

論文 プレストレストコンクリート柱・梁接合部のせん断性状に関する実験的研究

紅谷信行*¹・柏崎隆志*²・野口 博*³

要旨：プレストレス導入量やプレストレス材の付着の有無が、柱・梁接合部のせん断性状やせん断終局強度に与える影響を調べるために、破壊モードを接合部せん断破壊先行型に設計した試験体の繰り返し載荷実験を行った。今回の実験では、プレストレス導入量は接合部せん断ひび割れの形成に影響を示したが、接合部せん断終局強度には殆ど影響が見られなかった。また、プレストレス材をアンボンドとした場合、接合部せん断終局強度はやや低下する傾向が確認された。

キーワード：柱・梁接合部、プレストレス導入力、付着、せん断終局強度、圧着接合

1. はじめに

近年、プレレストレストコンクリート(PC)構造の高層建築物への適用を実現するために、建設省建築研究所を中心とするPC共同研究[1]などで、各研究機関により様々な研究が行われている。高層建築物における柱・梁接合部の応力状態は、高層化や材料の高強度化によって従来の中低層建築物に比べ厳しいものとなるが、PC柱・梁接合部の設計法に関する明確な設計規定は未だ設けられていない。また、PC柱・梁接合部のせん断強度は不明な点が多く、接合部せん断破壊型の実験も我が国では殆ど行われていない。

そこで、PC共同研究の一環として、破壊モードを接合部せん断破壊先行型に設計した試験体の載荷実験を行い、接合部せん断抵抗機構に基づいたせん断耐力モデルやせん断終局強度式の提案、ひいては接合部の合理的な耐震設計法の開発に寄与することを目的とする。

2. 実験概要

2. 1 実験計画

PC柱梁接合部を対象にした既往の研究[2]では、プレストレス導入力が大きくなると接合部のせん断性状にとって有利になることが指摘されている。しかし、これらの研究の実験試験体は梁曲げ降伏先行型の破壊モードを示しており、接合部せん断終局強度については殆ど解明されていない。また、PC鋼材をアンボンドにすることにより、PC鋼材の梁危険断面における変形の集中が改善されるが、接合部内では付着による応力伝達となされない分、接合部のせん断抵抗に差異が生じると思われる。

本研究では、これらの観点から、プレストレス導入力とPC鋼材の付着を試験体のパラメータとし、これらの要因がPC柱・梁接合部のせん断強度に与える影響を実験的に検討する。

2. 2 試験体と材料特性

試験体諸元を表-1に、材料特性を表-2に、試験体形状を図-1に示す。試験体は、実大の約1/3スケールの内柱・梁接合部で、一体打ち接合部4体と圧着接合部3体の計7体である。試験体

*1 西松建設(株)(前千葉大学大学院工学研究科)、工修(正会員)

*2 千葉大学助手 工学部建築学科、工修(正会員)

*3 千葉大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

表-1 試験体諸元

試験体名	PC-0	PC-1	PC-2	PC-U	PCa-1	PCa-2	PCa-U	
構造形式	一体打ち							
柱	設計基準強度 $F_c=360$ (kgf/cm ²)							
	主筋 12-D19 (SD490)							
	ブープ 目 4-D10 @40 (SD785) $P_w=1.19$ (%)							
接合部	$F_c=360$ (kgf/cm ²)							
	ブープ □ 2-D10 ×1セット (SD785) $P_w=0.22$ (%)							
	コンクリート $F_c=360$ (kgf/cm ²) $F_c=500$ (kgf/cm ²)							
梁	主筋 6-D19 (SD490)							
	スターラップ □ 2-D10 @50 (SD785) $P_w=1.43$ (%)							
	PC鋼材 2-φ 23 (C種1号 SBPR110/125)							
	P_c (tf)	0	21.6	43.2	21.6	21.6	43.2	21.6
	$P_c/(A_0F_c)$	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
	グラウト	あり	あり	あり	なし	あり	あり	なし

P_c :有効プレストレス A_0 :梁断面面積 20 × 30=600 (cm²)

表-2 材料特性

コンクリート	圧縮強度 σ_B (kgf/cm ²)	強度時のひずみ ϵ_c (μ)	1/3 F_c 割線剛性 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm^2)
360	PC-0,1 343.5	1819	2.80	30.1
	PC-2 352.9	1863	2.81	30.1
	PC-U 369.2	2028	2.73	30.1
	PCa 371.5	1903	2.84	33.0
500	535.8	2314	3.53	36.7
鉄筋	降伏強度 σ_y (kgf/cm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)	ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	引張強度 σ_t (kgf/cm ²)
D19 (SD490)	5168	2849	1.81	6922
D10 (SD785)	8967	4329	2.07	10718
PC鋼棒	降伏強度 σ_y (kgf/cm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)	ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	引張強度 σ_t (kgf/cm ²)
23 φ	11000	5500	2.00	12500

* 製品規格値

寸法は、階高 147cm、スパン 270cm で、柱断面 30cm × 30cm、梁断面 20cm × 30cm である。各部材の配筋は、接合部のせん断耐力時に梁及び柱が曲げ降伏しないように設計した。梁断面平均プレストレス力のコンクリート圧縮強度に対する比をプレストレスレベルと定義し、この値を 0、0.1、0.2 の 3 レベルに設定し、さらに 0.1 に関してはアンボンドの試験体も用意した。なお、プレストレスの導入力は実験時の有効率を 95% と判断し、その分上乗せした緊張力を導入した。緊張力は PC 鋼棒に貼付けたひずみゲージの値から計算し、導入時及び実験直前に計測した結果、実際の有効率は 97% 程度であった。

2. 3 荷重システムと測定項目

加力は、図-2 に示すように、柱頭・柱脚をピン支持とし、柱頭に一定軸力($\sigma_0 \approx 0.1\sigma_B$)を加えた後、梁端に地震力を模擬した正負交番繰り返し荷重をアクチュエータにより行った。加力のサイクルは、層間変形角 $R_s = 1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/66$ 、 $1/50$ 、 $1/33$ で正負各 2 サイクルずつ、最後に $1/20$ の正加力を 1 回行うことを基本とした。主な測定項目は、①層間変位、②柱・梁曲げ変形、③接合部せん断変形角、④鉄筋と PC 鋼棒のひずみ、⑤接合部パネルのコンクリート圧縮ストラットのひずみ等である。

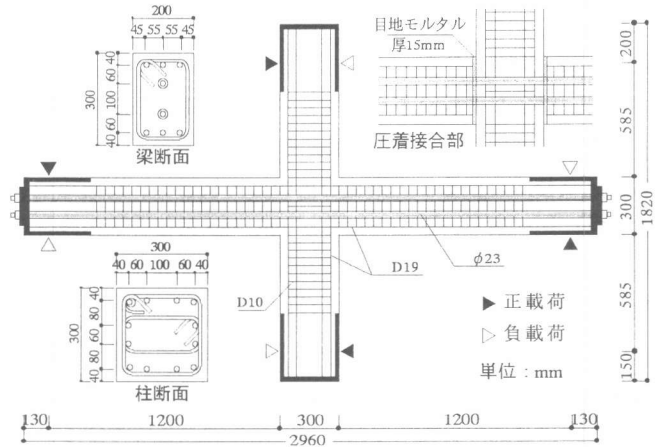


図-1 試験体形状

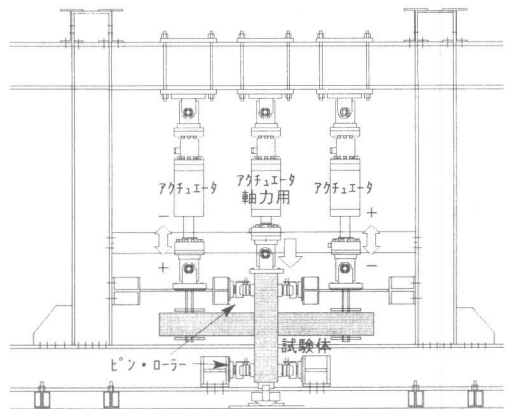


図-2 加力装置

3. 実験結果

3.1 破壊状況

図-3に最終ひび割れ状況を示す。一体打ちシリーズのすべての試験体で、接合部のせん断ひび割れが顕著に確認された。接合部せん断ひび割れの角度は、プレストレスレベルの高い試験体ほど緩やかであった。接合部せん断ひび割れは、ひび割れ幅の拡大とともに接合部から柱の主筋方向に沿って伸展し、割裂ひび割れを伴った。梁主筋及びPC鋼棒の降伏は最後まで確認されず、接合部破壊が進行した結果から、接合部せん断破壊先行型(J型)と判断した。

一方、圧着接合シリーズのPCa-1では、PC鋼棒の付着劣化による接合部からの抜け出しが顕著となり、接合部せん断ひび割れは、発生後殆ど成長が見られず、破壊は梁接合端の圧縮部に集中した。PCa-1でこのような梁の曲げ圧壊が顕著に見られたため、PCa-2とPCa-Uについては、梁のヒンジゾーンに鋼板(厚さ12mm)を巻いて補強し、これを防止する形で荷重を行った。この結果、PCa-2では $R_s = 1/33$ のサイクルから接合部の破壊が顕著に起こった。しかし、PCa-Uでは、PC鋼棒の接合部からの抜け出しが顕著なため、PCa-1とほぼ似たような破壊経過を示し、接合部のせん断破壊は確認されなかった。加力終了後、鋼板をはがしてコンクリートの破壊状況を調べた結果、PCa-Uでは被りコンクリートの圧壊が進行していた。これらの結果から、PCa-1とPCa-Uは梁曲げ圧壊先行型(B型)、PCa-2は接合部せん断破壊先行型(J型)と判断した。

3.2 履歴特性

図-4に層せん断力-層間変位関係を示す。一体打ちシリーズでは、すべての試験体でエネルギー吸収の少ない逆S字型の復元力特性を示した。プレストレスレベルの高い試験体ほど、初期

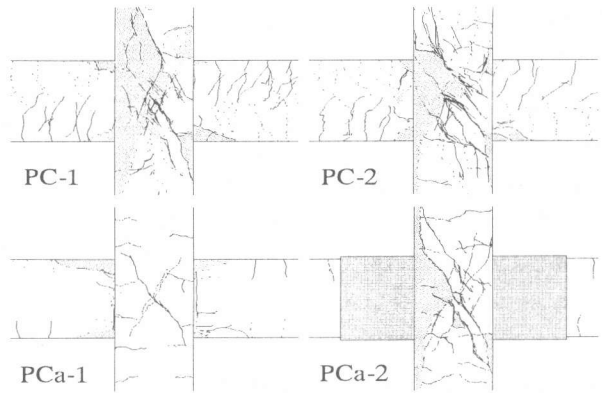


図-3 最終ひび割れ状況

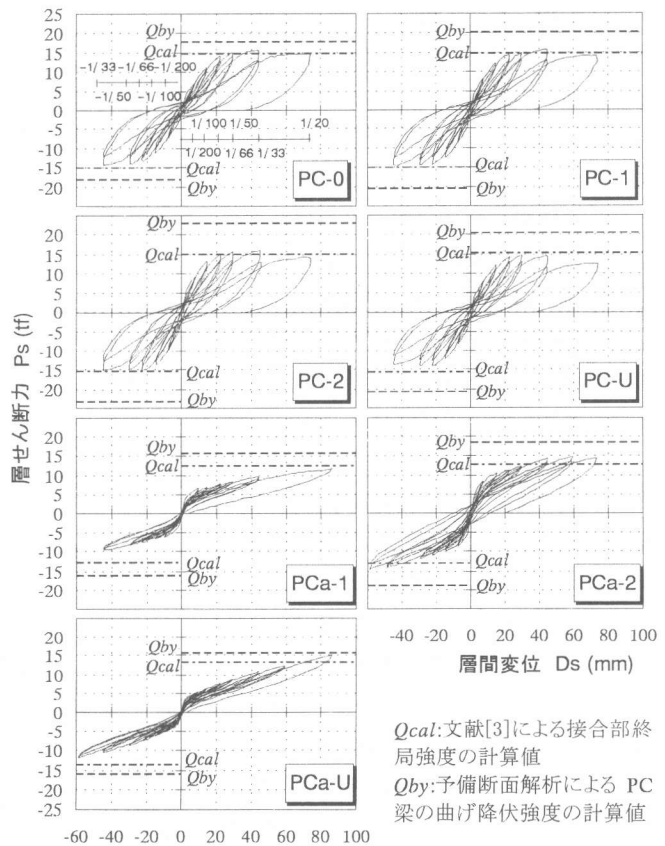


図-4 層せん断力-層間変位関係

剛性が高くなっているが、この時点では梁の曲げ変形が支配的であると思われる。接合部破壊の生じた $R_s = 1/66$ サイクルあたりからスリップ性状が顕著になり、その後 PC-U が $R_s = 1/50$ 、それ以外は $R_s = 1/33$ サイクルで最大耐力に達したが、以降の耐力低下は緩やかであった。一方、圧着接合シリーズでは、エネルギー吸収の極めて少ない、非線形弾性的な原点指向型の履歴特性を示した。接合部破壊の殆ど見られなかった PCa-1 及び PCa-U では最終サイクルで計画の $R_s = 1/20$ 時においても耐力低下が見られなかったので、 $R_s = 1/17$ まで加力を行った。PCa-2 では、接合部破壊の起こった $R_s = 1/33$ サイクルから履歴ループが膨らみを持ち始め、最終サイクルまで紡錘形の履歴性状を示した。

3.3 接合部のせん断変形

図-5 に接合部せん断応力度-接合部せん断変形角関係を示す。一体打ちシリーズのすべての試験体で、接合部破壊が顕著になった $R_s = 1/66$ のサイクルあたりからせん断変形の増加が見られる。一方、圧着接合シリーズの PCa-1 では、接合部からの PC 鋼棒の抜け出しが顕著なため、接合部コンクリートパネルのせん断変形が生じにくくなっている。図-6 に各正サイクルのピーク時における接合部せん断変形角を、プレストレスレベルに対して示す。プレストレスレベルが大きくなると、接合部のせん断変形が抑制されるという現象は見られず、むしろ部材角が進むにつれ変形が増大する傾向がある。

3.4 接合部コンクリートのひずみ

図-7 に接合部コンクリート圧縮ストラットのひずみ状況を示す。一体打ちの試験体では、一軸圧縮強度時のひずみ ϵ_c が 1800μ 程度であるのに対し、ストラットのひずみが $R_s = 1/66$ のサイクルで急増しているのが分かる。このことは、接合部破壊がこ

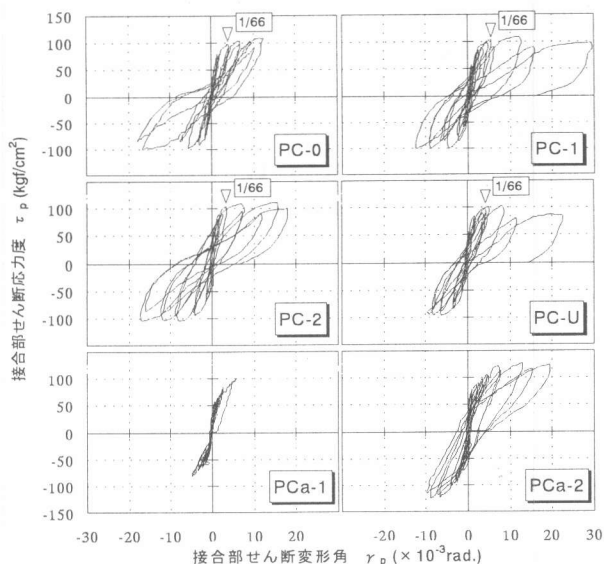


図-5 接合部せん断応力度-せん断変形角関係

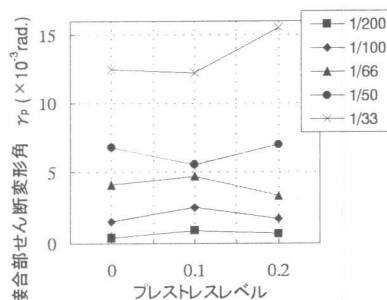


図-6 接合部せん断変形角の推移

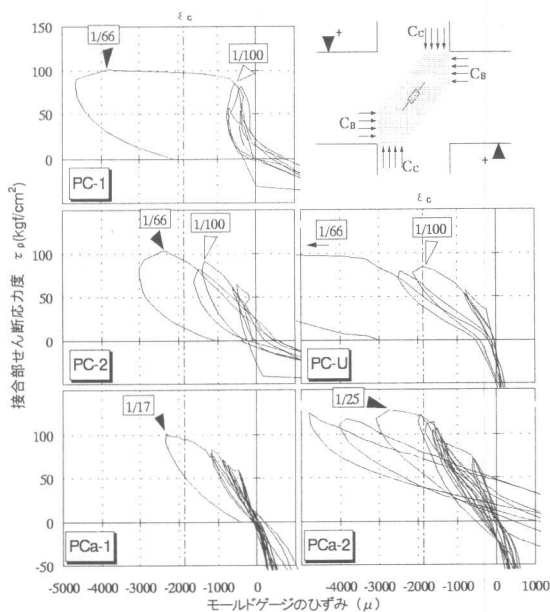


図-7 接合部圧縮ストラットのひずみ

表-3 実験値と計算値の比較

試験体	接合部せん断ひび割れ発生時					最大耐力時					破壊モード
	層せん断力 P _s (tf)	層間変位 D _s (mm)	接合部せん断応力度 τ _p (kgf/cm ²)			層せん断力 P _s (tf)	層間変位 D _s (mm)	接合部せん断応力度 τ _p (kgf/cm ²)			
			実験値 τ _{exp}	計算値 τ _{cr}	τ _{exp} /τ _{cr}			実験値 τ _{exp}	計算値 τ _{max}	τ _{exp} /τ _{max}	
PC-0	5.31	4.84	36.9	43.18	0.85	15.65	43.78	108.7	103.05	1.05	J
PC-1	5.21	3.07	36.2	59.10	0.61	15.74	44.74	109.3	103.05	1.06	J
PC-2	5.65	2.90	39.2	73.41	0.53	15.87	44.66	110.2	105.86	1.04	J
PC-U	5.40	3.81	37.5	61.00	0.61	14.67	29.41	101.9	110.77	0.92	J
PCa-1	6.90	18.62	59.0	59.14	1.00	11.68	86.49	101.0	111.46	0.91	B
PCa-2	7.16	4.72	62.0	74.17	0.84	14.70	59.17	127.0	111.46	1.14	J
Pca-U	7.41	21.12	64.0	60.91	1.05	15.13	86.47	130.0	111.46	1.17	B

$\tau_{exp} = Q_p / b_j D_c$ $\tau_{cr} = \{F_t^2 + (\sigma_0 + \sigma'_g) F_t + \sigma_0 \sigma'_g\}^{1/2}$ $\tau_{max} = 0.3 \sigma_B$ $F_t = 1.6 \sqrt{\sigma_B}$ $\sigma'_g = 0.667 \sigma_g$
 Q_p : 接合部せん断力 b_j : 接合部有効幅 D_c : 柱せい σ_0 : 柱軸応力度 σ_g : 平均プレストレス σ_B : コンクリート圧縮強度

のサイクルにおいて生じていることを裏付けている。また、圧着接合シリーズでの接合部破壊型の PCa-2 でも R_s = 1/25 のサイクル以降でこれと同じような現象が見られた。

4. 実験結果の検討

4.1 接合部せん断ひび割れ強度

表-3 に各実験値を計算値と比較して示す。接合部のせん断ひび割れ強度 τ_{cr} は、柱からの軸応力度 σ₀ と接合部の平均せん断応力度 τ_p との組み合わせによる引張主応力度がコンクリートの引張強度 F_t に達したときにせん断ひび割れが発生する、と考える主応力度式(式 1)が知られている。今回はこの式に、プレストレス力による梁軸応力度 σ_g を柱断面に換算し、σ_g' として加え(図-8)、モールの応力円を描き直して導き出した式(式 2)を用いて検討する。接合部せん断ひび割れ強度の実験値と計算値を比較すると、プレストレスレベルが高くなるにつれ計算値との対応が悪くなっている。しかし、3.1 でも述べたように、ひび割れの角度がプレストレスレベルによって明確に異なる点を考えると、プレストレスレベルの接合部せん断ひび割れ強度に対する影響は存在すると思われる。

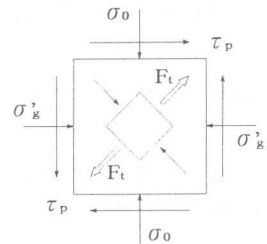


図-8 応力の釣合い

$$\tau_{cr} = \sqrt{F_t^2 + F_t \cdot \sigma_0} \quad (1)$$

$$\tau_{cr} = \sqrt{F_t^2 + (\sigma_0 + \sigma'_g) F_t + \sigma_0 \cdot \sigma'_g} \quad (2)$$

ここで、 $F_t = 1.6 \sqrt{\sigma_B}$ $\sigma'_g = 0.667 \sigma_g$

4.2 接合部せん断終局強度

日本建築学会の RC 終局強度型指針[3]では、RC 接合部のせん断終局強度の下限値を 0.3σ_B と定めているが、今回 J 型破壊した試験体は 0.28~0.34σ_B の間にあり、RC 接合部の計算値で概ね評価できることが分かる。また、試験体ごとに比較すると、図-9 に示すように、PC-0、PC-1、PC-2 の間には接合部せん断終局強度に殆ど差が見られず、プレストレス導入力が大きくなっても、接合部のせん断強度は上昇していない。一方、PC-1 と PC-U との比較から、PC 鋼棒をアンボンドにした PC-U で、接合部のせん断終局強度が若干低めになっていることが分かる。これは、接合部の圧縮ストラットのひずみ(図-7)の増大が PC-U の方が大きいことから、アンボンドの場合、梁

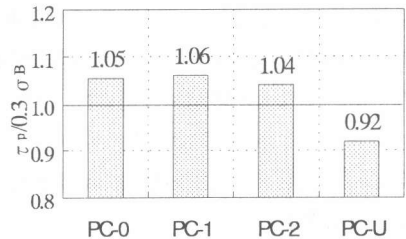


図-9 接合部せん断終局強度の比較

から入力されるコンクリート圧縮域のせいが付着のある場合に比べ小さく、その分ストラットの幅が狭くなり、負担する圧縮力がきつくなったためではないかと思われる。

4. 3 PC 鋼棒の抜け出しと梁端部の塑性回転

圧着接合シリーズの試験体のうち、PCa-1 と PCa-U では、梁曲げ圧壊型の破壊モードを示した。この場合、終局強度時における現象としては、接合部からの鋼材の抜け出しと、梁塑性ヒンジの生成により塑性回転変形が生じることが挙げられる。図-10 に終局時の梁接合端の塑性回転変形の模式図を示す。図中に、梁曲げ圧壊時における梁断面方向のひずみ分布を簡略して示す。上下の PC 鋼棒のひずみが付着劣化から近い値を示し、「平面保持の仮定」からはかなりかけ離れたひずみ分布となっている。このような結果から、「平面保持の仮定」を用いずにコンクリートの圧壊で耐力が決まると考え、図示のように計算し直すと層せん断力で 10.3 tf (実験最大耐力時の約 88%) の時に梁の曲げ圧壊が生じ、接合部のせん断破壊より先行することが分かった。

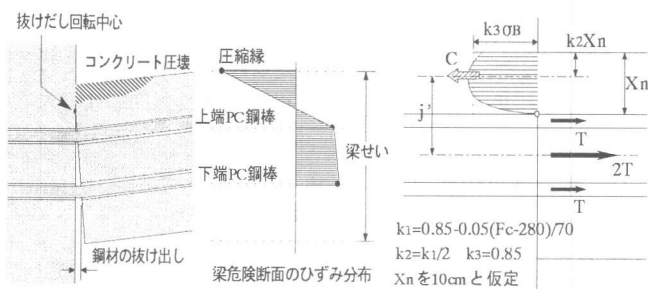


図-10 梁端部の回転変形 (模式図)

5. まとめ

プレストレス導入力及び PC 鋼棒の付着の有無をパラメータとした PC 内柱・梁接合部の載荷実験を行った。実験結果を以下のようにまとめる。

- (1) プレストレス導入力を増加すると、接合部せん断ひび割れの形成に影響を示すが、一般的に言われているような、接合部せん断終局強度の上昇は見られなかった。
- (2) PC 鋼棒をアンボンドにすると、接合部せん断強度はやや低下する傾向が見られた。
- (3) プレストレス力を与えても、接合部のせん断変形は抑制されず、層間変形角が進むとせん断変形をむしろ増幅させる傾向が確認された。
- (4) 接合部に圧着接合方式を用いた試験体では、接合目地部における PC 鋼棒の抜け出し及び梁の曲げ圧壊が顕著であった。

【謝辞】 本研究は、(社)建築研究振興協会に設けられた共同研究「PC 構造設計・施工指針作成」の研究調整委員会(委員長：岡本伸 建築センター技術研究所所長)のもとで構造性能評価 WG(主査：渡辺史夫 京都大学教授)で行われました。ご協力頂いた関係者各位に謝意を表します。

プレストレスの導入作業はオリエンタル建設(株)技術研究所にて行いました。また、同社技術部主任研究員の小山内裕氏には貴重なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1] 建設省建築研究所 他：「PC 構造設計指針作成のためのフィジビリティースタディー共同研究報告書」、1995.12
- [2] 渡辺史夫：「プレレストレストコンクリート造建築架構の耐震設計法」：財団法人日本建築センター平成5年度研究助成報告書 No.9307、1994.5
- [3] 日本建築学会：「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」、1990.11