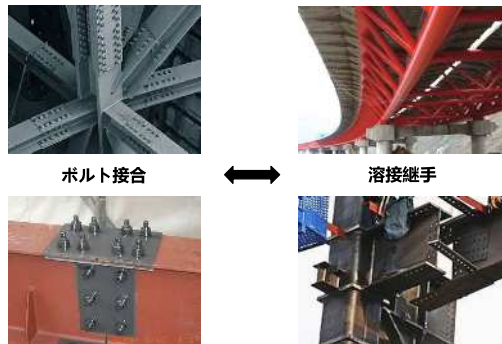
圧接継手

溶接継手

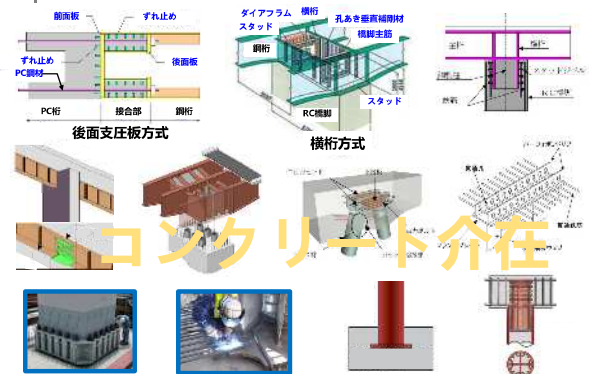
機械式継手



鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

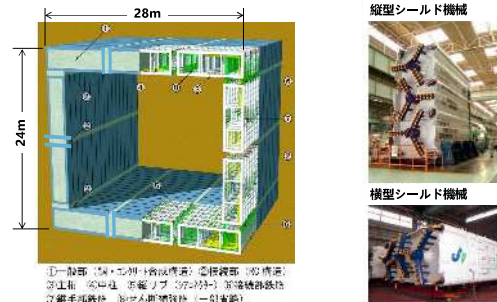


鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

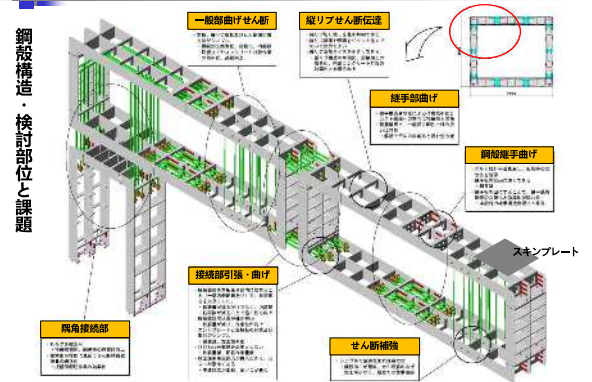


鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

世界最大級矩形断面非開削トンネル工法 (Multi-Micro Shield Tunnel Method)
首都高速川崎縦貫線, H11土木学会技術開発賞受賞



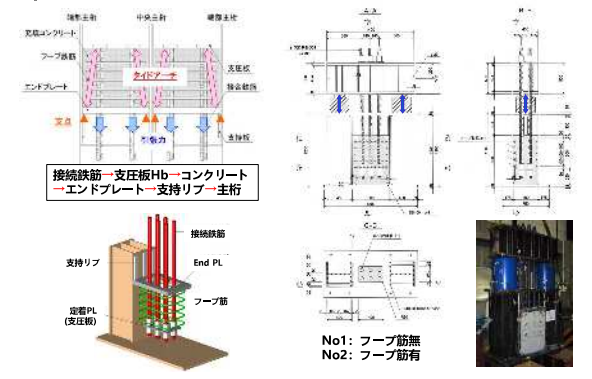
鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？



鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

	支圧板方式	型鋼モルタル方式	球面台座結合方式	アイホールジョイント結合方式
区画平面				
区画側面				
区画断面				
特徴
長所
短所

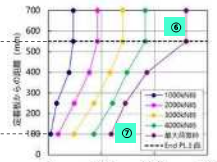
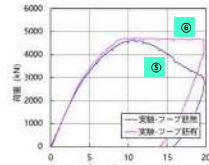
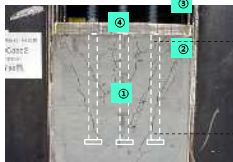
鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？



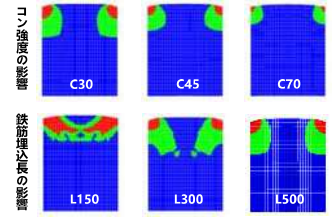
鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

主要な実験結果

- ①コンクリートがひびわれ (1900)
- ②コンクリート隅角部局所圧壊開始 (3000)
- ③支持板端部降伏 (4000)
- ④No1: エンドプレート降伏 (4000)
- ⑤No1: 耐力到達 (4600), 以後耐力低下
- ⑥No2: 接続鉄筋降伏 (4700) 以後耐力維持
- No2: エンドプレート、フープ鉄筋降伏せず
- ⑦支圧板: 接続鉄筋降伏耐力の2/3を分担

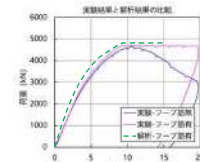


鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

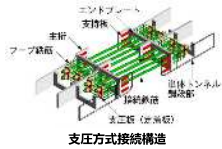


主な解析結果

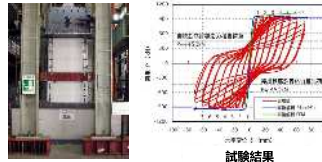
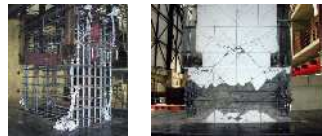
- ①解析における破壊のプロセスは、隅角部コンクリート降伏⇒エンドプレート降伏⇒接続鉄筋降伏となっている。
- ②接続部耐力はエンドプレートの板厚に支配される。設計ではエンドプレート降伏を避けるべきである。
- ③本解析は、設計へ適用の観点から、2次元モデルを使用した。3次元解析やフープ補強効果の評価は課題であった。



鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？



隅角接続部正負交番載荷試験

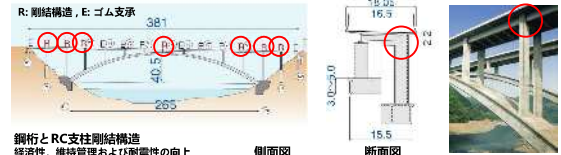


試験結果

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？



新東名富士川橋
鋼・コンクリート複合アーチ橋、スパン265.00mは指合構造世界一
RCアーチリブ、RC橋脚、鋼2主桁およびPC床版の複合構造

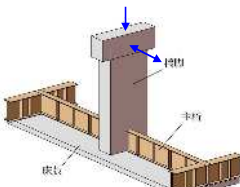


鋼桁とRC支柱剛結構造
経済性、維持管理および耐震性の向上

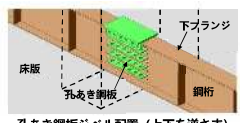
側面図

断面図

鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？



試験体形状 (上下を逆さま)



孔あき鋼板ジベル配置 (上下を逆さま)

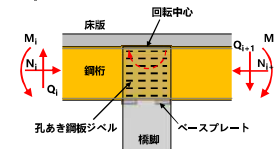
剛結構造の課題

- 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
- 本稿では横桁を介さず、桁に配置した孔あき鋼板ジベルによって直接鉄骨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筋を決定
- 設計の妥当性を検証するため確認実験

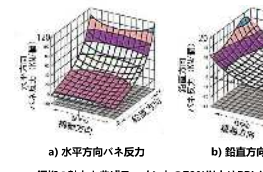


試験体設置状況 (上下を逆さま)

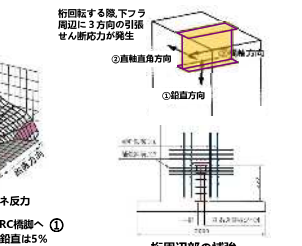
鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？



伝達経路	伝達内容
床版	合成桁の軸力・せん断力
鋼桁・孔あき鋼板ジベル・横桁	合成桁の軸力・曲げモーメント
鋼桁・ベースプレート	合成桁の曲げモーメント・せん断力



a) 水平方向バネ反力 b) 鉛直方向バネ反力



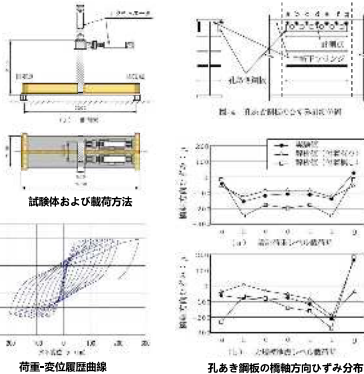
桁間辺部の補強

- 鋼桁の軸力と曲げモーメントの70%以上はPBLからRC橋脚へ
- 孔あき鋼板ジベ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？

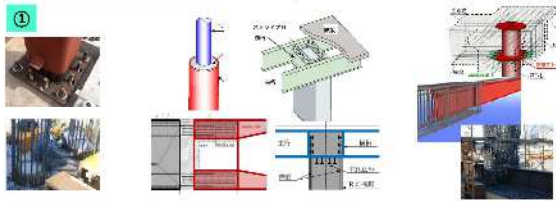
性能確認実験の結果

設計想定荷重に対して、剛結部の応力が解析通りで現れている。
 ・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、適切に補強された。
 ・PBLによる鋼桁とRC橋脚の剛結構造は良好な耐荷性能



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、コンクリート介しての接合が多い
- ②剛接合は剛結より確保される。剛域とはコンパインドコンクリート
- ③鉄筋を鋼筋に埋め込む：剛接合域では用道形成しやすい
- ④鉄骨をコンクリートに埋め込む：形状は自由だが、十分な補強!



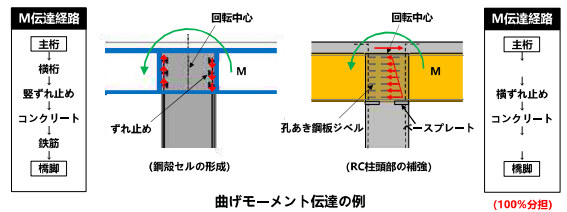
鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

鋼部材とRC部材の接合には種々の形態があり、その形態ごとに照査を行う必要がある。
 ・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】



鉄筋と鉄骨はどうやってつなぐの？

- 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装置と伝達機構の総称を「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。



まだまだ惑います

- ? 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？
- ? 鉄筋の太さって、どれくらいでいいの？ (阪神淡路大地震, 阪神高速倒壊)
- ? 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解析の矛盾って、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あるの？

.....
 疑問が多いって、好奇心はあるが根性がないのかもしれない。
 まとまらない話でsumimasendesita!

ご清聴ありがとうございました!