

論文

[2060] 3軸変動力を受ける高強度 RC 柱の弾塑性挙動に関する研究

正会員 ○申 範昊 (横浜国立大学大学院)  
 正会員 倉本 洋 (横浜国立大学建設学科)  
 正会員 壁谷澤 寿海 (横浜国立大学建設学科)

1. はじめに

筆者らは、高強度材料を用いた超高層鉄筋コンクリート構造物の下層階の柱部材の弾塑性挙動を明らかにすることを目的として、一連の実験および解析的研究を行って来た。前報[1]では、中柱および隅柱を想定した一定の高軸力あるいは変動軸力と二方向の水平力を受ける高強度RC柱の実験研究について報告した。本報は、3軸変動力を受ける高強度RC造外柱および隅柱の弾塑性挙動を明らかにし、初期軸力レベルあるいは変動軸力レベルが柱部材の力学特性におよぼす影響を検討することを目的として行われた研究結果をまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 試験体特性

柱試験体は、超高層鉄筋コンクリート造建築物の下層階の外柱および隅柱を想定し、同一寸法、同一配筋の縮尺約 1/3の試験体2体を計画した。試験体の形状寸法、配筋詳細は図1および表1に示す。柱断面は25cm×25cm、柱の内法高は 100cmで、シアスパン比は 2.0とした。

2.2 材料の力学特性

主筋には D13、引張降伏強度 7000kgf/cm<sup>2</sup>級(SD70に相当)の鉄筋を用いた。また、横補強筋には 5φ、引張降伏強度13000kgf/cm<sup>2</sup>級のスパイラル補強筋と副帯筋を用い、すべての主筋を拘束した。なお、コンクリートは設計強度

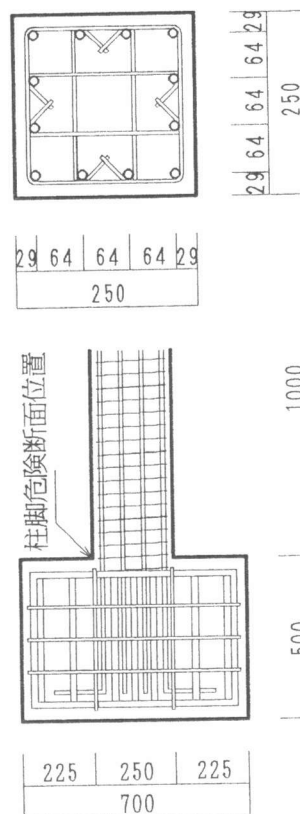


図1 試験体

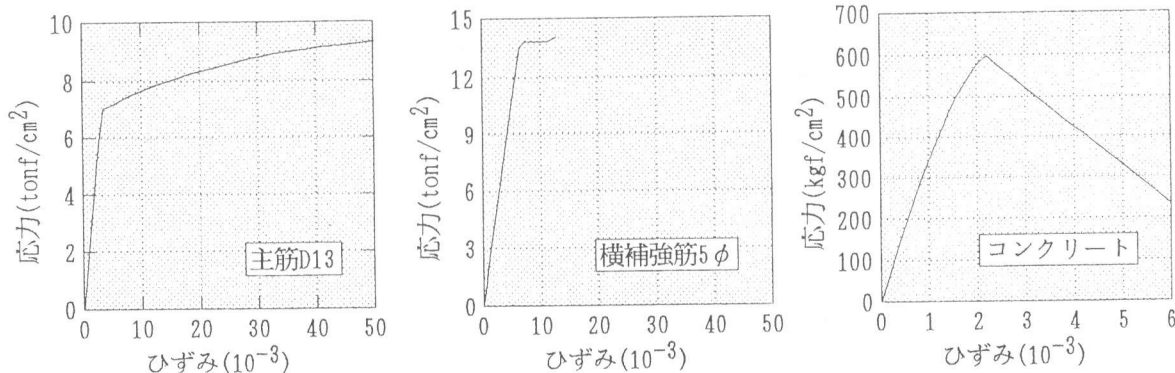


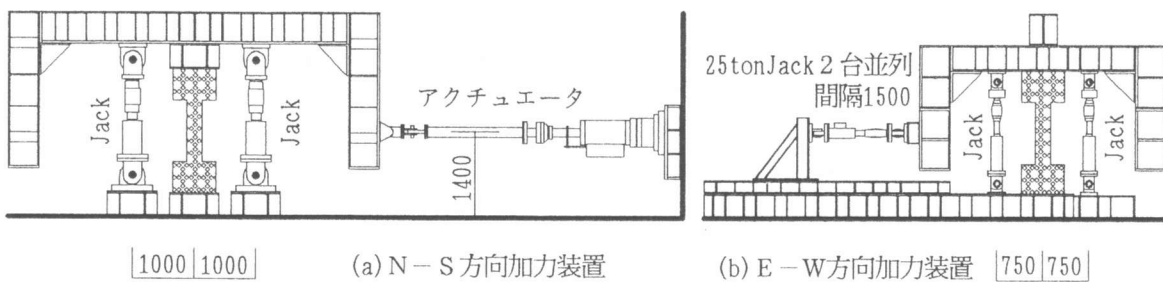
図2 鉄筋及びコンクリート材料の応力-ひずみ関係

表1 試験体一覧表

試験体	bxD (mm)	H (mm)	a/D	主筋 Pg(%)	補強筋	Pw (%)	軸力 N(ton)	軸力比 変動範囲
N-3	250x250	1000	2.0	12-D13	2-5φ@60(Spiral)	0.52	-40~230	-0.106~0.610
N-4				2.440	2-5φ@60(副帯筋)		25~225	0.066~0.597

表2 材料特性 (単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

主筋				横補強筋				コンクリート		
公称径	規格	弾性係数	降伏点	公称径	規格	弾性係数	降伏点	σ <sub>B</sub>	ε <sub>B</sub>	σ <sub>t</sub>
D13	SD70	2.01x10 <sup>6</sup>	7170	5φ	SD130	2.01x10 <sup>6</sup>	13800	603	2300μ	37

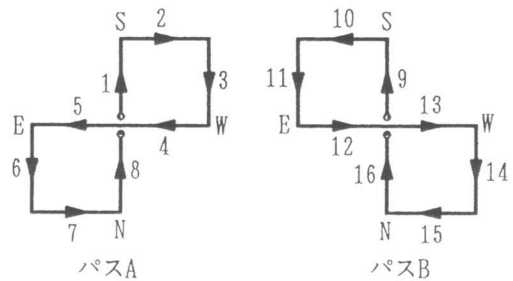


600kgf/cm<sup>2</sup>とした。試験体は横にしてコンクリートを打設した。使用した鉄筋およびコンクリートの材料特性は表2に、応力度-ひずみ度の関係は図2に示す。なお、以下の記述では試験体を前報と区別するため、試験体名はそれぞれN-3、N-4とする。

### 2.3 加力方法

加力装置および加力履歴を図3に示す。この装置は、両端にユニバーサルな(2軸あるいは3軸の回転に対して自由な)ピンをもつ鉛直方向の油圧ジャッキ4台、水平方向のジャッキ2台(EW方向)、アクチュエータ1台(NS方向)の計7台を用いて、門型の鉄骨治具を介して試験体上部の応力あるいは変形を任意の自由度で制御するものである。本実験では、水平ジャッキおよびアクチュエータによってNS、EW両方向の2軸逆対称曲げモーメントを与え、4台の鉛直ジャッキによって軸力を与える。さらに、頂部の回転変形が生じないように各鉛直ジャッキを独立に微調整している。また、柱頭の水平捩れ変形は図3(b)に示したEW方向の2台の水平ジャッキを用いて制御した。

水平加力は柱頭の柱脚に対する水平変形で制御し、図3(c)に示した四つ葉型の水平変形履歴を強制した。NSおよびEW方向の水平変形成分の部材角を、5/1000、7.5/1000、10/1000、15/1000、20/1000、30/1000の順で漸増させ、各変形レベルでそれぞれ1サイクルずつ(加力パスA:stage1~8、加力パスB:stage 9~16)繰返した。以下では、変形レベルをNS、EW方向の部材角で参照するが、各サイクルにおける45°斜め方向の最大部材角は、これらの√2倍になっていることに注意する必要がある。



注:数字1.2...16は加力順番を表わす。

(c)変形履歴

図3 加力装置及び変形履歴

試験体には初期軸力を加えてから水平加力を行う。試験体N-3に対しては、梁降伏型骨組の隅柱を想定して、初期軸力50tonf( $\sigma_0 = 80 \text{ kgf/cm}^2$ )と両方向の水平力の和に比例する変動軸力を与えた。即ち、軸力による平均応力度 $\sigma$ は、両方向水平力による平均せん断応力度を $\tau_x$ 、 $\tau_y$ として、次式にしたがって変動させた。

$$\sigma = \sigma_0 + 4(\tau_x + \tau_y) \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (1)$$

一方、試験体N-4に対しては、梁降伏型骨組の外柱を想定して、初期軸力100tonf( $\sigma_0 = 160 \text{ kgf/cm}^2$ )とNS方向の水平力に比例するものとし、次式にしたがう変動軸力を与えた。

$$\sigma = \sigma_0 + 4 \cdot \tau_x \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (2)$$

軸力は圧縮を正、水平力はNS、EW方向において、それぞれN→S、E→W方向を正とし、式(1)および式(2)のせん断応力度は繰返し加力における水平せん断力の符合の定義にしたがうものとする。したがって、パスBでは、変動軸力の変動幅がパスAに比べて相対的に小さくなる。結果的に試験体N-3の軸力の範囲は、 $\sigma = -64 \sim +368 \text{ [kgf/cm}^2]$ となり、試験体N-4の軸力の範囲は、 $\sigma = +40 \sim +360 \text{ [kgf/cm}^2]$ となっている。

## 2.4 測定方法

試験体柱頭の柱脚に対する2方向の水平変形および軸方向変形は電気式変位計で計測した。また、危険断面位置における主筋のひずみ、柱軸方向主筋のひずみ分布、横補強筋のひずみ等はワイヤストレインゲージで計測した。

## 3. 実験結果および検討

### 3.1 破壊経過

試験体N-3において、部材角15/1000の変位振幅までは最大強度以後の顕著な耐力低下は認められず比較的安定した挙動を示した。部材角5/1000の変位振幅では、東、北側の柱脚、西、南側の柱頭部付近に曲げひび割れが生じた後、柱脚の西南隅角部、柱頭の東北隅角部の圧壊を伴い、主筋に沿う曲げせん断ひび割れが生じた。部材角7.5/1000の変位振幅において、西面には中段筋に沿う縦ひび割れが生じた。部材角15/1000の変位振幅では、変形の増大に伴って、柱脚の西南隅角部、柱頭の東北隅角部の圧壊が顕著となり、南、北面中央部のひび割れの進展が顕著であった。部材角20/1000の変位振幅では、柱頭、柱脚部の圧縮側隅角部のかぶりコンクリートが、圧壊により剥落した。また、変位振幅の増大に伴い、東、南、西、北各面の端部から中央部に向け、中段筋に沿う縦ひび割れの伸展が顕著であった。部材角30/1000の変形では、柱頭、柱脚危険断面位置において、コアコンクリートの圧壊が観察された。

試験体N-4においても、試験体N-3とほぼ同様な破壊経過を示した。しかし、試験体N-4では、最大軸力が試験体N-3より小さいにもかかわらず、加力全般にわたって、曲げひび割れ、危険断面の圧壊、縦ひび割れ、かぶりコンクリートの圧壊などの発生および進展が試験体N-3に比べて相対的に小さい変位振幅で発生する傾向がある。この理由としては、試験体N-4の初期軸力がN-3に比して高かったことに加え、軸力の変動範囲が小さかったため、低軸力時においても比較的大きなせん断力が入力されたことなどが挙げられよう。

### 3. 2 荷重—変形の関係

各試験体のNSおよびEW方向のせん断力と部材角の関係を図4に示す。柱危険断面の曲げモーメントは、柱頭に水平変形を与えることによって生じるマニュアルジャッキとアクチュエーターの傾斜角度および付加モーメントを考慮して精算した。すなわち、図4におけるせん断力は、軸方向ジャッキが傾斜することによって生じるP-Δ効果の影響と、NS・EW方向それぞれの水平方向ジャッキおよびアクチュエータに対して、直交方向の変形によって生じる水平加力軸の移動による誤差を控除したものである。

試験体N-3では、軸力増大側（式(1)の定義により以下では、Stage1,2を軸力増大側、Stage5,6を軸力減少側と言う。）では剛性低下は小さく、除荷後、軸力の減少にしたがって剛性低下が大きくなる。各変位振幅におけるピーク時の耐力は、正載荷時の耐力が負載荷に比べてかなり大きい。また、部材角15/1000以降の変位振幅では、ピーク時の耐力低下が著しく、不安定な挙動を示した。なお、同じ変形レベルにおけるパスAとパスBの繰り返しでは、加力履歴の相違による軸力レベルの差により、各変位振幅におけるピーク時耐力および履歴ループの形状が異なる。即ち、軸力の変動幅が大きいパスAにおいて、軸力増大側では耐力および2軸曲げ相互作用（柱の2方向加力において、部材角が一定値を保つ方向の耐力は、当該方向と直交する方向の部材角の増加に伴って低下する現象を以下では、2軸相互作用と言う。）ともに大きいのに比べ、軸力

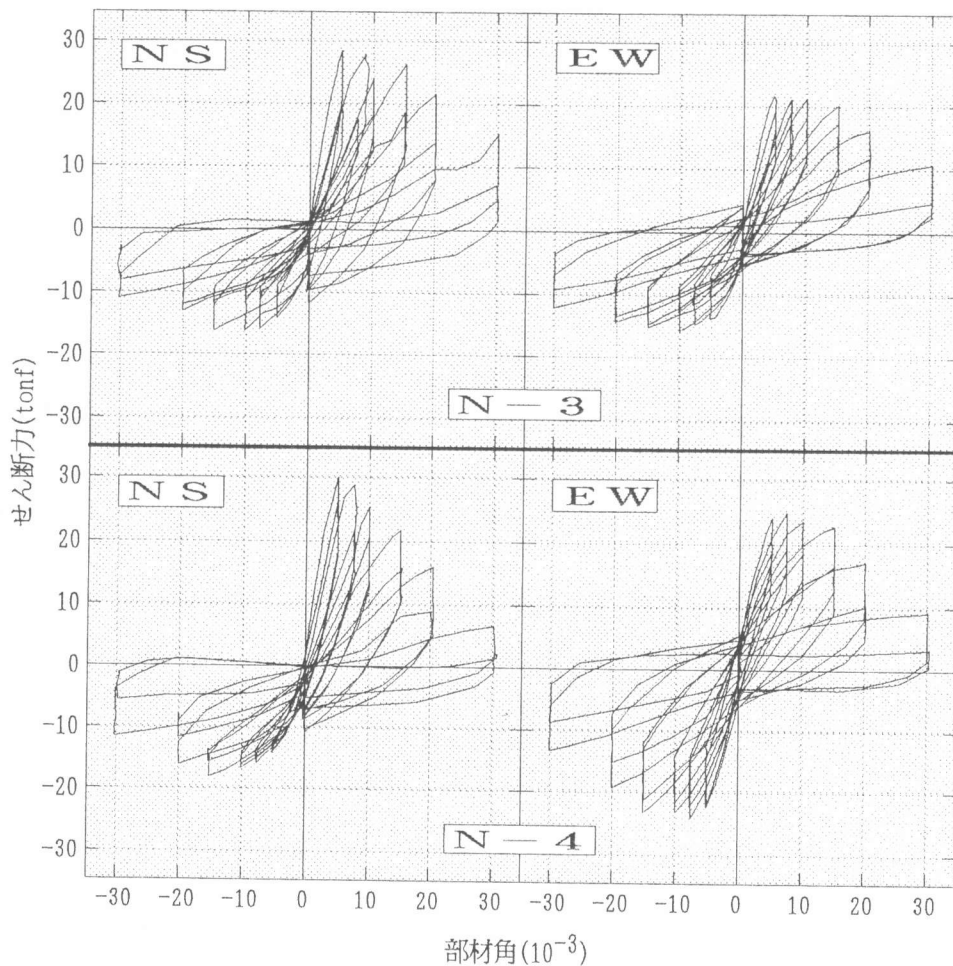


図4 せん断力と部材角との関係

の変動幅が小さいパスBでは、耐力および2軸曲げ相互作用ともに小さい。

一方、試験体N-4のEW方向の履歴においては、軸力の変動幅が小さかったため、正載荷と負載荷時の履歴ループがほぼ対称であり、一定軸力を受ける柱部材の履歴特性に近い性状を示した。それに対して、NS方向の履歴ループは、EW方向より軸力の変動幅が大きく、試験体N-3より初期軸力が高いため、部材角5/1000以後、各変位振幅におけるピーク時の耐力低下が比較的著しい。

### 3.3 軸方向変形

試験体の軸方向変形と水平変形を図5に示す。図5に示した水平変形は、NS方向とEW方向それぞれの水平変形の2乗和平方根である。試験体N-3では、軸方向に引張と圧縮変形が繰返して生じるため、軸方向変形があまり進行しない。これに対して、試験体N-4の場合は、水平加力の進行に従って軸方向引張変形は圧縮変形に比べかなり小さく、圧縮変形が試験体N-3に比べかなり大きい。また、部材角20/1000以後の大変形では、試験体N-3およびN-4ともに、軸方向の圧縮変形が急増する傾向にあるが、荷重-変形曲線(図4)においても、この変形レベルを境としてNS、EW両方向に顕著な耐力低下が生じている。すなわち、軸方向の圧縮変形の進行が部材靱性に及ぼす影響が大きいことが示されている。なお、両試験体ともに最終加力サイクル(部材角30/1000)において、曲げせん断破壊の様相が顕著となったことも、耐力低下および軸方向の圧縮変形の急増の一因として挙げられる。試験体N-3における軸方向変形は、正負繰返し軸力により、部材角20/1000の変形までは、軸方向変形は引張と圧縮の繰返しであったが、その以後は圧縮変形が著しくなる。一方、試験体N-4においては、相対的に高い初期軸力および軸力の変動幅が小さかったため軸方向圧縮変形が徐々に進展し、かつ蓄積される。

### 3.4 主筋の応力分布

試験体N-3におけるNW隅部主筋の応力分布を一例として図6に示す。鉄筋の応力度は、実測した主筋のひずみを入力データとして、ひずみ硬化とBauschinger効果を考慮したTri-linear型の区分線形モデルを用いて算定した。図に示したように、部材角10/1000および15/1000の変形レベルでは、柱頭圧縮側の危険断面において主筋が降伏しており、柱脚圧縮側の危険断面においても主筋はほぼ降伏強度に達している。また、試験体の軸力はせん断耐力に比例して変動するため、部材角20/1000の変形レベルでは、鉄筋の応力度が減少している。なお、試験体N-3の危険断面における主筋の解析結

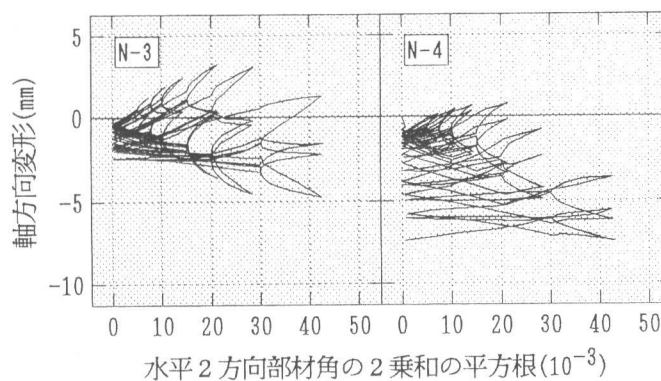


図5 軸方向変形と部材角の関係

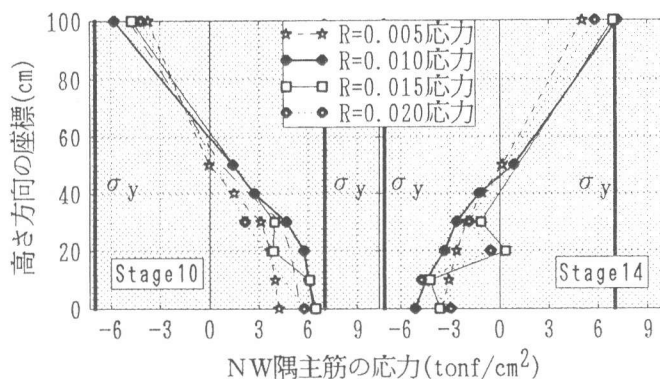


図6 NW隅主筋の応力分布

果において、EN隅角部の主筋は、部材角5/1000の変形レベルで、圧縮降伏している。

一方、試験体N-4のNW隅角部主筋の応力分布においては、部材角7.5/1000の変形レベルで、柱脚圧縮側危険断面の主筋が降伏しており、試験体N-3に比して、同一断面位置における主筋の降伏が相対的に小さい変形レベルで発生した。

### 3.5 部材耐力の比較

実験から得た試験体危険断面の2方向せん断力履歴（細実線）関係を図7に示す。また同図には、曲げ終局強度略算式[2]（以下では、略算式と言う。）によって求めた正負最大耐力（破線の円）を示している。なお、略算式による耐力算定においては、実験時の最大軸力と最小軸力を用いた。図に示したように、試験体N-3およびN-4に対して、圧縮軸力を受ける場合には略算式による計算結果は実験結果とほぼ一致しているが、引張軸力を受ける場合（試験体N-3の場合）には計算結果は実験結果を過小評価している。これは、従来の略算式においては、繰返し加力、特に鉄筋のひずみ履歴の影響が考慮されていないのが原因であると考えられる。

## 4. 結論

本研究により、以下の結果が得られた。

- ① 高強度RC柱部材の2軸曲げ相互作用および変動軸力の効果を含む履歴特性を明らかにした。
- ② 変動軸力を受ける柱部材において、初期軸力レベルは柱の軸方向変形および耐力低下などの力学挙動を左右する要因となる。
- ③ 高層建築物下層階の外柱は、隅柱に比べ最大軸力は相対的に低い、初期軸力が高いため、隅角部のかぶりコンクリートの圧壊、耐力の低下および主筋の降伏などが小さな変形レベルで生じる傾向がある。
- ④ 実験による軸力増大側の最大耐力は従来の曲げ強度略算式で評価した結果とほぼ一致している。したがって、圧縮軸力を受ける高強度RC柱部材に対して、従来の曲げ強度略算式は適用可能であるが、引張軸力を受ける場合には、適切な検討が必要であると考えられる。

### 【謝辞】

本研究は文部省科学研究費補助金総合研究(A)（代表者：東京大学、青山博之教授）の一部として行われたものである。また、実験の際、卒論生石田博英、伊東譲両氏をはじめ、当研究室の諸氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

### 《参考文献》

- [1] 申、李、壁谷澤：「3軸応力を受ける高強度鉄筋コンクリート造柱の挙動に関する実験的研究」、コンクリート工学年次論文報告集、1991年、Vol.13、No.2、PP.463-468.
- [2] 日本建築センター：構造計算指針・同解説、1986年

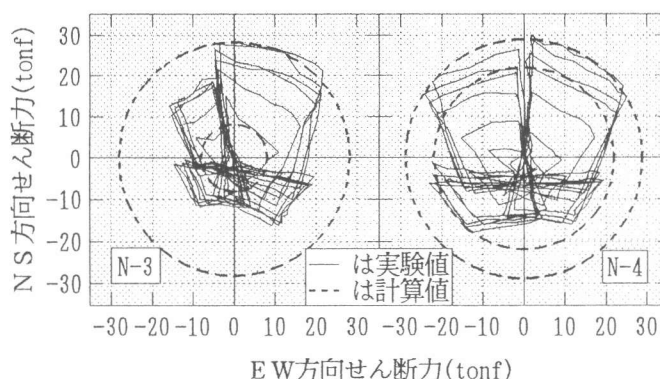


図7 二方向せん断力関係及び部材耐力比較