

論文 変動軸力下における SRC 構造非埋め込み形柱脚の力学的性状

貞末 和史^{*1}・藤原 大英^{*2}・伊藤 倫夫^{*3}・南 宏一^{*4}

要旨：高層建築における低層部の外柱などは地震時に大きな変動軸力を受ける。兵庫県南部地震による SRC 造建物柱脚部の被害も柱の軸力変動に伴う引張力の影響であると推測されるが、変動軸力を受ける非埋め込み形柱脚に関する実験報告は数少なく、特に、変形性能に影響を与える要因や、その評価方法が確立されていない。そこで、本研究では、変動軸力の大きさと柱脚部の断面構成を主要な変数とした実験を行い、変動軸力を受ける柱脚部は、主筋が塑性伸びと座屈を交互に繰り返すことで破断しやすくなり、主筋の破断によって柱脚部の限界変形が決定されることを明らかにし、柱の終局耐力と変形性能について検討した。

キーワード：兵庫県南部地震，終局曲げ耐力，限界部材角

1. はじめに

兵庫県南部地震の被災調査で SRC 造建物における非埋め込み形柱脚の破壊が報告されている¹⁾。非埋め込み形柱脚の破壊は、柱の軸力変動に伴う引張力の影響であると推測されているため、震災後、引張力を受ける非埋め込み形柱脚の構造性能を確認するための実験的な研究が各機関で行われた。これらの実験によって、兵庫県南部地震と同様な柱脚部の破壊状態が再現され、終局耐力は SRC 規準式²⁾で安全側に評価できることや、引張軸力下で曲げ・せん断を受ける柱脚部はすべりを生じるといった力学的な特徴が明らかにされた。一方で、変形能力の評価に関しては、引張力を受ける非埋め込み形柱脚に関する実験データを整理して、限界部材角の下限値を引張軸力比との関係で評価した称原らによる提案式³⁾があるが、未だ実験データの数が少なく、限界部材角を決定付ける要因は完全には抽出されていない。

筆者らは、非埋め込み形柱脚の力学特性を検討するために、震災後、一連の実験的研究⁴⁾⁵⁾を行ってきた。これらの研究は、柱脚部に作用する引張力の影響を明瞭にする基礎的な研究と位置づけており、一定引張軸力あるいは引張領域のみ

の変動軸力下で載荷実験を行っている。その結果、柱の限界部材角は、いずれもアンカーボルトの破断によって決定された。しかしながら、実構造物において、地震時に柱の軸力が変動することを想定する場合、軸力は圧縮と引張の領域にわたり変動することが十分に考えられ、引張軸力領域下での力学的性状とは異なることも考えられる。

そこで、本論文では、高圧縮と高引張にわたる変動軸力下で繰返し曲げ・せん断を受ける非埋め込み形柱脚の実験を行い、既報⁴⁾において報告した一定軸力下での実験結果との比較検討も踏まえて、引張力を受ける非埋め込み形柱脚の終局耐力と変形性能について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状と断面を図 - 1、図 - 2 にそれぞれ示す。試験体は片持ち梁型の形状で、変動軸力の大きさ、柱脚断面構成（主筋量とアンカーボルト量の比率）、アンカーボルト強度、アンカーボルト定着長さ、帯筋間隔を実験変数とした 9 体を計画した。試験体計画を表 - 1 に示す。各試験体とも柱断面は 400mm × 400mm で、充腹形 H 形鋼

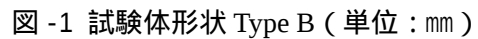
*1 福山大学 ハイテクリサーチセンター特別研究員 博士(工学) (正会員)

*2 福山大学大学院 工学研究科建築学専攻修士課程

*3 日立機材(株) 博士(人間環境学)

*4 福山大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

鋼材の材料強度を表 - 2，コンクリートの材料強度を表 - 3 にそれぞれ示す。



試験体番号	断面構成	長期軸力 N (kN)	最大軸力 N (kN)		主筋	アンカーボルト	アンカーボルト定着長さ aL (mm)	帯筋間隔 w_p (mm)
			圧縮最大	引張最大				
No.1	Type A	650 ($n_c=0.10$)	1650 ($n_c=0.26$)	-500 ($n_t=-0.40$)	16-D13(SD345)	4-M24(SS490)	480 (20d)	100
No.2	Type B				20-D13(SD345)	4-M18(SS490)	360 (20d)	
No.3	Type C				24-D13(SD345)	4-M12(SS400)	240 (20d)	
No.4	Type A	960 ($n_c=0.15$)	2960 ($n_c=0.46$)	-1000 ($n_t=-0.80$)	16-D13(SD345)	4-M24(SS490)	480 (20d)	
No.5	Type B				20-D13(SD345)	4-M18(SS490)	360 (20d)	
No.6	Type C				24-D13(SD345)	4-M12(SS400)	240 (20d)	
No.7							50	
No.8	Type D	650 ($n_c=0.10$)	1650 ($n_c=0.26$)	-500 ($n_t=-0.40$)	16-D13(SD345)	4-M18(HAB)	360 (20d)	100
No.9							540 (30d)	

アンカーボルト M18(HAB)は降伏強度 490N/mm^2 相当

使用箇所		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D13	柱主筋	391	564	17.6	177
D10	帯筋	449	504	17.7	190
D22	基礎梁主筋	442	634	16.4	165
D10	あばら筋	869	1052	8.2	182
M24	アンカーボルト	331	523	25.3	177
M18(SS490)	アンカーボルト	358	555	23.0	172
M18(HAB)	アンカーボルト	573	843	14.8	192
M12	アンカーボルト	327	457	30.1	213
PL9	フランジ	393	546	17.2	161
PI.6	ウェブ	402	553	16.7	168

$an, aA_n, a\sigma_y$: アンカーボルトの本数, ねじ部断面積, 降伏強度
 $mn, mA, m\sigma_y$: 主筋の本数, 断面積, 降伏強度

使用箇所	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
柱	40.0	2.51	31.2
基礎梁	67.0	2.80	36.2
グラウトモルタル	58.1	3.68	24.3

2.2 荷重方法

実験は図 - 3 に示す建研式荷重装置を用いた。荷重は、所定の軸力を与えた状態での柱部材角の変位制御である。

変位履歴は柱部材角 R (柱頭ピン位置の水平変位 δ_{uc} / せん断スパン L) = $\pm 0.25\%$ rad. で正負繰返し荷重を 1 回行った後、 $R = \pm 0.5\%$ rad. を 2 回繰返し、その後、 $\pm 0.5\%$ rad. ずつ変位を漸増させる正負繰返し荷重を 2 回ずつ行った。

想定した軸力 N の荷重履歴を図 - 4 に示し、以下に荷重手順を説明する。

- 1) 長期軸力相当の圧縮軸力を荷重する。(a → b)
- 2) $H = 0$ の状態で、最大引張軸力まで引張軸力を荷重する。(b → c)
- 3) 最大引張軸力を一定に保ち、所定の R に達するまで水平力 H (正荷重) を加力する。(c → d)
- 4) H (正荷重) の除荷が完了する時に長期軸力に達するように、軸力調整する。(d → b)
- 5) $H = 0$ の状態で、最大圧縮軸力まで圧縮軸力を荷重する。(b → e)
- 6) 最大圧縮軸力を一定に保ち、所定の R に達するまで水平力 H (負荷重) を加力する。(e → f)
- 7) H (負荷重) の除荷が完了する時に長期軸力に達するように、軸力調整する。(f → b)

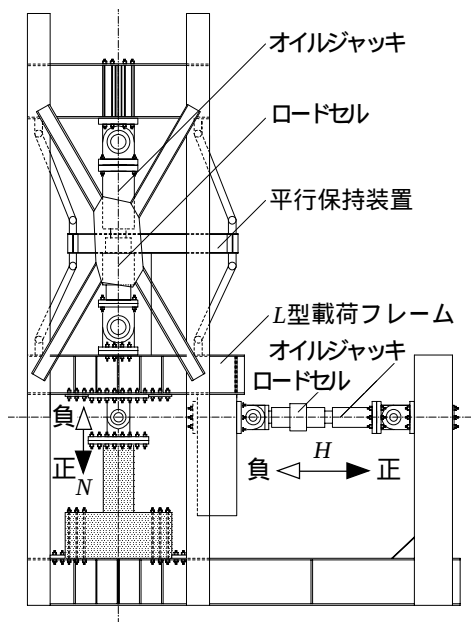


図 - 3 荷重装置

8) $H = 0$ の状態で、最大引張軸力まで引張軸力を荷重する。(b → c)

9) 以後、同様。

実構造物における柱の軸力変動は、作用するせん断力と常に連動することが推測され、本実験の荷重方法では、せん断力加力中は軸力一定としているが、実情よ

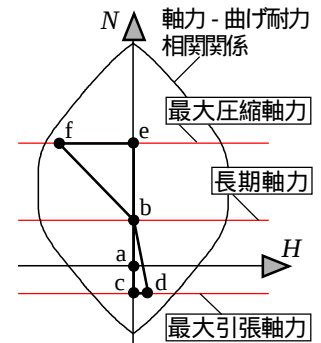


図 - 4 軸力の荷重履歴

りは厳しい荷重条件下にあると考えている。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

最終破壊状況の数例を写真 - 1 に示す。各試験体について、最終破壊状況の大きな相違は認められず、柱脚部での破壊が卓越した。ひび割れの発生および破壊状況としては、(1) 引張軸力荷重時に、柱に輪切り状のひび割れが発生する、(2) 圧縮軸力下で水平力を受ける場合、柱の全域に渡り斜めひび割れが発生し、曲げ圧縮力を受ける側の柱脚部コンクリートが圧壊して、主筋に座屈を生じる、(3) 引張軸力下で水平力を受ける場合、ひび割れの発生は柱脚部に集中し、圧縮軸力下で座屈した主筋が曲げ引張力を受けて伸びを生じる時、直線状に伸びきる前に破断する（写真 - 2 参照）、等の特徴が挙げられる。



No.1

No.7

No.4

写真 - 1 最終破壊状況

写真 - 2 はつり後

3.2 履歴性状

縦軸に水平力、横軸を柱部材角とした履歴曲線を図 - 5 に示す。図中の Q_{fu} ($= M_u/L$ 、 M_u は終局曲

げモーメント)はSRC 規準による終局曲げ耐力の計算値で、軸力の作用による転倒モーメントの影響を考慮している。また、○印、□印はそれぞれ主筋の引張降伏と破断、●印、■印はそれぞれアンカーボルトの引張降伏と破断を意味する。

履歴ループの形状に影響を与える各現象の発生・進展状況として、Type C 以外の試験体は、(1)主筋引張降伏、(2)アンカーボルト引張降伏、(3)主筋座屈後の破断、アンカーボルト破断の順で進行し、Type C で軸力変動幅の大きい No.6、No.7 は、アンカーボルトの破断が主筋の破断に先行した。全試験体を通じて、引張軸力下で曲げ・せん断を受ける場合は、主筋やアンカーボルト

が破断するまで大きな耐力低下を生じず、圧縮軸力下で曲げ・せん断を受ける場合は、 $R = -1.0 \sim -1.5\%$ rad. で最大耐力に達した後、急激に耐力低下を生じることが確認された。圧縮軸力下での耐力低下は、曲げ圧縮力を受ける側のコンクリートの圧壊と主筋の座屈の影響である。なお、Type C の試験体については、アンカーボルト断面が小さいため、アンカーボルトが破断した場合でも、破断した瞬間の耐力低下は極めて小さい。

3.3 終局耐力と変形性能

SRC 規準の累加強度式を用いて得られる軸力 - 終局曲げモーメント相関関係の数例と実験値を図 - 6 に示す。実験値は転倒モーメントの影響

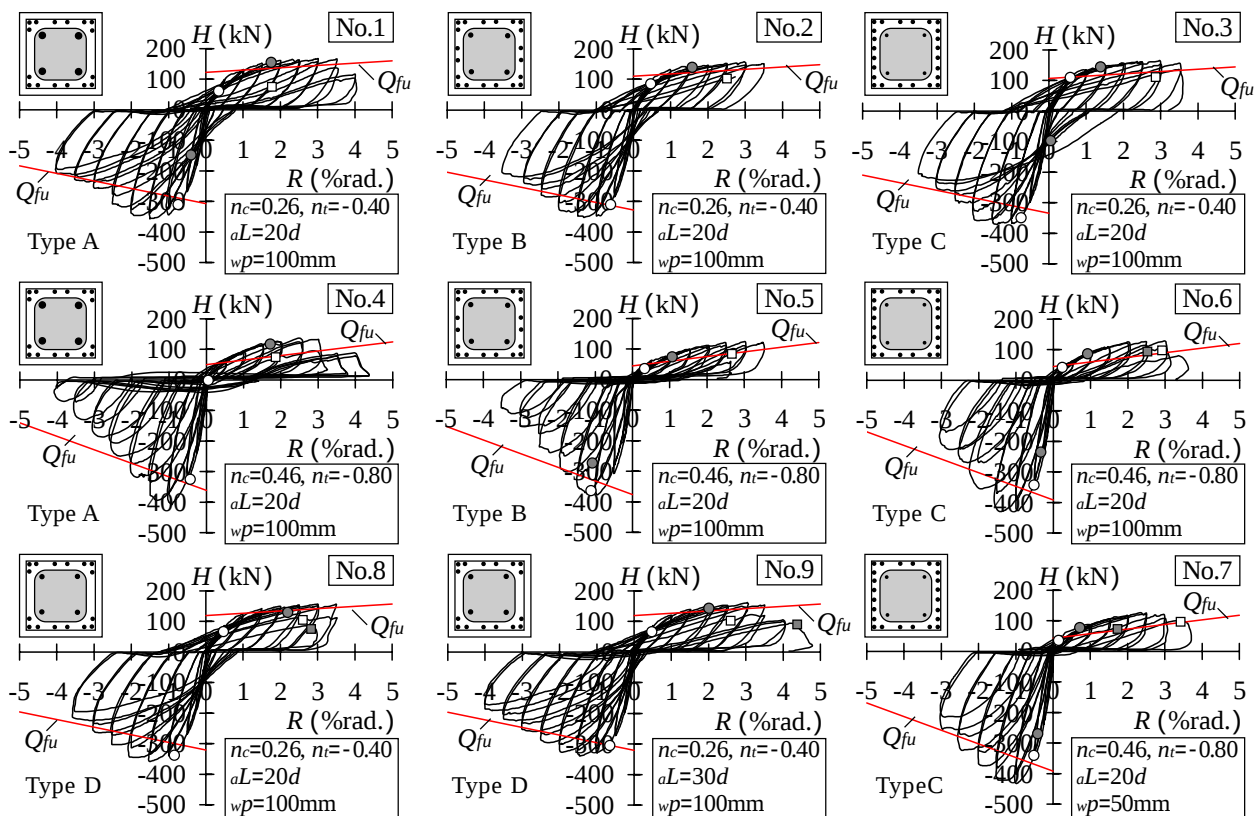


図 - 5 履歴曲線

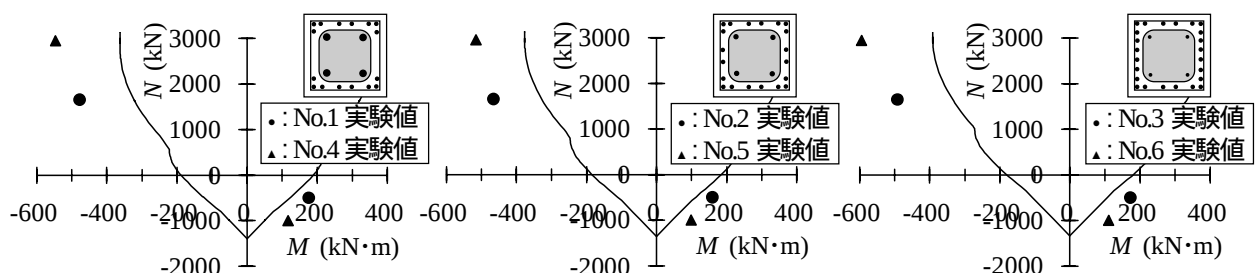


図 - 6 軸力 - 曲げモーメント相関関係

を考慮している。圧縮軸力下、引張軸力下ともに、計算値は実験値を過小評価していることがわかる。引張軸力下での耐力過小評価の理由は、主筋とアンカーボルトのひずみ硬化の影響が考慮されていないこと、圧縮軸力下での耐力過小評価の理由は、ベースプレート下部コンクリートの支圧効果による強度上昇が考慮されていないことが原因として考えられる。しかしながら、図-7に示すように、すべての試

験体の最大曲げモーメントの実験値は SRC 規準による終局曲げモーメントの計算値を上回っており、SRC 規準式で耐力を安全側に評価できることが確認された。

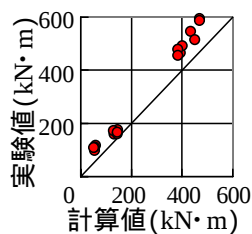


図-7 終局曲げ耐力

図-8に本実験(変動軸力下)および筆者が行った既往の実験⁴⁾(一定引張軸力下)における限界部材角の実験値と称原らによる限界部材角の評価式³⁾を示す。3.2で述べたように、引張軸力下では主筋かアンカーボルトが破断するまで大きな耐力低下を生じないため、引張軸力下での限界部材角 R_{tu} は主筋とアンカーボルトが破断しないことが確認された最大の部材角、圧縮軸力下での限界部材角 R_{cu} は最大耐力から20%耐力低下したときの部材角とした。 n_t と n_c は、それぞれ引張軸力比と圧縮軸力比であり、表-1に示す式によって算定した。

$n_t = -0.8$ の引張軸力を受ける場合には、一定引張軸力下、変動軸力下とも R_{tu} は2.5~3.0%rad.でほぼ同程度であるが、一定引張軸力下の場合、アンカーボルトの破断によって R_{tu} が決定された

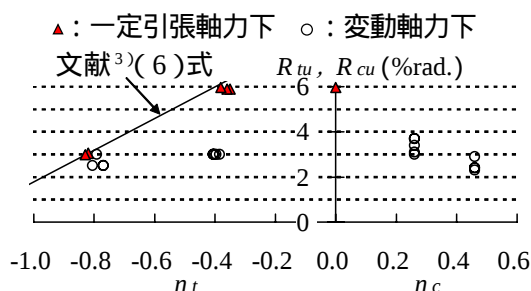


図-8 限界部材角

のに対して、変動軸力下の場合、主筋の破断によって R_{tu} が決定されている。

$n_t = -0.4$ の引張軸力を受ける場合には、一定引張軸力下では $R_{tu} = 6.0\%$ rad.の変形性能を有していることが確認されたのに対して、変動軸力下では R_{tu} が3.0%rad.まで低下していることがわかる。また、 $n_t = -0.4$ の場合も、一定引張軸力下ではアンカーボルトの破断によって R_{tu} が決定されたのに対して、変動軸力下では主筋の破断によって R_{tu} が決定されている。

一定引張軸力下ではアンカーボルトの破断が主筋の破断に先行しているのに対して、変動軸力下では主筋の破断がアンカーボルトの破断に先行するのは、アンカーボルトには大きな圧縮力が作用しないため、引張と圧縮の繰返し力が働かず、なおかつ、基礎梁コンクリートに取り囲まれているため座屈を生じにくいのに対して、主筋は圧縮力を受けてコンクリートが圧壊した柱脚部で座屈と塑性伸びを繰り返すため、単調引張りを受ける主筋の破断伸びより小さな伸びで破断してしまうことが影響している。したがって、非埋め込み形柱脚のじん性を向上させるには、帯筋量を十分に確保し、柱に作用する圧縮軸力を制限することも必要であり、塑性変形能力を評価するには、柱脚部が受ける最大引張力の大きさを考慮するだけでなく、軸力の変動や曲げ・せん断の繰返し力による載荷履歴の影響を考慮する必要がある。

3.4 実験変数の影響

本論文で計画した実験は、同一の軸力履歴を受ける試験体では終局耐力がほぼ等しくなるように断面設計を行っており、採用した実験変数が変形性能に与える影響を調べることを主要な目的としている。以下に本実験で明らかにされた実験変数の影響について述べる。

No.1とNo.2とNo.3の比較およびNo.4とNo.5とNo.6の比較によって、非埋め込み形柱脚の断面設計を行う際に、主筋を増やす場合とアンカーボルトを増やす場合のどちらが優れた力学特性を有しているかを確認することができる。文献[3]によると、柱脚部の補強を目的とした柱脚部

のみに配筋される主筋（補強主筋）は，付着劣化を生じる場合，変形性能に大きく影響を与えることが指摘されているが，本実験では，主筋間隔が小さく付着劣化に関して最も条件の厳しい Type C の断面に関しても，図 - 9 に示すように 柱頭から柱脚にわたり隅筋と補強主筋のひずみ度分布にあまり差異はなく，図 - 5 の履歴特性，図 - 8 の限界部材角においても断面構成による違いが表れてないことがわかる。したがって，補強主筋に対する付着劣化の検討が行われ，付着劣化を生じないことが確認されている場合に関しては，柱脚部に主筋量を増やす場合でも，アンカーボルト量を増やす場合でも力学的には同等の性能を期待できると推察されるが，柱脚部の主筋量を減らすことは，柱鉄骨建て方時のアンカーボルトの締め付けが容易になるなど，施工的な利点が得られる。

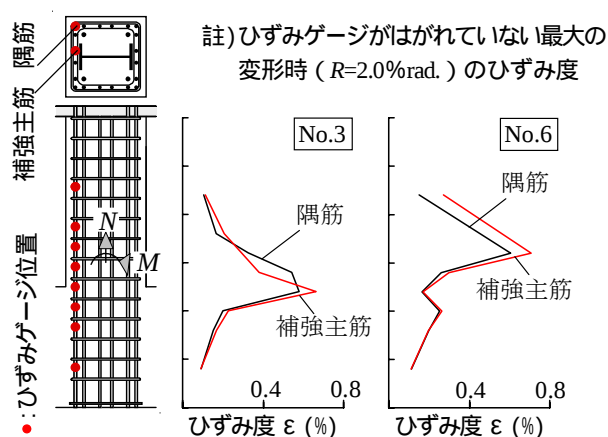


図 - 9 曲げ引張側主筋のひずみ度分布

No.1 と No.4 の比較，No.2 と No.5 の比較および No.3 と No.6 の比較によって，同断面で軸力の大きさによる影響が確認される。軸力の大きさに関わらず，引張軸力下での限界部材角は同程度になることが確認された。

No.7 は No.6 より帯筋量を増やすことで，主筋の付着劣化と座屈を抑制することを期待したが，いずれの試験体とも同様な履歴特性，限界部材角となった。これは，No.6 に関しても付着劣化を生じていないことと， $n_c = 0.46$ 程度の高圧縮軸力を受ける場合には，帯筋間隔を 50mm

にしても座屈を防ぐには効果が小さかったことが原因であると考えられる。

No.9 は No.8 よりアンカーボルトの定着長さを長くすることで，No.8 より柱脚が大きな回転を生じるまでアンカーボルトが破断するのを防ぐことを期待したが，いずれの試験体とも，アンカーボルトの破断より主筋の破断が先行したため，限界部材角は等しくなった。

4. まとめ

圧縮と引張の領域にわたる大きな変動軸力下で繰返し曲げ・せん断を受ける非埋め込み形柱脚の実験を行い，以下の結論を得た。

- 1) 終局曲げ耐力は SRC 規準に示される累加強度式によって安全側に評価できる。
- 2) 圧縮と引張を受ける変動軸力下では，主筋が座屈と塑性伸びを交互に繰り返すことで破断しやすくなり，このことは柱の限界部材角を小さくする大きな要因となる。
- 3) 柱脚部のじん性を高めるには，帯筋量を十分確保し，作用する圧縮軸力を制限するなどして，主筋の座屈を防止することが重要である。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告建築編-2，日本建築学会，1998.8
- 2) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（第 5 版），pp.181 - 187，2001.1
- 3) 称原良一，澤本佳和，今井和正，中澤春生，成原弘之，福元敏之：引張軸力を受ける SRC 造非埋込み形柱脚の耐力と変形性能について，日本建築学会構造系論文集，第 569 号，pp.111 - 118，2002.7
- 4) 貞末和史，伊藤倫夫，大庭秀治，田中秀宣，南宏一：引張軸力下における SRC 構造非埋込み形柱脚の耐震性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.48B，pp.221 - 229，2002.3
- 5) 貞末和史，伊藤倫夫，田中秀宣，南宏一：変動軸力を受ける SRC 構造非埋込み形柱脚の弾塑性性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.1051 - 1056，2000.6