

論文 3次元 FEM による直交壁付き RC 柱の耐震性能に関する解析的研究

田中 宏樹^{*1}・柏崎 隆志^{*2}・野口 博^{*3}

要旨：本研究では，壁直交方向に水平力を受ける腰壁付き RC 柱を対象に 3 次元 FEM 解析を行い，腰壁が柱の耐震性能に与える影響についての検討を行った。特に，腰壁が柱に対して偏心して取り付く場合に，正負繰返し载荷の正負で異なる挙動を，破壊性状や変形状態，内部応力状態，ひび割れ状況，累積吸収ひずみエネルギー等から 3 次元的な挙動に与える影響について検討した。

キーワード：柱，直交壁，偏心，3 次元 FEM 解析

1. はじめに

過去の地震被害では，腰壁が鉄筋コンクリート (RC) 柱の脆性的な破壊に大きな影響を与えたと考えられる事例が数多く報告されている。腰壁が柱に取り付くことにより，せん断破壊が生じやすく，脆性的な挙動を示す部材となり，建物の耐震性能を低下させる原因となっている。壁面内方向の水平力に対しては，多くの研究が行われ，現行の設計法でも面内方向の水平力に

対する影響を考慮した検討が行われている。しかし，直交方向の水平力に対しては腰壁の影響が殆ど考慮されておらず，また，直交方向の水平力を受ける柱の解析的研究も十分には行われているとは言えないのが現状である。

そこで本研究では，壁直交方向に水平力を受ける腰壁付き RC 柱を対象に 3 次元 FEM 解析を行い，腰壁が柱の耐震性能に与える影響を検討する。特に，柱に対して腰壁が偏心して取り付くと，正負繰返し载荷では正負で異なる挙動を示す。破壊性状や変形，内部応力状態，ひび割れ状況，累積吸収ひずみエネルギーなどの解析結果から，3 次元的な挙動に与える影響について降伏ヒンジ発生位置に着目した検討を行った。

表-1 試験体変動因子

試験体名	腰壁厚さ (mm)	せん断補強筋比 $p_w(\%)$	
		独立柱部分	壁付き柱部分
1999 No.5	75	0.13	
1999 No.7	200	0.13	
2000 No.1		0.79	
2000 No.4		1.19	0.21
2000 No.6		1.19	0.79

表-2 材料特性

コンクリート			
試験体No	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
1999	23.5	2.3	21
2000	30.8	2.43	25.2
鉄筋			
試験体No	鉄筋種類	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
1999	D13	370	188
	D6	350	195
	D4	231	212
2000	D13	378	214
	D10	388	177
	D6	341	200

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

解析対象試験体は，松崎ら^{1, 2)}により実験が行われた壁直交方向に水平力を受ける腰壁付き柱の試験体とした。共通因子は，柱断面 $b \times D = 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，柱高さ 900mm，せん断スパン比 $a/D = 1.5$ ，柱主筋 12-D13 (SD295A， $p_g = 1.7\%$)，腰壁は偏心配置である。腰壁は壁厚 $t = 75\text{mm}$ の場合，壁筋 2-D4@80 (SD295A， $p_s = 0.42\%$) で，壁厚 $t = 200\text{mm}$ の場合は，主筋は

*1 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 工学部デザイン工学科 (建築系) 助手 工修 (正会員)

*3 千葉大学 工学部デザイン工学科 (建築系) 教授 工博 (正会員)

2-D13 (SD295A), 補強筋は 2-D6@50 (SD295A, $P_w=0.64\%$) である。変動因子を表-1 に示す。加力方法は一定軸力(軸力比:0.2)の下で, 逆対称繰り返し加力が層間変形角 $R=\pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/100, \pm 1/67, \pm 1/50, \pm 1/50, \pm 1/33, \pm 1/20$ で与えられた。材料特性を表-2, 要素分割および境界条件を図-1 に示す。載荷方向の正負は図-1 中に示す方向である。

2.2 解析モデル

本研究では, 余・野口らにより開発された 3 次元 FEM 解析プログラム³⁾を用いた。コンクリート要素はアイソパラメトリック 8 節点ソリッド要素, 構成則には Darwin-Pecknold³⁾の等価一軸ひずみに基づく直交異方性弾性モデルを 3 次元に拡張したモデルを用いた。破壊曲面には, Kupfer らの実験に基づく Willam-Warnke³⁾の 5 パラメータモデルを仮定した。応力-ひずみ関係は圧縮側の上昇域では Saenz 式, 下降域では横補強筋の拘束効果を考慮した Kent-Park 式

⁴⁾を用いた。また, 引張側の下降域では, Tension Stiffness 効果を考慮した白井式⁵⁾を用いた。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には, 飯塚式⁶⁾, ひび割れモデルは回転ひび割れモデルをそれぞれ用い, ひび割れ方向のせん断伝達特性は直交異方性により, ひび割れに直交方向のヤング係数の低下とポアソン比に依存する。また, 鉄筋要素は鉄筋軸方向のみに剛性を有する 2 節点トラス要素, 応力-ひずみ関係には修正 Menegotto-Pinto

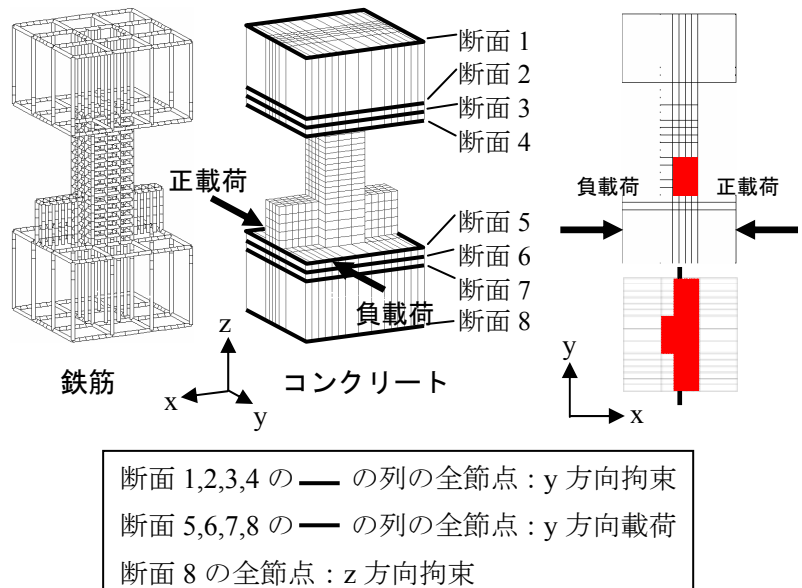


図-1 要素分割および境界条件

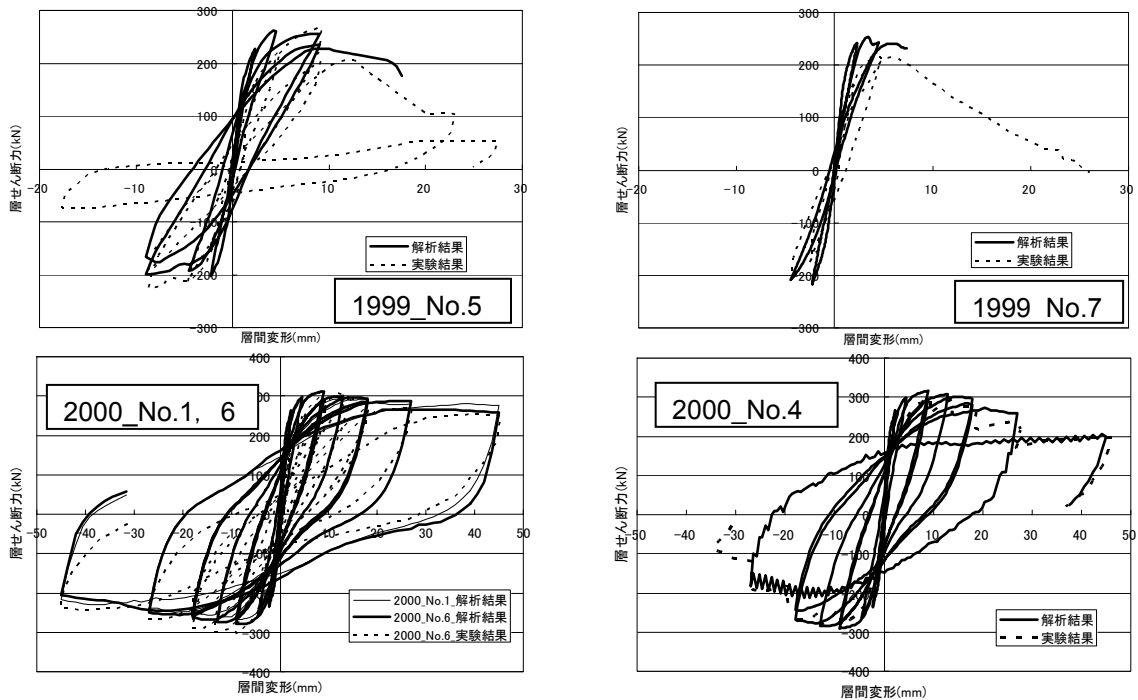


図-2 層せん断力-層間変形関係

モデルを用いた。鉄筋とコンクリート間の付着の応力-すべり関係には森田・角モデル⁷⁾を用いた。

3. 解析結果

3.1 層せん断力-層間変形関係

各試験体の解析および実験結果の層せん断力-層間変形関係を図-2に示す。全試験体で、最大耐力は良好な対応を示したが、剛性は若干、実験を上回る結果となった。全ての試験体で、正載荷時の耐力が負載荷時の耐力を上回ることになった。これは、腰壁が柱に対して偏心して取り付いているためである。この傾向が顕著に現れるのが、2000_No.4（独立柱部分 $p_w=1.19\%$ 、壁付き柱部分 $p_w=0.21\%$ ）で、 $R=-1/33\text{rad}$ の負載荷時に荷重-変形関係が乱れるのに対して、 $R=1/20\text{rad}$ の正載荷時にも靱性を保ち、実験値と良く対応している。また、柱のせん断補強が十分になされていない

1999_No.5（腰壁厚 75mm, $p_w=0.13\%$ ）と 1999_No.7（腰壁厚 200mm, $p_w=0.13\%$ ）の比較から、腰壁厚さが厚い場合は、特に、柱の靱性が乏しくなることを解析においても確認できた。壁付き柱部分のせん断補強筋量が同じ、2000_No.1（独立柱部分 $p_w=0.79\%$ 、壁付き柱部分 $p_w=0.79\%$ ）と 2000_No.6（独立柱部分 $p_w=1.19\%$ 、壁付き柱部分 $p_w=0.79\%$ ）の解析結果がほぼ同様な挙動を示し、壁付き柱部分のせん断補強筋量が少ない 2000_No.4（独立柱部分 $p_w=1.19\%$ 、壁付き柱部分 $p_w=0.21\%$ ）との結果から、壁付き柱部分のせん断補強が少ないと、正載加では

影響は見られないが、正載加では靱性が乏しくなることがわかる。

3.2 応力状況と変形状態

1999_No.5（腰壁厚 75mm, $p_w=0.13\%$ ）と 1999_No.7（腰壁厚 200mm, $p_w=0.13\%$ ）の正載荷時（ $+1/200\text{rad}$ ）と、負載荷時（ $-1/200\text{rad}$ ）の最小主応力コンターを変形状態と併せて図-3に示す。壁厚が薄い 1999_No.5（腰壁厚 75mm, $p_w=0.13\%$ ）では、正載荷時に柱頭から柱と壁の境界に、圧縮応力が集中する特徴があるが、概ね正負で大きな違いは見受けられなかった。一方、壁厚が厚い 1999_No.7（腰壁厚 200mm, $p_w=0.13\%$ ）では、正載荷時には柱頭と腰壁上端を結ぶように圧縮ストラットが形成された。負載荷時には、柱頭から腰壁を避けるように柱脚に圧縮応力が流れる様子が確認できる。腰壁が厚い他の試験体でも同様の圧縮応力の流れが見

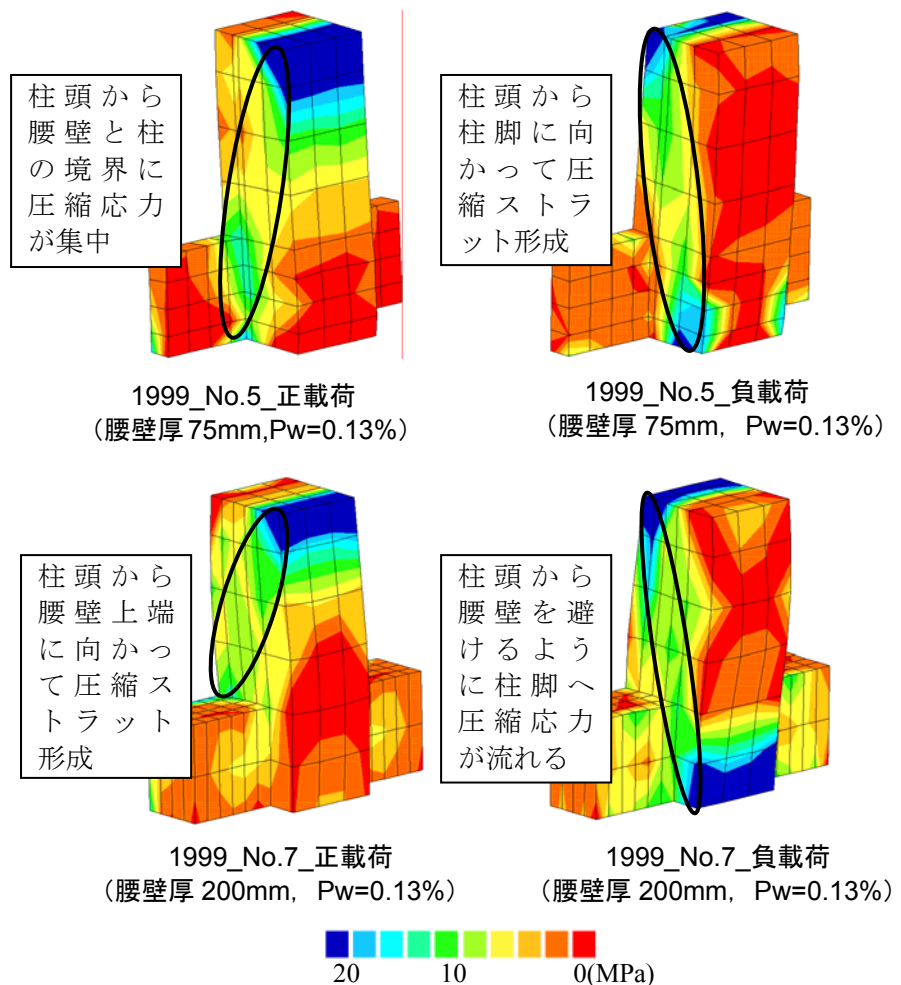


図-3 最小主応力コンター($R=\pm 1/200$ 時, 変形 $\times 15$)

られた。

3.3 せん断補強筋のひずみ分布

$R=\pm 1/100$ radにおける2000_No.1, 4, 6のせん断補強筋ひずみ分布を図-4に示す。全ての試験体で、実験のひずみよりも、解析のひずみが大きくなったが、ひずみの傾向は概ね実験と良好な対応を示した。正載荷時には、どの試験体も降伏ひずみを超えることはなく、柱全体でひずみに大きな差が生じなかったことに対して、負載荷時には壁付き柱部分のひずみが大きく伸びる傾向が見られた。特に、2000_No.4（独立柱部分 $pw=1.19\%$ ，壁付き柱部分 $pw=0.21\%$ ）ではその傾向が顕著で、唯一、降伏ひずみに達した。これは、壁付き柱部分のせん断補強筋量が、他の試験体に比べて少ないため、他の試験体よりもひずみが増大し、その影響は特に、負載荷時に現れている。

3.4 ひび割れ状況

$R=\pm 1/100$ radにおける1999_No.5（腰壁厚75mm， $pw=0.13\%$ ）と2000_No.1（腰壁

厚75mm， $pw=0.79\%$ ）の柱内部のひび割れ状況を最大主ひずみ分布と併せて図-5に示す。1999_No.5（腰壁厚75mm， $pw=0.13\%$ ）の柱内部のひび割れ状況は、正負両載荷時ともに、柱頭から柱脚に向かって斜めにせん断ひび割れが生じている。一方、2000_No.1（腰壁厚75mm， $pw=0.79\%$ ）では、正載荷時には、柱頭か

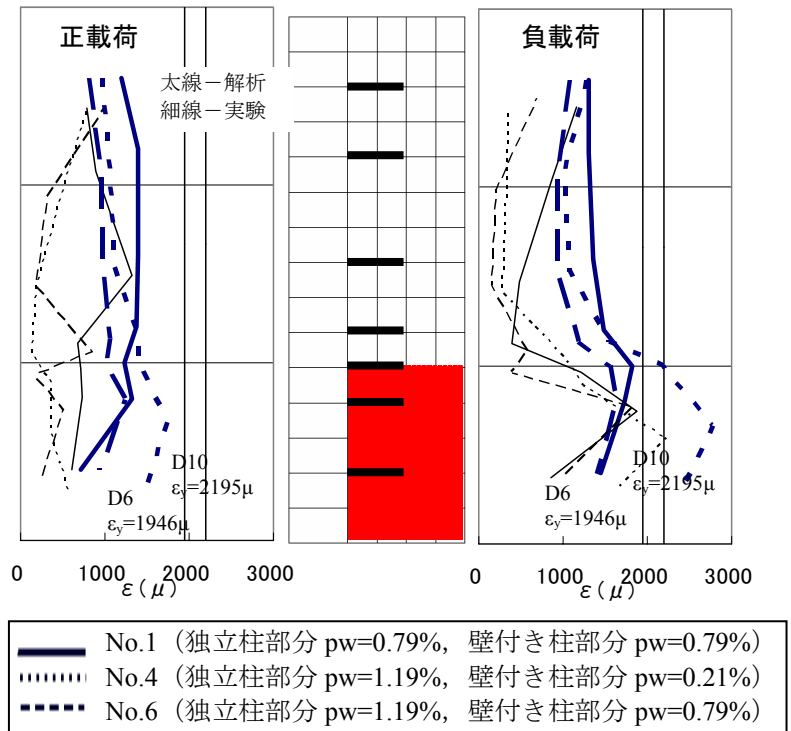


図-4 せん断補強筋ひずみ分布

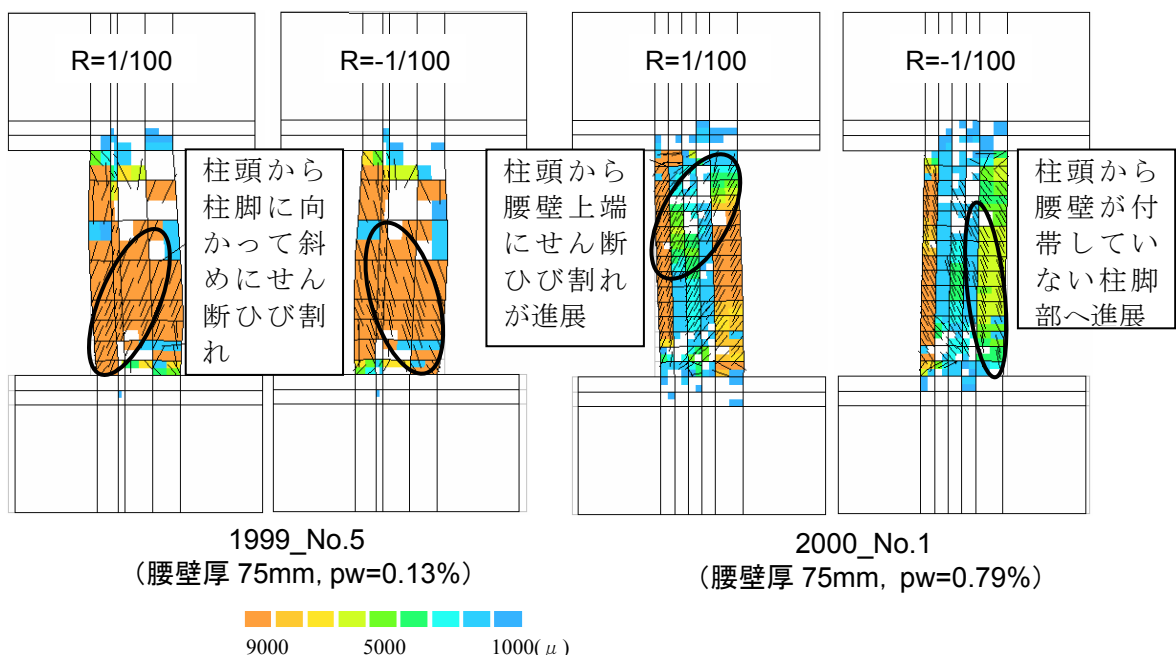


図-5 ひび割れ状況と最大主ひずみ分布（ $R=\pm 1/200$ 時，変形×3）

ら腰壁上端にせん断ひび割れが進展している。腰壁より上部において、短柱化して変形している様子が見て取れる。負荷荷時においては、柱頭から柱脚に向かってせん断ひび割れが入っているが、腰壁が付帯していない柱部分に向かっていることが、ひび割れの角度から推測できる。2つの試験体を比較すると、柱のせん断補強筋量が少ない 1999_No.5 の方が内部のひび割れ幅が大きく、内部の損傷が進んでいる。これは、壁厚が厚くせん断補強筋量が少ない 1999_No.7 にも同様な傾向で、せん断補強筋量が少ない補強筋量が少ない試験体の内部の損傷が大きいことがわかる。

3.5 累積吸収ひずみエネルギー

各試験体の累積吸収ひずみエネルギーを図-6 に、部材毎の累積吸収ひずみエネルギーを図-7 に示す。2000_No.6 (独立柱部分 $pw=1.19\%$ 、壁付き柱部分 $pw=0.79\%$) は 2000_No.1 (独立柱部分 $pw=0.79\%$ 、壁付き柱部分 $pw=0.79\%$) とほぼ同様の結果を示したので省略した。1999_No.5 (腰壁厚 75mm, $pw=0.13\%$) と 1999_No.7 (腰壁厚 200mm, $pw=0.13\%$) は 2 サイクル目までは、ほぼ同様の結果だった。2000_No.1 (独立柱部分 $pw=0.79\%$ 、壁付き柱部分 $pw=0.79\%$) と 2000_No.4 (独立柱部分 $pw=1.19\%$ 、壁付き柱部分 $pw=0.21\%$) は、6 サイクル目から違いが見られ、8 サイクル目に 2000_No.4 が大きく吸収エネルギーが増加した。これは、8 サイクルの負荷荷時に耐力・剛性が急激に下がることから、損傷が大きくなっていることがわかる。また、各試験体の部材毎の吸収エネルギーを見ると、壁厚の薄い 1999_No.5 (腰壁厚 75mm, $pw=0.13\%$) では独立柱部分と壁付き柱部分の吸収エネルギーが、ほぼ同等である。これは、柱全体で変形をしているために、柱全体でエネルギー吸収したと考えられる。一方、壁厚の厚い試験体では、独立柱部分の吸収エネルギーが、壁付き柱部分の吸収エネルギーを上回った。特に、柱のせん断補

強筋量が少ない 1999_No.7 では、独立柱部分の吸収エネルギーが特に大きい。これは、腰壁によって、壁付き柱部分が拘束され、独立柱部分での変形が増大しているためだと考えられる。また、この傾向は壁付き柱部分の補強筋量が少ない 2000_No.4 (独立柱部分 $pw=1.19\%$ 、壁付き柱部分 $pw=0.21\%$) において 2000_No.1 (独立柱部分 $pw=0.79\%$ 、壁付き柱部分 $pw=0.79\%$) よりも顕著である。

図-8 に各試験体の累積吸収ひずみエネルギーコンターを示す。1999_No.5 と 1999_No.7 を比較すると、1999_No.5 の方が吸収エネルギーが大きく、柱全体でエネルギーを吸収していることがわかる。2000_No.1 と 2000_No.4 では、共に柱

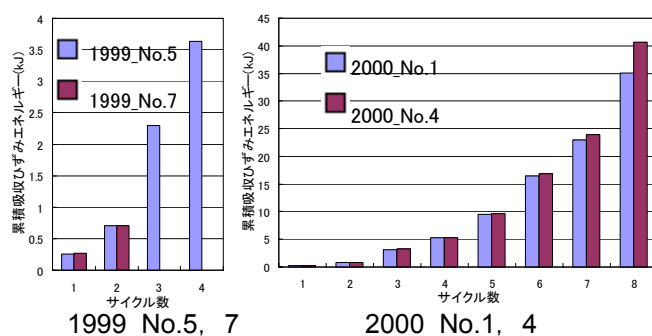


図-6 各試験体の累積吸収ひずみエネルギー

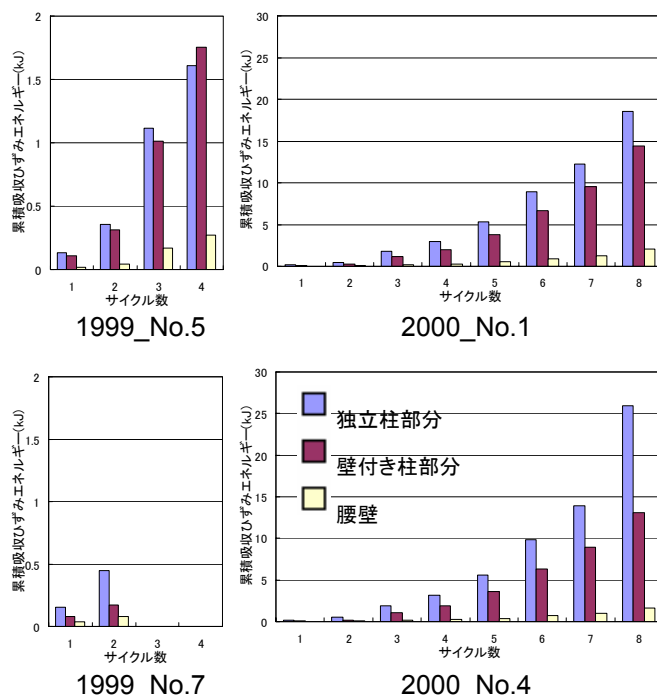


図-7 部材毎の累積吸収ひずみエネルギー

頭、柱脚で大きくエネルギーを吸収しているが、2000_No.4の方が、特に、柱頭でエネルギーを大きく吸収している。そこでの差が全体の吸収エネルギーの違いに現れている。

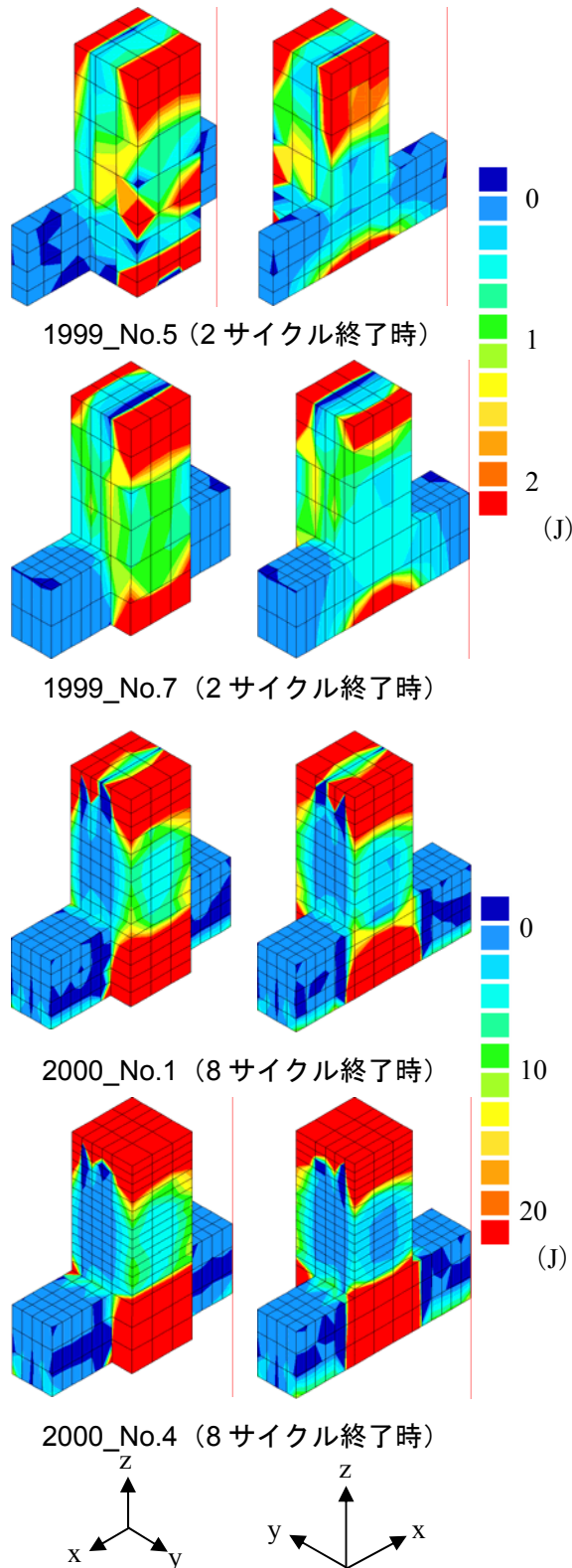


図-8 累積吸収ひずみエネルギーコンター

4. まとめ

- 1) 実験に比べ、解析の剛性はやや高めとなったが、最大耐力や履歴ループは実験と良好な対応を示した。
- 2) 壁厚が厚い試験体は、独立柱部分の累積吸収エネルギーが増加し、独立柱部分の変形が卓越する。
- 3) 壁厚の違いによって、応力の流れや内部のひび割れ状況に違いが見られ、破壊進行状況にも影響を与えることがわかった。
- 4) 腰壁が柱に対して偏心して取り付く場合、壁直交方向の荷重が正方向と負方向で異なり、応力の流れ、ひび割れの方向、せん断補強筋のひずみ分布、累積吸収ひずみエネルギー等から柱の耐力や靱性能の劣化に大きな影響を与える。
- 5) 腰壁が厚い場合、壁が取り付いている部分の柱のせん断補強筋量が柱全体の破壊モードに影響を与えた。
- 6) 本来、結果を過大評価してしまう回転ひび割れモデルを用いたのは、繰返し解析を行うためであったが、使用するひび割れモデルは改善の余地があると思われる。

参考文献

- 1) 小林正浩, 松崎育弘, 中野克彦, 福山洋: 炭素繊維シートにより補強した腰壁付き柱の構造性能に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp.1417-1422, Vol.21, No.3, 1999.
- 2) 宇野功一, 松崎育弘, 中野克彦, 杉山智昭: 腰壁・垂れ壁付き RC 柱が面外方向に荷重を受けた場合の構造性能に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, pp.409-414, Vol.22, No.3, 2000.
- 3) 余勇, 柏崎隆志, 野口博: RC 構造部材の 3 次元繰返し載荷時の FEM 解析プログラムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.67-70, 2004 年 8 月
- 4) Kent, D.C., and Park, R.: Flexural Members with Confined Concrete, Proceedings of ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990, 1971.
- 5) 佐藤稔雄, 白井伸明: 鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1615-1618, 1978.
- 6) 飯塚崇文, 野口博: 普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリート部材の非線形有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集, pp.9-14, Vol.14, No.2, 1992.
- 7) 森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集 No.299, pp.15-24, 1975.3