論文 2方向水平力を受けるせん断破壊型鉄筋コンクリート柱に関する 解析的研究

蒋 梅*1·柏崎 隆志*2·野口 博*3

要旨:本論文は芳村,津村らが実験を行ったせん断破壊型 RC 柱試験体の一部を解析対象試 験体とし,軸方向と水平2方向にわたる耐力と変形の相関を3次元 FEM 解析によって検討 したものである。解析結果から、X方向の最大耐力は,軸力の増加と共に増大し,軸力比0.4 で最大となりその後は低下し,更にX方向最大耐力はY方向一定水平力が大きいほど小さ くなることが確認された。また、2方向水平力を受ける RC 柱の主軸方向耐力は、1方向加 力時の耐力に比べ低下し,最大耐力後の耐力劣化が激化するなど、RC 柱の諸相関に対して 実験で得られた知見について,解析においても検証することができた。

キーワード:柱,2方向,軸変形,せん断破壊,有限要素法,3次元解析

1. はじめに

地震動を受ける RC 骨組構造物の柱は,長期 軸力と共に地震力の作用により2方向の曲げ・ せん断力を受け,3 軸の応力状態となる。この ような2方向水平力を受ける RC 柱に関する既 往の研究では,2 方向水平力を受ける場合の主 軸方向の耐力は1方向加力のものに比べ低下し, 塑性化が進むこと¹⁾²⁾,また,一定水平力方向 の変形は,他方向への加力に伴い増加すること など,水平2方向の力及び変形の間に相互の影 響が存在する³⁾⁴⁾ことが示された。ただし,今 までの研究では,実験的な研究が多数を占め, 解析的な研究例は,芳村,津村等が挙げられる が,まだ数が少ないのが現状である。

FEM 解析では、実験では測定が難しい内部応 力状態や破壊進行状況を視覚的に把握できる。 この利点を生かし、軸力及び2方向水平力を受 ける RC 柱の立体的挙動を把握することを目的 として、3次元 FEM 解析を行った。

2. 解析概要

本研究では,芳村,津村⁵,何⁶らが実験を 行ったせん断破壊型 RC 柱の試験体の一部を解

表-1 試験体一覧

試験体名	軸力(KN)	Y方向一定 水平力(KN)	シリーズ	
N2Y0	588(0.2)	0	標準試験体	
N2Y1	588(0.2)	98	2十百	
N2Y2	588(0.2)	196	 シローブ	
N2Y3	588(0.2)	294		
N0Y0	0	0	1七白	
N4Y0	1176(0.4)	0	・ 1/1回	
N6Y0	1764(0.6)	0		

表-2 試験体材料特性

鉄筋		降伏応力度 (MPa)	最大応力度 (MPa)	降伏時歪 (%)	ヤング係数 (MPa)	
	D10	384	542	0.21	1.83×10 ⁵	
	D19	506	722	0.28	1.82×10^{5}	
コンクリート	最大応力度 (MPa)	最大応力度 時歪(%)	ヤング係数 (1/3割線) (MPa)			
	24	0.31	1.76×10^{4}			

析対象とした。この実験では,試験体に軸力と 2方向水平力を作用させ,種々の加力パスをパ ラメータとし,RC柱のせん断耐力の多軸相関 を検討するためのものである。試験体一覧を表-1に,材料特性を表-2に示す。加力装置と制御 方法を図-1に,試験体配筋を図-2に示す。試験 体は,柱頭,柱脚の材端を平行に保ちつつ水平 2方向加力が可能となるように制御されている。 すべての試験体の形状寸法は同じであり,柱部

*1 前千葉大学大学院自然科学研究科博士前期課程 工修(正会員)

*2 千葉大学助手 工学部デザイン工学科 工修(正会員)

*3 千葉大学教授 工学部デザイン工学科 工博(正会員)



図-1 加力装置と制御方法 図-2 試験体配筋



図-3 要素分割および境界条件

分は 35cm×35cm の正方形断面である。せん断 破壊が卓越するようにせん断スパン比を小さく とり,さらに降伏応力度の高い主筋が十分に配 筋された。試験体は全部で7体あり,加力方法 により表-1に示すように2シリーズに分けられ る。Y方向一定水平力が0の試験体を1方向シ リーズと呼び,主として軸力の影響が検討され た。Y方向にも加力された試験体を2方向シリ ーズと呼び,主に水平2方向の耐力と変形の諸 相関が検討された。

3. 解析方法

3.1 材料モデル

解析には、内田、野口らにより開発された 3次元非線形 FEM 解析プログラム⁷⁾を用いた。 コンクリートには、アイソパラメトリック 8節 点ソリッド要素を用いた。構成側には、Darwin -Pecknod の等価1軸ひずみに基づく直交異方 性モデルを3次元に拡張したモデルを用いた。 また, 破壊曲面には, Willam-Warnke の 5 パラ メータモデル⁸⁾を仮定した。5つのパラメータ は Kupfer 等の実験に基づいた。ひび割れ面に沿 ったせん断剛性は Al-Mahaidi モデル⁹⁾を用いた。 ひび割れたコンクリートの圧縮劣化特性は, RC 平板の基礎実験から得られた野口,濱田¹⁰の 提案式を使用した。応力-ひずみ関係は、圧縮 側の上昇域では Saenz 式を用い, 下降域では横 補強筋の拘束効果によるひずみ軟化域での靭性 向上を考慮する Kent-Park 式¹¹⁾ を用いた。鉄筋 は2節点線材要素で表現し、応力-ひずみ関係 は、バイリニアの弾塑性モデルとして、降伏後 の2次剛性は、ヤング係数の1/100を仮定した。 鉄筋とコンクリート間の付着は完全付着とし, かぶりコンクリートの剥落と鉄筋の座屈は考慮 しなかった。

3.2 試験体のモデル化

解析試験体の要素分割と境界条件を図-3に示 す。拘束条件では,柱脚をZ方向面ローラー支 持とし,柱頭を軸方向のみ変形可能にするため, 両側面をそれぞれX方向面ローラーとY方向面 ローラーで拘束した。加力方法は,まず,一定 軸力を柱頭に加力した後,一定水平力になるま でY方向に加力し,その後,一定軸力とY方向 一定水平力を保持したままX方向に強制変位を 与える単調解析を行った。

- 4. 解析結果
- 4.1 1方向シリーズ

(1) X 方向水平力-X 方向変形関係

実験及び解析から得られた X 方向水平カ-X 方向変形関係を図-4 に示す。全ての試験体が最 大耐力前後において実験値と良い対応を示した。 最大耐力では,解析値が実験値よりやや高い傾 向が見られた。これは,解析の場合,鉄筋とコ ンクリートの間は完全付着と仮定され,コンク リートに生じたせん断ひび割れの本数が実験よ り多いが,1本1本のひびわれ幅が実験より小 さいため,ひび割れの発生によるコンクリート の最大圧縮強度の低減が実験より低いことが要 因と考えられる。最大耐力以後の挙動を考察す ると,解析では最大耐力後の耐力劣化を実験よ りやや大きめに評価したことが分った。これは, 帯筋のコンクリート拘束モデルと実際との違い によると考えられる。



1 方向シリーズ全体の X 方向水平力-変形関

係を比較する。軸力比と X 方向最大耐力との関係について、実験では、X 方向水平最大耐力は軸力比の増加と共に増大し、軸力比 0.4 で最大となりその後は低下した。解析では、軸力比が 0,0.2,0.4 の順で X 方向最大耐力が大きくなる傾向を再現できたが、軸力比が 0.6 の試験体の最大耐力は実験ほど低下しなかった。軸力比と耐力劣化との関係については、軸力比が大きいほど、試験体の最大耐力以後の耐力劣化が激しくなる現象が見られた。

(2) 破壊状況

図-4 中には参考文献 12)による曲げ耐力略算 値を示した。すべての試験体について,最大耐 力が曲げ耐力略算値より小さいこと,最大耐力 時からせん断変形成分が増加したこと,また, 破壊まで主筋の降伏が確認できなかったことか ら,解析の破壊モードは実験と同様のせん断破 壊であると判断した。

図-5 には、一例として、N6Y0 試験体の最大 耐力時の主筋及び横補強筋応力度分布を示した。 主筋応力度分布に関しては、加力方向の中間主 筋②は大きな応力度の変化が見られず、隅角部 主筋①に対し隅角部主筋③及び直交面の中間主 筋④は、ほぼ逆対称な挙動を示した。また、主 筋の応力度は降伏応力度以内で降伏しなかった。 横補強筋の応力度分布では、加力方向部分①が 直交方向部分②より大きく応力を負担し, 柱高 さ方向の中央部分では,横補強筋①が降伏した。 これは、X 方向水平加力により、加力方向に平 行の側面にせん断ひび割れが発生し、横補強筋 が応力を負担するようになったためと考えられ る。また、加力と直交する横補強筋のひずみが それほど増加していないのは、コンクリートの 拘束効果が最大耐力時ではそれほど大きくない ことを示している。

(3) 軸変形-X 方向変形関係

軸変形-X方向変形関係を図-6に示す。N0Y0, N2Y0 試験体では,解析値の最大耐力点まで実 験値と良い対応を示したが,その後は,解析の 方が水平変形に対する軸縮みの割合が実験値 よりかなり大きくなる傾向が見られた。水平加 カと軸変形の関係では、軸力による軸縮みは、 水平加力に伴い一旦伸びとなるが、水平方向最 大耐力点以降再び縮みとなる傾向について、解 析は実験によく対応した。



(Y方向水平力をパラメータとした)

- 4.2 2方向シリーズ
- (1) X方向水平力-X方向変形関係

2 方向シリーズの実験及び解析から得られた X 方向水平力-X 方向変形関係を図-7 に示す。 初期剛性について, N2Y2, N2Y3 試験体では実 験値とほぼ一致したが、N2Y1 試験体では実験 値よりやや低い結果となった。また、2 方向シ リーズにおいても、1 方向シリーズと同様、解 析値の最大耐力が実験値よりやや高い傾向が見 られた。これも、鉄筋とコンクリートの間に完 全付着と仮定したことが要因と考えられる。X 方向水平力ー変形関係におけるY方向一定水平 力の影響は,変形が小さい場合はそれ程大きく ないが,変形の増大と共に顕著になって,X方 向最大耐力はY方向一定水平力が大きいほど小 さくなり、2方向水平力の相関を示した。また、 図-7 中のシリーズ全体を比較した図には、2 方 向シリーズと同じ軸力を受けた1方向シリーズ の N2Y0 試験体の結果も表示した。2 方向加力 の試験体は1方向加力よりコンクリートの塑性 化が進み、耐力劣化が激しいことがわかった。

(2) 破壊状況

N2Y2 試験体の最大耐力時の主筋及び横補強 筋の応力分布を一例として図-8 に示す。主筋の 応力度分布に関しては,2 方向水平力が交わる 隅角部主筋③が負担する応力が他の主筋より大 きいのが特徴である。全ての試験体において, 最大耐力まで主筋が降伏しなかったこと,また, 最大耐力時から柱のせん断変形成分が増加した ことから,解析の破壊モートはせん断破壊であ ると判断した。横補強筋の応力度分布を N6Y0 試験体と比較し,②部分が負担する応力が大き くなったことから,こちらの側面にもひび割れ が発生したことがわかる。

(3) Y方向変形-X方向変形関係

実験及び解析から得られた2方向シリーズの Y 方向変形-X 方向変形関係を図-9 に示す。Y 方向一定水平力の影響について、実験では、Y 方向一定水平力が大きいほど、X 方向変形の増 加に対するY 方向変形の増加の割合が大きいと いう傾向を示したが,解析の場合では,N2Y1 試験体がごく早い段階で加力限界点に達した ため,実験のような傾向を再現できなかった。 ただし,X方向水平変形が増加するにつれて, X方向変形の増加に対するY方向変形の増加の 割合が増える,いわゆる水平2方向変形の相関 は解析においても確認することができた。

4.3 破壊曲線の検討

1 方向シリーズの軸力とX 方向水平力の関係 及び 2 方向シリーズの Y 方向水平力と X 方向 水平力の関係を図-10 に示す。図-10a 中の内側 の楕円は実験データから求められた1 方向シリ



ーズの実験値の破壊曲線であり,外側の楕円は, 軸圧縮耐力点(コンクリート強度×柱断面積+主 筋降伏強度×主筋総断面積)と軸引張耐力点(主 筋降伏強度×主筋総断面積)を通り,1方向シリ ーズ試験体の解析値の最大耐力点に合うように, 最小二乗法で求めた破壊曲線である。実験値よ り解析値の破壊曲線がやや膨張していることが わかった。図-10b中の内側の円は2方向シリー ズの実験値の破壊曲線を示した。外側の円は, N2Y0 試験体の解析の最大耐力値を半径とした 円で,2方向シリーズの解析値の最大耐力点は ほぼこの円上に乗っていることから,せん断破 壊型となった2方向入力試験体の破壊曲線は円 で表せることが今回の解析で再現できた。

4.4 コンクリートの内部応力状態の検討

加力パスの違いが RC 柱の内部応力伝達機構 に与える影響を示す一例として,解析から得ら れたX方向水平力が最大耐力時のコンクリート の圧縮主応力分布図を図-11 に示す。図中の切 断面は柱の中心部分から切り出したX方向縦断 面である。

柱頭と柱脚の圧縮域間を結ぶ圧縮アーチ機構 をRC柱の主要なせん断抵抗機構として考える。 1 方向シリーズの場合,最大耐力時の柱中央部 分の圧縮応力度は,軸力比が増大すると共に大 きくなり、圧縮アーチ機構も明確に見えて来る。 これが,軸力が増加すると,試験体のX方向せ ん断耐力が増大した原因として考えられる。2 方向シリーズの場合,Y方向水平加力が大きく なることによって,X方向縦断面内の圧縮アー チ機構が薄くなったことが,試験体のX方向せ ん断耐力が低下した原因として考えられる。

5. まとめ

軸力と 2 方向水平力を受けるせん断破壊型 RC 柱に関する 3 次元 FEM 解析を行い,実験結 果と比較し,軸方向及び水平 2 方向における力 と変形の相関について検討を行った。その結果, 以下の結論を得た。

1) 水平力を1方向とした場合, X方向の最大耐



カは軸力比の増加と共に増大したが,軸力比 0.4 で最大となりその後は低下した。また,軸力比 が大きいほど,試験体の最大耐力以後の耐力劣 化が激しい,いわゆる軸力と水平力の相関が存 在することを確認した。

2) 水平力を2方向とした場合, X 方向最大耐力 は Y 方向一定水平力が大きいほど小さくなり, 2 方向水平力の相関を示した。また, 2 方向水平 力を受ける RC 柱の主軸方向耐力は1 方向加力 時の耐力に比べ低下し, 塑性化が進むことによ って,最大耐力後の耐力劣化が激化するという 現象が見られた。

3) 水平2方向の変形相関については, X 方向水 平変形が増加するにつれて, X 方向変形の増加 に対するY 方向変形の増加の割合が増える傾向 を示した。

【謝辞】

弘前大学・津村浩三助教授には、貴重な研究 論文を提供して頂きました。ここに記して感謝 の意を表します。

【参考文献】

 上原 広,南 宏一:繰り返し2方向の曲げせ ん断を 受ける鉄筋コンクリート柱の復元力特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.375-380, 1990.6 2) 辰巳佳裕, 小谷俊介, 青山博之:2 方向水平力 と大きな変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱に 関する実験的研究,構造工学論文集, Vol.36B, pp.211-218, 1990.3 3) 佐藤幸博, 芳村 学, 津村浩三: 2 方向水平力 を受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性、コンク リート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2 pp.653-658, 1994 4) 津村浩三, 芳村 学: せん断破壊型 RC 柱の3 方向加力実験,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.463-468, 1998 5) 津村浩三, 芳村 学, 小川 敦: せん断破壊型 RC 柱の多軸相関(その1)(その2),日本建築 学会大会学術講演梗概集,構造Ⅳ, pp.345-348, 1998 6) 何 楓:2 方向水平力を受ける RC 柱のせん断 破壊性状, 東京都立大学修士論文, 1998 7) 内田和弘・野口 博:梁貫通型接合部を有する 柱 RC 梁 S 構造 2 層 2 スパン架構の力学的挙動に 関する解析的研究,日本建築学会構造系論文集, No.514, pp.207-214, 1998 8) Argyris, J. H. G. Faust, J. Szimmat, E. P. Warnke, and K. J. Willam : Recent Developments in the Finite Element Analysis of Prestressed Concrete Reactor, Nuc1. Eng. Des., Vo1.28, pp.42-75, 1974 9)Al-Mahaidi, R. S. H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report No.79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Jan. 1979 10)大久保雅章, 濱田 聡, 野口 博: ひびわれコ ンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.2, pp.323-326, 1989.6 11) Kent, D.C., and Park, R. : Flexural Members with Confined Concrete, Proceedings of ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990, 1971 12)日本建築学会:鉄筋コンクリート建物の構造計 算規準·同解説, 1988