

論文 SRC 構造非埋め込み形柱脚の終局耐力と変形性能

貞末和史*1・中野建蔵*2・伊藤倫夫*3・南宏一*4

要旨： 引張力を受ける SRC 構造非埋め込み形柱脚の終局耐力と変形性能を検討するために柱脚の断面構成と作用軸力を実験変数として正負逆対称曲げせん断加力実験を行い、作用軸力の大きさや補強方法が柱脚の挙動に大きく影響することを示し、アンカーボルトが柱脚の引張耐力を負担する比率が大きいほど引張軸力下においても安定した履歴特性を示すことが判明した。また、アンカーボルトが負担する比率のいかんにかかわらず、柱脚の終局曲げ耐力はベースプレート直下のコンクリートとアンカーボルトよりなる部分とこれを取り囲む鉄筋コンクリート部分の曲げ耐力の累加により評価できることを確認した。

キーワード： 非埋め込み形柱脚, 引張軸力, 終局曲げ耐力, 変形性能

1. はじめに

先の兵庫県南部地震では、新耐震設計法に基づいて設計された充腹形 SRC 建物においては、倒壊・崩壊に至るような致命的な損傷を生じた建物は見られなかった。しかしながら把握されているだけでも、SRC 造非埋め込み形柱脚に被害を生じた建物の総数は 43 棟にものぼり、さらに非充腹形よりもむしろ柱が強い充腹形の非埋め込み形柱脚に被害が多いことが文献¹⁾により報告されている。このような非埋め込み形柱脚の被害状況を見ると、アンカーボルトや主筋の破断・抜け出しが見られるため、柱脚の破壊原因としては地震時の転倒モーメントによる引き抜き力が大きな原因として考えられる。しかしながら、引張力・曲げ・せん断力の複合応力下での非埋め込み形柱脚の弾塑性性状を実験的に検証した研究は数少なく、このような複合応力下における柱脚の耐力および変形性能に関する基礎資料はほとんど整備されていない。そこで本研究では SRC 造非埋め込み形柱脚の耐力・剛性・変形性能について実験的に検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は SRC 造非埋め込み形柱脚 9 体、S 造露出形柱脚 1 体の計 10 体とした。実験変数は、主筋・アンカーボルトの数量、アンカーボルトの強度、アンカーボルトの定着方法、軸力の有無とした。各試験体における共通因子は、柱断面 400mm×400mm、ベースプレート 280mm×280mm でコンクリート強度 $F_c=21\text{N/mm}^2$ とし、H-250×125×6×9(SM490)の鉄骨を内蔵させた非埋め込み形柱脚および露出形柱脚としてある。また、帯筋は D10(SD295)を 100mm 間隔で配筋し、曲げ破壊が先行するように設計してある。なお、SRC 柱脚 9 体の各試験体において、アンカーボルトが柱脚の引張耐力を負担する比率(λ)を変えてあるが、引張耐力の合計は全試験体ともほぼ等しく、なおかつ、同一軸力の各試験体の終局曲げ耐力もほぼ等しくなるように設計した。試験体断面一覧を図-1、試験体の形状を図-2、実験変数を表-1 に示し、使用材料の素材試験結果を表-2.1、表-2.2 に示す。

*1 福山大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日立金属(株) 若松工場建材技術課

*3 日立金属(株) 若松工場建材技術課 工修

*4 福山大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

表-1 実験変数

試験体	軸力(N/Ty)	主筋	A.Bolt	A.Boltの間隔(mm)	A.Boltの定着方法	λ
NO.1	0 ^{kN} (0)	16-D13 (SD345)	4-M24 (SS490)	220	アンボルト	0.349
NO.2		20-D13 (SD345)	4-M18 (SS490)			0.194
NO.3		24-D13 (SD345)	4-M12 (SS400)			0.071
NO.4		16-D13 (SD345)	4-M18 (SA)			0.350
NO.5		16-D13 (SD345)	4-D19 (SD490)			0.377
NO.6	480 ^{kN} (0.4)	16-D13 (SD345)	4-M24 (SS490)	220	アンボルト	0.349
NO.7	480 ^{kN} (0.4)	20-D13 (SD345)	4-M18 (SS490)			0.194
NO.8	520 ^{kN} (0.4)	24-D13 (SD345)	4-M12 (SS400)			0.071
NO.9	480 ^{kN} (0.4)	16-D13 (SD345)	4-D19 (SD490)			0.377
NO.10	0 ^{kN} (0)	-	4-M24 (SS490)			220

註) N:作用軸力 Ty:柱脚部の中心引張耐力 aTy:アンボルトの引張降伏荷重 $\lambda = aTy/Ty$

表-2.1 鋼材の素材試験結果

使用鋼材 (材質)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
柱主筋 D13(SD345)	371	536	22.2	194
帯筋 D10(SD295)	384	521	20.0	169
A.Bolt M24(SS490)	339	525	27.0	185
A.Bolt M18(SS490)	343	542	22.8	212
A.Bolt M12(SS400)	328	462	29.3	167
A.Bolt M18(SA)	475	873	-	212
A.Bolt D19(SD490)	530	727	15.6	182
鉄骨フラッシュ(SM490)	325	433	26.0	196
鉄骨ウェブ(SM490)	374	448	23.0	190

表-2.2 コンクリートの素材試験結果

コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
柱コンクリート	24.16	2.19	25.0
基礎梁コンクリート	26.23	2.20	20.8
無収縮モルタル	30.15	2.91	-

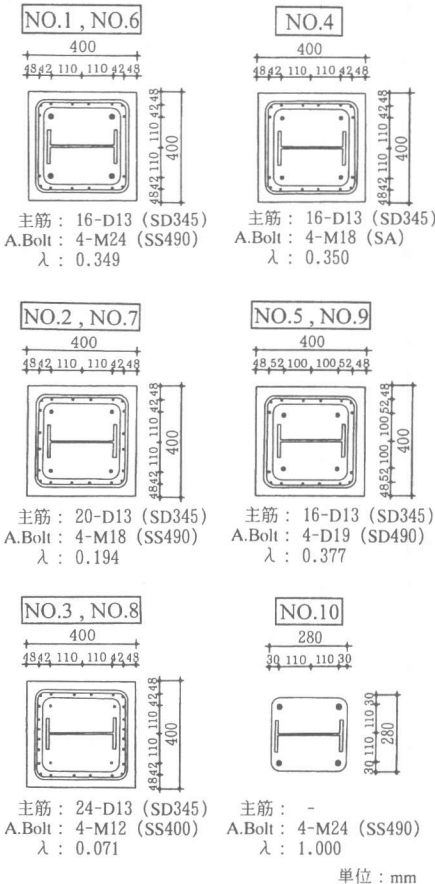


図-1 試験体断面一覧

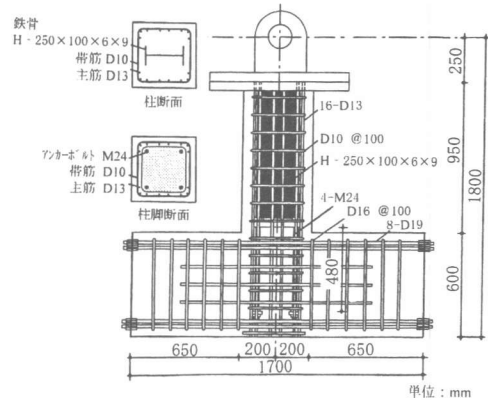


図-2 試験体形状 (NO.1, NO.6)

2.2 載荷方法

載荷は図-3 に示す建研式載荷装置を使用し、載荷装置反力床上に試験体基礎梁両端部を PC 鋼棒で固定した後、L 型フレーム上面に取り付けた油圧ジャッキで一定軸力を導入後、L 型フレーム側面の油圧ジャッキにより試験体頂部のピンの位置に正負繰り返しの水平荷重を作用させる。載荷履歴は、試験体頂部ピン位置での変位制御により、柱頭相対部材角 $R = \pm 0.25\% \text{rad.}$ で正負繰り返し載荷を 1 回行った後、 $R = \pm 0.50\% \text{rad.}$ を 2 回繰り返し、その後 $0.50\% \text{rad.}$ までの漸増正負繰り返し載荷を $R = \pm 4.00\% \text{rad.}$ まで 2 回ずつ繰り返し、最終的には正加力方向に $R = 6.00\% \text{rad.}$ まで単調載荷した。

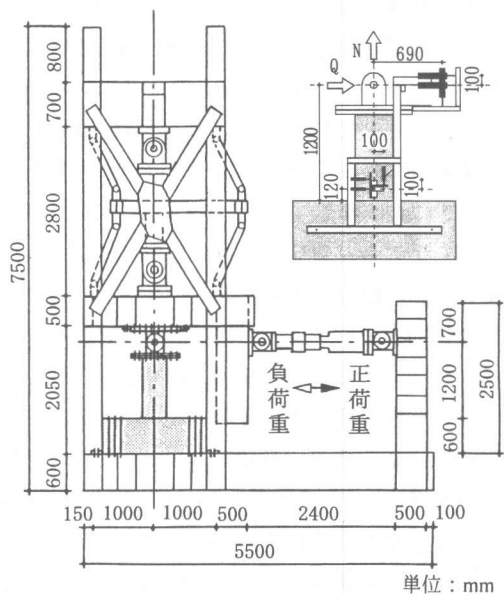


図-3 荷重装置および変位測定位置

2.3 測定項目

変位の測定項目は、図-3 に示す柱頭及び柱脚に取り付けた変位計により水平方向、鉛直方向の変位を測定し、これらの測定値に基づいた幾何学的な関係より、柱頭ピン位置中心(基礎梁天端より 1200mm)の水平変位 δ_{uc} 、軸方向変位 δ_{vc} 、回転角 θ_c および柱脚ベースプレート上部位置(基礎梁天端より 120mm)の水平変位 δ_{ub} 、軸方向変位 δ_{vb} 、回転角 θ_b を求めた。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図-4 に試験体側面の最終ひび割れ状況を示す。ひび割れの発生過程は、軸力のない試験体については断面構成の違いにかかわらず、まず、 $R=0.25\%$ rad.までに、ベースプレート下面の柱脚部に曲げひび割れが発生し、次いで、ベースプレートより上面の柱中央にも曲げひび割れがほぼ等間隔に発生した。その後、変形の増大とともに曲げひび割れが水平に進展し、さらに変形が増大すると、まず、柱脚に曲げせん断ひび割れを生じ、次いで柱中央にも曲げせん断ひび割れが発生した。なお、このひび割れは λ の小さい試験体ほど柱全体にわたって生じる傾向が見られた。引張軸力の試験体については、軸力導入時に、まず、柱脚部に引張ひび割れが発生し、ついで柱中央にも引張ひび割れがほぼ等間隔に水平に発生した。次に水平荷重を作用させると、 $R=0.25\%$ rad.までの変形の小さい時点では新たな曲げひび割れは発生せず、軸力導入時の引張ひび割れ幅の広がり、進展が観察された。その後、変形の増大とともに、 $R=0.5\%$ rad.までに新たな曲げひび割れが発生進展し、 λ の小さい NO.8 は柱中央にも若干の曲げせん断ひび割れは観察されたが、その他の試験体は柱脚にのみ曲げせん断ひび割れを生じた。

軸力比 λ	0.349	0.194	0.071	0.350	0.377	1.000
0						
	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.10
0.4						
	NO.6	NO.7	NO.8		NO.9	

図-4 最終ひび割れ状況

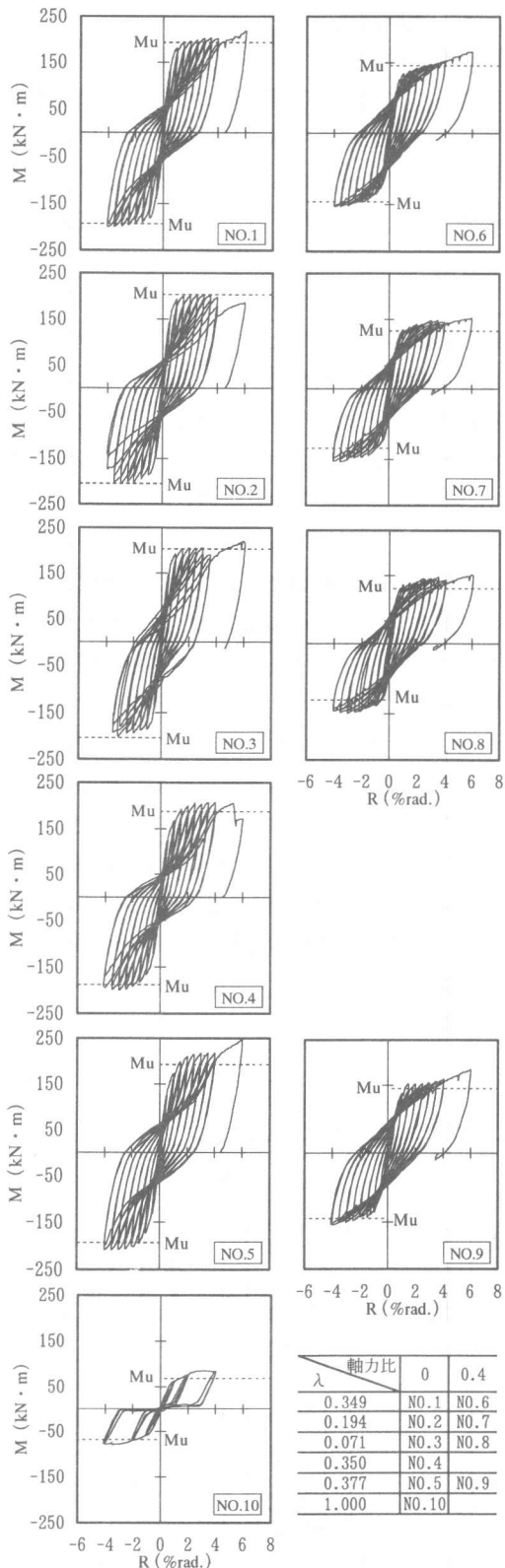


図-5 荷重-変形関係

最終破壊状況について柱脚の断面構成の違いによる比較をすると、 λ の大きい NO.1 に比べて、 λ の小さい NO.2, NO.3 は柱脚の損傷が大きく、引張軸力を作用させた試験体では、その傾向がさらに強く現れ柱脚へ破壊が集中した。

3.2 変形状

図-5 に各試験体の荷重-変形曲線を示す。縦軸は作用軸力による転倒モーメントを考慮した作用曲げモーメント M , 横軸は基礎梁固定部に対する柱頭ピン位置の水平変位 δ_{uc} から求められた柱頭相対部材角 R である。図中破線の終局曲げ耐力の計算値 (M_u) は鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説²⁾ (以下 SRC 規準) に示される単純累加式を用いて算定している。

同一軸力の試験体では、SRC 柱脚のいずれの試験体とも剛性、履歴ループの形状ともに大きな差は見られないが、S 造露出形柱脚は、SRC 柱脚とは履歴性状が大きく異なり、すべりを伴う逆 S 字形となった。

作用軸力による比較をすると、引張軸力の試験体は軸力のない試験体に比べて初期剛性はやや低いが、履歴ループの形状については軸力のない試験体より引張軸力の試験体の方が紡錘形に近い形となった。

図-6 に柱脚の水平変位・軸方向変位・回転角と柱頭相対部材角の関係を示す。引張軸力の試験体は、軸力のない試験体に比べ $R=1.0\%rad.$ 以降、柱頭相対部材角の増加に伴い柱脚の水平変位、軸方向変位が急速に増大し、同一軸力の試験体では λ の小さい試験体の方が水平変位、軸方向変位の増加が早い。柱脚の回転性状に着目すると、 $R=1.5\%rad.$ まで試験体による差はほとんどないが、 $R=2.0\%rad.$ 以降は水平変位、軸方向変位の大きい試験体ほど柱脚の回転角は小さくなっている。これは、 λ の小さい試験体は主筋が回転変形を拘束するが、柱脚にせん断ひび割れ発生後、破壊が進行するにつれベースプレート周部 RC 部分のせん断変形に対する抵抗が小さくなり、水平方向のずれが大きくなったものと思われる。

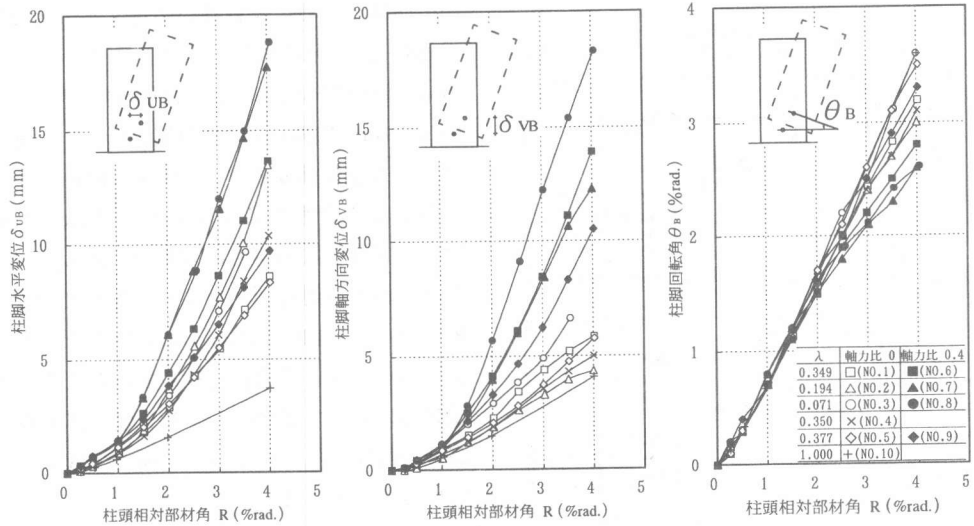


図-6 柱脚の変位-柱頭相対材角関係

4. 実験結果の検討

4.1 実験変数の影響

図-4, 図-5, 図-6 に示す実験結果について実験変数の影響を以下に示す。

(1) 断面構成の影響

NO.1, NO.2, NO.3 および NO.6, NO.7, NO.8 は軸力比がそれぞれ 0 および 0.4 と同じで, λ を変化させたものである。 λ が小さい試験体で大変形時に繰り返し载荷による耐力の低下が見られるが, これは圧縮側主筋の座屈によるものと考えられる。

(2) 軸力比の影響

NO.1 と NO.6, NO.2 と NO.7, NO.3 と NO.8, NO.5 と NO.9 は柱脚の断面構成が同じで, 軸力比が異なる試験体である。引張軸力の試験体は, 軸力のない場合と比べ, 履歴ループが紡錘形に近くなったが, 柱脚の水平方向・軸方向の変形が大きく破壊も大きくなった。

(3) アンカーボルト強度の影響

NO.4 は NO.1 と λ が同じでアンカーボルトの径を小さくし, 強度を高めたものである。R=4.0%rad.まで両試験体に明確な差はないが NO.4 は R=4.5%rad.以降に柱脚コンクリートが圧壊し, R=5.0%rad.の時, 主筋の破断により急激な耐力低下を示した。

(4) アンカーボルトの定着方法の影響

NO.5, NO.9 はアンカーボルトをボンドタイプとし, NO.1, NO.6 のアンボンドタイプと比較することによりアンカーボルトの定着方法による影響を確認するものである。軸力の有無にかかわらず, 破壊性状, 変形状に差は見られなかった。

(5) SRC 柱脚の効果

NO.1 は NO.10 の周りを RC で取り囲み, SRC 柱脚にすることによる効果を確認したものである。S 造露出形柱脚を SRC 造非埋め込み形柱脚にすることにより柱脚のエネルギー吸収能力は大きく改善され, 特に SRC 造柱脚は S 造柱脚に比べて繰り返し载荷においても変形能力が非常に高いことがわかる。

以上のことから, 引張軸力を受ける柱脚は水平方向・垂直方向に大きく変形し, 柱脚部の破壊が大きい事がわかる。また, λ の大きい試験体は, 柱脚の回転角は大きくなるが水平方向・垂直方向の変形が小さく, 破壊も小さいことから, 柱脚補強の設計に関しては, 回転能力を高める配慮が必要と思われる。

4.2 M-N 相関曲線

図-7 は SRC 規準に示される単純累加式を用いて算定したベースプレート下面位置の M-N

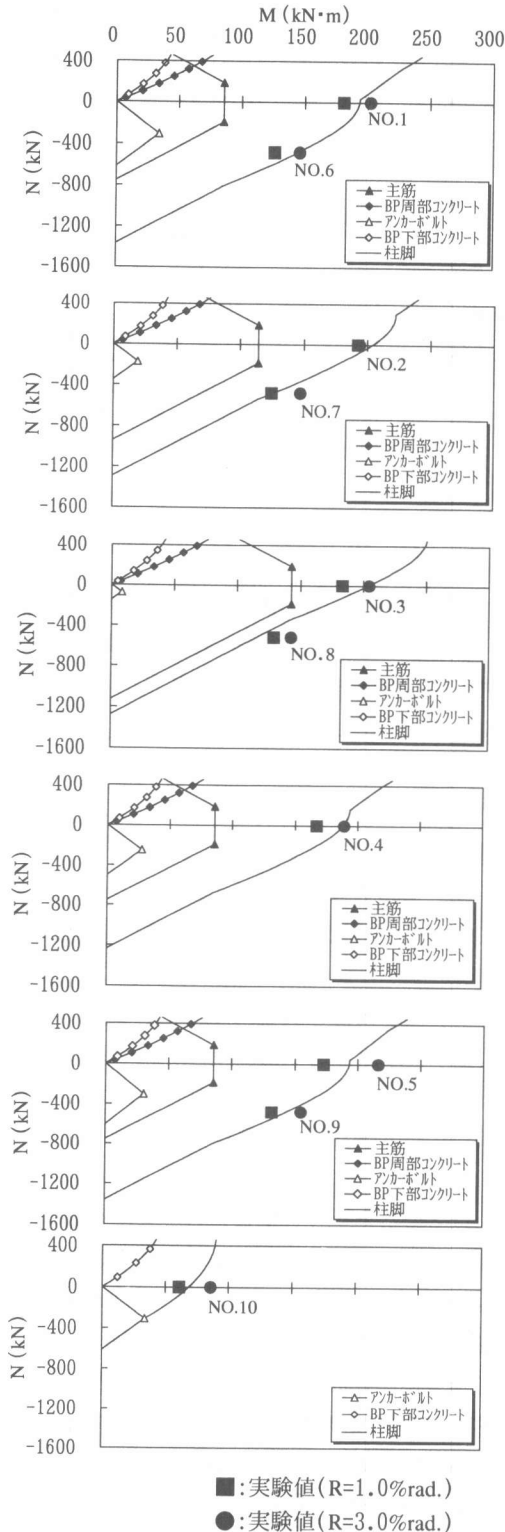


図-7 M-N 相関曲線

相関曲線である。縦軸は引張をマイナスとした作用軸力、横軸は曲げモーメントを示す。各耐力線は鋼材の降伏点による耐力線を示している。R=4.0%rad. 以降の単調載荷において、荷重が増大した試験体があり、これは、鋼材のひずみ硬化による影響と思われるが、NO.2, NO.4 を除くいずれの試験体も最大耐力に達していないため、ひずみ硬化開始ひずみに達していない■ R=1.0%rad. ● R=3.0%rad. における正荷重時の実験値を示す。実験値と比較すると入の小さい試験体において引張軸力の時、規準式よりやや高めの見られるが、全体的にはほぼ一致していることが認められる。

5. まとめ

以上の検討結果をまとめると次のようになる。

- 1) 入の小さい試験体は入の大きいものより損傷が大きく、引張軸力のものは柱脚に破壊が集中した。
- 2) 軸力の有無により履歴ループの形状に違いが見られ、引張軸力の試験体の方が紡錘形に近い形となり、入の大きいものは大変形時における繰り返し載荷においてもその耐力を維持した。
- 3) ベースプレート下面位置の柱脚の曲げ耐力は、入の値いかんにかかわらず、ベースプレート直下のコンクリートとアンカーボルトよりなる部分と、これを取り囲む鉄筋コンクリート部分の曲げ耐力の累加によりその終局曲げ耐力を評価することが可能である。しかし、さらに高引張軸力を受ける場合には今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 称原良一・南宏一：兵庫県南部地震における SRC 造柱脚部の被害，第 10 回日本地震工学シンポジウム，Vol.1，pp.355-358，1998.11
- 2) 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（第 4 版），日本建築学会，pp.148-151，1987.6