

論文 卓越した引張力を受ける SRC 構造非埋め込み形柱脚の復元力特性

貞末和史*¹・伊藤倫夫*²・田中秀宣*³・南宏一*⁴

要旨：引張軸力を受ける SRC 構造非埋め込み形柱脚の復元力特性を検討するため、軸力の大きさと柱脚の断面構成を実験変数として、一定引張軸力下における繰り返し水平加力実験を行った。その結果、引張軸力下において柱脚部は大きな横すべりを生じるが、履歴特性としてはアンカーボルトの破断に至るまでは紡錘形の履歴特性を示すことが明らかとなった。さらに柱脚部の変形をモデル化した弾塑性曲げ解析を行い、軸力と曲げモーメントを受ける非埋め込み形柱脚の回転性状について検討した。

キーワード：非埋め込み形柱脚、引張軸力、アンカーボルト、終局曲げ耐力、変形性能

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震において、SRC 建造物の非埋め込み形柱脚に被害が発生したことが起因となり、引張軸力と曲げ・せん断の複合応力を受ける非埋め込み形柱脚の耐震性能を確認するための実験的研究が近年行われている。これらの実験成果より、曲げ耐力に関しては SRC 規準¹⁾に示される累加強度法によって耐力の評

価が可能であることが確認された。さらに、変形性能に関しても、軸力と柱限界変形角との間に相関があることが明らかになっており²⁾、高引張軸力下においては主筋やアンカーボルトの破断によって急激な耐力低下を生じることが報告されているが、変形能力の評価を定量的に把握するには至っていない。また、繰り返し水平力を受ける SRC 柱は柱断面の鉄骨と鉄筋の断

表 - 1 試験体計画

シリーズ	試験体	軸力比 N/T_y	柱脚曲げ耐力/柱曲げ耐力 $c_bMu/srcMu$	柱脚引張耐力/柱引張耐力 T_y/N_y	アンカーボルト引張耐力/鉄骨引張耐力 aN_y/sNy	断面構成比 λ
I	00A1200	0	0.29	0.62	0.37	0.35
	00B1200		0.24	0.57	0.21	0.19
	00C1200		0.22	0.54	0.08	0.07
	40A1200	0.4	0.29	0.62	0.37	0.35
	40B1200		0.24	0.57	0.21	0.19
	40C1200		0.22	0.54	0.08	0.07
II	80A1200	0.8	0.29	0.62	0.37	0.35
	80B1200		0.24	0.57	0.21	0.19
	80C1200		0.22	0.54	0.08	0.07

註) 1. N : 作用軸力, $T_y = aT_y + rT_y$, $aT_y = 0.75 \cdot aA \cdot a\sigma_y$, $rT_y = rA \cdot r\sigma_y$, $\lambda = aT_y/T_y$

2. c_bMu および $srcMu$ の算定は文献 1) に示される累加強度法により算定した

3. 試験体名 80 A 1200

— せん断スパン L 1200

— 断面構成比 λ A : 0.35, B : 0.19, C : 0.07

— 軸力比 N/T_y 0.8

*1 福山大学大学院 工学研究科地域空間工学専攻博士課程 工修 (正会員)

*2 日立金属(株) 若松工場 博士 (工学)

*3 日立機材(株) テクニカルセンター

*4 福山大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

— 716 —

3. 実験結果

3.1 破壊性状

実験結果一覧を表-4に、軸力比0.8の試験体の最終破壊状況を写真-1に示す。表-4における M は柱脚部に作用する曲げモーメント、 R は柱頭部材角（柱頭ピン位置の水平変位/柱長さ）である。写真-1に示した3体を比較してわかるように、80C1200は他の試験体と比べて最終破壊状態が著しく異なり、柱部分に大きな破壊を生じていることがわかる。これは実験終了後試験体を確認してみると、主筋の上端と試験体上部鋼板の溶接不良が判明したことから、主筋による付着割裂破壊およびベースプレートのパンチングシャーによる破壊で終局耐力が決まったものと思われる。しかしながら、主筋は表-4に示すように軸力導入時に降伏しており、柱鉄骨の引張力がベースプレート上面のコンクリートを介して主筋に伝達されていることがわかる。

80A1200、80B1200および同一軸力の他の試験体については、破壊に至るまでの経過は各試験体ともほぼ共通で、曲げひび割れの発生（引張軸力の試験体については軸力導入時に引張ひび割れの発生）、せん断ひび割れの発生、主筋の降伏、アンカーボルトの降伏の順で進行し、軸力比0.8の試験体についてはアンカーボルトの破断とともに柱脚部のコンクリートが激しく損傷した。なお、いずれの試験体とも実験終了時まで鉄骨、帯筋は降伏しておらず、80C1200を除く試験体は柱脚部の損傷が大きく、柱脚部に塑性ヒンジを形成していることがわかる。

3.2 変形状

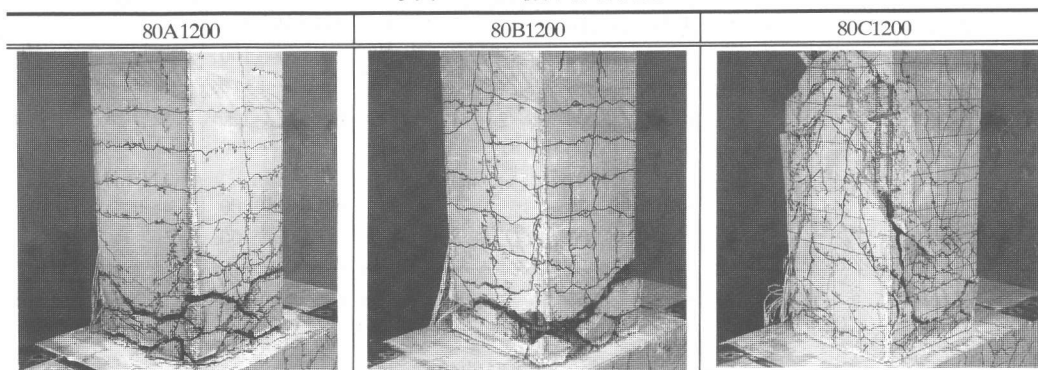
図-3に各試験体の履歴曲線を示す。縦軸は作用軸力による転倒モーメントを考慮した曲げモーメント M 、横軸は柱頭部材角 R をそれぞれ示す。図中の破線はSRC規準に示される単純累加式を用いて算定した終局曲げ耐力の理論値で

表-4 実験結果一覧

試験体	主筋引張降伏		アンカーボルト引張降伏		アンカーボルト破断		最大耐力	
	M (KN·m)	R (%rad.)	M (KN·m)	R (%rad.)	M (KN·m)	R (%rad.)	M (KN·m)	R (%rad.)
00A1200*1	135.8	0.518	200.3	1.944	-	-	218.7	5.989
00B1200	146.5	0.528	189.3	2.848	-	-	203.4	3.011
00C1200*1	168.9	0.640	-193.1*2	-2.391*2	-	-	219.9	5.855
40A1200*1	85.4	0.507	129.7	1.796	-	-	154.7	5.850
40B1200*1	85.6	0.496	125.0	1.500	-	-	134.4	5.900
40C1200	100.8	0.593	126.6	1.704	-	-	133.9	3.492
80A1200	43.7	0.245	75.9	0.486	119.9	2.920	150.7	3.004
80B1200	68.0	0.213	-63.1*2	-0.388*2	121.8	2.983	154.7	2.387
80C1200	0.0	0.000	54.2	0.254	-116.5*2	-1.302*2	117.4	1.500

- 註) 1. 80C1200は軸力導入完了直後に主筋が降伏した。
2. 最大耐力を発揮していない*1印の試験体は $R=6.0\%$ 時における値を示している。
3. *2印の負値は負加力時の値を示している。

写真-1 最終破壊状況



あり、 M_y は主筋とアンカーボルトの降伏点、 M_u は引張強度を用いて算定した。

軸力比 0 および 0.4 の試験体については、いずれの試験体とも $R=6.0\%$ まで急激な耐力低下が見られないのに対し、80A1200、80B1200 は $R=3.0\%$ 時にアンカーボルトの破断によって急激な耐力低下を示した。また 80A1200、80B1200 は $R=0.25\%$ で主筋が降伏、 $R=0.3\sim 0.4\%$ でアンカーボルトが降伏した後も $R=3.0\%$ まで抵抗モーメントが上昇し終局耐力 M_u に達している。

履歴ループの形状を試験体によって比較すると、柱脚の断面構成による差は小さいことがわかる。80C1200 についても $R=2.0\%$ のループにおいて柱上部が破壊するまでは、80A1200、80B1200 との差はほとんどない。軸力の違いによる比較をすると、軸力のない試験体がすべりを伴う逆 S 字の履歴特性を示すのに対して、引張軸力下における試験体は紡錘形の履歴特性を示している。本論文における試験体の場合、柱脚の強度に対してベースプレートより上部の SRC 柱部分は十分強く設計しており、実験においても 80C1200 を除く他の試験体は明らかに柱脚部において塑性化が進行している。したがって非埋め込み形柱脚とした SRC 柱の復元力特性

は柱脚部の挙動を検討することによって説明することができると考えられる。

図-4 は実験において変位制御を行った柱頭の水平変位に対して、柱脚がどのように挙動しているかを示したもので、軸力の違いによる影響を比較している。縦軸は柱脚の水平変位 δ_{UB} および回転角 θ_B 、横軸は柱頭部材角 R である。なお、柱脚部の変位は、ベースプレートに変位測定用ボルトを溶接で取り付け、このボルトの変位を測定している。高引張軸力のものほど柱脚部で横方向にずれることによって柱部材角が進行し、逆に柱脚部の回転は小さい。しかしながら、アンカーボルトが破断した後は、柱脚部の水平ずれは小さく、柱脚部の回転によって柱部

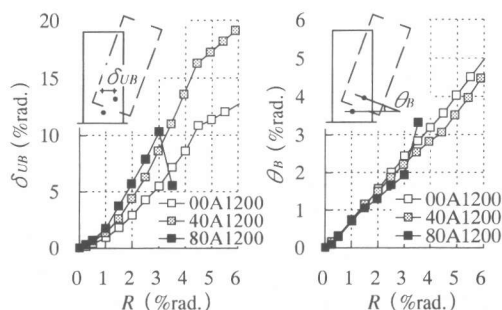


図-4 柱脚の変位 - 柱頭部材角関係

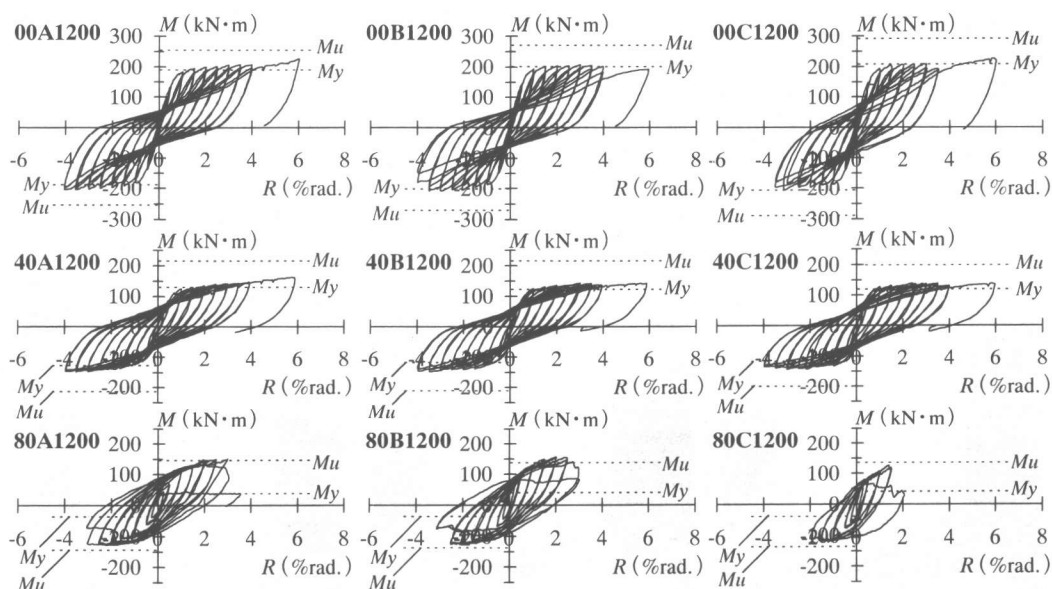


図-3 履歴曲線

材角が $R=3.5\%$ に達している。これはアンカーボルトが破断したすべての試験体において同様であった。従って引張軸力が小さい時に見られた履歴曲線のすべりは、柱脚の水平ずれによるものではなく、S 造の露出形柱脚の復元力特性と同様にアンカーボルトの降伏によるボルトの残留伸びによる影響であると考えられる。

3.3 終局曲げ耐力

図-5 に縦軸を軸力 N 、横軸を曲げモーメント M としたベースプレート下面位置の $M-N$ 相関曲線を示す。図中の耐力線は図-3 で示した計算値と同様の方法によって求めた。実験値は主筋とアンカーボルトが降伏した直後の値と最大値を示している。また、実験値と理論値との対応を表-5 に示す。いずれの試験体とも最大耐力は M_y の値を上回っている。また、高引張軸力の試験体は、主筋とアンカーボルトが降伏した以降においても抵抗モーメントの上昇が極めて大きいことがわかる。

4. 弾塑性解析

本解析では柱脚部ベースプレートの回転性状に着目し、軸力と曲げモーメントを受ける柱脚部の弾塑性性状について断面区分法を用いて解析を行う。解析に用いた仮定を以下に示す。

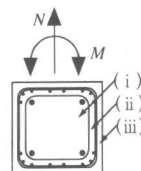
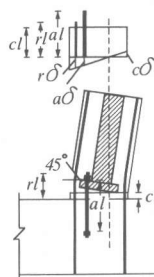
①変形の適合条件:平面保持を仮定した場合、断面を構成するそれぞれの要素のひずみ度が断面中立軸からの距離に比例すると考えるが、本解析では、図-6 に示すように、ベースプレート下部のコンクリートの幅 cl にコンクリートのひずみ度 $c\varepsilon$ を乗じて得られるコンクリートの変形 $c\delta$ 、アンカーボルトの定着長さ al にひず

表-5 実験値と理論値の比較

試験体	理論値		実験値/理論値	
	M_y (KN・m)	M_u (KN・m)	M_{max}/M_y	M_{max}/M_u
00A1200	189	254	1.16	0.86
00B1200	201	270	1.01	0.75
00C1200	207	290	1.06	0.76
40A1200	129	215	1.20	0.72
40B1200	122	215	1.10	0.63
40C1200	119	197	1.13	0.68
80A1200	37	145	4.08	1.04
80B1200	39	137	3.95	1.13
80C1200	41	135	2.90	0.87

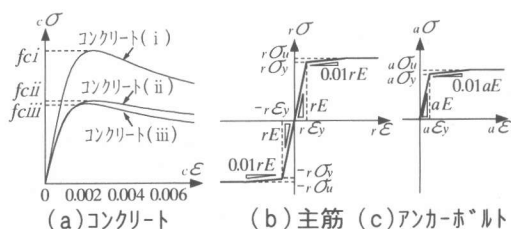
註) M_{max} : 実験最大耐力

み度 $a\varepsilon$ を乗じて得られるアンカーボルトの伸び $a\delta$ 、一様に伸びると仮定した主筋の長さ rl (ここで、 rl はベースプレートのパンチングシアによってひび割れが 45° に広がる領域とした) にひずみ度 $r\varepsilon$ を乗じて得られる主筋の伸び $r\delta$ のそれぞれの伸びが断面中立軸からの距離に比例すると仮定した。



(i) 拘束と支圧を受けるコンクリート
(ii) 拘束を受けるコンクリート
(iii) かぶりコンクリート

図-6 変形の適合 図-8 断面の区分



(a) コンクリート (b) 主筋 (c) アンカーボルト

図-7 材料の応力度-ひずみ度関係

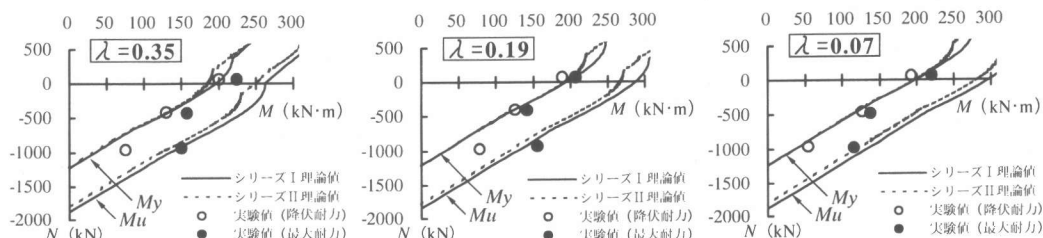


図-5 $M-N$ 相関曲線

②材料の構成則：解析に用いた材料の応力度－ひずみ度関係を図－7 に示す。主筋とアンカーボルトはトリリニア型のモデルとし、アンカーボルトは引張力にのみ抵抗するとしている。コンクリートは図－8 に示す 3 種類に区分し、コンクリートが受ける応力状態に基づいてそれぞれの応力度－ひずみ度関係を仮定した。なお、コンクリートの応力度－ひずみ度関係は以下に示す文献 5 のモデルを用いた。また、ベースプレートにより支圧を受けるコンクリートの強度はシリンダー強度の（支圧面積/支承面積）^{1/2} 倍としている。

$$f_c = f_{cc} \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX}, X = \varepsilon_c / f_{cc}$$

$$K = f_{cc} / f_c = 1 + 11.5 \frac{\rho_h f_{yh}}{f_c} \left(\frac{d''}{C} \right) \left(1 + \frac{s}{2D_c} \right)$$

$$A = E_c \varepsilon_{co} / f_{cc}, E_c = (0.69 + 0.332 \sqrt{f_c}) \times 10^4$$

$$\frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_o} = \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 3.35 + 20(K-1.5), & K > 1.5 \end{cases}$$

$$\varepsilon_o = 0.94 (f_c)^{1/4} \times 10^{-3}$$

$$D = 2.25 - 0.017 f_c + 1.6 \sqrt{(K-1) f_c / 23}$$

ここで、

f_{cc} ：拘束を受けるコンクリートの強度 (N/mm²),

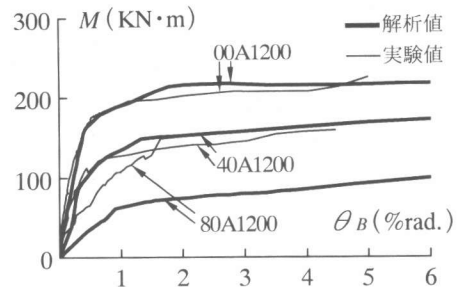
f_c ：コンクリートのシリンダー強度 (N/mm²),

ρ_h ：帯筋の体積比, f_{yh} ：帯筋の降伏強度, d'' ：帯筋の直径

C ：有効横支持長さ, d'' ：帯筋の直径, s ：帯筋間隔,

D_c ：帯筋の芯々間距離

解析結果の一例として $\lambda=0.35$ の試験体の解析値と実験値の比較を図－9 に示す。00A1200 と 40A1200 については、実験値と解析値との対応が良好であるのに対して、高引張軸力を受けている 80A1200 については、実験値と比べて解析値は変形が大きくなっている。また、80A1200 については、解析では主筋およびアンカーボルトが実験値より早い段階で降伏しているにもかかわらず破断には至らない。しかしながら実験では $\theta_B = 2.0\%$ rad. でアンカーボルトは破断しており、これは柱脚部のせん断変形に伴うアンカーボルトの伸び影響が考えられる。



図－9 曲げモーメント－柱脚回転角関係

5. まとめ

本研究により、以下の結論を得た。

- 1) 引張軸力の有無にかかわらず、柱脚断面構成の違いによる復元力特性への大きな影響は見られない。
- 2) 終局曲げ耐力は累加強度理論によって安全側に評価することが可能であり、高引張軸力下においては、主筋およびアンカーボルトのひずみ硬化の影響を受け耐力が大きく上昇する。
- 3) 変形性状は軸力の影響を大きく受け、引張軸力下においては紡錘形の履歴特性を示すが、アンカーボルトの破断によって急激な復元力低下を示す。
- 4) ベースプレートの回転性状は、低軸力下においては本解析と実験値はよい対応を示すが、高引張軸力下においては解析値と実験値は対応せず、せん断力による影響も考慮して再検討する必要がある。

参考文献

- 1) 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(第 5 版), 日本建築学会, pp.181-187, 2001.1
- 2) 称原良一・中澤春生・福元敏之・澤本佳和・成原弘之・今井和正: SRC 柱非埋込み形柱脚の耐震性能に関する研究(その 1,2,3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1147-1152, 2000.9
- 3) 若林實・南宏一・中村武: 繰り返しせん断力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の履歴特性に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, No.15, B, pp.69-97, 1972.4
- 4) 貞末和史・中野建蔵・伊藤倫夫・南宏一: SRC 構造非埋込み形柱脚の終局耐力と変形性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1045-1050, 1999.6
- 5) 田福勝・崎野健治・孫王平: 拘束 RC 柱の曲げ圧縮性状に及ぼす断面ひずみ勾配の影響, 構造工学論文集, Vol.43B, pp.191-198, 1997.3