

論文

[2076] 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

正会員 ○申 範 昊 (横浜国立大学大学院)

正会員 李 康 寧 (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

地震動を受ける骨組構造物の柱部材は、水平2方向の地震力により、2方向の曲げとせん断力を受ける。さらに、高層建物の外柱と隅柱は、大きな変動軸力も受ける。部材の実験あるいは地震応答解析による研究では、2方向地震力を考慮することの重要性がしばしば指摘されている。耐震設計は本来このような3軸の応力状態での柱の挙動を基本にして行われるべきであるが、現行の設計では2方向地震力の同時性は、陽な形では一切採り入れられていないのが現状である。

一方、鉄筋コンクリート造建築物に関する研究分野では、(超)高強度材料を用いた鉄筋コンクリートの実用化を目指した組織的な研究開発が行われている。本研究は、これらの研究開発の一環として、高強度の鉄筋とコンクリートを用いた柱を対象として、2方向の曲げ、せん断と一定軸力または変動軸力を受ける場合の挙動を明らかにすることを目的として静加力実験を行ったものである。

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物の1階の外柱及び隅柱を想定し、縮尺約1/3の試験体を同じ寸法配筋で2体作成した。試験体の形状寸法、配筋詳細は図1と表-1に示す。即ち、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

主筋はD13、引張降伏強度6200kgf/cm²級(SD70に相当)の鉄筋を用いた。横補強筋は5φ、引張降伏強度10000kgf/cm²級のスパイラル補強筋と副帯筋を用い、全ての主筋を拘束した。コンクリートは設計強度700kgf/cm²として、普通セメントと最大粒径20mmの粗骨材、水セメント比28%、細骨材率38%として、高性能減水剤を用いて調合した。試験体を横にしてコンクリートを打設した。使用した鉄筋及びコンクリートの材料特性は表-2に、応力度-歪度の関係は図2に示した。

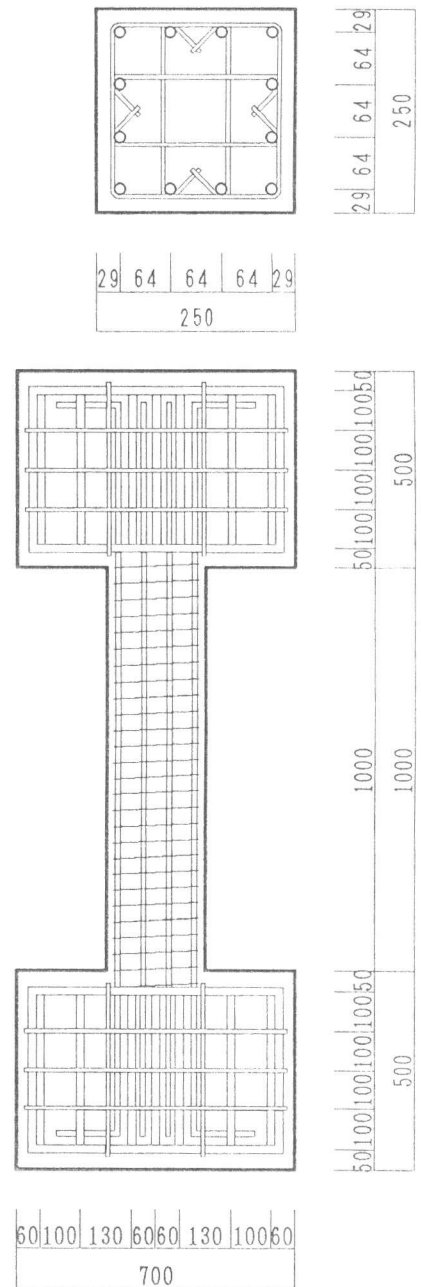


図1 試験体

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-1	250x250	1000	2.0	12-D13	2-5φ@40(Spiral)	0.60	200	0.5(一定)
N-2				2.440	2-5φ@40(副帯筋)		-50~250	-0.1~0.6

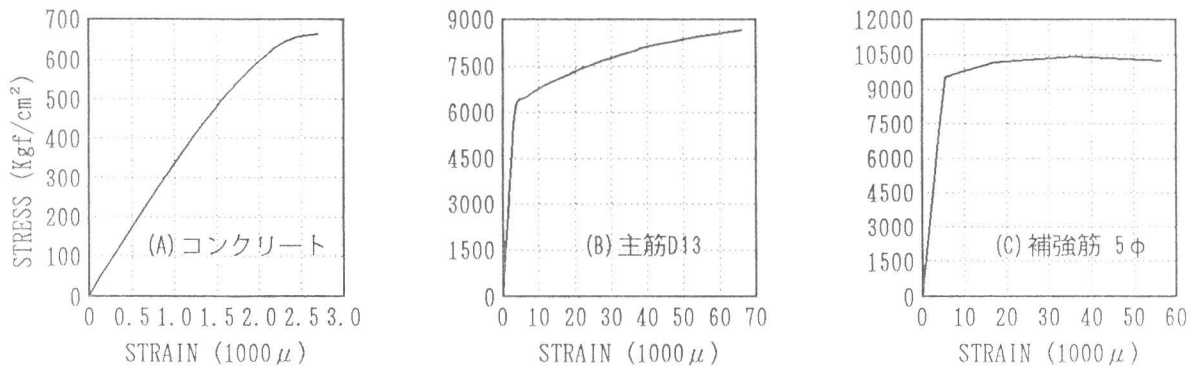


図2 鉄筋及びコンクリート材料の応力-歪関係

2.3 加力方法

加力装置を図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位を任意の自由度で制御しうるものである。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、頂部の回転変位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、柱頭の水平振れ変形は図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位で制御し、図4に示した四つ葉型の水平変位履歴を強制した。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、各変形角レベルで斜め方向にそれぞれ1サイクルずつ(加力パスA:stage 1~8、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斜め方向の最大部材角は、これらの $\sqrt{2}$ 倍になっていることに注意する必要がある。

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-1では、かなり高い一定軸力200tonf($\sigma_0 = 320 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_0/\sigma_B = 0.5$)を与えて加力した。試験体N-2では、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 σ は、両方向水平力による平均せん断応力度を τ_x 、

表-2 材料特性(単位: kgf/cm²)

鉄		筋	
公称径	規格	弾性係数	降伏点
D13	SD60	2.01×10^6	6235
5φ	ウルボン	2.01×10^6	9873
コンクリート			
圧縮強度		654	
圧縮強度時歪		3100 μ	
割裂強度		64	

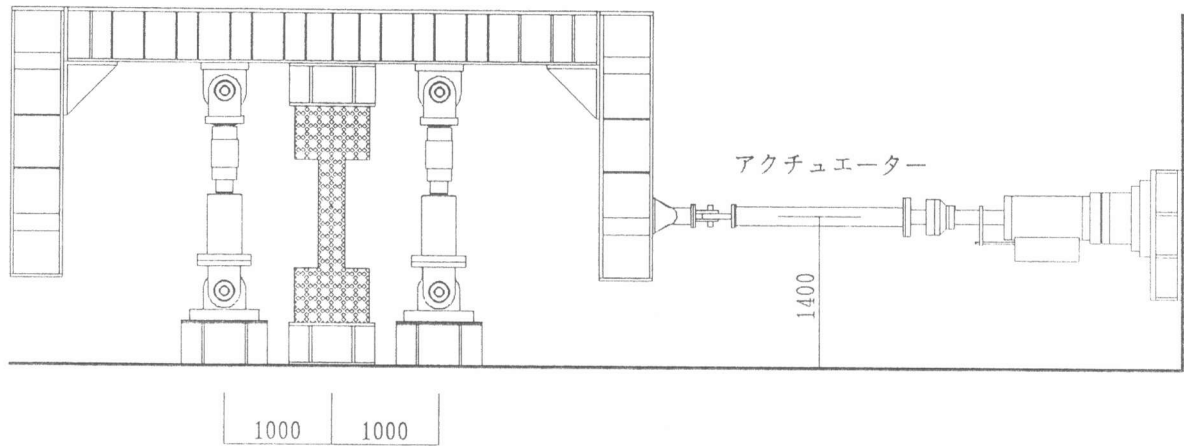


図3 (a) NS方向加力装置

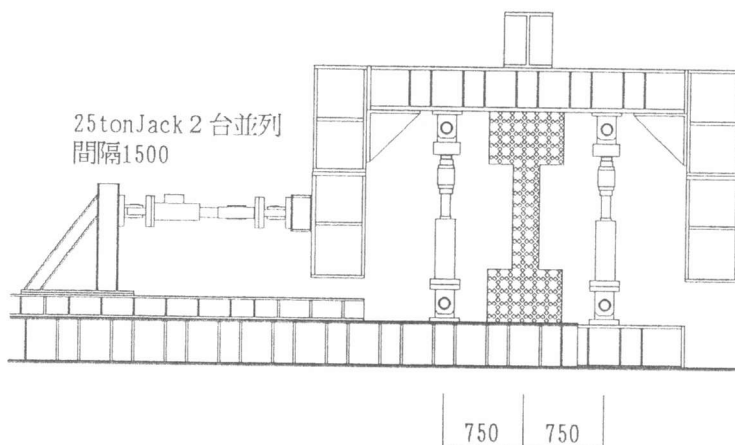
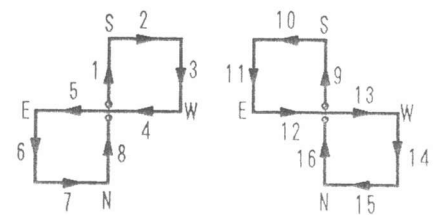


図3 (b) EW方向加力装置



(a) パスA

(b) パスB

注: 数字1. 2... 16は加力順番を表わす。

図4 加力履歴

τ_y として、次式にしたがって変動させた。

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

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)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-2の軸力の範囲は、 $\sigma \approx -80 \sim +400$ [kgf/cm²] 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歪、柱軸方向主筋の歪分布、横補強筋の歪等はワイヤストレーンゲージで計測した。

3. 実験結果及び検討

3. 1 破壊経過

試験体は2体ともに曲げ降伏した後、部材角30/1000の大変形に達する前には大きな耐力低下を起こさず比較的安定した挙動を示した。図5に試験体のひびわれ状況を示す。

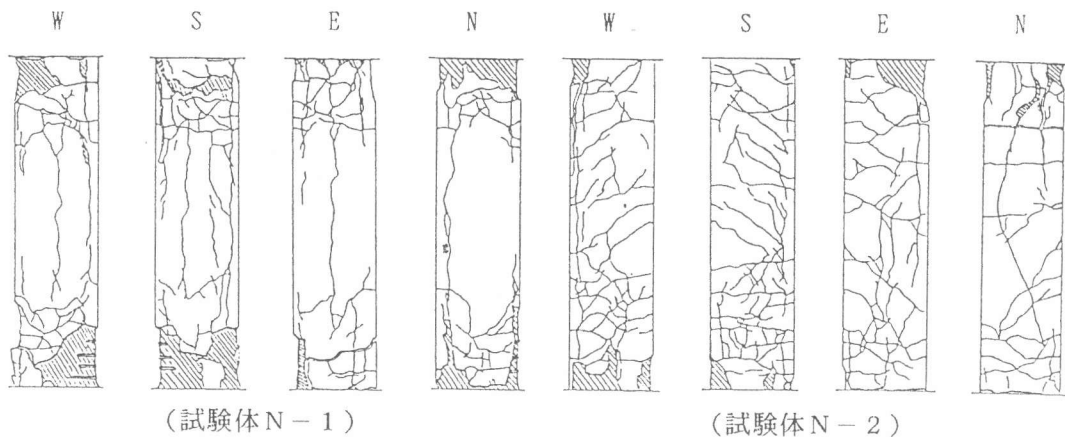


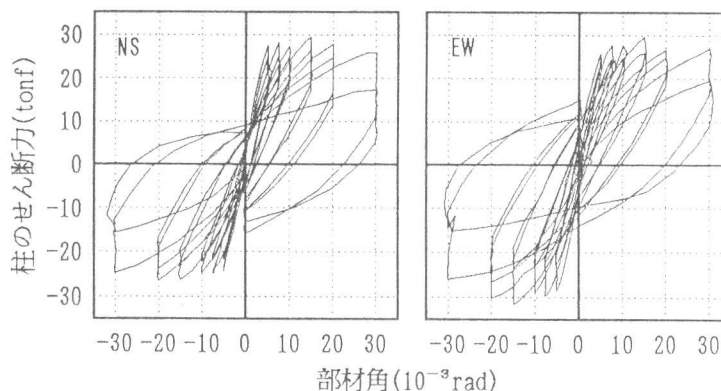
図5 試験体のひび割れ状況 (R=15/1000の時)

試験体N-1は、部材角5/1000の変形では危険断面に曲げひび割れが生じ、部材角7.5/1000の変形では、危険断面における隅の鉄筋が降伏した後、変位振幅の増大に伴って曲げ圧縮側に縦ひびわれが生じ、かぶりコンクリートが圧壊によって、剥落し始めた。この変形レベルは一方向加力[1]の場合と比較して、やや小さい傾向がある。部材角20/1000の変形では柱全長にわたって中段筋に沿う縦ひび割れが生じ、部材角30/1000の変形に至っては、ほぼ全長にわたってかぶりコンクリートが剥落した。また、フープ筋による拘束効果が有効であったため、コアコンクリートには顕著な圧壊は見られなかった。

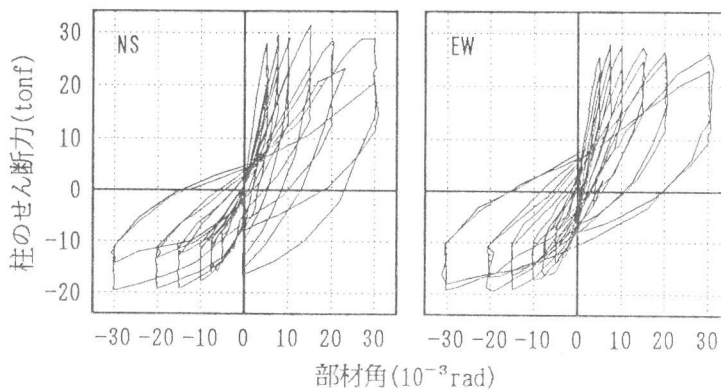
試験体N-2においても部材角20/1000の変形まではほぼ試験体N-1と同様な破壊経過を示した。また、試験体N-2ではNS方向载荷において、作用軸力が試験体N-1に比べて大きくなる場合があるが、それ以外では小さくなるため、部材角30/1000の大変形時においてもコンクリートの圧壊および剥離状況は試験体N-1に比べて軽微であった。

3.2 荷重-変形の関係

柱危険断面の曲げモーメントは、柱頭に水平変形を与えられた時ジャッキとアクチュエターの傾く角度を考慮して精算した。即ち、せん断力は、P-Δ効果の影響及び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。なお、柱部材が受けるせん断力は曲げモーメント



(a) 試験体N-1 (一定軸力)



(b) 試験体N-2 (変動軸力)

図6 水平せん断力と水平変形の関係

から換算した。各試験体のNS及びEW方向のせん断力と部材角の関係を図6に示す。また、水平面上でのせん断力ベクトルと変位ベクトルの関係を図7に示す。

一定軸力を受ける試験体N-1では、水平力-変形関係(図6(a))において正載荷と負載荷時の履歴ループがほぼ対称であり、部材角10/1000の変形までは、除荷後の残留変形が少なく、ほぼ弾性的な挙動を示した。部材角15/1000の変形ではほぼ最大耐力に達したが、部材角7.5/1000の変形以後において主筋が降伏し、且つかぶりコンクリートの圧壊が進行したため、最大耐力までの耐力の上昇はわずかであった。また、部材角20/1000までは耐力低下がなく、安定した挙動を示した。なお、一方向の変形を一定値に制御した場合には、その方向の耐力は直交方向加力の影響で大きく低下した。

一方、変動軸力を受ける試験体N-2(図6(b))では、軸力増大側では剛性低下は少なく、軸力が減少する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最大強度に関しては、軸力増大側が軸力減少側に比べてかなり大きい。大変形での強度劣化は軸力減少側ではみられず、軸力増大側においても大きくはない。また、同一変位振幅における一回目と二回目の繰返しでは、加力履歴の相違による作用軸力レベルの差によって、最大強度及び履歴ループの形状が異なる。即ち、パスAでは軸力の変動幅が大きいため、最大軸力側では耐力が大きく、直交方向加力の影響による耐力低下も大きくなるが、最小軸力側では耐力および直交方向加力の影響が共に小さい。しかし、パスBでは、軸力の変動幅が相対的に小さくなるため、非対称性が顕著ではなくなる。実地震動を受ける時の柱の軸力変動はこのようなパターンとは限らないが、軸力の変動が柱部材の曲げ耐力と剛性に対する影響が複雑であることが実験結果で示されている。

一方、変動軸力を受ける試験体N-2(図6(b))では、軸力増大側では剛性低下は少なく、軸力が減少する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最大強度に関しては、軸力増大側が軸力減少側に比べてかなり大きい。大変形での強度劣化は軸力減少側ではみられず、軸力増大側においても大きくはない。また、同一変位振幅における一回目と二回目の繰返しでは、加力履歴の相違による作用軸力レベルの差によって、最大強度及び履歴ループの形状が異なる。即ち、パスAでは軸力の変動幅が大きいため、最大軸力側では耐力が大きく、直交方向加力の影響による耐力低下も大きくなるが、最小軸力側では耐力および直交方向加力の影響が共に小さい。しかし、パスBでは、軸力の変動幅が相対的に小さくなるため、非対称性が顕著ではなくなる。実地震動を受ける時の柱の軸力変動はこのようなパターンとは限らないが、軸力の変動が柱部材の曲げ耐力と剛性に対する影響が複雑であることが実験結果で示されている。

3.3 軸方向変形

試験体の軸方向変形と水平方向の加力履歴との関係を図8に示す。一定の高圧縮軸力を受ける試験体N-1の場合は、水平加力の進行に従って軸方向縮み変形が徐々に蓄積され、最終的には軸方向の大変形によって、試験体の軸方向圧壊が生じた。これに対して、引張と圧縮の繰返し変動軸力を受ける試験体N-2では、軸方向に伸びと縮み変形が繰返して生じるが、最大軸力が試験体N-1よりも大きいにもかかわらず、軸方向変形があまり進行せず、一定高圧縮軸力を受ける試験体とは明らかに異なる挙動を示した。

変動軸力を受ける試験体N-2の軸力

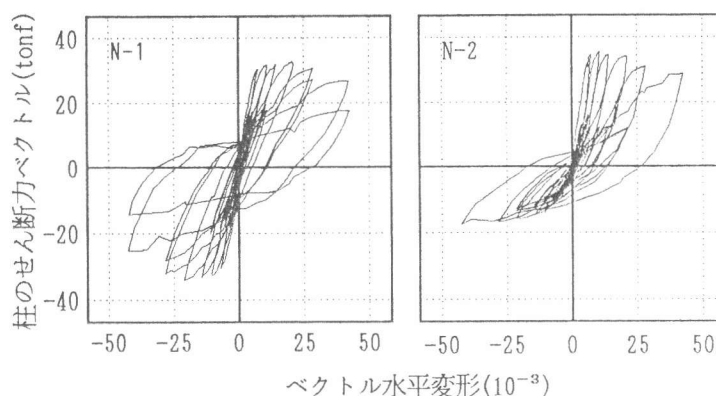


図7 水平せん断力と水平変形ベクトルの関係

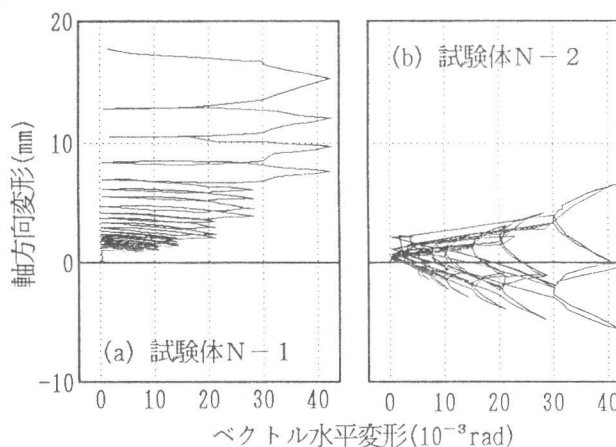


図8 軸方向変形と水平変形の関係

一軸方向変形関係を図9に示す。圧縮軸力を受ける時の軸方向挙動は、水平変形部材角が小さい範囲(7.5/1000まで)ではほぼ弾性であるが、水平変形が大きくなると、軸方向剛性が次第に低下し、軸方向変形も大きくなる。即ち、軸方向変形と水平方向変形の間大きな相互作用が存在する。このことは従来の解析ではほとんど考慮されていないことである。

3.4 部材の耐力

柱のNS方向とEW方向の曲げモーメントの関係をX-Y平面上にプロットしたものを図10に示す。図中に、現行の構造計算指針[2]の曲げ終局強度略算式によって、一方向(NS、EW)において算定した結果を破線の円で示し、実験結果と比較した。その結果、一定軸力を受ける試験体N-1では、実験による最大耐力は従来の略算方法による結果とほぼ対応した。変動軸力を受ける試験体N-2については、実験における最大耐力時の作用軸力に対して略算式で耐力を評価した。実験値は計算値より若干大きいですが、両者は概ね対応しており、従来の曲げ強度略算式は高強度柱部材にも適用可能であると考えられる。

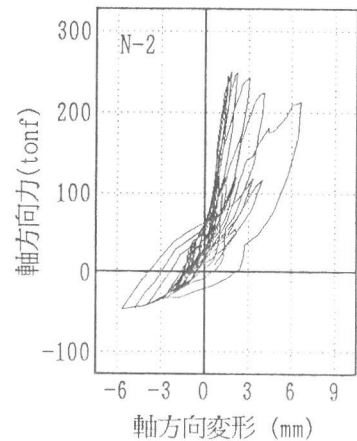


図9 軸力-軸方向変形

4. 結論

本実験により、高強度鉄筋コンクリート柱部材の2軸曲げ相互作用及び変動軸力の効果を含む復元力特性が明らかになった。水平二方向加力は、一方向加力と比べ[1]隅角部のかぶりコンクリートの圧壊と鉄筋の降伏が小さい変位レベルで起きる傾向が見られたが、靱性および一定軸力下の耐力につ

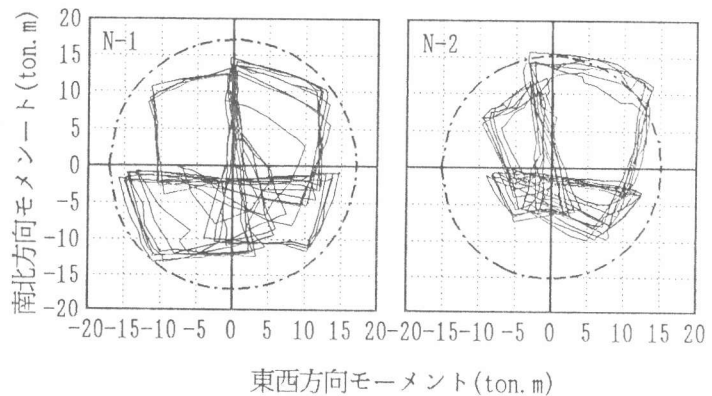


図10 M_x-M_y 関係及び部材耐力の比較

いては顕著な差異は確認されな

った。また、一定軸力と変動軸力では軸方向変形に大きな差が見られ、変動軸力の場合の最大軸力は一定軸力の場合ほど軸方向変形に対して影響がない。実験による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。本実験の柱試験体は十分な補強筋を配したため靱性のある力学的挙動を示したが、脆性的破壊が生じる場合については今後も引き続き検討する必要がある。

【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、卒論生小久保直行氏をはじめ、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] 黄、李、壁谷澤:高軸力を受ける高強度鉄筋コンクリート柱の強度と変形能力に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、1990年、Vol.12、No.2、PP.427-452。
- [2] 日本建築センター:構造計算指針・同解説、1986年