

論文 RC 造腰壁・垂壁付き短柱の耐震性能改善に関する解析的研究

細野 清子*1・関口 雄平*2・柏崎 隆志*3・野口 博*4

要旨: 本研究では、水平力を受ける腰壁・垂壁の取り付け RC 短柱について、偏心接合、部分スリットの有無を変動因子とした既往の実験で用いられた試験体を対象とし、仮想試験体も含め 3 次元 FEM 解析を実施し、実験結果との比較や解析手法の検証を行った。そして、応力の分布や破壊性状、累積消費ひずみエネルギーなどの実験での把握が困難な項目についても、3 次元的な把握も含めて検討し、二次壁やスリットが柱の耐震性能に与える影響について詳細に考察した。

キーワード: 腰壁, 垂壁, 柱, 偏心, スリット, 有限要素法, 3 次元解析

1. はじめに

RC 造の建物のうち、学校校舎や集合住宅のほとんどには、内法高さ/せい比が 2 程度以下の二次壁付き短柱がある。これらの破壊性状は極脆性的なせん断破壊で、建物の耐震性能を低くする原因となり、全国的に補強措置が採られているのが現状である。そして、局所的に二次壁が取り付け柱を有する建物には、平面、立体的剛性バランスを良くし、柱の靱性能を改善する補強方法として、構造スリットを設ける補強が有効な手段の一つと考えられている。

そこで本研究では、解析的研究資料が少ない、せん断破壊先行型の腰壁・垂壁付き RC 短柱を対象に 3 次元 FEM 解析を行い二次壁が柱の耐震性能に与える影響を解明するとともに、構造スリットを設けることによる靱性能の改善を定量的に評価することを第一の目的としている。そして、解析の利点を活かし、累積吸収ひずみエネルギー、3 次元的な内部応力状態やひび割れ進展状況などの視覚化、明確化を工夫し詳細に検討を行った。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

工学院大の広沢ら¹⁾によって 2004 年に実験が行われた面内方向に水平加力を受ける部分スリットを有する RC 造腰壁・垂壁付き短柱を解析対象試験体とした。試験体は仮想試験体を含め 5 体で、共通因子は、柱断面 $b \times D = 240\text{mm} \times 240\text{mm}$, 柱主筋比 $p_g = 1.24\% (10\text{-D}10)$, 柱内法高さ $h_0 = 360\text{mm}$, 帯筋比 $p_w = 0.26\% (2\text{-}4\phi @100)$, 壁厚 $t_w = 50\text{mm}$, 腰壁高さ $H_{sw} = 400\text{mm}$, 垂壁高さ $H_{pw} = 240\text{mm}$, 縦横壁筋 $4\phi @100$ シングルである。学校校舎の 1 階外周にある両側腰壁・垂壁付き柱を想定しており、大きさは実大の約 1/2.5 である。変動因子と試験体形状を表-1、材料特性を表-2、要素分割および境界条件を図-1 に示

す。部分スリットに接するコンクリートは、ひび割れが生じやすいことより引張強度を 1/2 にして表現した。また、図-2 に荷重履歴を示す。軸力 169.5kN の一定軸力下で、逆対称繰り返し加力を原則とした。部材角 $R = 1/400 \sim 1/50$ までは同変位 3 サイクルずつ繰り返し荷重を与えている。

2.2 解析モデル

本解析では、当研究室で余, 洪, 柏崎, 野口ら²⁾³⁾により開発された繰り返し載荷モデルを導入した 3 次元 FEM プログラムを使用した。コンクリートは 8 節点ソリッド要素を用いて表現し、構成則には Darwin-Pecknold の等価一軸ひずみに基づく直交異方性弾塑性モデルを 3 次元に拡張したモデルを用いた。破壊曲面については、Kupferらの基礎実験データを使用した Willam-Warnke 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 式を使用し、下降域では横補強筋の拘束効果を考慮した Kent-Park 式を用いた。また、引張側の下降域では、Tension Stiffness 効果を考慮した白井式⁴⁾を用いた。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には野口・飯塚式を使用し、ひび割れモデルには固定ひび割れモデル、ひび割れ方向のせん断伝達特性には青柳・山田モデルでそれぞれ表現した。また、鉄筋要素は鉄筋軸方向のみに剛性をする 2 節点トラス要素で表現し応力-ひずみ関係には Ciampi らによって提案された修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。丸鋼 (4φ) を使用している壁縦横筋に、丸鋼の特性を考慮したモデルを採用し、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⁵⁾を用いた。また、柱主筋の付着は完全付着とした。各モデルの詳細は文献²⁾を参照されたい。

*1 千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 工修 (正会員)

*2 千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 大学院生

*3 千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻建築学コース 助教 工修 (正会員)

*4 千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻建築学コース 教授 工博 (正会員)

3. 解析結果

3.1 層せん断力-層間変形角関係

図-3 に No.4, No.5, No.9, No.10 の解析および実験結果の層せん断力-層間変形角関係を示す。No.4 は、最大耐力が実験結果よりやや高い結果となり、実験のような振りモーメントによる極端な耐力低下も再現できていない。これは主筋の付着を完全付着としていることが原因の一つと考えられるが、丸鋼の付着モデルのパラメータを再検討する必要もある。一方、履歴ループの形状は逆 S 字型となり、実験と同様の傾向を示した。No.9 では、最大耐力は実験結果よりも若干低くなったが、ピーク後の耐力低下と逆 S 字型の履歴ループ形状は実験と良好に対応した。部分スリットの無い No.4 と No.9 に関しては、 $R=1/67rad(R=15/1000rad)$ でピークの 50~60% まで大きく耐力が低下し、履歴ループ形状も逆 S 字型であることより、脆性的なせん断破壊が顕著であると言える。部分ス

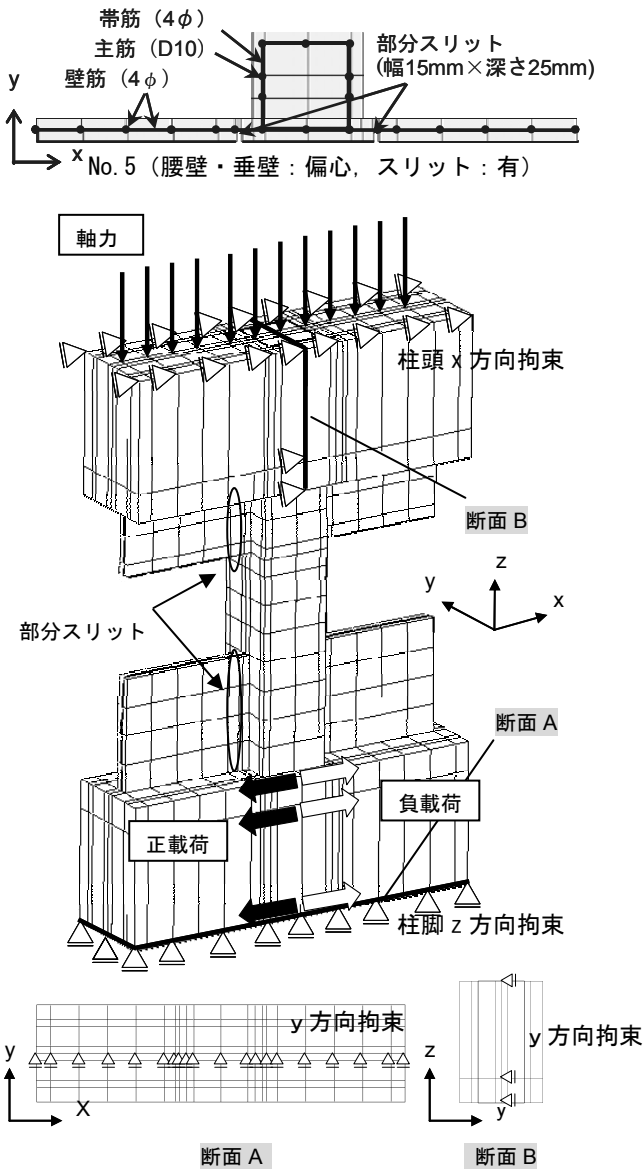


図-1 要素分割および境界条件

リットを有する No.5, No.10 に関しては、共に最大耐力は実験結果と良好に対応し、ピーク後の大変形に至るまでの穏やかな耐力低下も良好に再現できている。また、 $R=1/67rad(R=15/1000rad)$ でもピークの約 80% 以上の耐力を保持している。履歴ループ形状も、やや逆 S 字型寄りではあるが紡錘型であり、部分スリットを設けることによる変形性能の改善が解析においても確認できた。

3.2 最小主応力コンター

図-4 に、No.4 と No.5 の正載荷時の $R=1/100rad$ における最小主応力コンターを示す。変形倍率は 10 倍である。部分スリットの無い No.4 では、壁と柱が一体となりアーチ機構を形成していることが、部分スリットを設けた No.5 では、壁にはほとんど応力は流れず柱に独立し

表-1 変動因子と試験体形状

試験体名	スリット幅×深さ (mm)	偏心接合	試験体形状
No.4		有	
No.5	15×25		
No.9		無	
No.10	15×25		
No.11 (仮想試験体)	15×50		

表-2 材料特性
(a) コンクリート

試験体No.	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)
No.4,5	2.55×10^4	26.6	2.44
No.9,10,11	2.57×10^4	26.9	2.46

(b) 鉄筋

呼び径 (規格)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	降伏強度 σ_B (N/mm ²)	断面積 ($\times 10^2$ mm ²)
D10	1.78×10^5	383.1	0.71
4φ	2.42×10^5	285.0	0.13

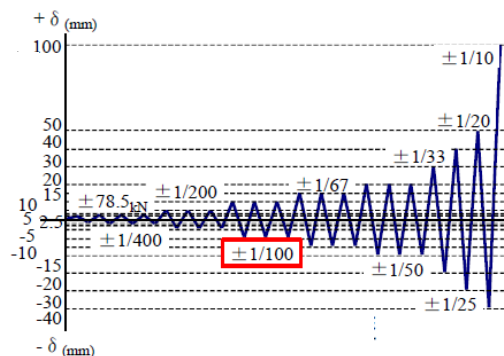


図-2 荷重履歴

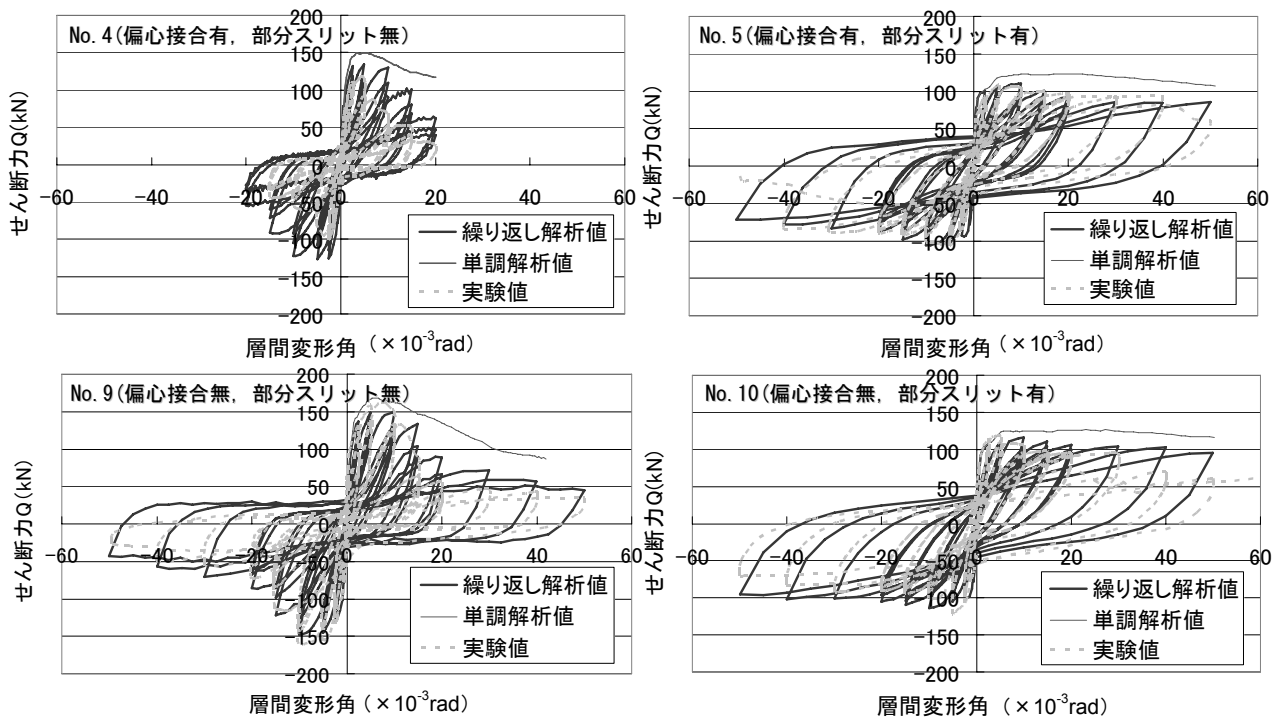


図-3 層せん断力-層間変形角関係

たアーチ機構が形成されていることが見て取れる。また、偏心による応力の偏りが部分スリットを設けることで緩和されていることもわかる。変形状態より、No.4では偏心面の短柱部分にせん断変形が生じていることが確認できる。

3.3 鉄筋のひずみ

図-5にNo.9とNo.10の柱主筋と帯筋のひずみ分布と、ひずみの観測位置を示す。図中の縦の点線は、柱主筋の降伏ひずみ 2200μ と帯筋の降伏ひずみ 1200μ を表している。柱主筋のひずみに関して、全体的に圧縮側の鉄筋のひずみが小さいのは、コンクリートが一部圧縮力を負担しているからだと予測できる。部分スリットの無いNo.9では、それぞれ層間変形角 $R=1/100\text{rad}$ で同時に柱主筋と帯筋が降伏している。部分スリットを施したNo.10では $R=1/100\text{rad}$ で柱主筋が降伏しているが、帯筋は降伏していないことより、柱の曲げ破壊先行型の破壊モードであることがわかる。部分スリットを設けることで、破壊モードが変わり設計上望ましい曲げ破壊先行型となることが鉄筋のひずみ性状から判断できる。

3.4 繰り返し回数による消費エネルギー量の違い

本研究において、 $R=1/400\sim 1/50\text{rad}$ まで実験と同様の3回ずつ繰り返し荷重を与えた層せん断力 (Q) - 層間変形角 (R) 関係の各変位1サイクル目の消費エネルギーと、仮想的に1回ずつ繰り返し荷重を与えた $Q-R$ 関係の消費エネルギーの比較を試みた。消費エネルギー $\int W$ は各サイクルの荷重終了時におけるループに囲まれた面積を計算することにより求めた。図-6にNo.9,

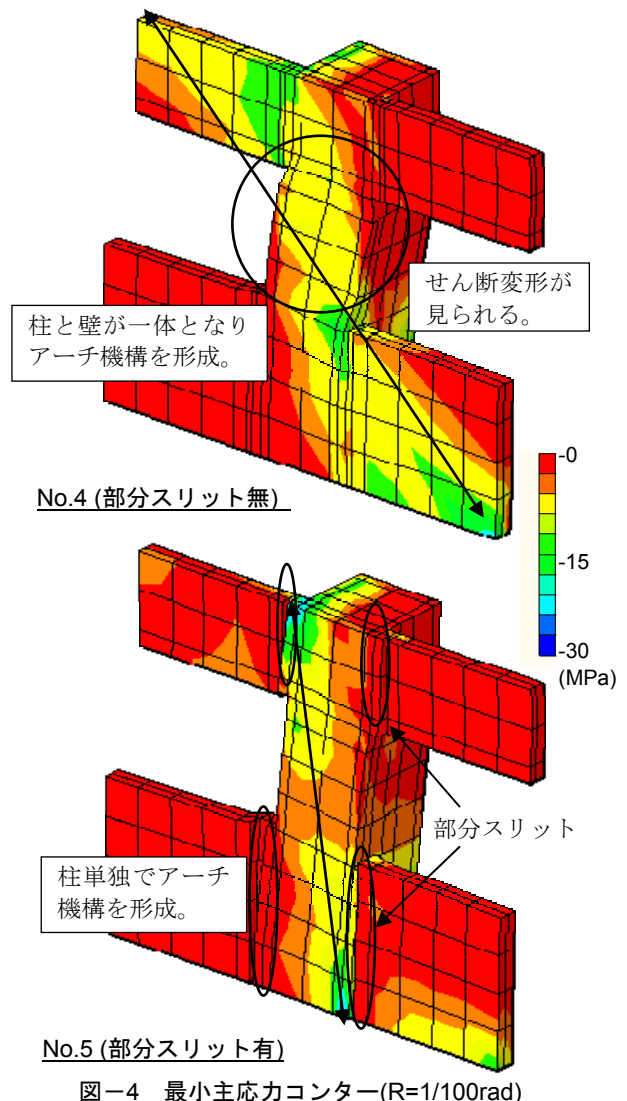


図-4 最小主応力コンター($R=1/100\text{rad}$)

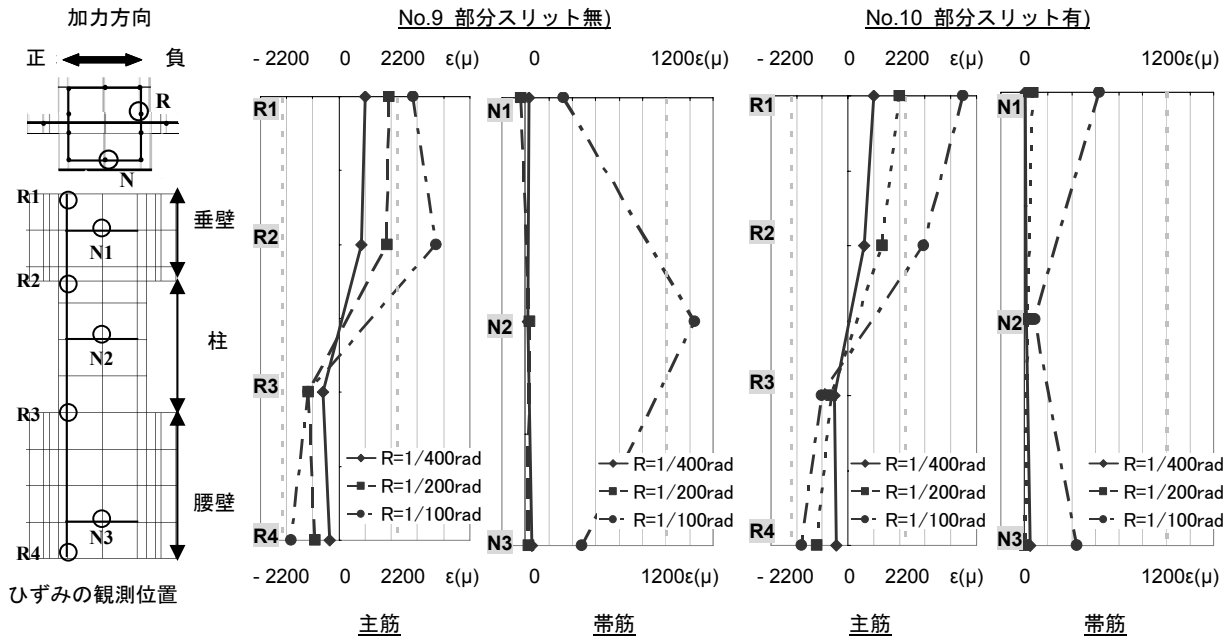


図-5 鉄筋のひずみ性状

No.10, No.11 の Q-R 関係の繰り返し回数による比較と、層間変形角ごとの繰り返し回数 1 回ずつと 3 回ずつの 1 サイクル目の消費エネルギー量の推移を示す。スリットが無くせん断破壊が顕著な No.9 では、変形が進むにつれて繰り返し回数 1 回と 3 回で消費エネルギー量に違いが見られ、特にせん断破壊が見られ始めた R=1/100rad から、差が大きくなっていくことがわかる。最終的に、繰り返し回数 1 回と 3 回で約 1500J 消費エネルギーに差が生じた。これは、繰り返し回数が増えることでコンクリートの劣化が激しくなり、短柱部分のせん断破壊を助長させたためと思われる。部分スリットを設けた No.10 においても、変形が進むにつれて消費エネルギー量に若干差が見られたが、最終的にも約 300J に留まった。これはスリットを設けない No.9 よりせん断破壊が穏やかであることを示していると考えられる。完全スリットを設け、曲げ破壊が先行した No.11 では繰り返し回数の違いによる消費エネルギー量の違いがほとんど見られなかった。このように、繰り返し回数をパラメータとし消費エネルギー量の違いを検討することで、試験体ごとの破壊性状の違いを推測することができると考えられる。

3.5 ひび割れ性状

図-7 に No.9 と No.10 の、実験結果の最大耐力時におけるひび割れ状況と、解析結果の R=1/400rad と最大耐力時の R=1/100rad におけるひび割れ状況を示す。本研究ではひび割れは引張主ひずみが引張強度時ひずみを超えた時に生じたと仮定した。ひび割れを円で表現しており、円の色が黒に近いほどひび割れ幅が大きいことを示している。また、円の傾きがひび割れの方向を示す。図では各要素における積分点での値の平均を用いた。図より、

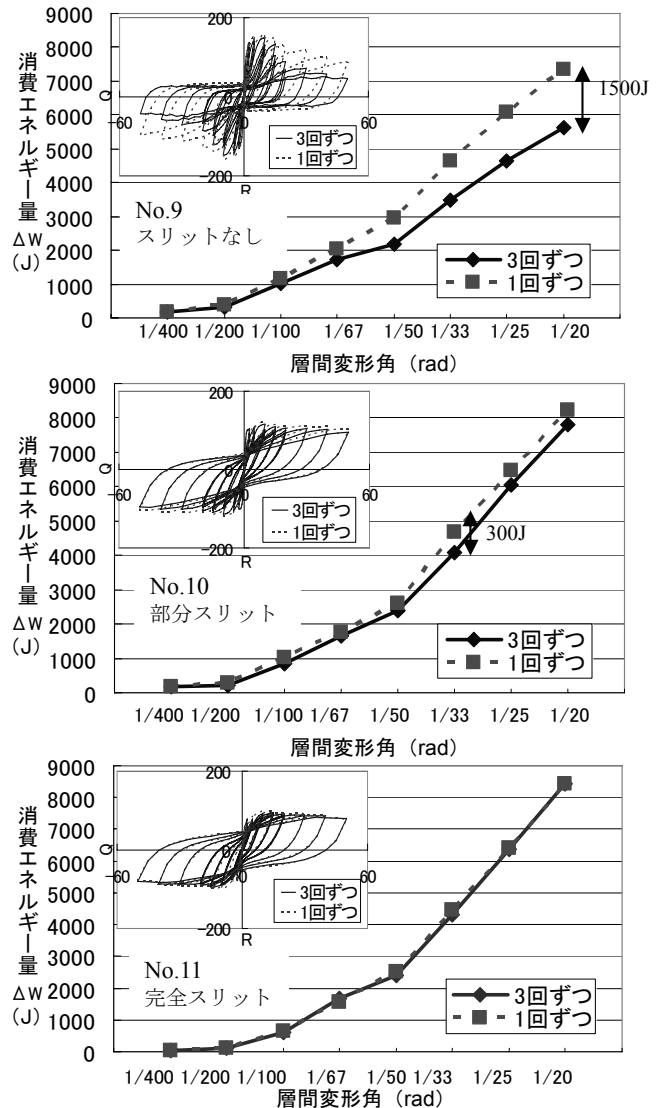


図-6 1 サイクル目の消費エネルギー量の推移

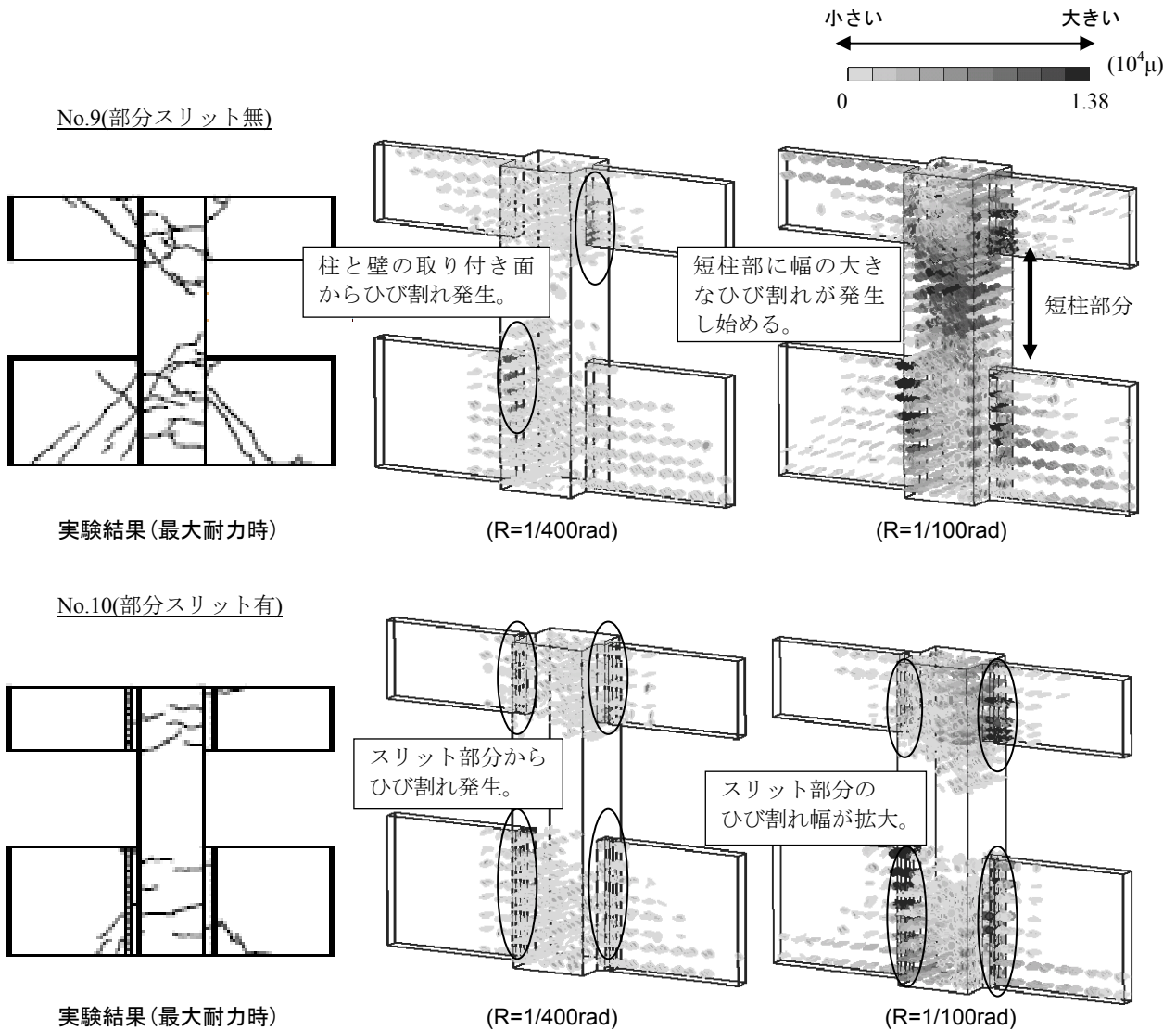


図-7 ひび割れ進展状況

解析結果は実験のひび割れを若干過大評価しているものの、実験を概ね良好に表現できていることがわかる。No.9では、柱と壁の取り付け部分からひび割れが生じている。そして、変形が進むにつれて壁に細かいひび割れが広がり、最大耐力付近から短柱部分に大きなひび割れが進展していることがわかる。部分スリットを施したNo.10では、部分スリットに接するコンクリートからひび割れが生じ始め、変形が進むにつれて幅が大きく進展していることがわかる。部分スリットに接するコンクリートにひび割れが集中し、柱と壁がさらに分離気味となるため、壁には一部の細かいひび割れしか生じていない。そして、柱の中央部分へのひび割れの進展がほとんど見られないことより、柱の短柱化が改善されたことがひび割れからも確認できる。

3.6 累積消費収ひずみエネルギー

No.4,No.5,No.9,No.10の層間変形角ごとの二次壁の累

積消費ひずみエネルギーの負担率を図-8に、図-9にR=1/100radの柱のコンクリート、主筋、帯筋の材料別の累積消費ひずみエネルギーの負担率を示す。図-8では、柱と壁の体積の違いによるエネルギーの違いを取り除くため、それぞれの部材体積で除した単位体積あたりのエネルギーを用い負担率を算出している。

図-8より、部分スリットの無いNo.4,No.9では、壁の負担率は初期において50%以上であるが、柱のせん断破壊が顕著になるR=1/100rad付近から減少し、最終的には10%程度まで低下する。すなわち、終局状態において単位体積あたり柱が壁の約10倍も消費ひずみエネルギーを負担するようになる。部分スリットを施したNo.5,No.10に関しては、壁の負担率は初期において35~40%であり、変形が進むにつれ減少し、最大耐力を迎えるR=1/100radでは大きく壁の負担率が低下した。これは部分スリットに接するコンクリートの損傷が最大耐力時に著しく大きくなり、柱と壁がさらに分離気味になった

ことを示している。そして、最大耐力決定要因の一つに、部分スリットに接するコンクリートの破壊も挙げられる。偏心接合の有無で述べると、偏心接合を有する試験体は無い試験体に比べて壁のひずみエネルギー負担率が全体的に5~10%低下している。また、部分スリットの有無で比較すると、部分スリットを施すことでR=1/100radの壁のひずみエネルギー負担率が40%程度減少している。

図-9より、すべての試験体において、コンクリートが50%以上消費ひずみエネルギーを負担していることから、損傷が主にコンクリートに集中することがわかる。また、偏心接合を有し、スリットを設けていない試験体ほど柱のコンクリートの損傷が大きい。鉄筋に関しては、曲げ破壊先行型のNo.5, No.10, No.11では、帯筋の負担率は1%にも満たない。しかし、せん断破壊が顕著に見られたNo.4, No.9では、帯筋の負担率が2~4%と増加する。顕著なせん断破壊にも関わらず、柱の全ひずみエネルギーに占める帯筋の負担率が僅かであるのは、主筋もR=1/100radに帯筋と同時に降伏したことで、R=1/100radで降伏した帯筋は柱の短柱部分の一部であり、柱全体に占める割合は極めて小さいからである。

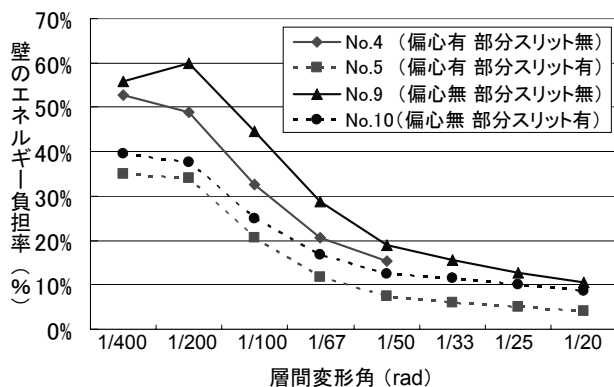


図-8 二次壁の累積消費ひずみエネルギー負担率

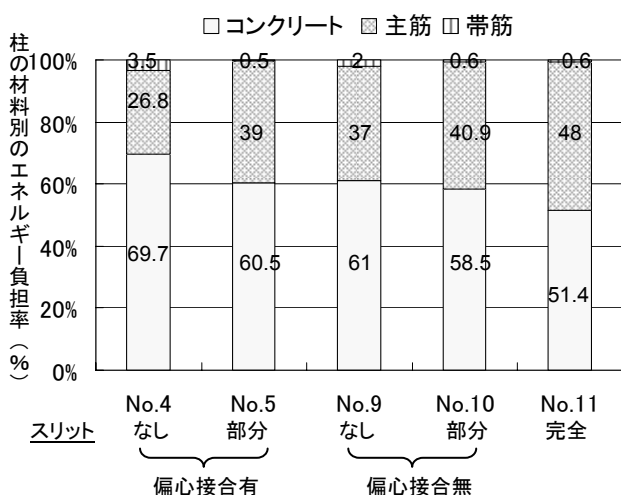


図-9 材料別の柱の累積消費ひずみエネルギーの負担率

4. まとめ

- 1) 実験ほどの極端な耐力低下やせん断破壊は再現できなかったが、最大耐力や履歴ループ形状は実験と概ね良好な対応を示した。部分スリットを設けることで、最大耐力は低下するが、変形性能が向上することが解析でも確認できた。
- 2) 部分スリットを設けることで、柱と壁が分離気味になった結果、柱のアーチ機構が独立した。ひび割れ状況においても、短柱部分を中心にななめに生じていたひび割れが消失していることが確認された。
- 3) スリットの有無や幅によって、消費エネルギー量、鉄筋のひずみ、応力の流れや内部のひび割れ状況に違いが見られ、破壊モードに影響を与えることがわかった。
- 4) 壁が柱に偏心して取り付け、部分スリットを有する試験体ほど壁が負担するひずみエネルギーの割合は減少する傾向となる。また、どの試験体においてもコンクリートに損傷が集中することが解析結果よりわかった。

参考文献

- 1) 松井健太郎, 澤口祐樹, 瀧澤正明, 小室達也, 広沢雅也: RC 造腰壁・垂れ壁付短柱の耐震性能に関する大変形加力実験 (その1~その4), 日本建築学会大会 (北海道), pp.381-388, 2004.8
- 2) 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(その1, 2), 日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集, C-2, pp.67-70, 2004.8
- 3) 洪杰, 柏崎隆志, 野口博: 3次元FEM解析による直交部材付きRC偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.605-608, 2007.9
- 4) 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
- 5) 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