論文 RC 造袖壁付き柱の耐震性能に関する 3 次元 FEM 解析

小林 大軸*1・余 勇*2・柏崎 隆志*3・野口 博*4

要旨:本研究では,変動因子を袖壁の有無,袖壁と柱の偏心の有無,構造スリットの有無, 載荷方向,帯筋比とした RC 造袖壁付き柱を対象に,3次元 FEM 解析を行い,袖壁が柱の耐 力,変形性能,軸力保持能力,破壊性状に及ぼす影響について検討を行った。さらに,累積 吸収ひずみエネルギーによる性能評価を行い,袖壁と柱のエネルギー吸収性能に関する検討 を行った。

キーワード:柱,袖壁,2方向載荷,構造スリット,エネルギー,3次元 FEM 解析

1. はじめに

既存の RC 構造物のほとんどに、袖壁などの2 次部材が付加されている。これらの2次部材が, 柱の力学的挙動,破壊性状に大きな影響を及ぼ すことは、過去の地震被害の調査報告により指 摘されている。そのため,現行の設計では,袖 壁に構造スリットを設けて柱との絶縁を図るケ ースが多く見られる。また、袖壁が加力方向に 対して面外に取り付いた場合、構造計算上無視 されているのが現状である。本研究では、脆性 的な破壊をもたらすと考えられている袖壁付き 柱の耐震性能を解明することを目的とし、立体 的な加力や形状を考慮できる3次元 FEM 解析プ ログラムを用いて袖壁付き柱の解析を行った。 FEM 解析結果を用いて、袖壁付き柱の破壊性状 や変形、応力状態、ひび割れ状態について検討 するとともに,累積吸収ひずみエネルギーによ

る性能評価を行った。

2. 解析モデル

2.1 コンクリート

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、Darwin-Pecknold の等 価一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により表現した。3 軸応力下 の破壊条件には、Willam、Warnke らの5パラメ ータモデルを用いた。応力-ひずみ関係には、 野崎・小林・櫻井らにより開発された繰り返し モデル¹⁾を導入した。また、圧縮側と引張側にお いて、破壊エネルギーによる要素寸法に依存し た限界ひずみ²⁾を適用した。ひび割れ発生後の圧 縮強度低減には、野口・飯塚式を用いた。ひび 割れモデルは、多方向固定ひび割れモデル³⁾を用 い、ひび割れ方向のせん断伝達特性には Al-Mahaidi モデルを用いた。各モデルの詳細は 参考文献³⁾を参照されたい。

2.2 鉄筋

鉄筋には、2節点線材トラス要素を用いた。応 カーひずみ曲線は、Ciampi らによって提案され た修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。

2.3 付着

丸鋼を有する試験体の鉄筋の付着特性には, ボンドリンク要素を用いた。付着応力-滑り関 係には,丸鋼の特性を考慮したモデルを用いた。

3.2方向載荷を受ける袖壁付き柱の FEM 解析 3.1 解析概要

解析対象試験体は、2002年に加藤ら4)により

*1 大鉄工業(株) (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 千葉大学大学院 自然科学研究科博士後期課程 工修(正会員)
*3 千葉大学 工学部デザイン工学科(建築系)助手 工修(正会員)
*4 千葉大学 工学部デザイン工学科(建築系)教授 工博(正会員)

実験が行われた 2 方向載荷を受ける袖壁付き柱 の試験体とした。試験体は、柱のみの試験体1 体,袖壁が柱の中心に取り付いた試験体2体, 袖壁が偏心した試験体1体の計4体である。変 動因子は加力方向で,面外への1方向載荷と面 内と面外への2方向載荷である。加力方法は逆 対称加力とし、2方向載荷は、初めにプレ載荷(面 内方向)として±1/150の部材角を2回繰り返し、 その後本載荷(面外方向)として±1/200, ±2/200, ±3/200, ±4/200, ±6/200, ±8/200の部材角を それぞれ2回ずつ繰り返した。試験体形状を表 -1に, 試験体一覧を図-1に示す。なお, 表-1の試験体断面形状に示した矢印は,加力方向を 意味する。作用軸力は柱のみの試験体が軸力比 η=0.62, 袖壁付き柱がη=0.47 で, それぞれ高軸 力である。図-2に解析での要素分割および境界 条件を示す。

3.2 解析結果

(1) 水平力一水平部材角関係

各試験体の実験および解析結果の水平カー水 平部材角関係を図-3に示す。全試験体において、 実験,解析結果ともに,紡錘型の履歴を示した が、解析結果では履歴面積をやや過小評価する 結果となった。初期剛性については、解析結果 が実験と良好な対応を示したが、最大耐力に関 しては、解析結果の方が約 20%大きくなった。 しかし、2 方向載荷を受ける試験体の解析結果で は、本載荷時の最大耐力が実験に比べ約 20%小 さい結果となった。1 方向面外載荷の試験体に関 して袖壁の有無による挙動を比較すると、実験 と同様に、袖壁を有する試験体の方が、最大耐 力後の耐力劣化が小さく,変形性能に優れてい る傾向が見られた。2方向載荷の試験体では、実 験と同様, 袖壁が偏心することによる初期剛性, 変形性能、最大耐力の変化は見られなかった。

(2) 軸ひずみ度-水平部材角関係

各試験体の軸ひずみ度-水平部材各関係を図 -4に示す。解析では、全体的に軸ひずみを過小 評価する傾向が見られたが、2方向載荷を受ける 試験体では、面外載荷時の軸ひずみの増大が実

表-1 試験体一覧

試験体名	試験体 断面形状	軸力	材料特性	
			鉄筋	
C-5		778kN		降伏強度
			D6	314MPa
CSWTR-1			D10	378MPa
			コンクリート	
			圧縮強度	26.1MPa
	-		鉄筋	
CSWTR-2				降伏強度
		784kN	D6	302MPa
CSWTR-3			D10	474MPa
			コンクリート	
			正 縮 庙 唐	26.1MDa





図-1 試験体形状

150



図-2 要素分割と境界条件

験に比べてやや大きくなった。また、袖壁を設 けることで、軸ひずみの増大を抑制しており、 面外載荷を受ける場合でも、柱のみの試験体に 比べ軸力保持能力に影響を与えることが確認で きた。



図-3 水平力-水平部材角関係

(3) ひび割れ状況

各試験体の面外方向の部材角が R=1/100 に達 したときのひび割れ状況と変形状態を図-5 に 示す。ひび割れは、コンクリート要素の最大主 ひずみが引張強度時ひずみ ε_{cr} を越えたときに ひび割れの発生が開始するものと定義し、試験 体部分のコンクリート要素の平均寸法から算出 した各積分点のひび割れ幅が、耐震性能評価指

針⁵⁾で提案されている柱の使用 限界状態での残留ひび割れ幅 (0.2mm)に達している範囲を ■で示した。図-5より,実験, 解析ともに全試験体において, ひび割れ範囲が柱頭と柱脚部 分に集中しており,曲げひび割 れが顕著に現れている。2方向 載荷を受ける試験体 CSWTR-2, 3では,実験と同様,プレ載荷 (面内載荷)により袖壁の外縁 に損傷を受け,本載荷に移行後 袖壁の損傷が進行した結果,1 方向載荷の試験体に比べて袖 壁部分のひび割れ範囲が広域にわたる傾向が見 られた。

(4) 圧壊進展状況

各試験体の部材角が R=1/200, 2/200, 3/200 の ときの断面-3 (図-2 参照)の最小主ひずみ分布 を図-6 に示す。この図では、コンクリートの最 小主ひずみが圧縮強度時ひずみを超えた場合、 コンクリートの圧壊が開始すると定義し、圧縮



強度時ひずみを超えた範囲を■で示した。柱の みの試験体では、変形が進むにつれて試験体断 面の圧壊開始範囲が著しく拡大しているのに対 し、袖壁を有する試験体は、圧壊開始範囲の拡 大が緩やかであることがわかる。しかし、2方向 載荷を受ける試験体では、プレ載荷(面内載荷) によって袖壁の外縁に損傷を受けることにより、 本載荷(面外載荷)時に、圧壊開始範囲の拡大 が助長される結果となった。また、袖壁が柱に 偏心して取り付くことによって、本載荷時の圧 壊開始部分が広範囲にわたる結果となった。

(5) 累積吸収ひずみエネルギー

各試験体の面外載荷時における累積吸収ひず みエネルギーを図-7に、袖壁のエネルギー負担 率を図-8に示す。柱のみの試験体では袖壁付き に比べると、初期の段階では消費エネルギーが 小さいが、変形が進むにつれてエネルギーの消 費が著しく増大していることがわかる。袖壁付 きでも、2方向載荷を受けることにより、エネル ギーの消費が大きくなる傾向が見られた。図-8 より、2方向載荷を受ける試験体は、面外載荷に 移行後、袖壁のエネルギー負担率が大

きくなっているが、どの試験体も変形 が進むにつれて、負担率が15~20% の同程度に収束する傾向が見られた。

4. 部分スリットを有する袖壁付柱の FEM 解析

4.1 解析概要

解析対象試験体は、2003 年に広沢ら⁶により 実験が行われた、部分スリットを有する袖壁付 き柱の試験体とした。試験体は、柱断面が240mm ×240mmで、袖壁厚さ50mm、袖壁幅は圧縮、 引張側とも480mmである。試験体の変動因子は、 部分スリットの有無、袖壁と柱の偏心の有無、 帯筋比(pw=0.10%,0.26%)とし、計8体である。 加力方法は逆対称加力とし、実験での正負繰り 返し載荷に対し、解析では単調載荷とした。試 験体一覧を表-2 に、一例として試験体 04C10EWS,08CEWSの要素分割及び境界条件を



図-7 累積ひずみエネルギー 図-8 袖壁エネルギー負担率

図-9に示す。帯筋及び壁縦横筋には丸鋼(4 ϕ) を用いられため、付着特性はボンドリンク要素 で表現した。ボンドリンク要素の τ -s関係を図 -10に示す。 τ -s関係は、第一折れ点を付着ひ び割れの生じる点とし、初期剛性は異形鉄筋の 1/10 倍、また、正負同様とした。なお、試験体 詳細は参考文献⁶⁰を参照されたい。

4.2 解析結果

(1) 水平力一水平変形角関係

各試験体の実験結果と解析結果の水平カー水 平部材角関係を図-11 に示す。実験結果の水平 カー水平部材角関係は,正方向の包絡曲線によ

2000

1500

1000

50

累積ひずみエネルギー(ド)

	-		A	20	
	帯筋間隔	スリット		材料特	
試験体名	X	幅×深さ	袖壁の偏心		
	mm	mm			
02C10EW	100	/		鉄筋	
04C10EWS	(p _w =0.10%)	15×25	有		<u></u>
06C04EW	40	/		D10	3
08C04EWS	$(p_w=0.26\%)$	15×25		4 φ	4
09C10EW	100	/		コンクリ	
10C10EWS	(p _w =0.10%)	15×25	無	圧縮強度	2
11C04EW	40	/		ヤング係数	2.3
12C04EWS	(pw=0.26%)	15×25			

3.4

(MPa)

り示した。全ての 試験体の解析結果 において, 初期剛 性,最大耐力とも に実験結果より高 い傾向が見られた

が,理論式から求めた初期剛性は解 析結果に良い対応を示した。解析結 果からは,部分スリットを設けた試 験体は,スリットの無い試験体に比 べ変形性能に優れており,実験と同 様の傾向を示した。帯筋比が大きい 試験体では,スリットを設けなくて も変形性能に優れており、スリット の有無による影響は見られなかっ た。袖壁が偏心している試験体は, 実験と同様に, 偏心無しの試験体に

比べ最大耐力が低下する傾向が見られた。 この原因としては、袖壁が偏心している試 験体では、偏心の無い面外方向への倒れ込 みが見られ,最大耐力時には平均で 0.15mm 倒れ込んでいるためであると考えられる。

(2)応力状況と変形状態

一例として試験体 09C10EW (スリット 無), 10C10EWS (スリット有)の最大耐力 時の最小主応力コンターを変形状態と併せ て図-12に示す。図より、スリットの無い試験 体は、試験体が一体となり対角線上にアーチ機 構が形成されているが, スリットを有する試験 体は、 スリットにより柱と袖壁が切り離された 結果, 袖壁と柱のアーチ機構が独立して形成さ れていることが読み取れる。

(3) ひび割れ範囲状況





実験、解析結果の各試験体の最大耐力時にお けるひび割れ範囲状況を図-13 に示す。同図に ひび割れ方向を矢印で示した。図の作成方法は, 図-5と同様である。図より、解析結果が実験の ひび割れ状況を良好に表現できていることがわ かる。スリットの無い試験体は、試験体を斜め に横切るせん断ひび割れの形成が見られるが, スリットを設けることにより、柱と袖壁がそれ



ぞれ分離した結果,柱部分のひび割れ範囲が消 失し,袖壁の上下端部にひび割れの発生が確認 できた。

(4) 累積吸収ひずみエネルギー

各試験体の最大耐力時における袖壁のエネル ギー吸収負担率を図-14 に示す。袖壁のエネル ギー吸収負担率は、袖壁の累積吸収ひずみエネ ルギーを柱と袖壁のエネルギーの和で除した値 とした。図より、部分スリットを設けることに よって袖壁のエネルギー吸収負担率が低下して いることがわかる。この原因として、応力状況、 ひび割れ状況からわかるように、部分スリット により柱と袖壁が分離し、袖壁部分の損傷が減 少したためであると考えられる。

5. まとめ

(1)2方向載荷を受ける袖壁付柱の FEM 解析

2 方向載荷を受ける場合,面内載荷が面外載荷 時のひび割れや圧壊の進展に大きく影響を与え た。また,袖壁のエネルギー負担率は,変形が 進むにつれて 15~20%の同程度に収束する結果 となった。

(2) スリットを有する袖壁付柱の FEM 解析

袖壁に部分スリットを設けることにより袖壁 と柱のアーチ機構が分断した結果,変形性能が 向上し,試験体の対角線上のひび割れが消失し,



また、袖壁のひずみエネルギー負担率が 減少した。

; 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費 補助金・基盤研究(B) (2)(課題番号:14350293, 研究代表者:野口博)により行われた。

参考文献

- 7) 櫻井輝夫,柏崎隆志,野口博:繰り返し載荷 を受ける RC 面材に関する非線形 FEM 解析 モデルの開発, JCI 年次論文集, Vol.24, No.2, pp.877-882, 2002
- 白井伸明ほか:軟化モデルが RC 造ボックス 型耐震壁のプレ・ポストピーク挙動に及ぼす 影響に関する FEM 解析, AIJ 大会学術講演 梗概集, C-2, pp.75-76, 2004.8
- 3) 余勇,柏崎隆志,野口博:RC 構造部材の3 次元繰り返し載荷時のFEM 解析プログラムの開発,AIJ 大会学術講演梗概集,C-2, pp.67-70,2004.8
- 大塚祐二,加藤大介:一定高軸力と二方向加 力を受ける面外袖壁つき RC 造柱の軸力負担 性能評価実験,JCI 年次論文集,pp.259-264, Vol.24, No.2, 2002
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造物の耐 震性能評価指針(案)・同解説,2004
- 広沢雅也ほか: RC 造袖壁付柱の耐震性能に 関する大変形加力実験, AIJ 大会学術講演梗 概集, C-2, pp.183-188, 2003.9