

逆対称曲げを受ける PC 圧着柱の耐震性能に関する研究

京都大学大学院 正会員 ○谷 昌典
正会員 西山 峰広

1. はじめに

アンボンド PC 部材では、荷重形式や荷重の分布により PC 鋼材の張力変動が異なり、したがって、曲げ耐力や変形挙動も異なる。過去に、文献[1]および[2]において片持ち形式のアンボンド PC 圧着柱に対する実験的研究が行われた。また、文献[3]においては、実際の骨組中の柱に近い荷重状態とするため、逆対称曲げを受けるアンボンド PC 圧着柱に対する解析的研究が行なわれた。しかしながら、この時点では、比較の対象となる実験は未実施であった。

本論文では、その後実施した、付着の有無を実験変数とした PC 圧着柱試験体に対する逆対称曲げ荷重試験について報告する。また、これらの試験体に対して、文献[3]で示した要素分割解析を適用し、実験結果と解析結果の比較検討を行い、PC 圧着柱耐震性能に関する基礎資料を提供する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本実験で使用する試験体は 2 体で、PC 鋼材にグラウトを行ったものを行っていないものが 1 体ずつである。試験体の設計に使用したコンクリート目標強度は 60MPa であり、試験体に作用させる導入プレストレス力及び軸力は、このコンクリート目標強度をもとに、プレストレス比 $\eta_P (= \Sigma P_i / (bDf'_c))$ 及び軸力比 $\eta_N (= N / (bDf'_c))$ をそれぞれ 0.10 及び 0.23 とし算出した値 (導入プレストレス力: 960kN, 軸力: 2240kN) を用いる。ここに、 P_i : 導入プレストレス力, N : 軸力, b : 断面幅, D : 断面せい, f'_c : コンクリート圧縮強度である。導入プレストレス力の PC 鋼材降伏耐力に対する比率は 0.535 である。

図-1 に試験体詳細を示す。断面 400×400mm, 内法高さ 1160mm の柱と、断面 400×1000mm, 高さ 800mm の基礎部分を別々に打設した後、20mm 厚の高強度無収縮モルタルを介して、両者をプレストレス力により圧着接合した。試験区間の組立筋及びせん断補強筋には D10 (SD295) の異形鉄筋を、PC 鋼材には ϕ 23PC 鋼棒 (SBPR1080/1230) をそれぞれ使用した。使用したコンクリート、モルタル、グラウトの力学特性を表-1 に、鉄筋及び PC 鋼棒の力学特性を表-2 に示す。

2.2 荷重方法

荷重は図-2 に示すように反力床上で行った。反力床に PC 鋼棒で固定した鉄筋コンクリート造反力ブロックに、試験体柱脚側スタブを固定し、水平荷重用の 2000kN ジャッキと軸力荷重用の 8000kN ジャッキ 2 本を鉄骨製及び RC 製治具を介して柱頭スタブに接続する。軸力荷重用ジャッキ 2 本の荷重合計値を一定に保ちながら、柱頭側スタブと柱脚側スタブが平行に保たれるように水平荷重用ジャッキの荷重を調整して荷重を行う。図-2 に示す柱頭及び柱脚に設置された水平変位計測用変位計が同じ値を示すように荷重することにより、スタブの平行度を保持した。なお、図-2 に示す通り、片方の水平荷重用ジャッキは取付上の問題により若干傾斜しているため、水平方向成分と軸力方向成分に分離してデータ整理を行った。荷重は柱部材回転角で制御し、部材回転角が 0.25%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0%, 4.0%, 5.0% で、それぞれ正負各 2 回の繰返し荷重を行った。荷重は西向き (図-2 中右向き) を正方向としている。

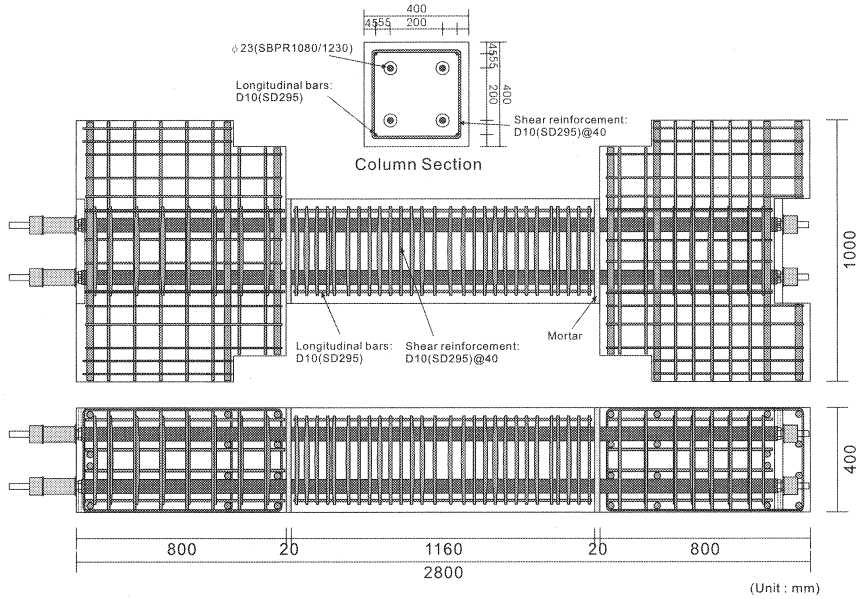


図-1 試験体詳細

表-1 試験体諸元

試験体名		B1/3-0.1	U1/3-0.1
コンクリート	f'_c [MPa]	71.6	56.1
	ϵ_c [MPa]	0.265	0.249
	E_c [GPa]	34.8	30.4
接合目地 モルタル	f'_c [MPa]	49.9	
	ϵ_c [MPa]	0.308	
	E_c [GPa]	20.8	
PC 鋼材 グラウト	f'_c [MPa]	37.7	-
	ϵ_c [MPa]	0.254	-
	E_c [GPa]	13.6	-
有効 プレストレス力 (軸力載荷前)	P_e [kN]	918.1	900.5
	ηP	0.080	0.100
軸力	N [kN]	2240	
	ηN	0.196	0.250

f'_c : 圧縮強度, ϵ_c : 圧縮強度時ひずみ,

E_c : 1/3 f'_c 割線弾性係数, P_e : 有効プレストレス力

表-2 鉄筋及びPC鋼棒の材料特性

鋼材種	f_y [MPa]	ϵ_y [%]	f_u [MPa]	E_s [MPa]
D10	322.7	0.192	443	1.68×10^5
φ23	1193*	-	1270	2.01×10^5

f_y : 降伏強度, ϵ_y : 降伏ひずみ, f_u : 引張強度,

E_s : ヤング係数, *0.2%オフセット降伏耐力

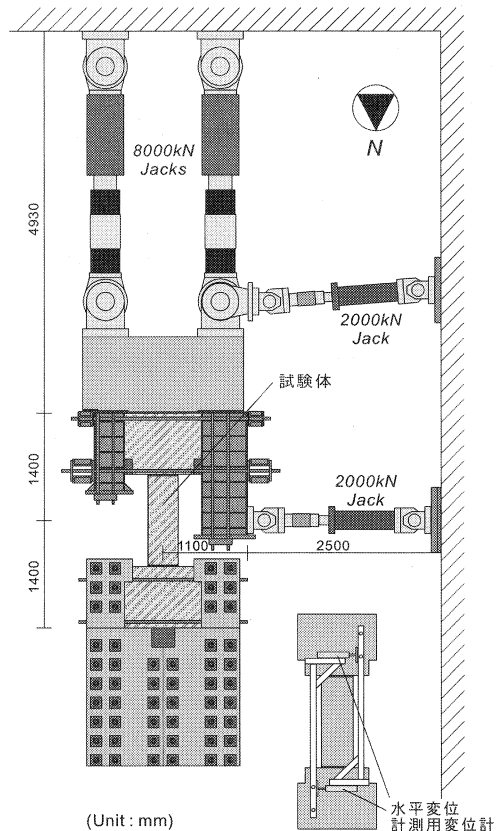


図-2 荷装置置

3. 実験結果

試験体はともに曲げ圧縮破壊により終局状態に至った。B1/3-0.1 試験体では部材回転角±5.0%の最終載荷変位まで達したが、U1/3-0.1 試験体では部材回転角+4.0%の1回目において軸力を支持できなくなったため載荷を終了した。

3.1 材端モーメントー部材回転角関係

図-3に各試験体の材端モーメントー部材回転角関係を、表-3に各試験体の最大耐力を示す。また、ACIコンクリート応力ブロックを用いて計算した曲げ耐力計算値 M_{ACI} も図-3及び表-3に併せて示す。なお、 M_{ACI} は、B1/3-0.1 試験体に関しては平面保持を仮定し、U1/3-0.1 試験体に関しては、文献[4]に基づきPC鋼棒とコンクリートのひずみ適合係数 F 値を0.2として求めたPC鋼棒張力を用いて計算した値である。

B1/3-0.1 試験体において、正載荷時の柱脚側と負載荷時の柱頭側で実験値が計算値 M_{ACI} を下回ったが、正載荷時と負載荷時の平均値と計算値を比較すると、実験値が計算値の0.99~1.12倍となり、両者がほぼ一致する結果となる。文献[1], [2]では、実験においては横拘束や基礎部による柱脚部コンクリートの拘束効果があるため、ACI応力ブロックを用いて算定された曲げ耐力値は実験値を過小評価する傾向にあるとされていた。しかし、これらの実験で使用された試験体の断面は220×250mmと小さく、本実験のように400×400mmと比較的大きな断面を有する本試験体と比べて、コアコンクリートに対する拘束効果が大きくなったことが耐力を上昇させる要因になったものと考えられる。また、本実験で使用した試験体でのPCシースによる断面欠損は4.9%で、文献[1], [2]の3.9%よりやや大きいことから、PCシースによる断面欠損が耐力低下の一因になったことも考えられる。

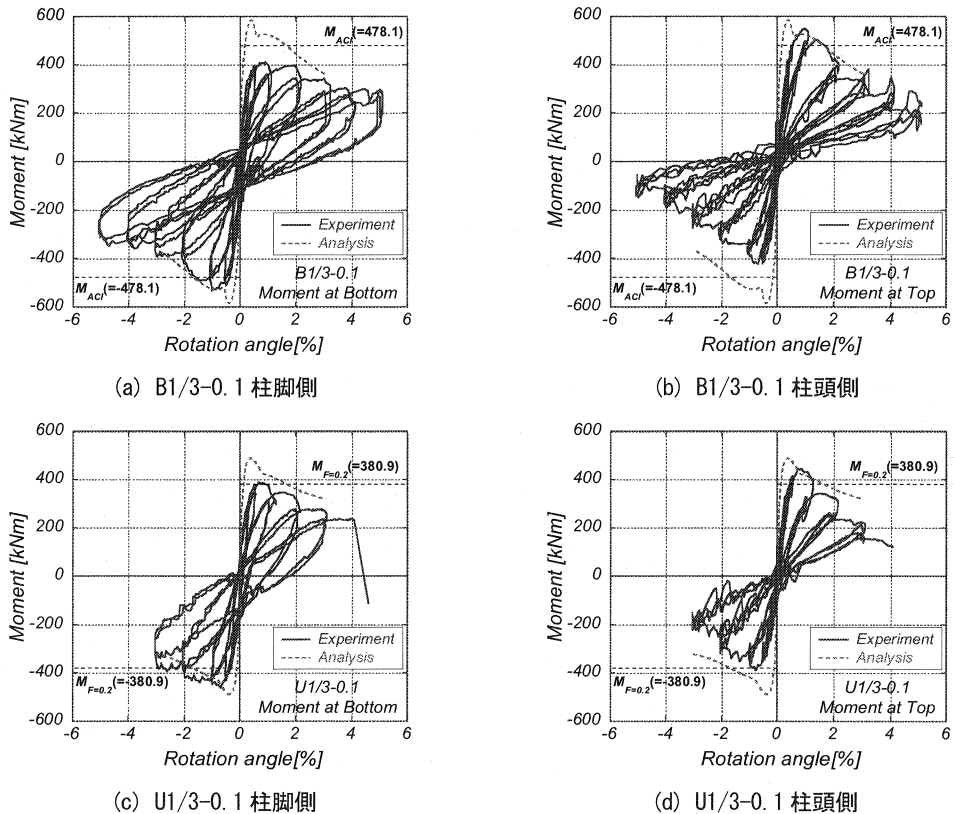


図-3 材端モーメントー部材回転角関係

表-3 曲げ耐力実験値と計算値

試験体名		M_{exp} [kNm]	M_{ave} [kNm]	M_{ACI} [kNm]	M_{ave}/M_{ACI}	M_{ana} [kNm]	M_{ave}/M_{ana}
B1/3-0.1	柱脚	410.1	471.2	478.1	0.99	583.5	0.81
		-532.2					
	柱頭	548.5	485.3		1.02		0.83
		-422.1					
U1/3-0.1	柱脚	388.9	425.2	380.9	1.12	487.9	0.87
		-461.5					
	柱頭	444.5	416.8		1.09		0.85
		-389.1					

M_{exp} : 曲げ耐力実験値, M_{ave} : 正載荷時と負載荷時の曲げ耐力実験値の平均値

M_{ACI} : ACI 応力ブロックによる曲げ耐力計算値, M_{ana} : 要素分割解析法による曲げ耐力解析値

3.2 PC 鋼棒張力

各部材回転角の1回目サイクルにおける東側及び西側のPC鋼棒張力合計値と部材回転角の関係を図-4及び図-5中に実線で示す。ボンド試験体では目地部近傍に貼付したひずみゲージから得られたPC鋼棒ひずみを、Menegotto-Pintoモデル⁵⁾に適用してPC鋼棒張力を推定した。また、アンボンド試験体ではPC鋼棒端部に取り付けたロードセルの計測値を用いた。なお、図-4中の「Top East」について、部材回転角+1.0%のデータは、ゲージ不調のため図から除外してある。

PC鋼棒に付着のあるB1/3-0.1試験体に関しては、正載荷時における柱脚東側及び柱頭西側のように引張側にあるPC鋼棒では有効プレストレスから張力が増加し、正載荷時における柱脚西側及び柱頭東側のように圧縮側にあるPC鋼棒では張力が減少している。また、実験時に最大耐力を示した部材回転角0.5%~1.0%サイクル時に、引張側にあるPC鋼棒張力が最大値を示し、その後部材の軸圧縮ひずみの進行に伴って徐々に張力が減退していく。U1/3-0.1試験体に関しては、逆対称曲げを受けるアンボンドPC部材では、柱上下のコンクリート引張側での伸びと圧縮側での縮みが柱全長にわたり均一化されるため、軸力導入直後のプレストレス力からの変動は小さく、部材の軸圧縮ひずみの進行に伴って徐々に張力が減退していく。なお、軸力導入により、軸力導入前のプレストレス力からB1/3-0.1試験体柱脚側で12.7%、柱頭側で16.7%、U1/3-0.1試験体で12.5%減少した。いずれの試験体についても導入プレストレスを降伏耐力に比べて低く設定したため、PC鋼棒の降伏は見られなかった。

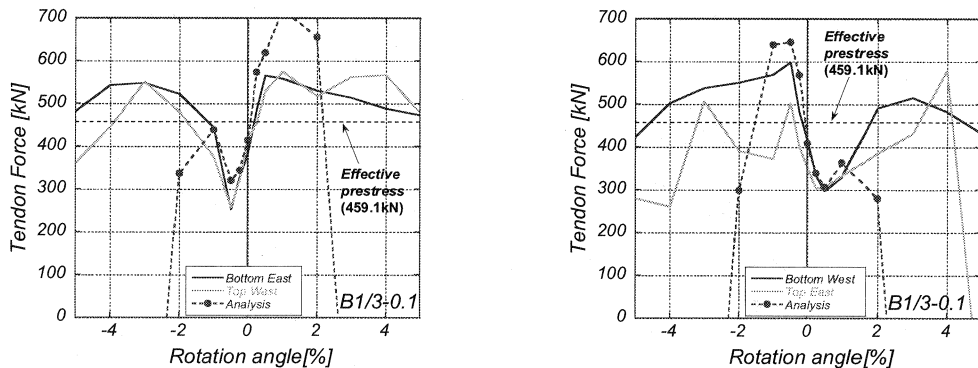


図-4 PC鋼棒張力変動 (B1/3-0.1 試験体)

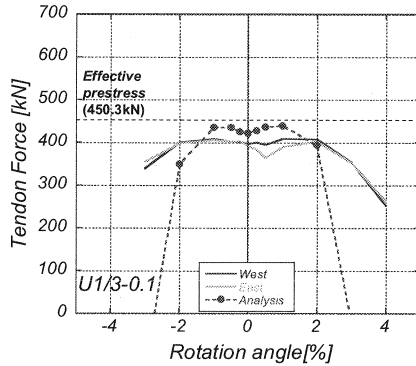


図-5 PC鋼棒張力変動 (U1/3-0.1 試験体)

4. 解析

文献[3]で示した、PC鋼棒の付着-すべり関係を考慮した要素分割法に基づいた数値解析を上記試験体に適用し、解析結果と実験結果を比較検討する。

4.1 解析モデル

解析モデルは実験で使用した試験体に基づき、柱断面は400×400mm、柱内法高さは1200mmとし、柱部材の両端に剛体と仮定した、長さ800mmのスタブを接続する。PC鋼棒以外には、上端・下端に異形鉄筋D10を各2本ずつ、せん断補強筋としてD10矩形フープを40mm間隔で配置している。要素分割の概要を図-6に示す。柱を材軸方向及び断面せい方向にそれぞれ6分割及び100分割している。

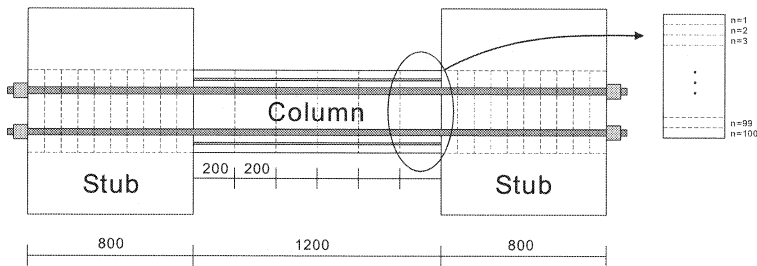


図-6 解析対象モデル

4.2 解析結果

各試験体について、単調載荷で解析を行って得られた材端モーメント-部材回転角関係を図-3中に点線で、実験と同じ載荷履歴を用いて繰返し載荷下での解析を行って得られた材端モーメント-回転角関係を図-7に示す。また、単調載荷時の最大耐力を表-3中に M_{ana} として示し、実験時の最大耐力との比も併せて示す。正載荷時と負載荷時の平均値と解析値を比較すると、実験値が解析値の0.81~0.87倍となり、解析値が実験値を過大評価している。また、初期剛性に関しても、解析結果の方が実験結果よりも大きくなっている。本解析では文献[7]に基づき、横補強筋によるコンクリート拘束効果に対して、NewRC式における拘束効果の強度上昇係数 α を2.6としたが、この値に関しては更なる検討が必要である。また、柱せいの半分とした要素分割方法も今後の検討課題である。

また、繰返し載荷下で解析を行って得られた各部材回転角の1回目サイクルにおけるPC鋼棒張力と部材回転角の関係を図-4及び図-5中に点線で示す。いずれの試験体も部材回転角±1%まではPC鋼棒張力の変動をうまく追跡できるが、大変形時には張力減退を過大評価している。

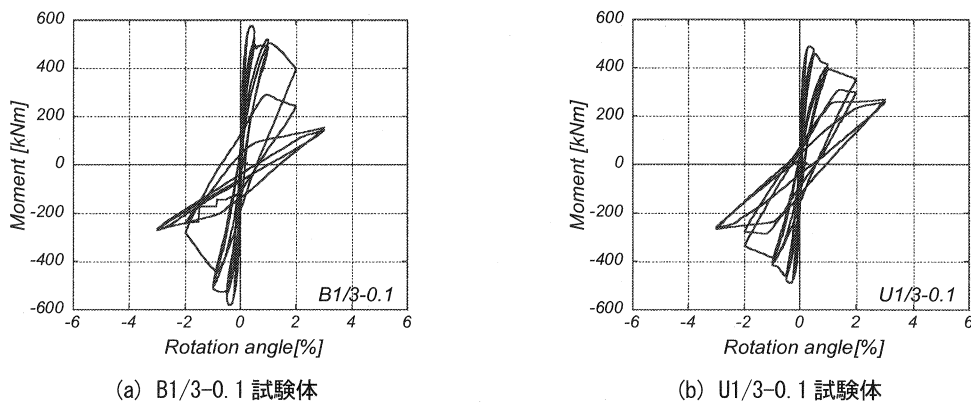


図-7 材端モーメント-部材回転角関係 (解析結果)

5. まとめ

逆対称曲げを受けるアンボンドとボンド PC 圧着柱に対して載荷実験を行い、要素分割解析に基づく手法で挙動予測を行った結果、以下の結論を得た。

- ・ ACI コンクリート応力ブロックを用いて、B1/3-0.1 試験体に対しては平面保持を仮定し、U1/3-0.1 試験体に関しては F 値を 0.2 として求めた PC 鋼棒張力に基づき、それぞれ曲げ耐力を計算した結果、実験値が計算値の 0.99~1.12 倍となった。
- ・ B1/3-0.1 試験体では目地部付近で PC 鋼棒張力が大きく増減したが、U1/3-0.1 試験体では張力変動は小さい。ただし、部材回転角が±2%を超えると、軸圧縮ひずみの進行に伴って張力が急激に減少する。
- ・ 要素分割解析を行った結果、曲げ耐力実験値が解析値の 0.81~0.87 倍となった。解析における要素分割方法及びコアコンクリート拘束係数に関して更なる検討が必要である。また、PC 鋼棒張力に関しては、部材回転角±1%までは実験結果をうまく追跡できるが、大変形時には張力減少を過大評価している。

本論文で掲載した実験結果は 2 体のみであったが、現在、プレストレス導入力比、軸力比及び PC グラウトの有無を実験変数とした試験体に対する載荷実験を実施中であり、別の機会に纏めて発表する予定である。

参考文献

- [1] 前田博司, 芹沢好徳, 西山峰広: アンボンド圧着接合柱の力学性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.1015-1018, 2003.9
- [2] 稲田剛知, 西山峰広: アンボンド PC 圧着柱の耐震性能, プレストレストコンクリート技術協会第 13 回シンポジウム論文集, pp.79-84, 2004.10
- [3] 谷昌典, 西山峰広: 逆対称曲げを受けるアンボンド PC 圧着柱部材に関する解析的研究, プレストレストコンクリート技術協会第 14 回シンポジウム論文集, pp.175-180, 2005.11
- [4] 六車熙, 渡邊史夫, 西山峰広: アンボンド PC 不静定梁の力学的性質に関する研究, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.677-680, 1986
- [5] 三隅哲志, 田川浩之, 西山峰広: PC 鋼棒の応力度-ひずみ度関係のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.885-886, 1997.9
- [6] 平尾正, 中塚侑, 溝口茂: PC 鋼材の繰返し応力-ひずみ関係モデル, 日本建築学会構造系論文集 550 号, pp.7-14, 2001.1
- [7] 藤本良, 河野進, 西山峰広, 渡邊史夫: 多軸載荷を受ける RC 柱の履歴特性と損傷評価法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, 2000