

論文 200N/mm² 級繊維補強コンクリートを用いた外殻プレキャスト柱梁接合部の復元力特性に関する実験的研究

上甲 尚典^{*1}・菅野 俊介^{*2}・木村 秀樹^{*3}・川口 哲生^{*4}

要旨：本研究は、200N/mm² 級の超高強度コンクリートの建築構造物への適用を目的としており、本報では UFC (Ultra-high-strength Fiber-reinforced Concrete) を用いた外殻プレキャスト柱梁接合部の復元力特性試験結果について報告する。梁主筋の付着長と接合部パネルのせん断耐力を実験因子とした実験により、破壊は靱性保証型設計指針の評価式による予想破壊形式の通りであり、せん断応力度は鋼繊維の影響を考慮した式に概ね沿うことが確認された。

キーワード：UFC, 高強度, 柱梁接合部, 復元力特性, 鋼繊維, 外殻プレキャスト

1. はじめに

近年、100N/mm² 級の圧縮強度を持つ高強度コンクリートを用いた建物が建設されるようになったが、本研究ではさらなる高層化、また大スパン、自由な空間の創造のために、200N/mm² 級の圧縮強度を持つ UFC (Ultra-high-strength Fiber-reinforced Concrete) を用いた部材の建築構造物への適用性を検討することを目的としており、これまでに、UFC の素材特性試験、中心圧縮試験、柱の復元力特性試験、柱梁接合部の復元力特性試験¹⁾を行ってきた。本報では UFC の有効利用法として提案する、外殻プレキャスト工法を用いた柱梁接合部の復元力特性に関する実験について報告する。

なおここで用いる UFC は、セメント、減水剤、珪石質微粉末、細骨材、及び短繊維を主な構成成分とし、短繊維には靱性の付与を目的とする直径 0.2mm、長さ 15mm の鋼繊維を使用した。

2. 実験概要

2.1 実験目的

本研究で 2004 年度に行った UFC 全断面柱梁接合部の実験において、靱性保証型設計指針に

おける接合部のせん断応力度の評価式は、鋼繊維無混入の試験体においては概ね妥当であり、繊維を混入することによって大幅に評価式を上回ることがわかった。そこで、本実験は外殻プレキャスト柱を用いた柱梁接合部にその評価式が適用可能であるかを検討することを目的としており、靱性保証型設計指針の接合部内付着強度、および接合部せん断応力度の外殻プレキャスト柱梁接合部への適用性を検証する。

2.2 試験体概要

試験体は梁曲げ破壊先行型の試験体を基準として、梁主筋の付着破壊先行型、接合部せん断破壊先行型、付着長さも不足する接合部せん断破壊先行型の試験体の 4 体とする。試験体の接合部耐力表を表-1、試験体鉄筋比を表-2、試験体形状および試験体配筋例を図-1、断面図を図-2 に示す。試験体名は PJ14S8 を例にとると、PJ はプレキャスト接合部、14 は梁主筋接合部通し配筋時の柱せい/梁主筋、S8 はせん断余裕度 0.8 で設計した接合部せん断破壊先行型であることを示す。その他の試験体の M は梁曲げ破壊先行型、B は梁主筋の付着破壊先行型を表す。

実験因子は梁主筋の付着長さ、接合部パネル

*1 広島大学大学院 工学研究科 (正会員)

*2 広島大学大学院教授 工学研究科 工博 (正会員)

*3 榊竹中工務店技術研究所 建設技術開発部 主任研究員 工博 (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社 中央研究所 ダクトル技術開発チーム (正会員)

表-1 試験体設計耐力一覧

試験体	接合部耐力 ^{文献2)}						試験体	柱		梁	
	せん断強度 V_{ju} (kN) 式1)	梁曲げ終局時 せん断力 V_j (kN) 式2)	せん断 余裕度 V_{ju}/V_j	設計用 付着応力度 τ_j (N/mm ²) 式3)	接合部内 付着強度 τ_u (N/mm ²) 式4)	付着 余裕度 τ_u/τ_j		横補強 筋比 ρ_w (%)	引張 鉄筋比 ρ_t (%)	横補強 筋比 ρ_w (%)	引張 鉄筋比 ρ_t (%)
PJ17M	3300	2381	1.39	14.70	21.71	1.48	0.70	1.43	0.61	2.65	
PJ14B	2280	1624	1.40	26.96	21.71	0.81	0.62	1.66	0.61	1.51	
PJ14S8	2545	3070	0.83	20.36	22.74	1.12	0.88	2.07	0.79	3.52	
PJ14S6	2545	4310	0.59	26.96	22.74	0.84	0.88		0.95		

* 柱・接合部内のコンクリート強度は外殻 UFC : 200N/mm², コアコンクリート : 60N/mm² とした等価コンクリート強度を用いる。

$$V_{ju} = \kappa \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j \quad \text{式 1)}$$

κ : 接合部の形状による係数 十字型接合部では $\kappa=1.0$
 ϕ : 直交梁の有無による補正係数 両側直交梁付きの接合部では $\phi=1.0$

F_j : 接合部のせん断強度の基準値 $F_j=0.8 \times \sigma_B^{0.7}$

σ_B : 接合部のコンクリート圧縮強度

b_j : 接合部の有効幅 $b_j = b_b + b_{a1} + b_{a2}$ b_b : 梁幅

b_{a1} : $b/2$ または $D/4$ のうち最小値

b_{a2} : 梁側面から平行する柱断面までの長さ

D : 柱せい D_j : 柱せいまたは 90度折り曲げ筋水平投影長さ

$$V_j = T + T' - V_c \quad \text{式 2)}$$

$$V_c = \frac{2}{L_c + L_c'} \cdot \frac{M_b \cdot L_b}{L + M_b' \cdot L_b' / L'}$$

M_b, M_b' : 左右の梁端部モーメント L_c, L_c' : 上下の柱の長さ

L_b, L_b' : 左右の梁スパン長さ L, L' : 左右の梁の内法長さ

$$\tau_j = \frac{(1 + \gamma) \sigma_{ju} \cdot d_b}{4D} \quad \text{式 3)}$$

γ : 複筋比 (1 以下) d_b : 主筋径 D : 柱せい

σ_{ju} : 主筋の上限強度算定用強度

$$\tau_u = 0.7 \left(1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_B} \right) \sigma_B^{2/3} \quad \text{式 4)}$$

σ_0 : 柱の圧縮軸応力度

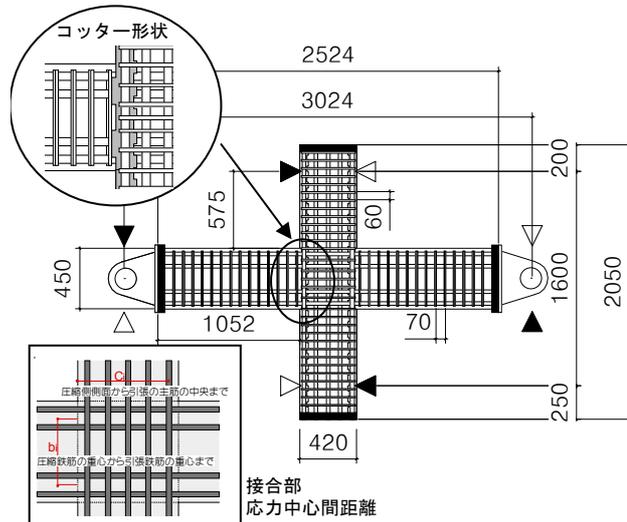


図-1 試験体形状および配筋例 (PJ17M)

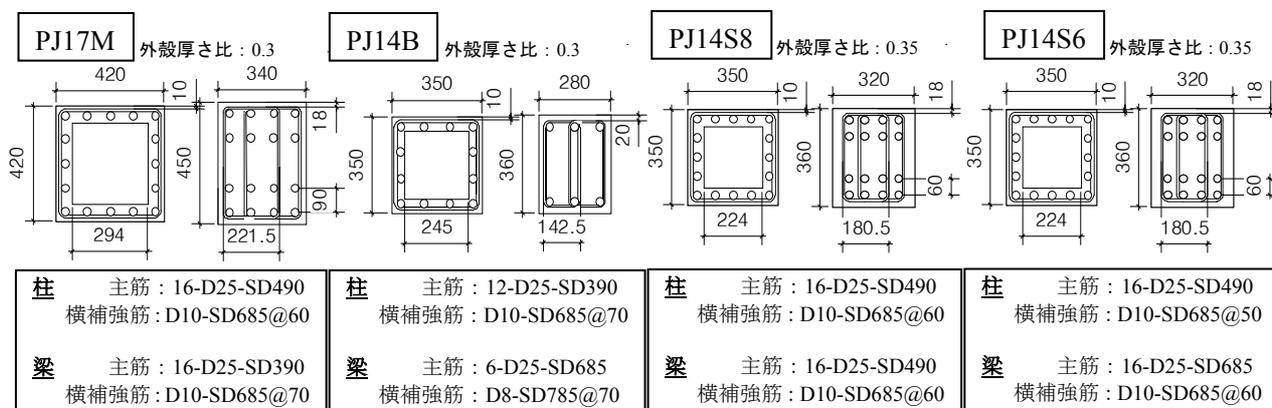


図-2 試験体断面図

のせん断耐力とし、PJ14B の試験体は接合部パネルのボリュームを基準の試験体と比べて大幅に小さくし、梁主筋の付着長不足による梁主筋付着破壊を意図した。試験体 PJ14S8 は梁が曲げ降伏せず接合部がせん断破壊し、PJ14S6 は梁主筋の強度を強くし、PJ14S8 よりも顕著に接合部せん断破壊が起こるよう設計した。PJ14S8 の試験体は梁主筋の付着長も不足し、梁主筋付着破壊も同時に起こり得ることを考える。外殻プレキャスト柱、および接合部部分のコンクリート圧縮強度は等価コンクリート強度とする。

2.3 試験体の製作

試験体はまず通し配筋である梁主筋を柱型枠に通した状態で柱コアである 60N/mm² のコンクリートを打設し、その周りに 200N/mm² の UFC を打設した。接合部の外殻厚さは柱部分と同様とした。梁部分はその後別打ちで、60N/mm² のコンクリートを使用し、接合部と梁の境界にはせん断抵抗を意図したコッターを配した。また柱においては、外殻部分からコアコンクリートへのせん断力の伝達を考慮して、外殻とコアの境界全体にコッターを配した。

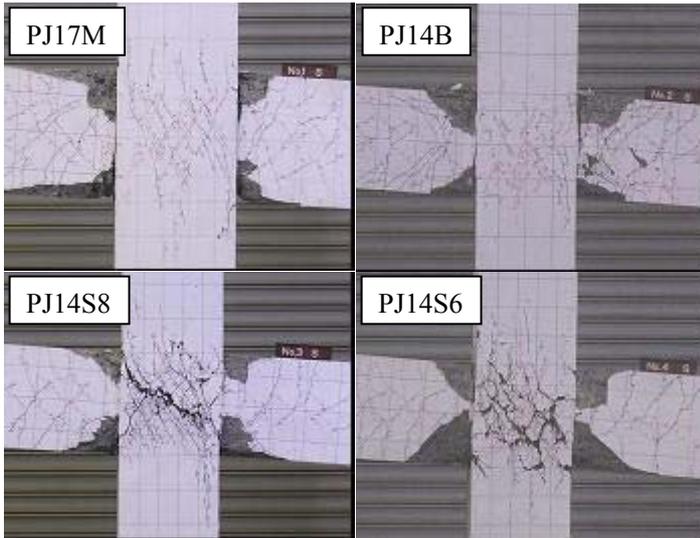


図-3 終局時破壊状況

表-3 コンクリート材料特性

試験部位	供試体寸法 (mm)	最大荷重 (kN)	強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ³ N/mm ²)
外殻(UFC)	50×100	358	223	54.57
梁(60N/mm ²)	100×200	538	68	37.42
コア(60N/mm ²)		500	64	37.39

表-4 鉄筋材料特性

試験体	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)
D25-SD685	694	19.76	923	9.44
D25-SD490	524	19.69	688	15.77
D25-SD390	459	19.71	651	23.28
D10-SD685	754	21.27	956	14.90
D8-SD785	882	19.16	1251	8.11

表-5 実験結果一覧

試験体	計算値		実験値 ³⁾		P _{max} / bQ _{mu}	uτ _p / τ _p
	梁曲げ終局強度時層せん断耐力 bQ _{mu} (kN)	接合部せん断応力度 uτ _p (MPa) ²⁾	最大耐力 P _{max} (kN)	接合部せん断応力度 τ _p (MPa) ¹⁾		
PJ17M	643	26.05	938	30.19	1.46	1.16
PJ14B	359	26.05	462	24.06	1.29	0.92
PJ14S8	487	27.39	675	42.66	1.39	1.56
PJ14S6	543	27.39	719	45.42	1.32	1.66

* 柱・接合部内のコンクリート強度は材料特性試験の結果による等価コンクリート強度を用いる。

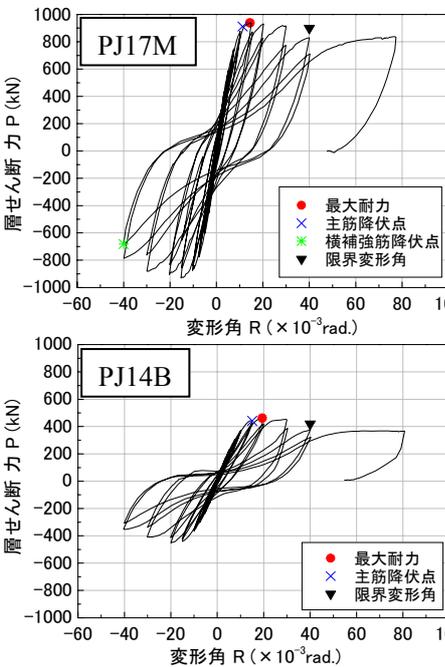


図-4 層せん断力-変形角関係 履歴曲線

鉄筋は主筋に D25-SD390, 490, 685, 横補強筋に D8-SD785, D10-685 を使用した。試験体毎の使用鉄筋は図-2 内に示す。

UFC を構成する材料はセメント, 石英質微粉末, 珪砂などをあらかじめ混合したプレミックス粉体, 高性能専用減水剤, 鋼繊維であり, 所定の強度発現の条件として, 打設後 48 時間の湿潤養生の後, 更に 90℃の蒸気で 48 時間養生することが不可欠である。コンクリート材料特性を表-3 に, 鉄筋の材料特性を表-4 に示す。

2.4 加力方法

加力は 20000kN 級アムスラーによって軸力比

を 0.2 で固定し, 梁両端を 1000kN 級の油圧ジャッキによって正負交番繰り返しせん断力を載荷した。載荷履歴は層間変形角 ±1, 2, 3.3, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40/1000rad. で 2 サイクルを原則とした。以後の変形角は全て層間変形角とする。

3. 実験結果

3.1 最大耐力と限界変形角

表-5 に試験体耐力一覧を, 図-3 に終局時の破壊状況写真, 図-4 に層せん断力-変形角関係の履歴曲線を示す。実験値の最大耐力 P_{max} について, 全ての試験体で計算値を上回っており, 曲げ耐

力に達していることがわかる。接合部パネルのせん断応力度については、接合部せん断破壊先行型の試験体では大きく 1 を上回っている。試験体 PJ17M, PJ14B の 2 体においては計算値と実験値の比がほぼ 1 であるが、この 2 体のせん断応力度は最大せん断耐力に至っていない。

また、図-4 の履歴曲線より、全ての試験体において 30/1000rad.の大変形時でも高い耐力を保持し、最大耐力後、ゆるやかに耐力は低下しているが、終局状態においても著しい耐力低下はなく、優れた変形性能を有していることがわかる。ここで、本検討においては変形角 40/1000rad.までの加力によってピーク時荷重が最大耐力の 80%以下に低下した点を限界変形角とする。

3.2 破壊経過

i) PJ17M

梁曲げ破壊先行型の試験体 PJ17M は、変形角 5/1000rad.で接合部パネルにせん断ひび割れが発生し、変形角 15/1000rad.で梁主筋が降伏した。その後梁における曲げせん断ひび割れの発生が顕著になり、変形角 40/1000rad.で接合部パネル内の横補強筋が降伏した。横補強筋降伏後、破壊は主に梁端部に集中し、接合部に大きな損傷は見られなかった。

ii) PJ14B

梁主筋の付着破壊先行型の試験体 PJ14B は、初期のひび割れ発生状況は PJ17M と同様であったが、変形角 15/1000rad.で梁主筋が降伏した後、梁が柱面との肌別れを起こし、その後は接合部パネルの損傷が進展せず、接合部パネル内の横補強筋は終局時においても降伏していなかった。

iii) PJ14S8

接合部せん断破壊先行型でせん断余裕度 80% の PJ14S8 は、変形角 7.5/1000rad.で接合部パネルにせん断ひび割れが急激に多数発生し、変形角 30/1000rad.でパネルせん断ひび割れ幅が拡大し始めた。最大耐力後、梁主筋曲げ降伏と共に大幅に耐力が低下した。その後、一方向載荷による終局直前に接合部内の横補強筋が降伏した。

iv) PJ14S6

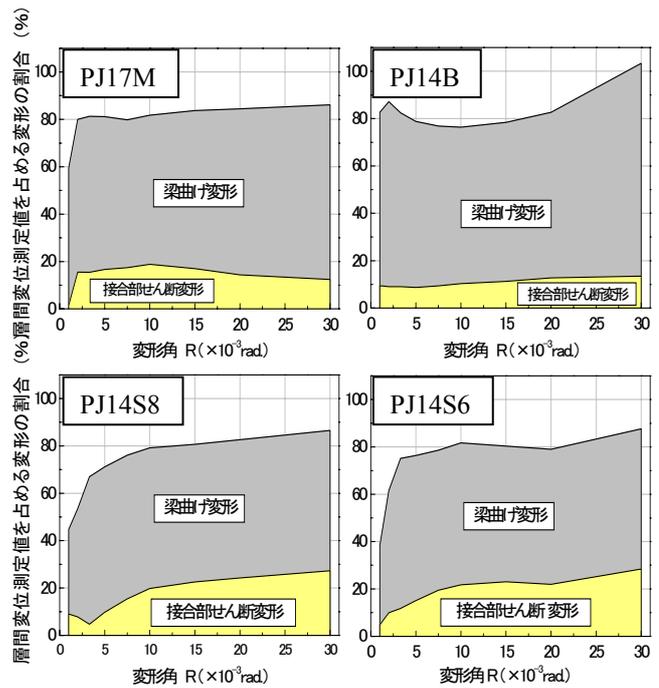


図-5 変形成分の割合

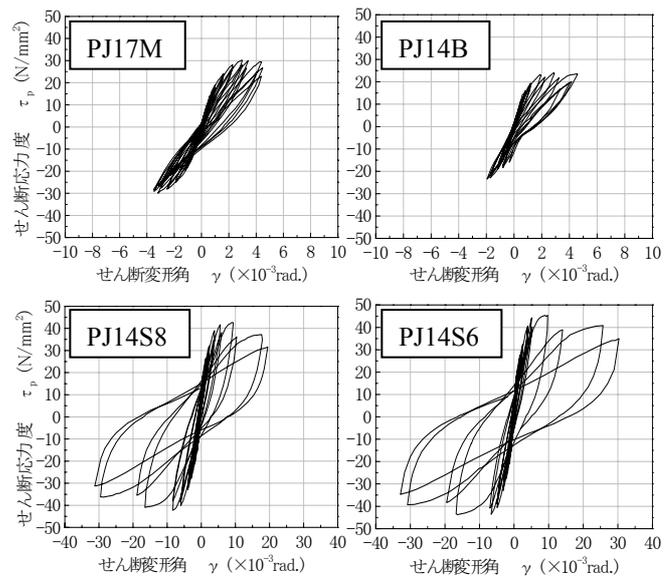


図-6 せん断応力度-せん断変形角 履歴曲線

接合部せん断破壊先行型でせん断余裕度 60% の PJ14S6 は履歴の形状、破壊経過、最大耐力等は PJ14S8 とほぼ同様であり、接合部パネルの横補強筋降伏点も同程度であるが、梁主筋は終局状態においても降伏点に至っていなかった。

4. 考察

4.1 最大耐力と破壊形式

表-5 より、全ての試験体において最大耐力は梁曲げ終局時層せん断耐力を上回っているため、全ての試験体において梁曲げ破壊を起こしてい

ると考えられる。梁主筋付着破壊先行型の試験体 PJ14B は梁曲げ破壊により終局に至っているが、履歴性状は梁曲げ破壊先行型の基準試験体 PJ17M とはるが、梁主筋付着破壊の挙動は確認できなかった。また、図-3 の写真より、PJ14S8、PJ14S6 はせん断破壊も起こっていると考えられ、接合部せん断破壊先行型の試験体 2 体は梁の曲げ破壊と接合部のせん断破壊が同時に起こっているものと考えられる。

4.2 接合部パネルおよび梁の変形

図-5 に変形角 30/1000rad.までの正載荷ピーク時の層間変位に占める接合部せん断変形と梁曲げ変形による層間変位の割合を示す。このとき、梁および接合部のその他の変形は軽微なものとして無視することとする。梁曲げ破壊先行型の PJ17M と梁主筋付着破壊先行型の PJ14B は载荷初期から 30/1000rad.の大変形まで、一貫して接合部変形が小さかった。梁の曲げ変形については、梁曲げ破壊先行型の試験体 PJ17M は大変形時にも大きな変化は無いが、梁主筋の付着破壊先行型の試験体 PJ14B は変形角 20/1000rad.を超える大変形時に曲げ変形の割合が上昇している。これに対して、接合部破壊先行型の試験体は変位が進むにつれて接合部が全体に占める割合が大きくなっている。しかし、せん断余裕度が 60% の PJ14S6 においても接合部変形は全体の 30% に満たない割合で、梁の曲げ変形の占める割合の方が大きい結果となっている。

図-6 にせん断応力度-せん断変形角関係の履歴曲線を示す。梁破壊先行型の試験体においては変形角も小さく試験体最大応力には至っていないと推定される。これは梁に顕著な破壊が発生した後応力が集中し、接合部のせん断破壊が進行しなかったためと考えられる。せん断破壊先行型の試験体は大変形時に耐力低下が見られ、層せん断力-変形角関係の履歴曲線と酷似した履歴曲線を描いていることが確認できる。

4.3 等価粘性減衰定数 (h_{eq})

図-7 に同一変位における 2 回目の繰り返しループ時の等価粘性減衰定数を示す。梁曲げ破壊

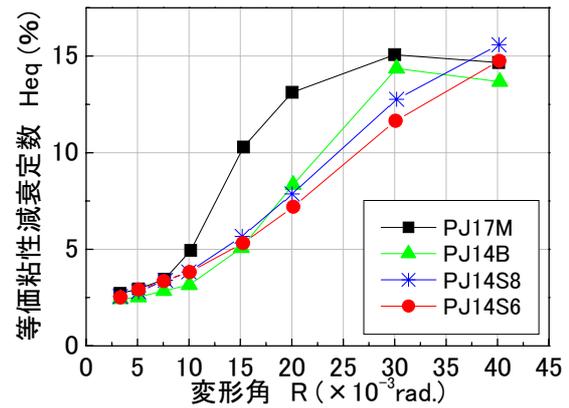


図-7 等価粘性減衰定数の比較

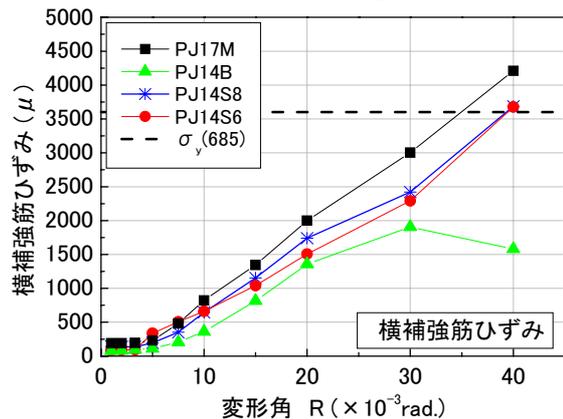


図-8 接合部内横補強筋ひずみ比較

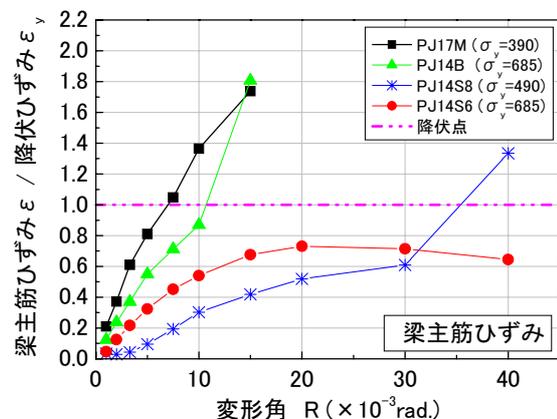


図-9 梁主筋ひずみ比較

先行型試験体 PJ17M の h_{eq} の値に比べて付着破壊先行型の試験体 PJ14B は変形角 15, 20/1000rad.においておよそ半分の値となっている。また、接合部せん断破壊先行型の 2 試験体も付着破壊した試験体と同様に基準の試験体と比べて低い値となっている。

4.4 鉄筋のひずみ分布

図-8 に接合部内において、それぞれの試験体で最初に降伏した横補強筋のひずみの比較を示す。梁主筋付着破壊先行型の試験体 PJ14B のみ、大変形時にひずみが進行せず、降伏ひずみに至

らなかったが、試験体には梁主筋の抜け出しと
考えられる挙動は見られなかった。その他の試
験体は全て変形角 40/1000rad.の以降の大変形時
に降伏ひずみに至っている。

また、図-9 に梁主筋ひずみと材料特性試験に
よる降伏ひずみの比の比較を示す。梁破壊先行
型の 2 試験体が変形角 10/1000rad.付近で降伏ひ
ずみに至っているのに対して、接合部せん断破
壊先行型の試験体はひずみの進行が少なく、せ
ん断余裕度 60%の PJ14S6 においては終局状態に
おいても降伏ひずみに至っていない。

4.5 接合部せん断耐力設計式の適応性

図-10 に靱性保証型設計指針によるコンクリ
ート強度とせん断応力度の関係式、および丸田
らの研究⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾による実験結果、本研究において
2004 年度に行った全断面 UFC を用いた柱梁接合
部の実験結果との関係を示す。接合部せん断破
壊先行型の 2 試験体においては評価式の値を大
幅に上回り、評価式の曲線に沿う形にならな
かった。ここで本研究における 2004 年度の UFC フ
ル断面柱梁接合部の実験により、鋼繊維による
接合部せん断応力度の強度増分が確認されてい
るため、鋼繊維の影響を考慮するとグラフの設
計式は概ね妥当であると考えられる。さらに今
後は外殻部分によるコアコンクリートの拘束効
果によるコンクリート圧縮強度の強度増分、お
よび等価コンクリート強度の妥当性を検討する
ことが必要であると考えられる。

5. まとめ

以上の結果により、以下の知見が得られた。

(1) 破壊形式

全ての試験体において、梁曲げ終局時層せん
断耐力を上回っており、梁曲げ破壊を起こして
いると考えられるが、せん断破壊先行型の試験
体は同時にせん断破壊も起こしていた。

(2) 梁主筋の付着長に関する評価式

梁主筋の付着長が規定を満たさない梁主筋定
着破壊先行型の試験体は、曲げ破壊によって終
局状態に達しているものの、等価粘性減衰定数、

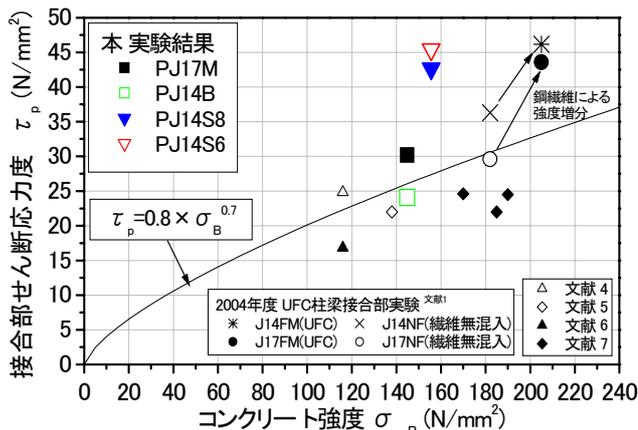


図-10 コンクリート強度-せん断応力度関

梁の曲げ変形の性状が梁曲げ破壊先行型の試験
体と異なり、梁主筋の付着長さの差による影響
が見られるが、梁主筋付着破壊と考えられる顕
著な挙動は確認できなかった。今後、鋼繊維が
付着に及ぼす影響および等価コンクリート強度
の検討が必要である。

(3) 接合部せん断耐力式の妥当性

接合部パネルのせん断応力度が最大耐力に至
ったせん断破壊先行型の試験体 2 体は、靱性保
証型設計指針による評価式の予想応力度を大幅
に上回る結果となり、鋼繊維による接合部パネ
ルのせん断耐力上昇を考慮した評価式に近い値
となった。今後は等価コンクリート強度の妥当
性等を検討する必要があると思われる。

謝辞

本研究は、平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究
(B) (2)：課題番号 16360278) の援助を受けて実施した
ことを記し、謝意を表します。また、実験にあたり高強
度鉄筋を(D8)株式会社神戸製鋼所から提供していただいた
ことを記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 上甲尚典ほか：200N/mm² 級超高強度繊維補強コンクリ
ートを用いた柱梁接合部の復元力特性に関する実験的研究、
コンクリート工学年次論文報告集, pp.691~pp.696, Vol.27,
Vol.2, 2005
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐
震設計指針・解説,
- 3) 木村秀樹ほか：高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部
の実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp.525
~pp.530, Vol. 1989
- 4) 丸田誠ほか：170N/mm² を超える高強度コンクリートを用
いた柱梁接合部の挙動, コンクリート工学年次論文報告集,
pp.469~pp.474
- 5) 中澤春生ほか：超高強度鉄筋コンクリート構造
(F_c=120N/mm²)の開発(その 4), 建築学会大会, 構造
IV, pp.663-664, 2001.9
- 6) 鳥居次夫, 林和也ほか：超高強度材料を用いた鉄筋コンク
リート造柱・梁部分架構に関する実験的研究(その 1, その
2), 建築学会大会, 構造IV, pp.513-516, 2003.9
- 7) 岩岡信一ほか, 超高強度鉄筋コンクリート構造柱梁接合部
実験, 建築学会大会, 構造IV, pp.489-490, 2003.9