

アンボンド PCaPC 柱梁接合部の せん断終局耐力に関する実験的研究

Experimental Study on Ultimate Shear Capacity of Precast Prestressed Concrete Beam-Column Joints Post-tensioned by Unbonded Tendons

R&D センター 松永 健太郎 KENTARO MATSUNAGA
R&D センター 新上 浩 HIROSHI SHINJO
R&D センター 田野 健治 KENJI TANO

柱と梁のいずれもアンボンド PC 部材とした柱梁接合部の実験を実施した。柱梁接合部に鉛直方向と水平方向の貫通孔を設けて、体積空隙率を実験変数とした。アンボンド PCaPC 柱梁接合部のせん断終局耐力は、体積空隙率が約 10% の場合にはボンド PC のせん断終局耐力式による計算値と同等となり、体積空隙率が約 15% の場合にはその計算値を 9% 下回った。柱梁強度比が 1 程度の試験体であったが、破壊形式は接合部降伏破壊ではなくコンクリート圧壊型の釣合破壊であった。

キーワード：アンボンド PC, 柱梁接合部, せん断終局耐力, 体積空隙率, 釣合破壊

Loading tests were conducted on precast prestressed beam-column joints in which both columns and beams were post-tensioned by unbonded tendons. Vertical and horizontal through-holes were provided at beam-column joints, and the volume void ratio was used as an experimental variable. The ultimate shear strength of unbonded PCaPC beam-column joints was equivalent to the calculated value by bonded PC formula when the volume void ratio was about 10%, and it was 9% lower than the calculated value when it was about 15%. Although the column-to-beam strength ratio of the test specimen was about 1, the beam-column joint yielding had not occurred.

Key Words: Unbonded Prestressed Concrete, Beam-column Joint, Ultimate Shear Capacity, Volume Void Ratio, Balanced Failure

1. はじめに

アンボンドプレストレストコンクリート（以下、アンボンド PC）圧着工法は、アンボンド PC 鋼材とコンクリートの間の付着がないことから、プレキャスト部材の解体が容易で、かつ部材をリユースすることが可能な工法である。リユースすることにより、プレキャスト部材の製作に伴う CO₂ 排出量を削減することができる。本工法の構造的な特長は、大きな変形性能と高い復元性能を有しており、免震構造と組み合わせることで地震時の損傷を抑制できることである。地震後の継続使用性という社会的な要求に加えて、BCP（事業継続計画）対策にも有効な工法である。

柱と梁をアンボンド PC 部材とすると、柱梁接合部には鉛直および水平方向の貫通孔による空隙が多くなるた

め、そのせん断終局耐力はボンド PC 部材よりも低下する可能性がある。過去に行われてきたアンボンド PC 柱梁接合部の研究では梁のみをアンボンド PC 部材としたものがほとんどであり^{例えば 1)}、柱もアンボンド PC 部材とした研究は著者らが過去に実施した T 形および L 形接合部の実験²⁾程度である。この実験では、梁と柱梁接合部間を PC 鋼棒破断時の梁部材落下防止用の接合筋が貫通していたり、柱梁接合部内に鉄骨梁が挿入された複合構造であったため、純アンボンド PC の柱梁接合部ではなかった。そこで本研究では、柱と梁のいずれも純アンボンド PC とした柱梁接合部のせん断終局耐力を把握することを目的として、柱梁接合部内の体積空隙率を実験変数とした構造実験を実施した。

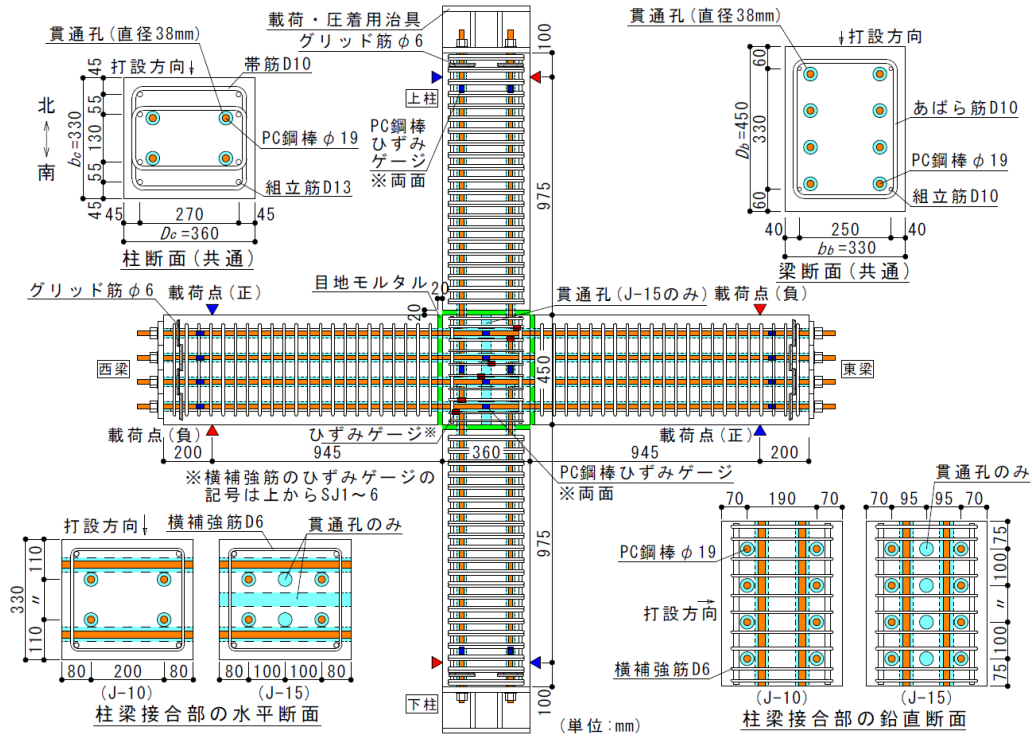


図-1 試験体形状と配筋

表-1 試験体一覧

2. 実験計画

(1) 試験体概要

試験体形状を図-1 に、試験体一覧を表-1 にそれぞれ示す。試験体は十字形柱梁接合部（柱と梁の側面は同面）であり、梁、柱および柱梁接合部それぞれをプレキャスト部材として、柱梁接合部周りの4面すべての目地（厚さ20mm）に無収縮モルタルを打設した。PC鋼棒を用いて柱と柱梁接合部、梁と柱梁接合部の順に圧着接合した。各断面における緊張力の導入はたすき掛けの位置にあるPC鋼棒を2本ずつ行った。実験変数は柱梁接合部内の体積空隙率である。柱と梁の配筋と形状は2体ともそれぞれ同一であり、J-15の柱梁接合部内の孔（直径38mm）の数を水平・鉛直の各方向ともJ-10の1.5倍とした。これにより、J-10の体積空隙率（貫通孔によって欠損した体積を柱梁接合部全体積で除した比）は約10%、J-15は約15%である。破壊形式は梁および柱の曲げ降伏に対して柱梁接合部のせん断破壊が先行するように計画した。コンクリートとモルタルおよび鋼材の材料試験結果を表-2 および表-3 にそれぞれ示す。

試験体名		J-10	J-15
梁	断面 $b_b \times D_b$	330 × 450mm	
	組立筋 / あばら筋	4-D10 / 2-D10@50 ($p_w=0.86\%$) ^{※1}	
	PC鋼棒	2 × 4-φ19	
	有効プレストレス力 P_e ^{※2}	0.69 P_y ^{※3}	0.73 P_y ^{※3}
	プレストレスレベル	0.21	0.22
柱	断面 $b_c \times D_c$	330 × 360mm	
	組立筋 / 帯筋	8-D13 / 4-D10@50 ($p_w=1.73\%$) ^{※1}	
	PC鋼棒	2 × 2-φ19	
	有効プレストレス力 P_e ^{※2}	0.55 P_y ^{※3}	0.56 P_y ^{※3}
柱梁接合部	組立筋 / 横補強筋	4-D13 / 2-D6 ($p_{pw}=0.43\%$) ^{※4} (計算)	
	孔数 [水平/鉛直]	8 / 4	12 / 6
	体積空隙率	9.9 %	14.9 %

※1: p_w は補強筋比。 ※2: 荷重開始時のPC鋼棒張力。 ※3: P_y はPC鋼棒の規格降伏耐力。 ※4: p_{pw} は横補強筋比。

表-2 コンクリートとモルタルの材料試験結果

試験体	コンクリート ^{※1} (N/mm ²)			目地モルタル (N/mm ²)		
	圧縮強度	ヤング係数 ^{※2}	割裂引張強度	圧縮強度	ヤング係数 ^{※2}	割裂引張強度
J-10	54.1	34500	3.79	139	47300	8.03
J-15	55.7	33100	3.23	137	45900	8.27

※1: 粗骨材の最大寸法は20mm。 ※2: 1/3割線弾性係数

表-3 鋼材の材料試験結果

径	鋼種	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	伸び (%)
D13	SD295	347	480	183000	21.8
D10	SD295	349	477	182000	23.7
D6	SD295	413 [※]	531	192000	20.4
φ19	C種1号	1185 [※]	1282	202000	12.4

※0.2%オフセット耐力

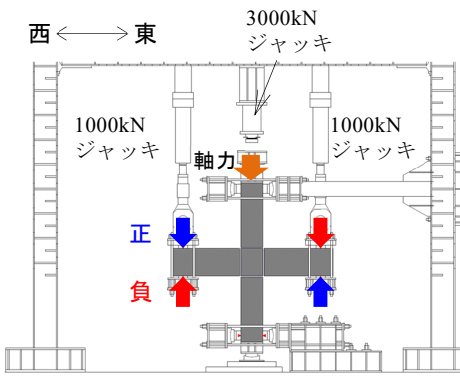


図-2 荷装置

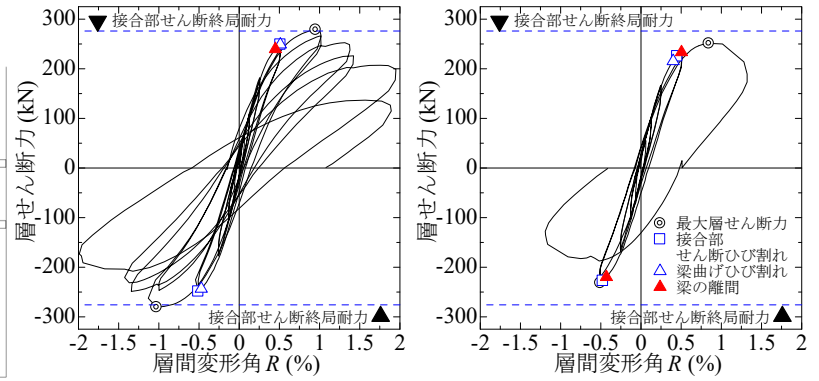
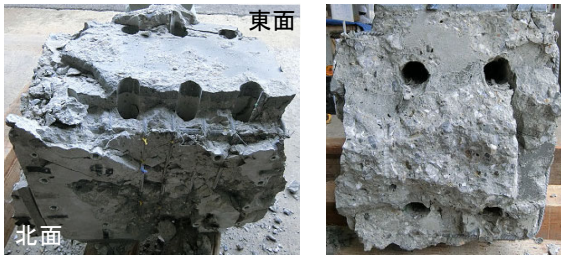
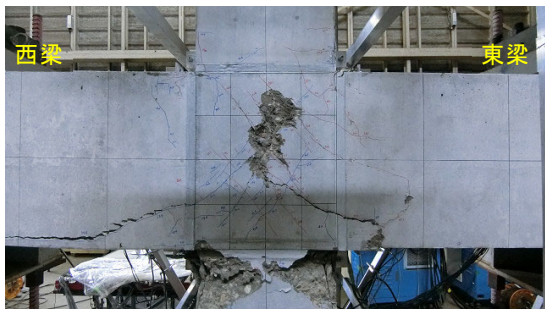
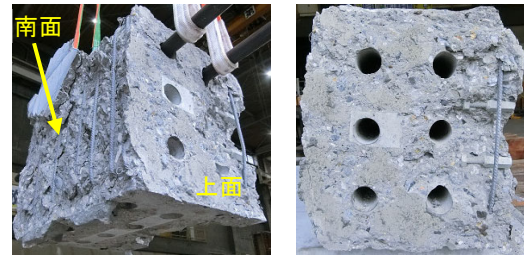


図-3 層せん断力-層間変形角関係
(a) J-10 (b) J-15



(a) J-10



(b) J-15

写真-1 最終破壊状況 (上段：柱梁接合部側面，下段：解体後の柱梁接合部)

間変形角 $R = \pm 0.0625\%$ を 1 サイクル， ± 0.125 ， ± 0.25 ， ± 0.5 ， ± 1.0 ， $\pm 2.0\%$ を 2 サイクルずつとした荷重履歴で，荷重制御により目標変位まで荷重した。

計測フレームを 2 種類取り付け付けた。一つは柱上下の反曲点位置に固定するタイプのもので，この計測フレームを基準として梁先端の変位から層間変形角 R を算出した。もう一つは部材ごとに独立した計測フレームを取り付け，計測方法は文献 4) を参照した。

計測項目は，反曲点位置の変位，柱梁接合部の対角線方向の変位，各部材間の相対変位，鉄筋のひずみ，コンクリートおよび目地モルタルのひずみである。

3. 実験結果

(1) 破壊性状とせん断終局耐力

層せん断力-層間変形角関係を図-3 に，最終破壊状況を写真-1 に，実験値と計算値の一覧を表-4 にそれぞれ

れ示す。両試験体とも $R = \pm 0.5\%$ 程度で柱梁接合部の対角線方向にせん断ひび割れが生じ， $R = \pm 0.9\%$ 程度で最大層せん断力に達した。J-10 では，最大層せん断力時には下柱の損傷が大きく，柱梁接合部のせん断破壊は生じていなかった。その後の加力で上柱および東西の梁端部が圧壊し， $R = \pm 2.0\%$ で柱梁接合部のせん断破壊が生じた。J-15 では，上下柱および東西梁の 4 部材とも端部が圧壊した後，柱梁接合部のせん断破壊が生じて急激に耐力が低下した。日本建築学会「プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針 (案)・同解説」³⁾ では体積空隙率が 8% 程度より大きいとせん断終局耐力の計算値に対する実験値の比が 1 を下回ることが指摘されているが，本実験では体積空隙率が約 10% の J-10 では 1.01 となり，約 15% の J-15 では 0.91 となった (表-4)。

両試験体とも柱梁強度比が 1 程度であるが，接合部降伏破壊ではなくコンクリート圧壊型の釣合破壊であった。

表-4 実験値と計算値一覧

試験体	層せん断力実験値 (kN) [記載例: 正載荷時/負載荷時]							耐力計算値 (層せん断力に換算)							実験値 ^{※5} / 計算値 ^{※6}	
	梁 [上段: 東梁, 下段: 西梁]			柱 [上段: 上柱, 下段: 下柱]			接合部	梁 (kN)		柱 (kN)		柱梁接合部 ³⁾ (kN)				
	離間 ^{※1}	曲げ ひび割れ	圧壊	離間 ^{※1}	曲げ ひび割れ	圧壊	せん断 ひび割れ	最大	離間	降伏 ^{※2}	離間	降伏 ^{※2}	柱梁 強度 比 ^{※3}	せん断 ひび割れ		せん断 終局 ^{※4}
J-10	+240/ -	+249/ -	- /-241	+240/ -	+249/-210	+276/-281	+249	+279	146	276	138	288	1.04	269	276	1.01
	- / -	+249/-243	+249/ -	+249/-249	- /-249	+279/-281	/-249	/-281								
J-15	- /-228	- / -	+189/ -	- /-220	+233/-232	+189/ -	+225	+251	155	291	143	297	1.02	276	276	0.91
	+233/-232	+215/ -	+189/ -	+233/-232	- / -	+225/-232	/-228	/-232								

※1: 部材端部圧着面の回転に伴う目開きのことで、目視により確認。※2: 曲げ降伏耐力は曲げ終局耐力の0.9倍。曲げ終局耐力計算⁵⁾時の梁の引張側 PC 鋼材張力は竹本式 (鉛直荷重用)、圧縮側 PC 鋼材張力は載荷開始時の張力 P_e 。※3: アンボンド PC 柱と梁の曲げ降伏耐力 (または曲げ終局耐力) の比。※4: 鉛直方向の貫通孔による空隙を考慮。応力中心間距離を $0.8D_0$ と仮定。※5: 正載荷時の最大層せん断力。※6: 柱梁接合部のせん断終局耐力。

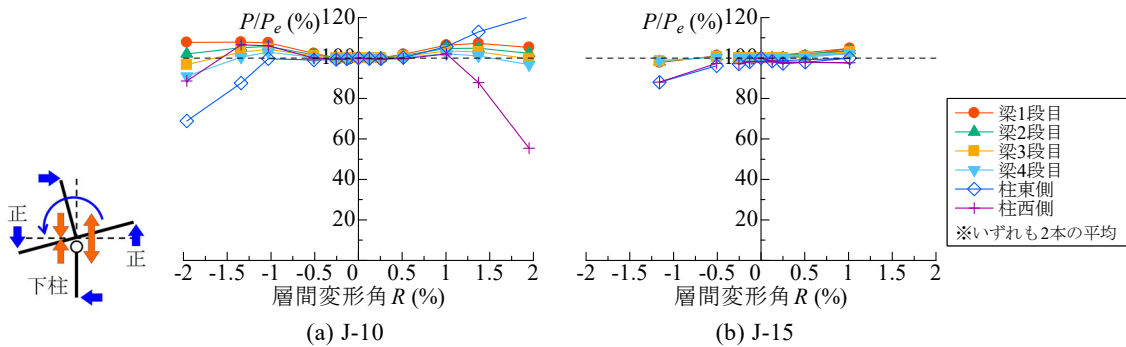


図-4 ピーク時 PC 鋼棒張力残存率

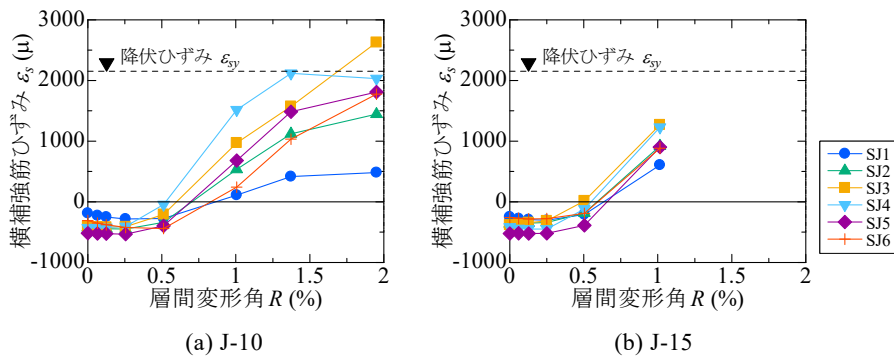


図-5 接合部横補強筋のひずみの推移

塩原はアンボンド PC 柱梁接合部では接合部降伏破壊は生じえないことを理論的に示しており⁹⁾、本実験からも接合部降伏破壊が起きないことが明らかになった。

部材端部に生じた曲げひび割れに加えて、モルタルの接着強度が大きい部分もあったことから、梁の離間開始後に圧着面の途中から梁部材内に伸展するひび割れも生じた。圧着面全体が大きく離間しない状態で層間変形角が増大したため、柱および梁部材の曲げ変形が大きくなり、端部の曲げひび割れが生じたものと考えられる。

実験終了後に PC 鋼棒の緊張力を解放し、それぞれのプレキャスト部材に解体した。解体後の柱梁接合部を写真-1 の下段に示す。梁の離間は一部に見られたものの、圧着面全体が完全に離間していないため、PC 鋼棒の緊張力の解放だけでは解体できなかった。そこで、目地モ

ルタル部を切断し、強制的に力を与えて解体した。解体後の柱梁接合部からは、貫通孔近傍とそれ以外の部分の破壊状況に明確な差異は見られなかった。

(2) PC 鋼棒張力残存率と接合部横補強筋のひずみ

有効プレストレス力 P_e に対する各ピーク時の PC 鋼棒の張力 P (ひずみゲージ 6 枚の平均より算出) の比と層間変形角の関係を図-4 に示す。2 体とも梁の PC 鋼棒の張力に大きな変動は見られなかった。J-10 の柱の PC 鋼棒の張力が $R = \pm 1.0\%$ から変動しているのは、下柱の曲げ剛性が圧壊によって低下し、上柱と東西梁の 3 部材が一体となって回転しやすくなったためと考えられる (図-4(a)左)。

接合部横補強筋のひずみ ϵ_s の推移を図-5 に示す。接合

部のせん断ひび割れが正載荷時に生じる対角線上の位置にひずみゲージを貼り付けた (図-1)。せん断ひび割れが生じてから引張ひずみが増大し始めたが、最大層せん断力時まで引張降伏ひずみ ϵ_{sy} に達した横補強筋はなかった。J-10 では、 $R=+2.0\%$ でせん断ひび割れ幅が大きくなり、柱梁接合部の中心部に近い横補強筋が降伏した。

4. まとめ

柱と梁のいずれもアンボンド PC 部材とした柱梁接合部の実験を実施した。柱梁接合部に設けた鉛直方向と水平方向の貫通孔による体積空隙率を実験変数とした。アンボンド PCaPC 柱梁接合部のせん断終局耐力は、体積空隙率が約 10% の場合にボンド PC のせん断終局耐力式による計算値と同等となり、体積空隙率が約 15% の場合にその計算値を 9% 下回った。

謝辞：本実験の実施および結果の検討に至るまで、京都大学准教授 谷昌典博士には、多くのご指導、ご助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 新井昂, 栗本健多, 北山和宏, 金本清臣, 田島祐

- 之：アンボンド PC 鋼材で圧着接合した PCaPC 柱梁接合部の耐震性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 構造IV, pp.741-742, 2014.9
- 2) 大圖友梨子, 下平悠夏, 田野健治, 松永健太郎, 新上浩, 松田拓, 峯竜一郎, 谷昌典: 柱をアンボンド PCaPC 部材とした柱梁接合部の実験的検討 (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 構造IV, pp.685-688, 2022.7
- 3) 日本建築学会: プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針 (案)・同解説, 2015.2
- 4) 楠原文雄, 塩原等: 接合部回転角を含む RC 造柱梁接合部部分架構の変形成分と応力およびその測定法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.355-360, 2006.7
- 5) 日本建築学会構造委員会プレストレストコンクリート構造運営委員会: 古くて新しい・アンボンド PC が紡ぐ未来の空間創造, 2021 年度日本建築学会大会 (東海) 構造部門 (PC) パネルディスカッション資料, 2021.9
- 6) 塩原等: 鉄筋コンクリート柱梁接合部: 梁曲げ降伏型接合部の耐震設計, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 640 号, pp.1145-1154, 2009.6