

論文 二方向水平力を受ける二次壁付き RC 柱の破壊性状に関する解析的研究

渡辺 圭彦^{*1}・高橋 誠^{*2}・柏崎 隆志^{*3}・野口 博^{*4}

要旨：本研究では、面内及び面外の二方向から交互に水平力を受ける腰壁・垂壁の取り付け RC 柱について、既往の実験で用いられた試験体を対象として 3 次元 FEM 解析を実施し、面内及び面外方向における耐力やひずみなどの挙動の違いについて実験結果との比較を試み、解析手法の検証を行った。また、壁の高さ及びせん断補強筋比の違いが破壊性状に対して与える変化をより明らかにするために、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を行った。

キーワード：2 方向加力、腰壁、垂壁、柱、有限要素法

1. はじめに

一方向にのみ腰壁・垂壁を有する RC 柱では、シアースパン比が壁の面内方向と面外方向で異なる。そのため、実際の地震入力のように任意の方向から水平力を受ける時には両方向の破壊形式や靱性性能、曲げ降伏ヒンジの発生位置などの違いによって、それぞれ一方向のみの正負繰返し水平力を受けた場合とは異なる挙動を示す可能性がある。しかし、面外方向加力における腰壁・垂壁の影響については考慮がされておらず、解析的研究も数少ないのが現状である。

そこで本研究では、柱が二方向曲げせん断加力を受けて破壊に至る時の耐力と変形性状を壁高さ及び横補強筋量を変動因子として検討した既往の実験を対象とし、3 次元有限要素法による解析を行い、その結果について実験との比較検討を試みた。また解析独自の視点として変形、ひび割れ、損傷状況、応力コンターや累積消費ひずみエネルギーなど、実験では把握が難しい項目についても検討を行うことで、壁高さや横補強筋などの違いによる破壊性状の差異をより明らかにすることを目的とする。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

北大の城ら¹⁾によって 1988 年に実験が行われた二方向水平加力を受ける腰壁・垂壁付き RC 柱を解析対象試験体とした。柱は内法高さが 140cm で、一辺が 30cm の正方形断面柱で、上下に幅 30cm、せい 35cm の剛な梁が直交する二方向に接続されている。試験体の寸法は実大のほぼ 1/2 スケールを想定した。腰壁・垂壁は左右同一高

さで壁厚は 7.5cm であり、一方向にのみ取り付けられている。壁高さは CW20-1 が 20cm、CW40-1 は 40cm で、CW35-1 は 35cm である。柱主筋の配筋は 12-D13 で共通とし、柱端から 30mm の位置に配した。主筋のひずみはおよそ 100mm 間隔で計測している。また CW35-1 は柱の横補強筋に二重のスパイラル筋を使用しているが、解析では横補強筋比が等しくなるようにシングルのロ型横補強筋でモデル化を行った。図-1 に CW20-1 の要素分割及び境界条件を、表-1、2 に試験体の変動因子、コンクリートと鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。

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 効果を考慮した森田・角モデル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有する 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。鉄筋とコンクリ

*1 (独)放射線医学総合研究所 (前 千葉大学大学院自然科学研究科 建築専攻) 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)

ート間の付着については完全付着と仮定した。各モデルの詳細は文献²⁾を参照されたい。

2.3 加力パターン

図-2に実験における加力パターンを示す。最初に軸力を与え、その後柱主筋の降伏変位を基準とした変位制御で面内X方向と面外Y方向の交互に加力を行っている。解析では軸力は荷重制御で載荷し、その後の加力には降伏変位でなく、実験結果から得られた層間変形角を用い、また一部サイクルは省略して載荷を行った。水平変位の計測は実験では柱頭部、解析では加力梁部分で行った。

3. 解析結果

3.1 層せん断力-層間変形角関係

図-3に、各試験体の面内方向及び面外方向加力時のそれぞれにおける層せん断力-層間変形角関係を実験値と比較して示す。面内方向加力に関しては、どの試験体においても初期剛性は実験結果と比較してやや高めとなり、正方向での最大耐力はほぼ実験と同じ結果となった。CW20-1ではその後耐力が実験より大きく低下し、

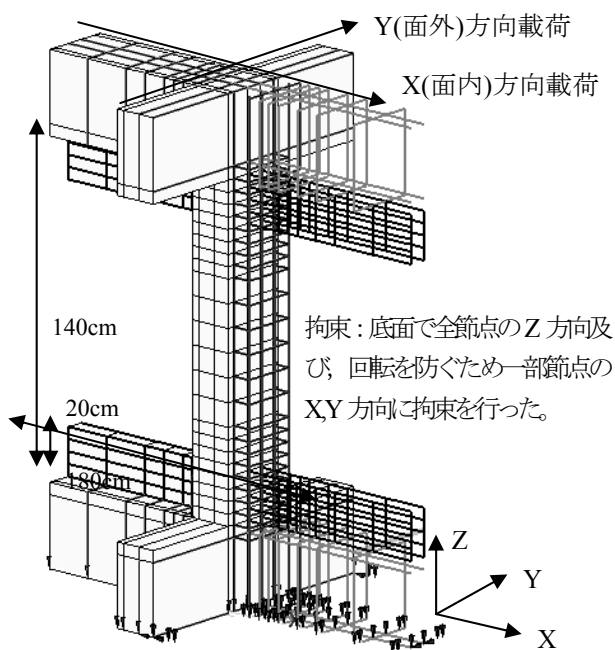


図-1 要素分割・境界条件 (CW20-1)

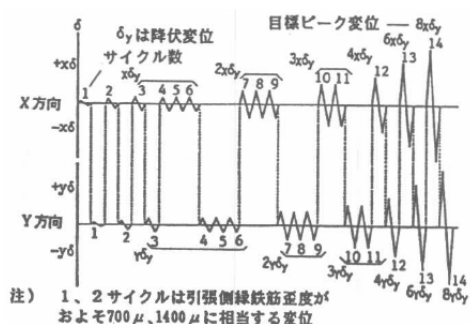


図-2 加力パターン

また最終サイクルでの急激な耐力低下も再現できていない。CW35-1では実験と同様の耐力低下を示したが実験ほどではなく、層間変形角 $1/28\text{rad}$ 以降では実験より高い耐力のままとなった。面外方向加力では初期剛性はやや低めとなった。理由としては、繰り返し載荷によるコンクリートの劣化の過大評価が考えられる。最大耐力及びそれ以降については実験結果と比較的良く対応した。初期剛性が低めとなった繰り返し載荷における履歴ループの形状については、面内方向加力については逆S字型のループ形状について実験結果に比べ、やや紡錘型に近いが、実験結果とある程度良い対応を示した。一方、面外方向加力では面内方向とは異なり紡錘型の履歴ループ形状となったが、実験では面内と同様のやや逆S字型の傾向を示しており若干異なる結果となった。これは、主筋の付着を完全付着としたことによると考えられる。

3.2 柱主筋ひずみ状況

図-4に、CW20-1の面内方向及び面外方向加力での3サイクル目（層間変形角 $1/83\text{rad}$ ）における柱主筋のひずみ分布を示す。横軸がひずみ量を示し、縦軸は柱内部における位置を示している。いずれの加力においても、実験と解析で近似した形状を得ることが出来た。とりわけ面内方向加力については垂壁及び腰壁の取り付け縁をピークとする傾向はほぼ一致している。一方、負方向の加力については面内、面外方向どちらについても実験結

表-1 試験体変動因子

試験体	壁高さ	柱横補強筋
CW20-1	20cm	6φ@50mm
CW40-1	40cm	
CW35-1	35cm	5φ@50mm ダブル・スパイラル (解析上では断面積を換算した通常の補強筋として作成)

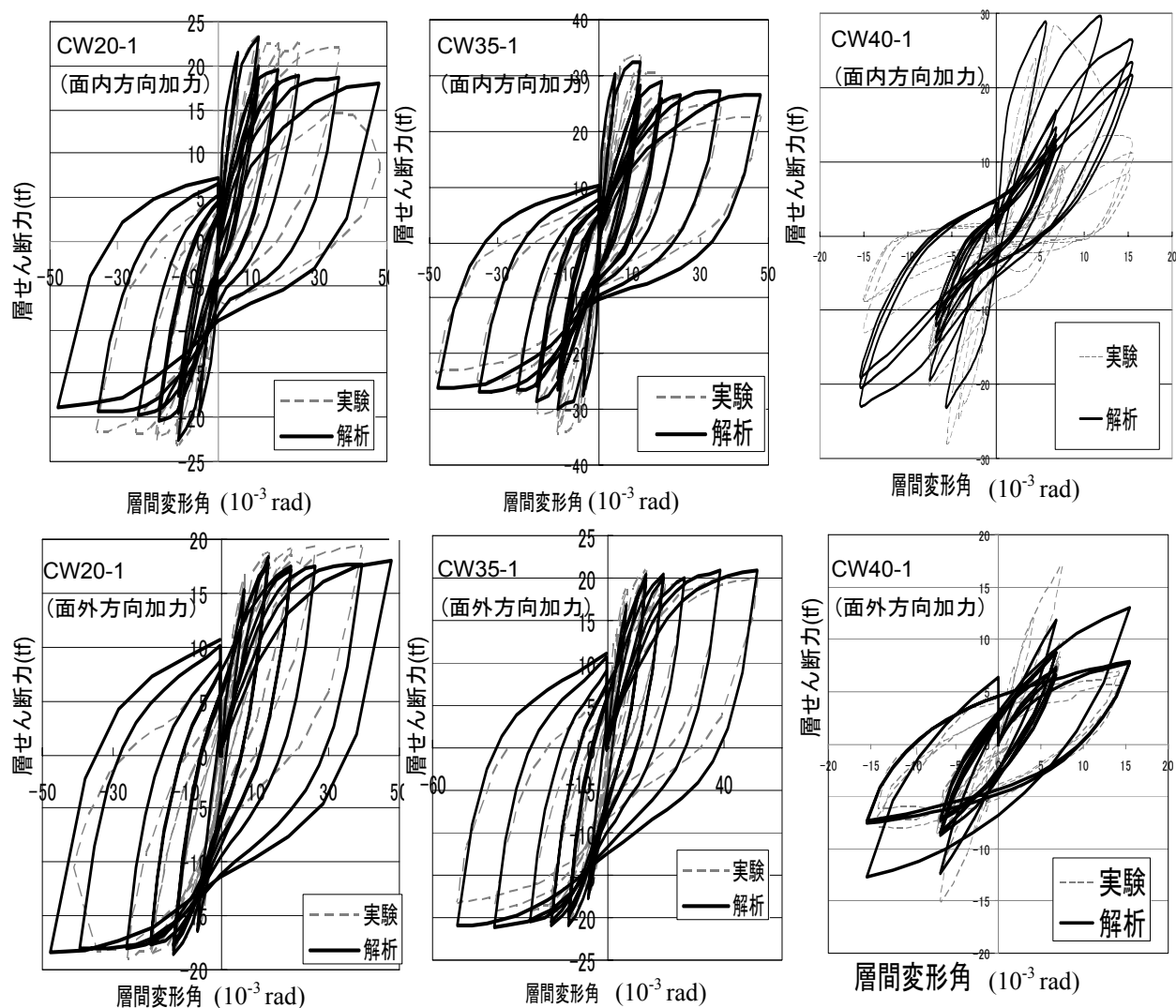
表-2 材料特性

(a) コンクリート

試験体	ヤング係数	圧縮強度	引張強度
CW20-1	25.2(GPa)	33.2(MPa)	2.73(MPa)
CW40-1	21.7(GPa)	30.6(MPa)	3.04(MPa)
CW35-1	33.6(GPa)	40.5(MPa)	3.41(MPa)

(b) 鉄筋

種別	ヤング係数	降伏強度
D13(CW20-1,40-1)	164(GPa)	380(MPa)
D13(CW35-1)	153(GPa)	388(MPa)
6φ(CW20-1,40-1)	197(GPa)	373(MPa)
5φ(CW35-1)	193(GPa)	1267(MPa)



図－3 層せん断力－層間変形角関係

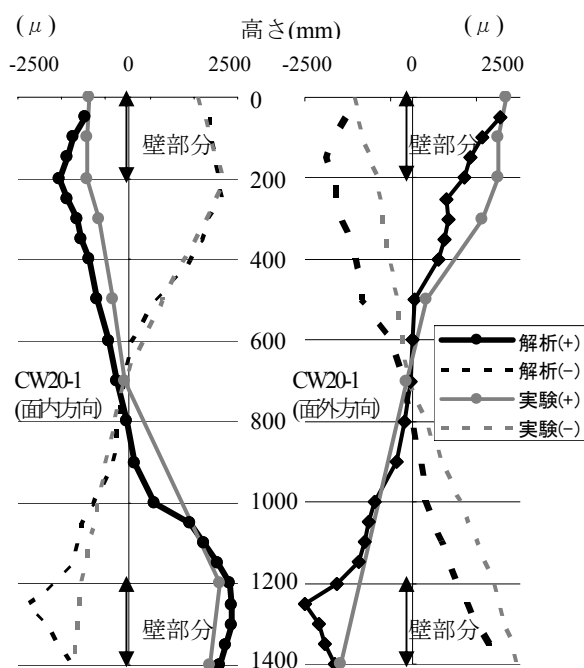
果よりやや大きめのひずみの値となった。全体として解析でのひずみが実験結果を上回る点については、本研究では鉄筋とコンクリートの間の付着を完全付着と仮定しているためではないかと考えられる。

3.3 コンクリート破壊状況

図－5に、CW20-1の面内及び面外方向における最大強度時の最小主ひずみ分布を示す。コンクリートの一軸圧縮試験から得られた圧縮強度時ひずみ (2210μ) を超えている領域ではコンクリートの圧壊が開始したと判断し、黒く塗りつぶして表現した。面内方向では壁が柱に取り付いた部分を中心として壁側にも多く圧壊域が発生しているのに対して、面外方向加力では圧壊域は柱にのみ見られ、垂直方向に圧壊域が広がっている。

3.4 累積消費ひずみエネルギー

各試験体における累積消費ひずみエネルギーの部材ごとの負担率の比較を図－6、試験体ごとのエネルギー総量の比較を図－7に示す。どちらの図においても横軸は加力サイクルである。要素の各積分点に対しての応力－ひずみ関係を積分し、その値に各積分点の負担体積を



図－4 柱主筋ひずみ分布

乗じ、累積吸収ひずみエネルギーを算出した。壁部分のエネルギー負担率は、いずれの試験体でも加力が進むにつれて減少していった。これは壁が初期のうちに破壊されることで実質的に柱と切り離され、柱の損傷が大きく進んでいくためと考えられる。また、試験体ごとの壁部分の負担率を比較すると、加力初期ではほぼ壁高さに比

例していたがその後の減少は壁高さが大きいほどにやや緩やかになる結果が得られた。

試験体ごとの累積消費エネルギーの比較については、10 サイクル目（層間変形角 1/56rad）まではおおそ壁高さに比例した量で推移しているが、それ以降は CW20-1 及び CW35-1 が大きく増加している。これはど

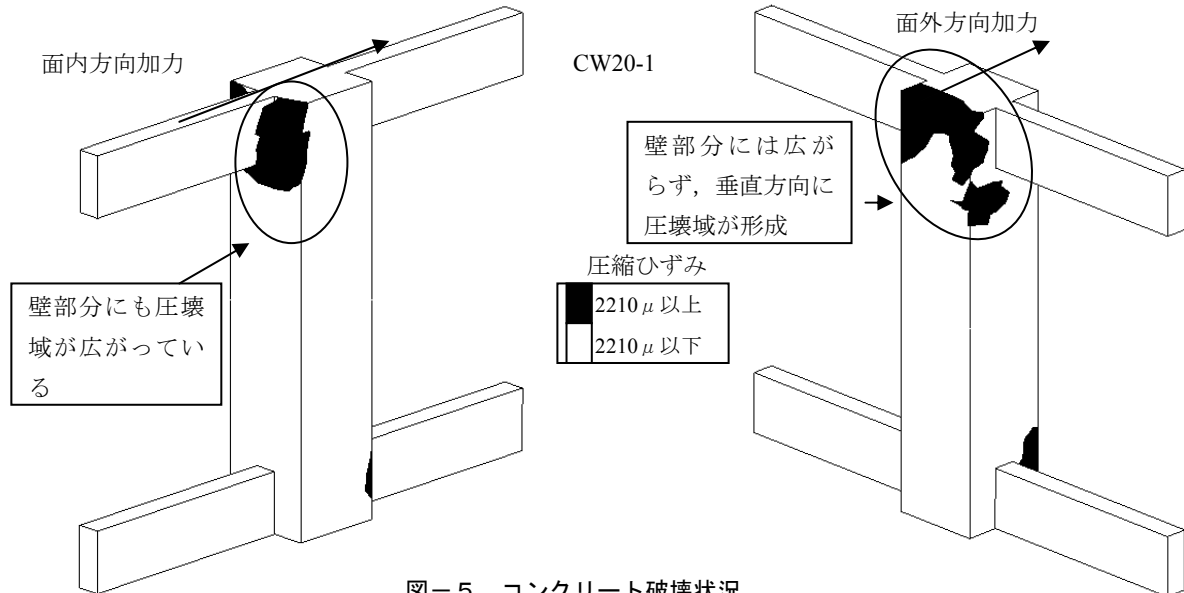


図-5 コンクリート破壊状況

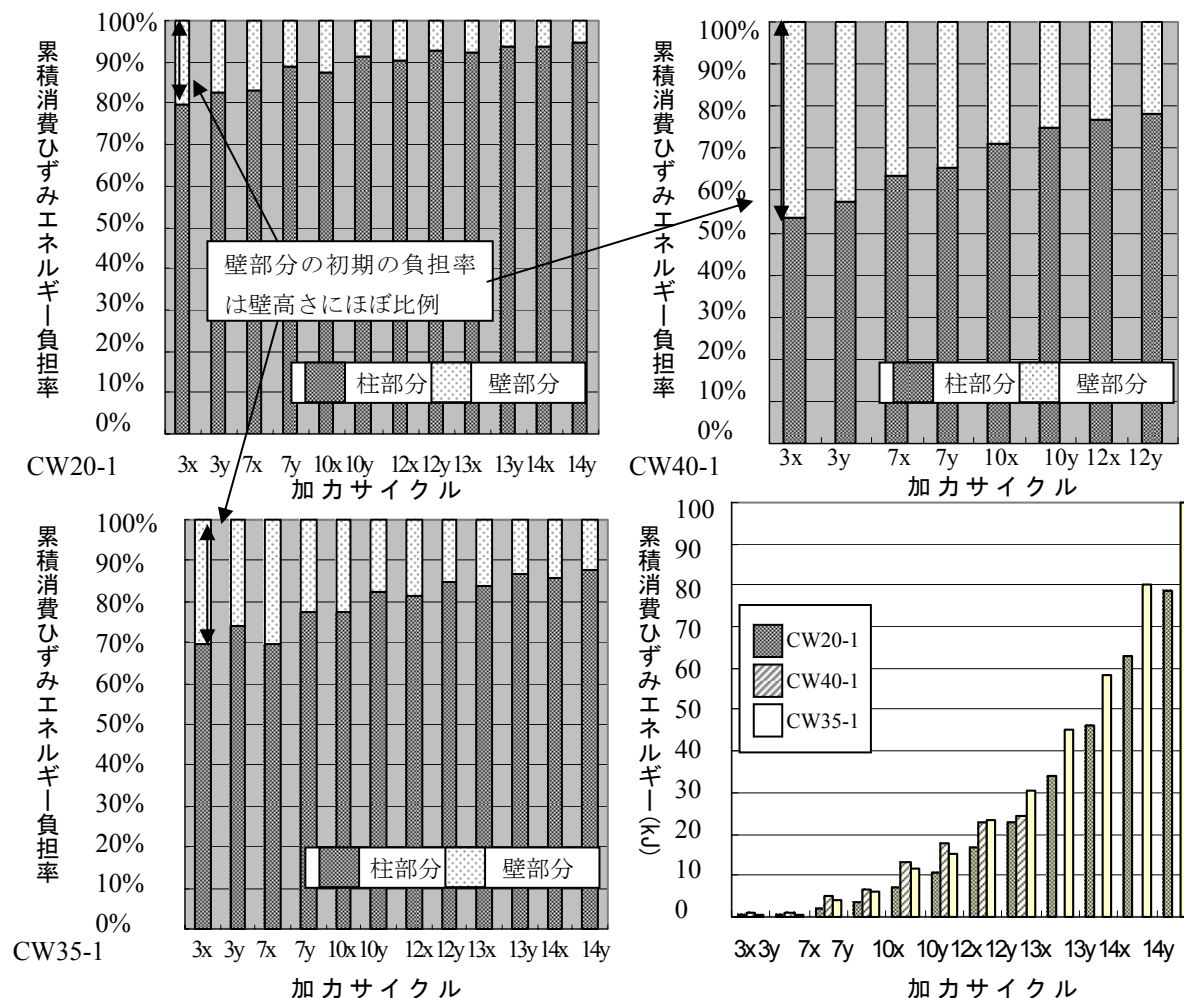


図-6 累積消費ひずみエネルギー部材負担率

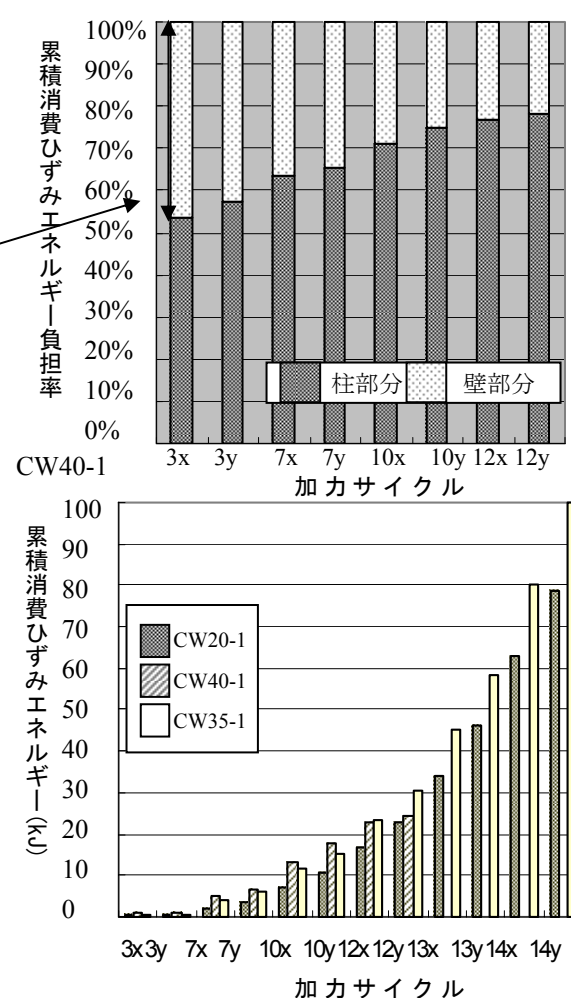


図-7 累積消費エネルギー総量比較

これらの試験体も逆 S 字型の履歴ループとなった CW40-1 と比べて履歴ループ面積が大きく、塑性変形能力が高いと考えられる。

3.5 最小主応力コンター

図-8に、CW20-1 及び CW40-1 の、面内方向及び面外方向の正方向加力における最大強度時の最小主応力コンターを变形とともに示す。なお、変形倍率は 1.5 倍とした。面内方向加力については、CW20-1 と CW40-1 どちらの試験体についても柱頭から柱脚にかけて加力方向に対して斜めにアーチ機構が形成されているのが確認できる。また、さらに腰壁・垂壁へも圧縮応力が流れているが、CW20-1 と CW40-1 では壁に伝達される圧縮領域に差が生じており、CW40-1 の方が壁内でもより広範囲に圧縮応力が広がっているのが確認できる。面外方向加力においては、CW20-1 では柱頭手前から柱脚の奥にかけて、圧縮応力の流れが形成されているのが確認できるが、面内方向と異なり壁部分においては殆ど応力の流れが確認できない。CW40-1 においても壁部分には応力の流れが確認できず、また柱部分におけるアーチ機

構についても CW20-1 のように柱頭手前から柱脚奥ではなく、上下の垂壁と腰壁の間に掛けて斜めに形成されている。

3.6 ひび割れ状況

図-9にそれぞれの試験体の面内方向加力での最大強度時におけるひび割れ状況、図-10にCW40-1の同時点での柱正面下部及び腰壁のひび割れ状況を実験と比較して示す。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生じたと仮定し、引張主ひずみに引張強度時ひずみを引いた値をクラックひずみと定義し、ひび割れ幅の大きさを円で表現した。円の色がクラックひずみの大きさを示し、黒に近いほど大きいことを表す。円の傾きは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。解析結果同士の比較では、CW40-1 では柱中央部にもひび割れが生じているのが確認できる。また、実験結果との比較では、柱左上から右下にかけてのせん断ひび割れや、柱脚部近くの水平方向のひび割れ、腰壁の斜め方向のひび割れなどある程度実験を再現できていることが確認できる。

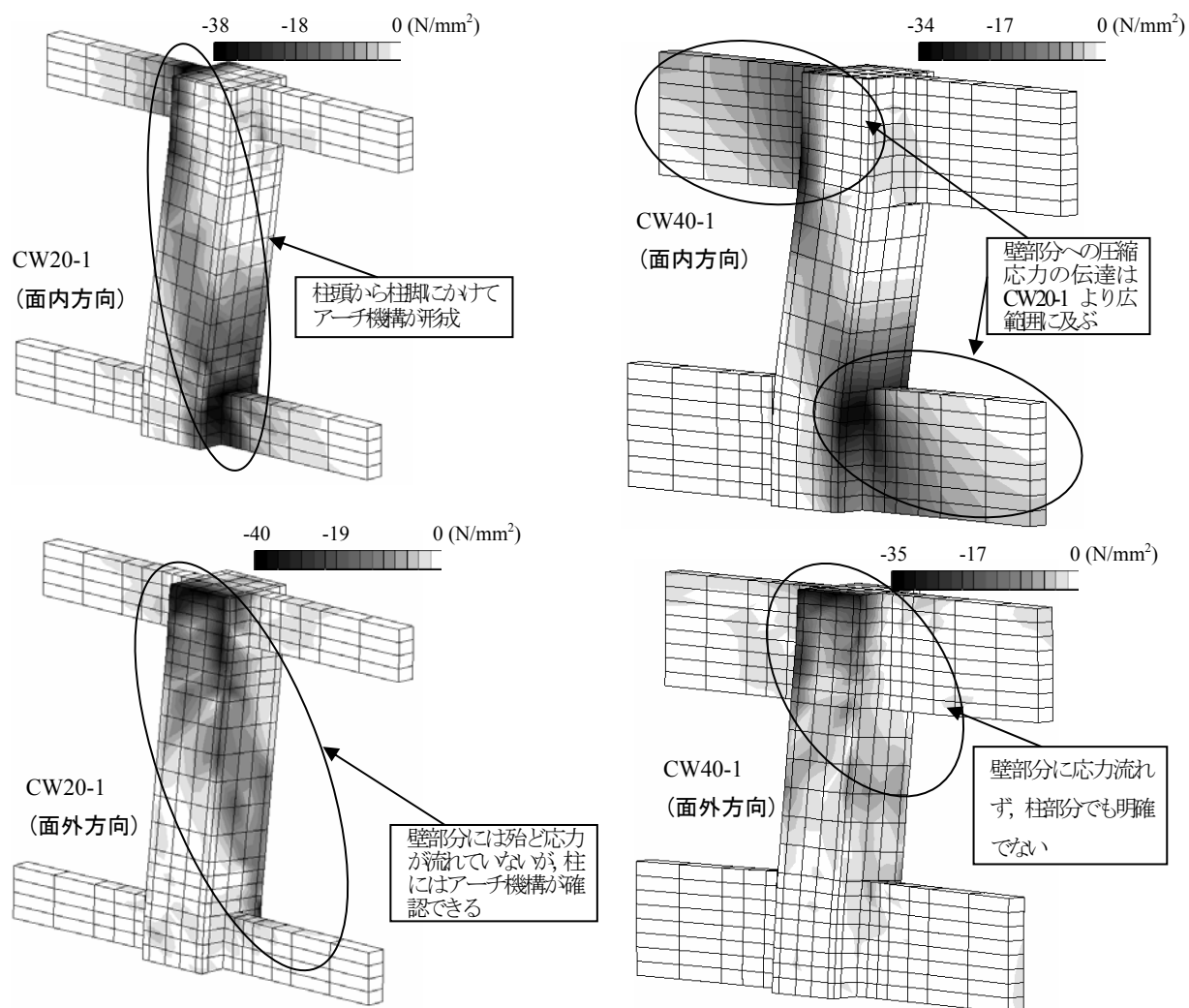
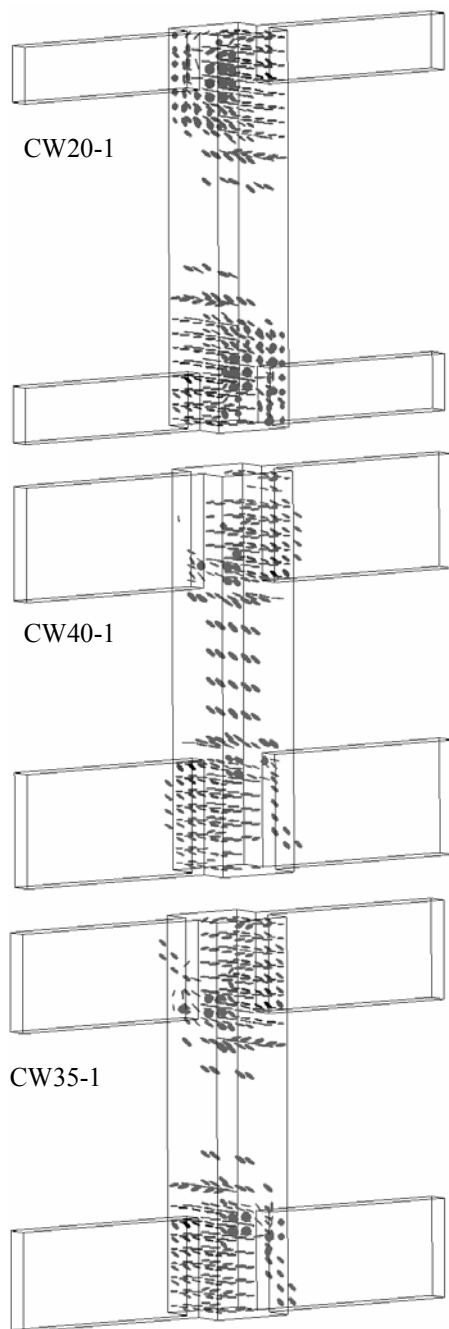


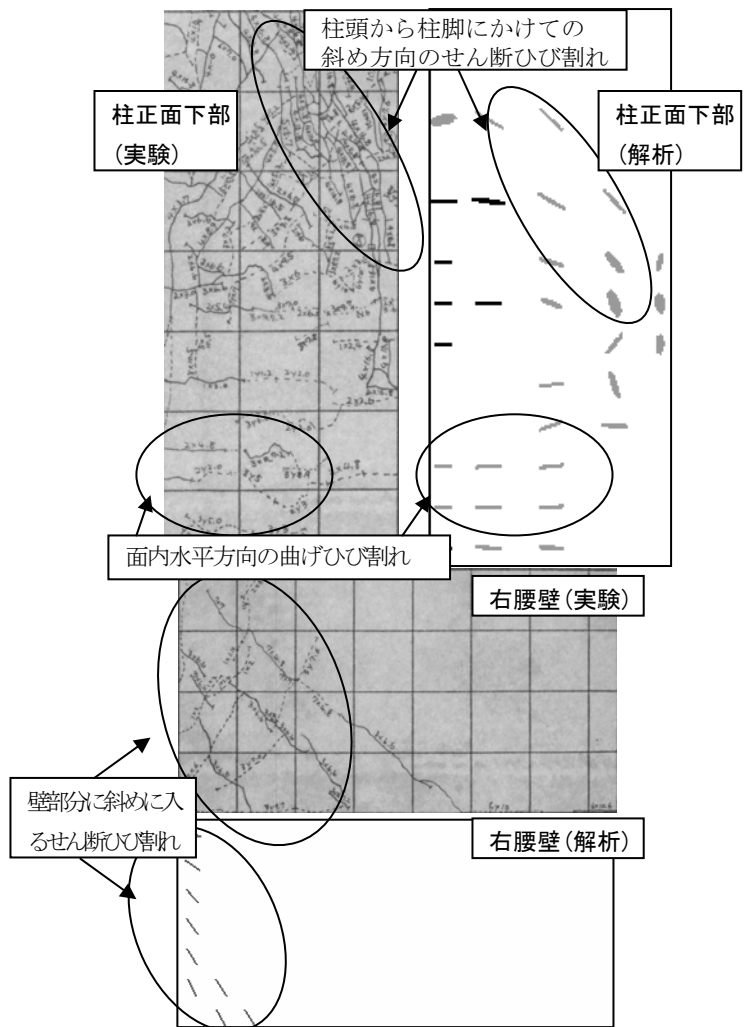
図-8 最小主応力コンター・変形図



図－9 ひび割れ状況

4. まとめ

- 1) 最大層せん断力については全体として実験結果と比較してほぼ近い結果となったが、耐力以降には差が見られた。また、履歴形状などは実験結果と近い形状が得られた。
- 2) 面内方向への加力と面外方向への加力によって、最大層せん断力や変形、コンクリートのひずみ量などに差が生じることが解析からも確認できた。
- 3) 腰壁・垂壁の付加により柱は短柱化し脆性的な破壊が顕著となるが、壁の高い CW40-1 では柱中央部におけるせん断ひび割れが増加するなど、壁の高さにより脆性破壊の程度が変わる。また、CW35-1 では



図－10 ひび割れ状況の比較

せん断ひび割れがやや少なくなっており、横補強筋量を増加させることによりある程度脆性破壊を防止することが可能となる。

4) 面外方向加力における腰壁・垂壁の影響の高さによる違いを応力コンターなどから確認することが出来た。

参考文献

- 1) 城攻，後藤康明，柴田拓二：二方向水平加力を受ける腰壁・垂壁付 RC 柱の破壊性状について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No.3, pp.507-512, 1988
- 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，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.67-70, 2004.9
- 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) 森田司郎，角徹三：鉄筋コンクリート部材の引張試験による付着効果の研究，セメント技術年報，Vol.18, pp.426-430, 1964