

論文 変動軸力を受ける SRC 構造非埋め込み形柱脚の弾塑性性状

貞末和史*¹・伊藤倫夫*²・田中秀宣*³・南宏一*⁴

要旨：兵庫県南部地震によって被害を生じた SRC 構造非埋め込み形柱脚の耐震性能を確認するため、柱脚の断面構成を実験変数として、変動軸力下における実大寸法試験体の曲げせん断実験を行い、引張軸力が柱脚の力学的挙動に大きく影響することが明らかとなった。また、柱脚断面における主筋とアンカーボルトの比率にかかわらず、非埋め込み形柱脚とした SRC 柱部材は変動軸力下においても安定した履歴特性を示し、終局曲げ耐力は既往の累加強度理論に基づく耐力算定式によって安全側に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、変動軸力、実大実験、終局曲げ耐力、変形性能

1. はじめに

兵庫県南部地震の激しい地震動によって、SRC 造建物に関しても、柱脚や継手などの接合部に多大な被害を生じていることが文献 1 などの震災調査報告や、その被害分析²⁾によって明らかにされている。また、柱脚や接合部の破壊原因として、地震時の転倒曲げに伴う変動軸力の影響、特に、大きな引張軸力によって生じたと推測される破壊状態が多いことが報告されている。しかしながら、非埋め込み形式の SRC 柱脚に着目した研究では、圧縮軸力下における曲げ・せん断実験³⁾⁴⁾や応力伝達機構に関する研究⁵⁾は行われているものの、引張軸力を受ける柱脚の挙動について実験的に検討したものは皆無であった。そこで震災後、引張力を受ける非埋め込み形柱脚の耐震性能を検討する実験的研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾が行われており、筆者らも基礎的な実験研究を開始し、その成果の一部を文献 9 に発表した。本研究はこの研究成果を踏まえて、引張変動軸力下における曲げ・せん断実験を実大寸法の試験体を用いて行い、その力学的性状について検討するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は SRC 構造非埋め込み形柱脚 3 体とし、柱脚の終局耐力および変形性能に影響を及ぼすと考えられる主筋とアンカーボルトの数量および強度を主要な実験変数として、ベースプレート下面位置の断面構成を変化させた実験計画を立てた。実験計画を表-1、試験体断面を図-1 に示す。NO.1, NO.2 の試験体は耐力と剛性の大きい鋳鋼製のベースプレートをを用い、ナット回転角法によって初期張力を導入したアンボンド形式のアンカーボルトを採用している。なお、いずれの試験体においても、アンカーボルトの引張降伏に先行しベースプレートが曲げ降伏しないようにベースプレートの厚さを決定した。

実大寸法を想定して各試験体の共通因子は柱断面 700mm×700mm、コンクリート強度 $F_c=21\text{N/mm}^2$ とし、SRC 柱材に内蔵させる H 形鋼を H-400×200(SN490)とする非埋め込み形柱脚としている。また、帯筋は D16(SD345)を 100mm 間隔で配筋し、柱脚部で曲げ破壊がせん断破壊に先行するように計画した。なお、全試

*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) 若松工場建材技術課 工修

*3 日立機材(株) テクニカルセンター

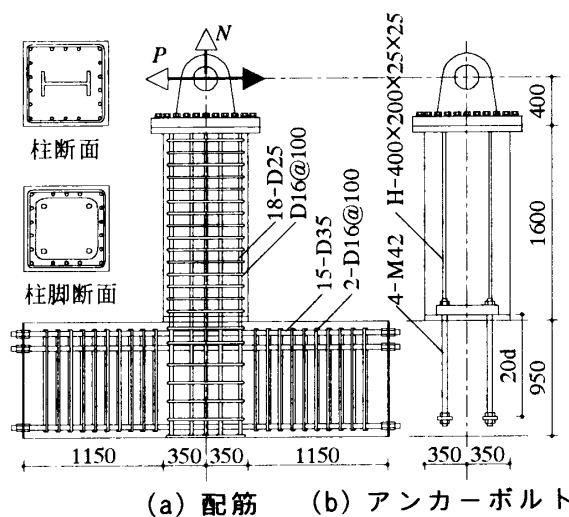
*4 福山大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

表－１ 実験計画

	N/T_y	主筋	アンカーボルト	鉄骨	λ
NO.1	0～0.4	18-D25 (SD345)	4-M42 (F値：490N/mm ²)	H-400×200×25×25 (SN490)	0.39
NO.2		22-D25 (SD345)	4-M30 (F値：490N/mm ²)	H-400×200×16×16 (SN490)	0.21
NO.3		26-D25 (SD345)	4-M24 (SS400)		0.07

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

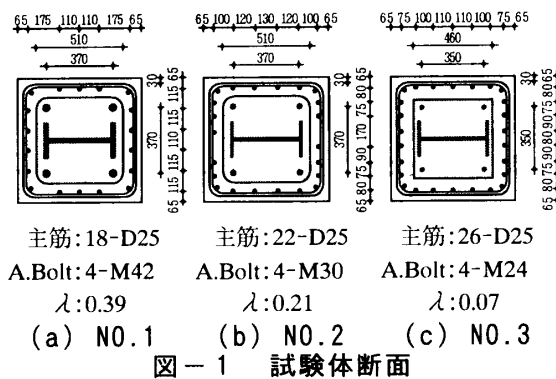
験体とも柱脚断面の引張耐力はほぼ等しく、かつ、各試験体の終局曲げ耐力もほぼ等しくなるように計画しているが、アンカーボルトの引張耐力 aT_y (ただし aT_y はねじ部の引張耐力) と柱脚断面の引張耐力 T_y (ただし T_y は柱脚断面のアンカーボルトの引張耐力 aT_y と主筋の引張耐力 rT_y の和) との比 λ を変数として計画している。試験体の形状を図－2に示し、使用材料の素材試験結果を表－2,表－3に示す。



図－2 試験体形状 (NO.1)

2.2 載荷方法

載荷は図－3に示す載荷装置を使用し、試験体頂部ピン位置での変位制御によって、漸増正負繰り返し水平載荷を $R = \pm 4.0\%$ rad.まで行った。なお、軸力は水平正加力時には所定の引張軸力を導入、水平負加力時には軸力0とする変動軸力とした。また、軸力の変動は各変位振幅において水平力が0の時点で所定の軸力まで加力あるいは除荷するものとし、軸力の大きさは $R = +1.0\%$ rad.までは $0.2 \times T_y$ の引張軸力を、それ以降の変位振幅過程では $0.4 \times T_y$ としている。



図－1 試験体断面

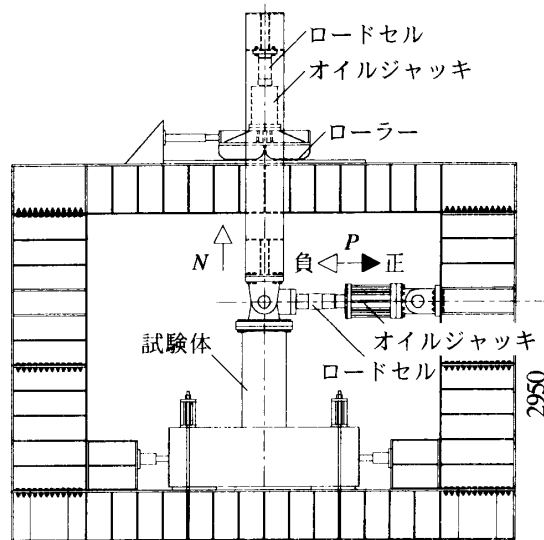
表－2 鋼材の素材試験結果

		降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	破断伸び (%)	ヤング係数 E_c (kN/mm ²)
鉄筋	D25	339	540	15.7	168
	D16	361	529	17.4	158
	D35	405	596	24.1	198
アンカーボルト	M42	490	782	24.7	215
	M30	537	751	26.8	216
	M24	303	431	30.6	214

註) D16およびM42は明瞭な降伏点を示さなかったため0.2%オフセット強度とした。

表－3 コンクリートの素材試験結果

	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	割裂強度 σ_t (N/mm ²)	材令 (日)
柱	24.3	2.24	28
基礎梁	27.0	2.60	28
モルタル	50.0	-	35



図－3 載荷装置

3. 実験結果

3.1 弾性性状

図-4に $R=\pm 1.0\%$ rad.までの曲げモーメントと柱脚の変位の関係を示す。水平変位 δ_{UB} および回転角 θ_B は負荷重時の変位も正で表し、軸方向変位 δ_{VB} は伸びる方向を正として表している。引張軸力下における弾性剛性は λ の大きい試験体の方がやや高いが、実験変数による差はほとんど認められない。しかしながら、軸力の有無によって柱脚の剛性は大きく異なり、引張軸力下における剛性の低下は著しい。

図-5は引張軸力導入時および水平荷重加力後のベースプレート下面の鋼材のひずみ推移を示したものである。アンボンドアンカーボルトを使用しているため、軸力導入時から、アンカーボルトと主筋の平面保持は成立せず、NO.2に関しては、水平荷重加力後、主筋に関しても平面保持の仮定が成立しないことが認められる。

3.2 破壊性状

図-6に各試験体の最終ひび割れ状況を示す。いずれの試験体とも柱脚部においての損傷が大きく、 $R=0.5\sim 1.0\%$ rad.で主筋が引張降伏し、アンカーボルトに関しては $R=3.0\sim 4.0\%$ rad.におい

て軸部が引張降伏している。また、帯筋・鉄骨のひずみは弾性状態を保っていることから、柱脚部においては曲げ破壊が生じたものと思われる。実験変数によってベースプレート下部の破壊性状には差は見られないが、水平荷重加力時に曲げ圧縮側となる側のコンクリートの破壊状況は軸力の有無によって異なり、軸力のない場合の方が損傷は大きい。ベースプレートより上部のひび割れは、 λ の小さい試験体の方が多くのせん断ひび割れを生じているが、これは、ベースプレートより上部の断面においては、主筋量の増加に伴い、 λ の小さい試験体の方が曲げに対する抵抗力が大きくなっていることによるものと思われる。

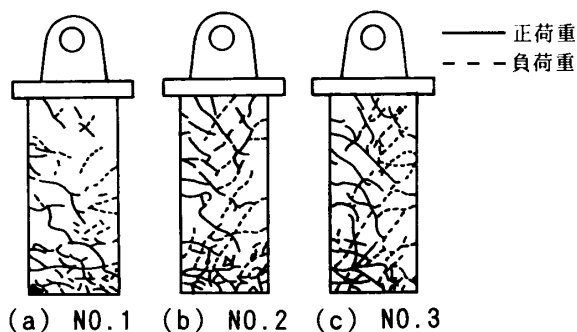


図-6 最終ひび割れ状況

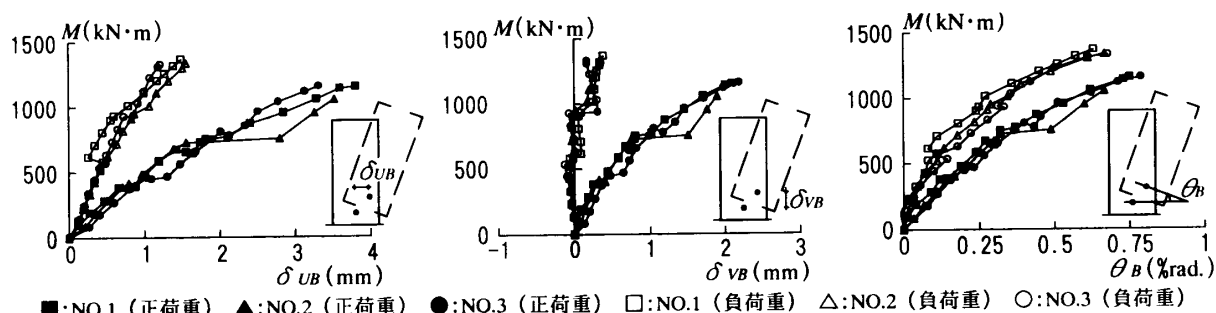


図-4 曲げモーメント-柱脚の変位関係

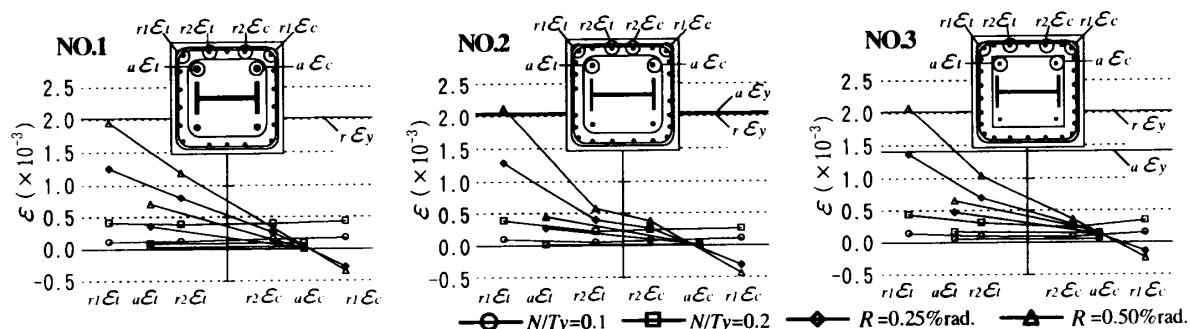


図-5 弾性域における鋼材のひずみ推移

3.3 変形状

図-7 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 をそれぞれ示す。図中の破線は SRC 規準¹⁰⁾に示される単純累加式を用いて算定した各軸力下における柱脚部の終局曲げ耐力を示し, $0Mu$, $0.2Mu$, $0.4Mu$ は軸力比 $N/Ty=0, 0.2, 0.4$ に対する終局曲げ耐力を表している。NO.2, NO.3 に関しては $R=1.0 \sim 1.5\%$ rad. において保有耐力が低下しているのに対して, NO.1 は $R=4.0\%$ rad. まで耐力が上昇し続けている。これは, 図-8 に示す鋼材のひずみと柱頭部材角の関係からわかるように, いずれの試験体ともア

ンカーボルトが大変形に至るまで降伏しておらず, 特に, NO.1 はアンカーボルトの負担量が大きいためこのような状況が見られたものと思われる。しかしながら, いずれの試験体とも $R=4.0\%$ rad. まで急激な耐力低下はなく, ほぼ紡錘形の安定した履歴特性を示している。

図-9 に柱脚の変位と柱頭相対部材角の関係を示す。引張軸力を受けている時は柱頭相対部材角の進行に伴う柱脚の変位の進展が大きい。また, 水平変位, 軸方向変位に関しては主筋の降伏以後, 急激に変位が増加することが認められることから, 主筋が柱脚の水平および軸方向の変形に, アンカーボルトが柱脚の回転変形に大きく影響しているものと考えられる。

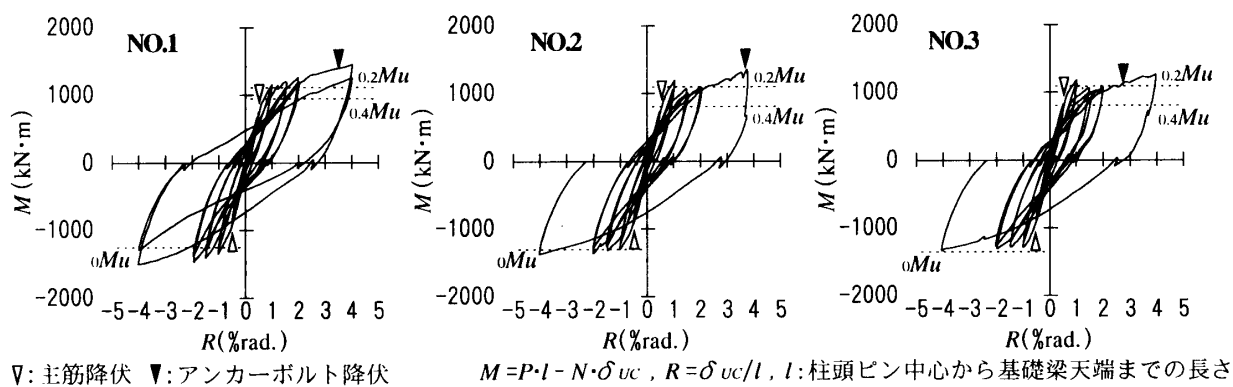


図-7 履歴曲線

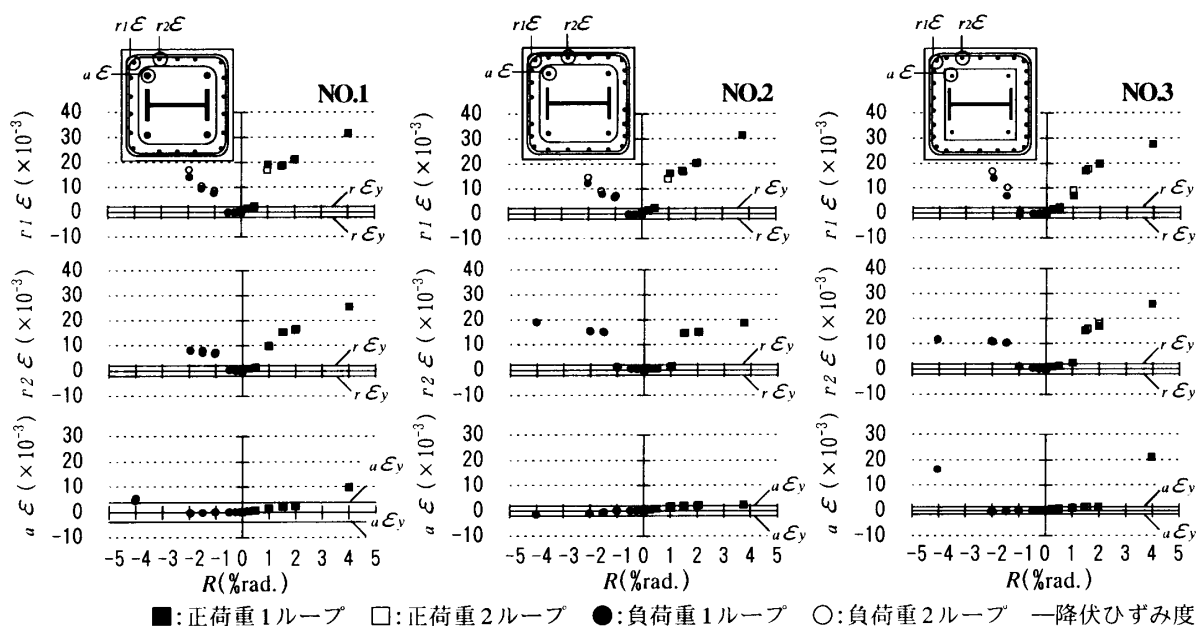


図-8 鋼材のひずみ-柱頭相対部材角関係

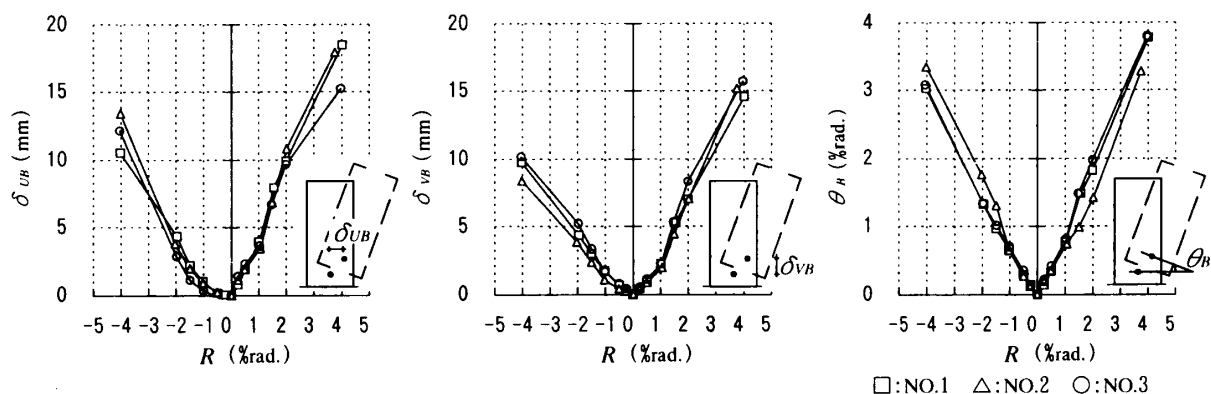


図-9 柱脚の変位－柱頭相対部材角関係

4. 終局曲げ耐力の検討

柱脚の終局曲げ耐力を文献 11 に示される平面保持の仮定を用いた終局強度理論に基づいて算定する。鋼材の応力度－ひずみ度関係は完全弾塑性型とし、コンクリートについては、弾塑性部分を 2 次のパラボラ、塑性部分は下降直線となるものを考え、コンクリートの圧縮応力が最大値に達する時のひずみ度 ϵ_{cu} は 0.15%，圧壊する時のひずみ度 ϵ_{cu} を 0.30%としている。以上の仮定を用いて得られた柱脚断面の曲げモーメント－曲率関係を図-10 に示す。NO.1, NO.2

では、まず主筋が降伏し、その後アンカーボルトの降伏によって剛性は低下するが、NO.3 ではアンカーボルトが先に降伏し、それとほぼ同時に主筋が降伏、その後、曲げモーメントは穏やかに上昇し剛性は低下する。しかしながら、実験では図-7 に示すようにいずれの試験体ともアンカーボルトは大変形時まで降伏していない。これは、図-11 に示すベースプレート下面の鋼材のひずみ推移より、主筋とアンカーボルトに対して平面保持が成立していないことに起因すると思われる。

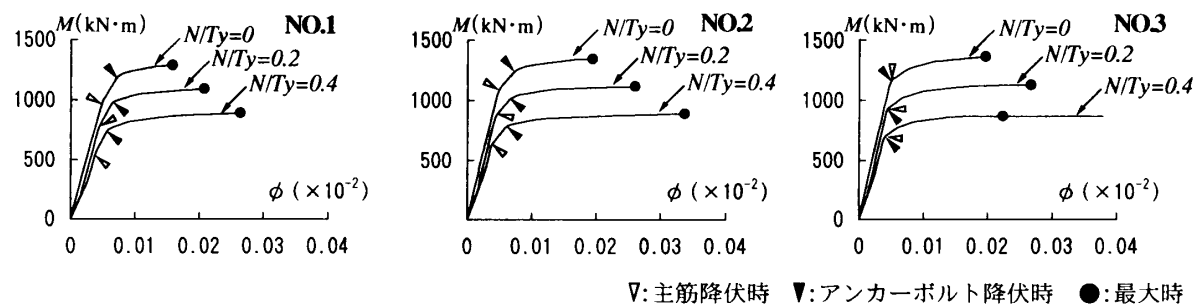


図-10 曲げモーメント－曲率関係

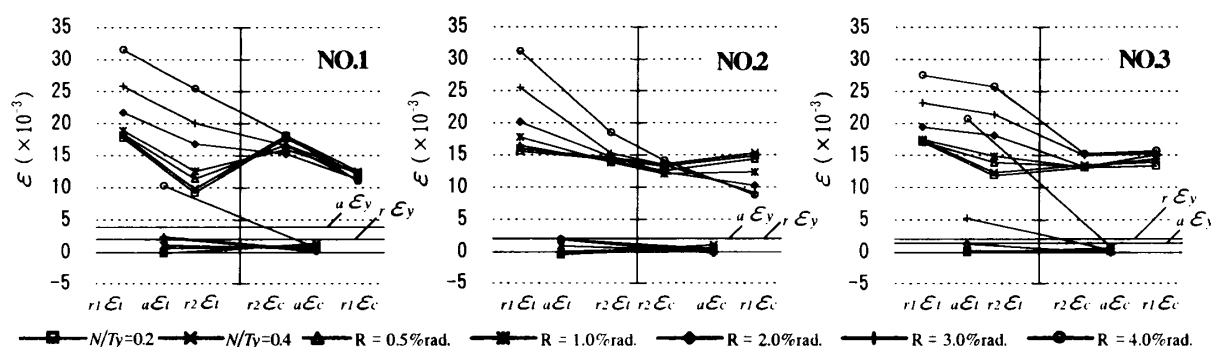


図-11 繰り返し荷重を受けた後の鋼材のひずみ推移

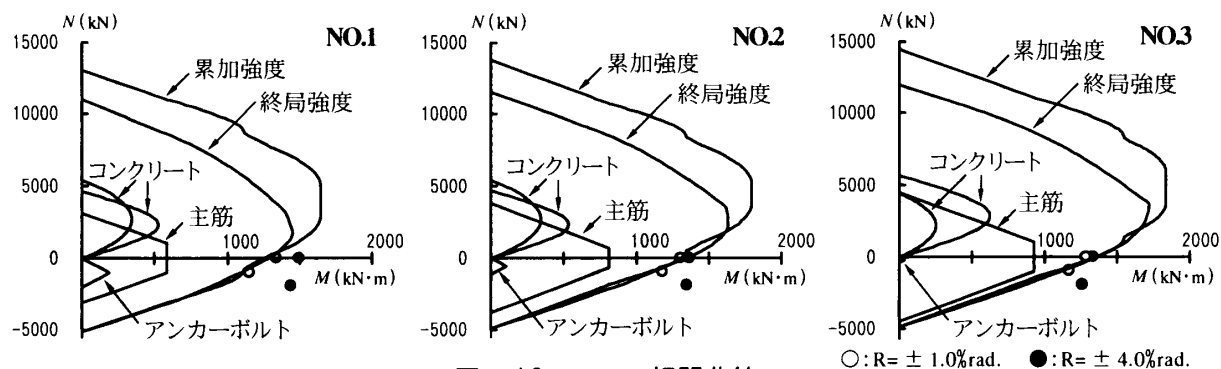


図-12 M-N 相関曲線

図-12 は縦軸を作用軸力 N 、横軸を終局曲げモーメント 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。図に示す耐力線は平面保持を仮定した終局強度理論による耐力線および、SRC 規準に示される累加強度理論を用いて算定した耐力線を表している。なお、主筋、アンカーボルトおよび累加強度の算定には鋼材の降伏点を用いている。また、いずれの試験体も最大耐力に達していないため、実験値としては、 $R=\pm 1.0\% \text{rad.}$ (○印) および $R=\pm 4.0\% \text{rad.}$ (●印) における曲げモーメントをそれぞれ示している。なお、終局強度理論では終局耐力時に鋼材が降伏していない場合を考慮しているため、高圧縮軸力下において累加強度と終局強度の差が大きくなっている。

実験値と解析値を比較すると、引張軸力を受けている $R=+4.0\% \text{rad.}$ の実験値は理論値を大きく上回っていることが認められる。これは、図-9 に示されるように引張軸力下においては柱脚の変位が大きく、 $R=\pm 4.0\% \text{rad.}$ での振幅においては、軸力が 0 の場合は主筋のひずみが 20×10^{-3} であるのに対して、引張軸力下においては 30×10^{-3} に達しており、この値は材料試験で得られた鋼材のひずみ硬化の域に達しているため耐力が解析値を上回っているものと思われる。

5. まとめ

柱脚引張降伏軸力の 0~40% の変動軸力下において ϵ を実験変数とした実大寸法試験体による曲げ・せん断実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 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、部材角 $R=4.0\% \text{rad.}$ まで十分な変形能力を有する。
- 2) 実験変数 ϵ によって終局耐力および履歴特性に差はみられないが、引張軸力の有無により柱脚部の鉛直、水平および回転の変形性状に差が生じることが認められる。

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」，1998.8
- 2) 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
- 3) 増田貫志：鉄骨鉄筋コンクリート柱脚部の力学性状に関する実験的研究(その 1)，日本建築学会論文報告集，第 260 号，pp.59-68，1979.2
- 4) 仲威雄・森田耕次・立花正彦：鉄骨鉄筋コンクリート柱脚の耐力と履歴特性に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第 276 号，pp.43-50，1977.10
- 5) 西村泰志・南宏一・若林實：鉄骨鉄筋コンクリート柱脚部の応力伝達機構，構造工学論文集，Vol.32B，pp.147-158，1986.3
- 6) 増田貫志・九谷和秀・城芦利仁：鉄骨鉄筋コンクリート柱脚の力学性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1101-1102，1997.9
- 7) 称原良一・中澤春生：非埋込型柱脚による SRC 柱の耐震性能に関する実験(その 1,2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1319-1322，1998.9
- 8) 谷田部敏之・立花正彦：引張軸力下における非埋込型 SRC 柱脚の力学的特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1039-1044，1999.6
- 9) 貞末和史ほか：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
- 10) 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
- 11) 建築構造学体系 19 鉄骨鉄筋コンクリート構造，pp.32-54，1975.10