

3.2.7 実大鉄筋コンクリート建物の三次元動的解析のための鉄筋コンクリート材料に関する要素試験

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成16年度業務目的

(2) 平成16年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 鉄筋コンクリート耐震壁の静的解析モデルの設定
 - 2) 鉄筋コンクリート耐震壁の静的解析の実行
- (c) 業務の成果
 - 1) 鉄筋コンクリート耐震壁試験体の破壊解析の結果および考察
 - 2) 鉄筋コンクリート構造物の破壊解析とコンクリート構成モデルの精度
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成14～16年度業務のまとめ

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 実大鉄筋コンクリート建物の三次元動的解析のための鉄筋コンクリート材料に関する要素試験

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
清水建設（株）技術研究所 社会基盤技術センター 社会インフラ技術グループ	主任研究員	長谷川 俊昭	has@shimz.co.jp

(c) 業務の目的

コンクリート材料の構成モデル（応力-ひずみ関係）や破壊モデルは、実大鉄筋コンクリート建物の三次元震動破壊シミュレーションの解析精度を大きく支配するので、解析に先立って用いるコンクリート材料の構成モデルと破壊モデルの能力や限界を評価・検証しておくことが必要であり、そのような評価・検証のために実施される構成モデルベンチマーク有限要素解析の方法を確立することは非常に重要である。そこで、コンクリートの構成モデルや破壊モデルの現状調査を行ない、構成モデルベンチマーク有限要素解析の手法を開発する。そしてベンチマーク有限要素解析によって精度検証を行なった構成モデルを用いて鉄筋コンクリート試験体の静的破壊実験をシミュレーション解析し、鉄筋コンクリート構造物の破壊解析に及ぼすコンクリート構成モデルの精度の影響ならびにコンクリート構成モデルと鉄筋コンクリート構造物の破壊応答特性との関係などについて考察する。

(d) 3 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成14年度：

- a) コンクリート材料の構成モデルや破壊モデルの現状調査ならびに文献調査を行ない、現在広く用いられているコンクリート材料の構成モデルと破壊モデルの能力や限界を明らかにした。
- b) 一般的に使用されているタイプの構成モデルについてその精度や能力を見極めるベンチマーク有限要素解析の手法を開発した。

2) 平成15年度：

- a) 開発した構成モデルベンチマーク有限要素解析の手法を応用し、現状の実務的な有限要素解析で比較的一般に採用されているコンクリート構成モデル、破壊モデルについて精度検証を行なった。その結果、2軸応力状態と3軸応力状態において大きな精度の差異が生じることや最大応力以降の応答をとらえることが困難であることなどが明らかになった。
- b) 解析手法検証用解析の対象として適切な既往の静的部材実験を調査し、解析手法検証用試験体を選定した。

3) 平成16年度：

- a) 解析手法検証用の鉄筋コンクリート試験体の静的破壊シミュレーション解析として本プロジェクトで実施された鉄筋コンクリート造耐震壁の静的加力実験に関する解析を行なう。
- b) 鉄筋コンクリート造耐震壁の解析において使用する構成モデル、破壊モデルの精度とそのモデルによって構造解析で得られる構造応答との関係について調査する。
- c) 総合評価を行なう。
- d) 全体のまとめを行なう。

(e) 平成16年度業務目的

前年度に選定・設定したコンクリート材料の構成モデルを用いて本プロジェクト内で実施された鉄筋コンクリート耐震壁の静的破壊実験¹⁾の有限要素破壊シミュレーション解析を行なう。その有限要素解析から得られる結果を通して鉄筋コンクリート耐震壁の構造特性、破壊性状について解析的な見地より考察を行なう。また、設定したコンクリート構成モデルと鉄筋コンクリート耐震壁の応答特性ならびに破壊特性との関係を調査し、鉄筋コンクリート構造物の破壊解析に及ぼすコンクリート構成モデルの精度の影響ならびにコンクリート構成モデルのベンチマーク解析の意義について考察する。

(2) 平成16年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度に開発した構成モデルベンチマーク有限要素解析手法を平成15年度に適用しその精度や能力を検証したコンクリート構成モデルを用いて、本プロジェクト内で実施された鉄筋コンクリート耐震壁の静的破壊実験の有限要素解析を行なった。解析は実験の構造応答や破壊性状を良好に再現することができた。これは本解析で選定したコンクリート構成モデルの能力に負うところが大きいと考えられる一方、その構成モデルの能力不足によって本破壊解析の発散が生じたと思われ、破壊解析の事前にベンチマーク有限要素解析を行なうことの重要性が指摘された。解析における要素の応力-ひずみ応答が、構造全体の破壊メカニズムを良好に説明できることが示された。これらのことより構造物において生じる応力-ひずみ応答や破壊挙動を精度よく再現できる構成モデルが鉄筋コンクリート構造物の破壊解析において非常に重要であることが強調された。

(b) 業務の実施方法

1) 鉄筋コンクリート耐震壁の静的解析モデルの設定

本プロジェクト内で実施された豊橋技術科学大学の鉄筋コンクリート耐震壁の静的破壊実験¹⁾をシミュレーション解析するための有限要素解析モデル化を行なった。以下に設定した構成モデルならびに解析条件を示す。

a) 圧縮応力場に関するコンクリートの弾塑性モデルの設定

i) コンクリートの1軸圧縮強度 f_c' は、静的破壊実験¹⁾の第1層壁部コンクリートの $f_c'=26.0 \text{ N/mm}^2$ とした。

ii) コンクリートの弾性係数 E_c 、ポアソン比 ν_c は、1軸圧縮強度に基づき、

CEB-FIP Model Code 1990²⁾より $E_c=30\text{k N/mm}^2$ 、 $\nu_c=0.2$ と設定した。

- iii) Drucker-Prager の降伏条件に基づく等方ひずみ硬化-軟化塑性モデル。
- iv) Drucker-Prager の塑性ポテンシャル関数を降伏条件と一致させる関連流れ則。
- v) Drucker-Prager の降伏関数を支配する粘着強度と内部摩擦角は Kupfer ら³⁾のコンクリートの 2 軸圧縮応力場の破壊曲面の実験データに適合するように設定した。
- vi) CEB-FIP Model Code 1990²⁾の圧縮応力-ひずみ関係式に適合するように相当(粘着) 応力 c -等価塑性ひずみ κ 関係 (図 1) を決定した。

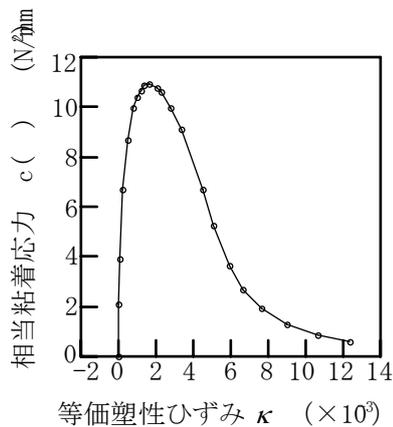


図 1 相当(粘着) 応力 c -等価塑性ひずみ κ 関係

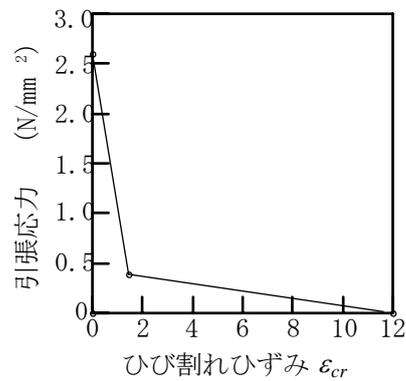


図 2 引張応力-ひび割れひずみ関係

- b) 引張応力場に関するコンクリートのひずみ軟化ひび割れモデルの設定
 - i) 1 軸引張強度 f_t は、1 軸圧縮強度に基づき CEB-FIP Model Code 1990²⁾ から算定し、 $f_t=2.6 \text{ N/mm}^2$ と設定した。
 - ii) ひび割れ閾角度を 60° とした固定多方向ひび割れモデル。
 - iii) CEB-FIP Model Code 1990²⁾ の破壊エネルギー $G_F=54.9 \text{ N/m}$ に基づきひずみ軟化関係を 2 直線で近似した。設定した引張応力-ひび割れひずみ関係を図 2 に示す。
 - iv) 対象とする鉄筋コンクリート耐震壁は十分に鉄筋補強されているため、ひび割れ帯モデルなどを適用しない。すなわち、ひび割れにともなう有限要素の消散破壊エネルギーを一定に保持するような **regularization** を行っていない。
- c) コンクリートのひび割れ発生にともなうせん断低減モデルの設定
 - i) ひび割れ発生にともなうせん断剛性をゼロまで低減するモデルを設定した。
- d) 鉄筋の構成モデルの設定
 - i) 実験で使用され報告されている異形棒鋼 D6、D10、D13、D25 の降伏強度、引張強度、ヤング係数を用いて Von Mises の降伏条件に基づく弾性-完全塑

性-等方ひずみ硬化塑性モデルを設定した。

ii) 埋込み鉄筋モデルを採用しコンクリートとの付着作用による平均応力モデルは考慮していない。

e) 有限要素メッシュデータならびに埋込み鉄筋要素データの設定

図 3 は、本解析で対象とする豊橋技術科学大学で行なわれた 2 層鉄筋コンクリート耐震壁の静的加力実験の試験体に関する有限要素モデルである。各部材における奥行方向の厚さの違いをモデル化するため、ならびにコンクリート材料と鋼材とを区別するために、試験体の有限要素モデルは 9 種類の要素グループで構成されている。図 4 は、コンクリート要素に設置された埋込み鉄筋要素を示すものである。鉄筋コンクリート耐震壁の多くの有限要素解析では、鉄筋を構成モデルとして考慮し、幾何学的に要素として離散化しないことが多い。しかしながらそのような RC 要素手法は、鉄筋の詳細な情報を解析に反映させることが不可能である。本解析では細大もらさず実験試験体の鉄筋を埋込み鉄筋要素として評価することとした。

f) 境界条件、荷重データなどの作成、設定

g) 弧長増分制御解析法、収束計算法に関する設定

豊橋技術科学大学の試験では、試験体の幾何形状を変えずにせん断スパン比の調整が可能となるように制御するために、せん断力に応じて左右の軸力を変動させ曲げモーメントを載荷することを行なっている。そのため、本解析では水平力と軸力の比率を制御する弧長増分制御法を採用した。すなわち載荷点の水平方向 (x 方向) 変位のみを超球面型拘束条件に考慮した弧長増分制御法 (間接変位増分制御法) を用いた。各解析増分ステップでは原則として Newton-Raphson 法による収束計算を行ない、収束条件としてはエネルギーノルムで 0.01% とした。なお、破壊が進行しこの収束条件が満足できなくなった場合には収束計算を打ち切り次の解析ステップへ不釣り合い力を持ち越す方法を採用した。さらに破壊が局所化すると特定の要素剛性マトリックスが非常に不安定になりマトリックス計算が不能に陥るため、そのような解析ステップからは全体剛性マトリックスを固定させた計算を行ない解の安定化をはかった。これらの方法は、本解析ならびに事前ケーススタディや小規模構造モデルのベンチマーク解析を実施しながら試行錯誤で設定したものである。

2) 鉄筋コンクリート耐震壁の静的解析の実行

本解析で用いたプログラムは汎用有限要素解析コード DIANA⁴⁾ であり、解析は豊橋技術科学大学で行なわれた 2 層鉄筋コンクリート耐震壁の静的加力実験の試験体 A および B を対象として各々、解析ケース A01 および B01 を実施した。本解析は弧長増分制御法を用いているなどの理由で収束解を得ることが非常に困難であり、ここで報告する解析ケースは形式的には各々 1 ケースであるが、本報告書に掲載する結果は何回もの計算を行なった結果得られたものである。

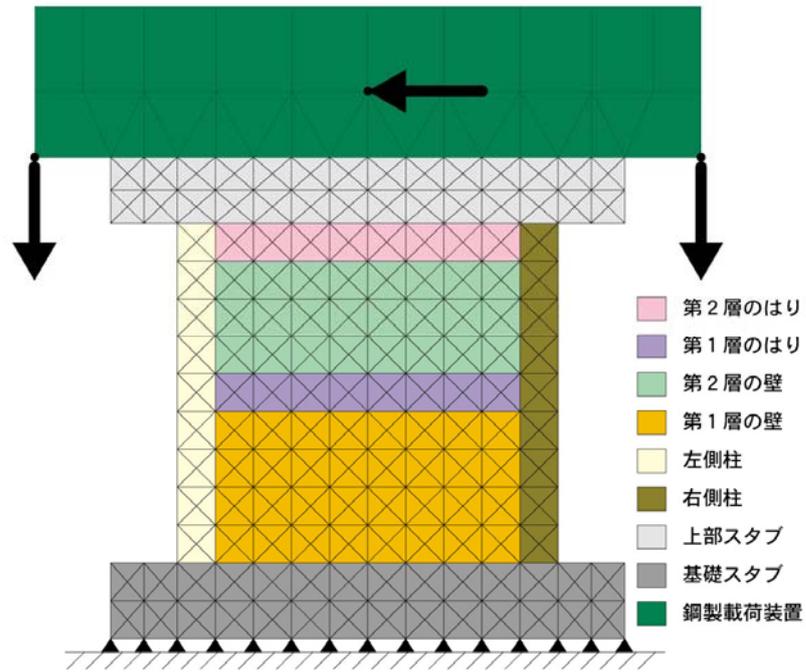


図3 2層鉄筋コンクリート耐震壁試験体の有限要素モデル

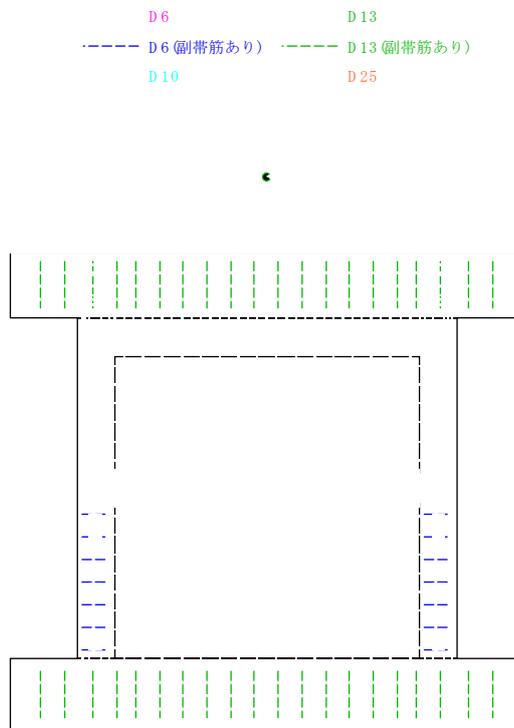


図4 2層鉄筋コンクリート耐震壁試験体の埋込み鉄筋要素

(c) 業務の成果

1) 鉄筋コンクリート耐震壁試験体の破壊解析の結果および考察

a) せん断力-変位関係

図5および図6は、解析ケース A01 および B01 から得られた鉄筋コンクリート耐震壁試験体 A および B に関するせん断力-水平変位関係の解析結果を実験と比較したものである。なお、実験のせん断力-水平変位関係はくりかえし載荷曲線の包絡線として描いたものである。解析の初期剛性は実験に比較して大きくなっていったため、コンクリートの圧縮強度に基づいて通常仮定されるコンクリートの弾性係数よりも小さな値を仮定し直して計算したが、このように初期の荷重段階より解析のせん断力-水平変位関係が実験値から乖離する結果となった。このような解析と実験の乖離は通常よく観察されており、その原因はコンクリートの弾性係数のみではなく、様々な部位での変形ロスに起因すると思われる。このような初期剛性の乖離がなければ解析と実験のせん断力-水平変位関係はかなりよく一致するものと思われる。本解析は実験のひび割れ耐力、降伏耐力、最大耐力を比較的良好にとらえているといえる。しかしながら最大耐力以降の応答に関しては、弧長増分制御法を採用していることも原因して収束解を得ることができず解の発散で早期に解析不能となってしまった。

b) 変形性状

図7および図8は、解析ケース A01 および B01 から得られた最大耐力時の試験体 A および B の変形性状である（両図の変形倍率は一致していない）。少なくとも最大耐力の時点では試験体 A および B ともに曲げ変形モードが卓越していることがわかる。しかしながら最大耐力以降はひび割れが局所化しそこにせん断変形が集中するためみかけ上試験体はせん断破壊と称される破壊モードを呈すると考えられる。

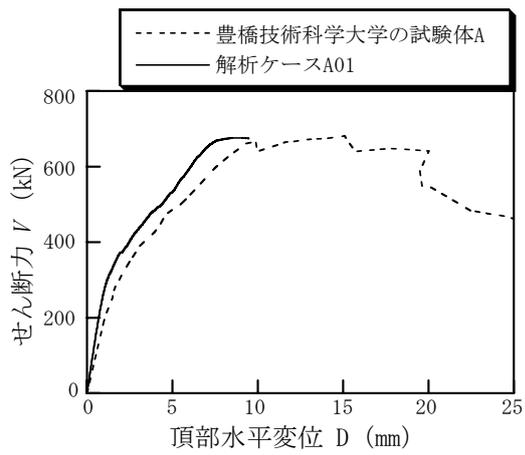


図5 試験体 A のせん断力-水平変位関係

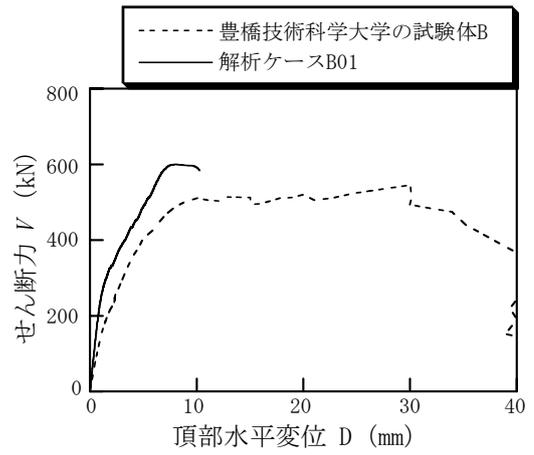


図6 試験体 B のせん断力-水平変位関係

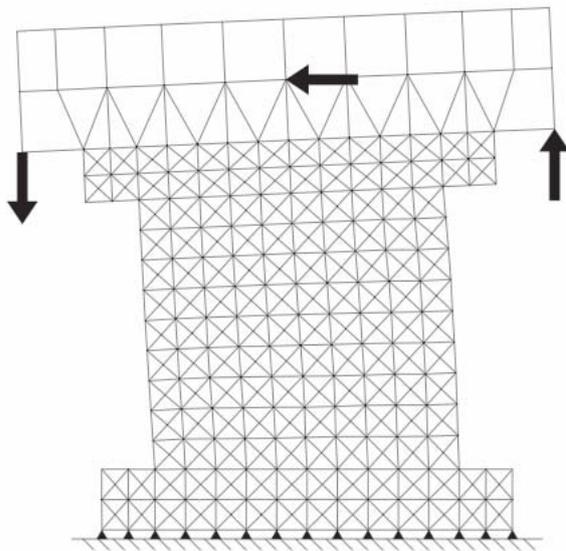


図7 解析ケース A01 の最大耐力における変形性状

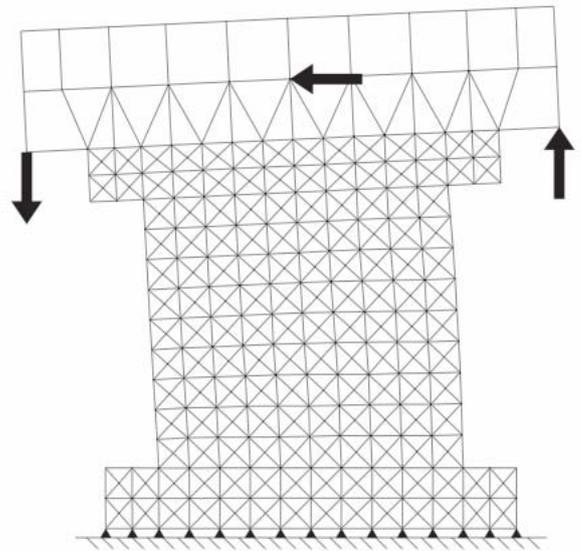


図8 解析ケース B01 の最大耐力における変形性状

c) ひび割れ破壊性状と最大主ひずみ分布

図 9、10、11、12、13 は、解析ケース A01 の各荷重ステップのせん断力レベル $V/V_{max}=0.50、0.62、0.72、0.82、1.00$ (V_{max} : 最大せん断耐力) におけるひび割れ性状を示したものである。これらの図は、各要素のガウス積分点においてひび割れが発生した、すなわち各要素のガウス積分点の応力が引張強度に達したと判定されたものをひび割れの方向とともに図示したものである。一方、図 14、15、16、17、18 は、同様に解析ケース A01 の各荷重ステップのせん断力レベル $V/V_{max}=0.50、0.62、0.72、0.82、1.00$ における最大主ひずみの値と方向を線の太さと方向で図示したものである。なお、図示した最大主ひずみ線は、図 2 で仮定したコンクリートの 2 直線引張軟化関係の折点より大きなひび割れひずみ値を示したものである (ただし各図でのひび割れ線の太さのスケールは一致していない)。ゆえに図 9 ~ 13 が微細なひび割れをも表示している図と解釈されるのに対して、図 14 ~ 18 はかなり太い主なひび割れを図示していると考えられる。比較のために実験における試験体 A の最終ひび割れ性状を図 19 に示した。これらの図より、本解析が試験体に発生し進展するひび割れの状態 (特に方向) を再現していると思われる。図 20 および図 21 は解析ケース B01 の $V/V_{max}=1.00$ つまり最大せん断耐力の荷重ステップにおけるひび割れ性状および最大主ひずみ分布を示したものであり、図 22 には比較のために実験における試験体 B の最終ひび割れ性状を示してある。解析ケース B01 の場合も解析ケース A01 と同様に実験のひび割れ性状を良好に再現することができている。

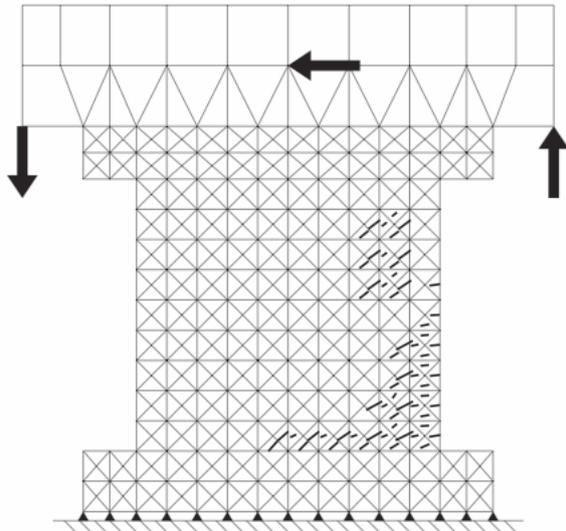


図 9 解析ケース A01 のひび割れ性状
($V/V_{max}=0.50$)

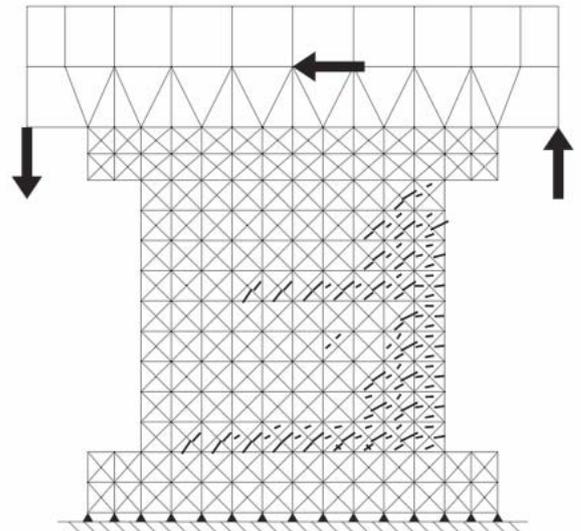


図 10 解析ケース A01 のひび割れ性状
($V/V_{max}=0.62$)

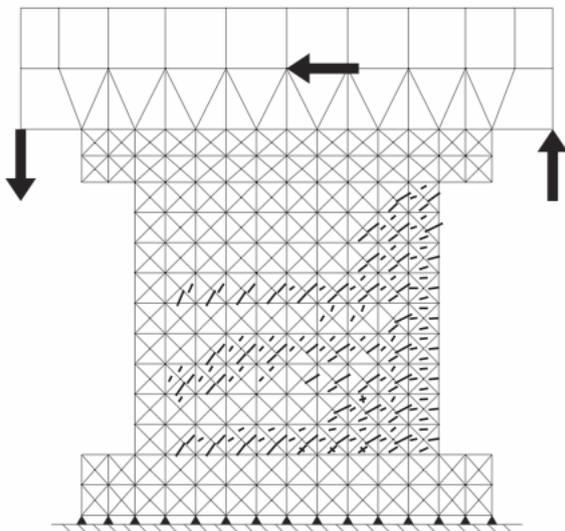


図 11 解析ケース A01 のひび割れ性状
($V/V_{max}=0.72$)

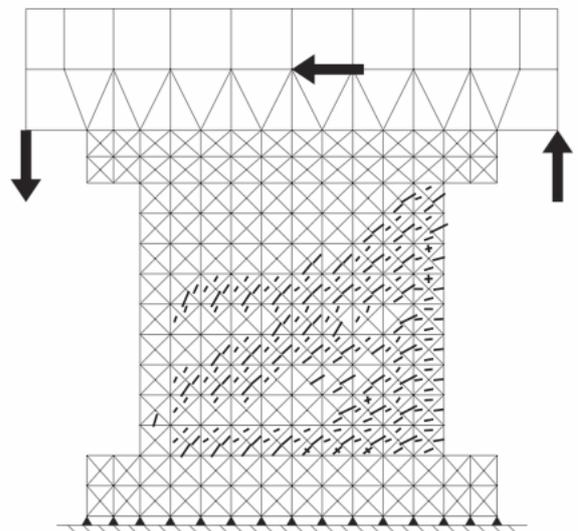


図 12 解析ケース A01 のひび割れ性状
($V/V_{max}=0.82$)

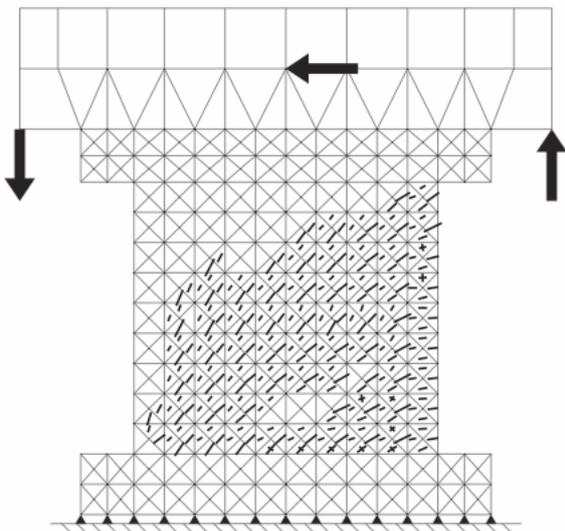


図 13 解析ケース A01 のひび割れ性状
($V/V_{max}=1.00$)

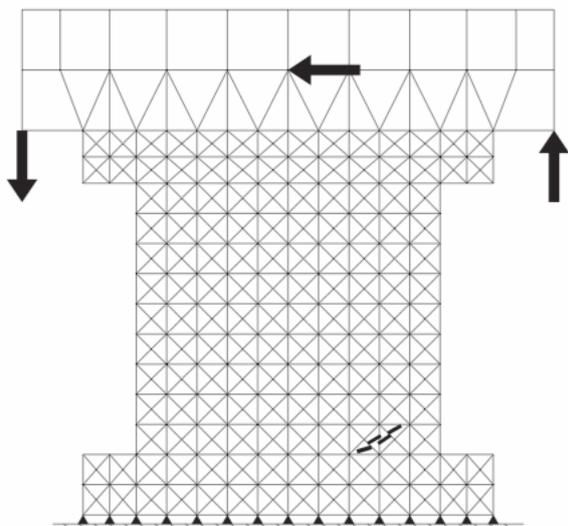


図 1 4 解析ケース A01 の最大主ひずみ分布 ($V/V_{max}=0.50$)

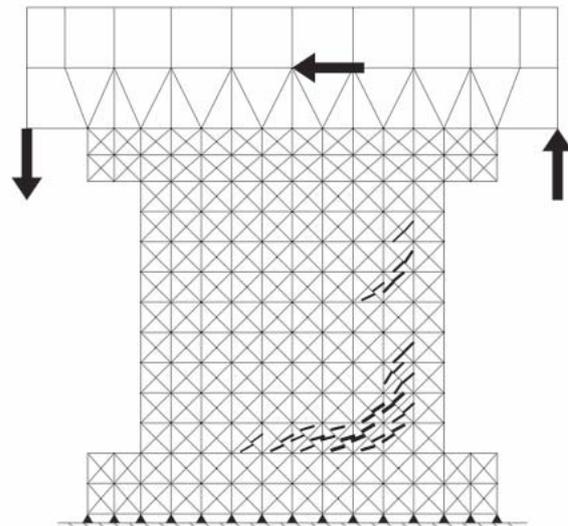


図 1 5 解析ケース A01 の最大主ひずみ分布 ($V/V_{max}=0.62$)

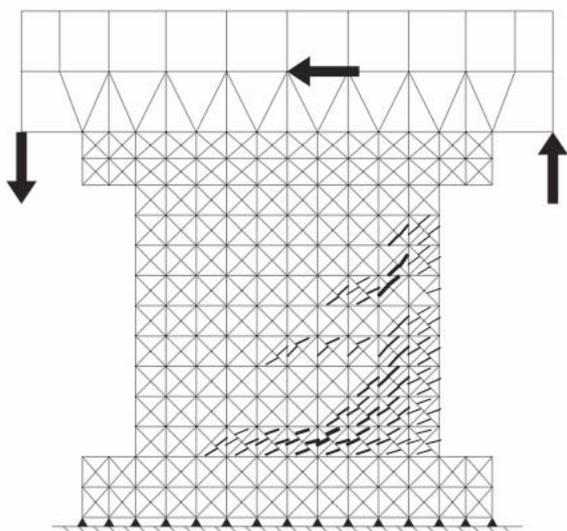


図 1 6 解析ケース A01 の最大主ひずみ分布 ($V/V_{max}=0.72$)

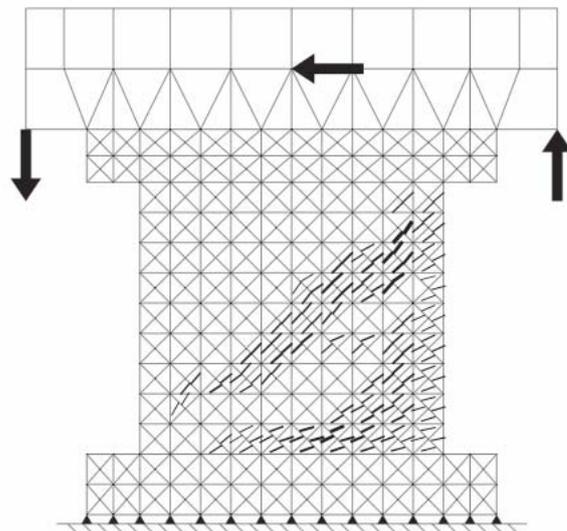


図 1 7 解析ケース A01 の最大主ひずみ分布 ($V/V_{max}=0.82$)

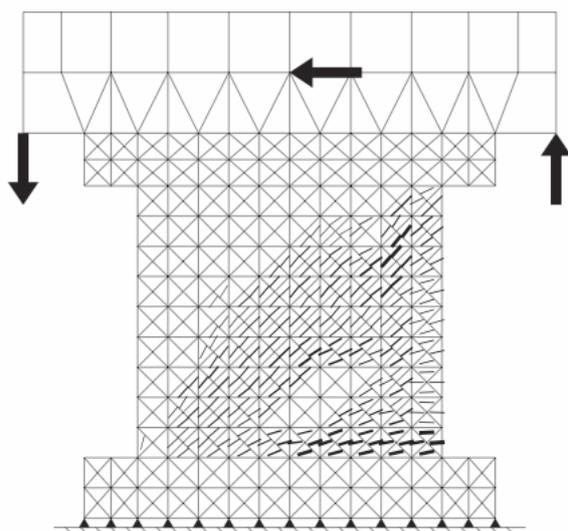


図 1 8 解析ケース A01 の最大主ひずみ分布 ($V/V_{max}=1.00$)

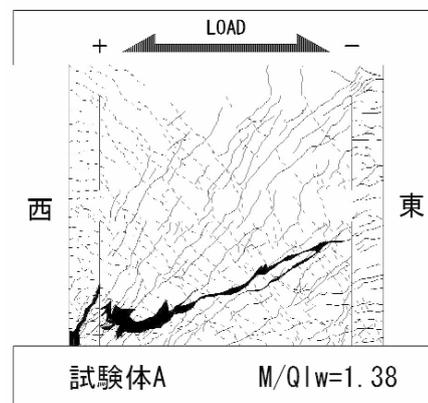


図 1 9 試験体 A の最終ひび割れ性状

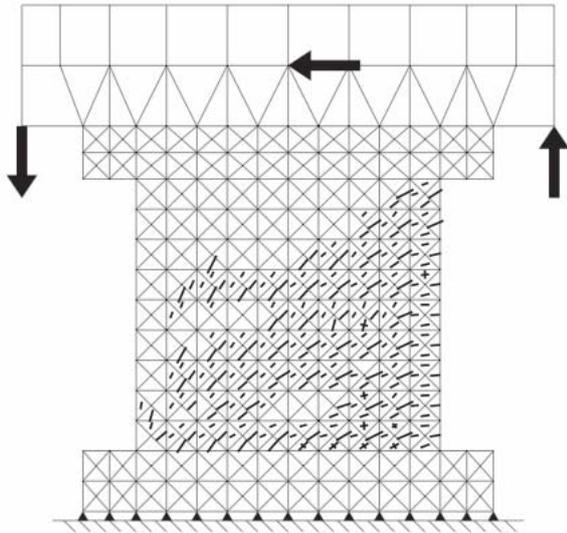


図 2 0 解析ケース B01 のひび割れ性状 ($V/V_{max}=1.00$)

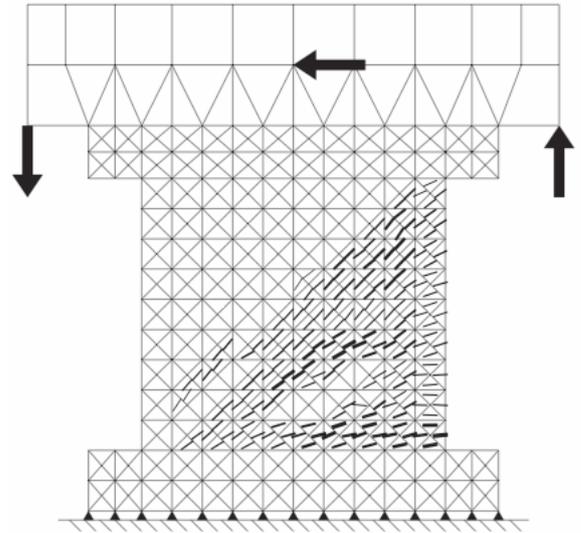


図 2 1 解析ケース B01 の最大主ひずみ分布 ($V/V_{max}=1.00$)

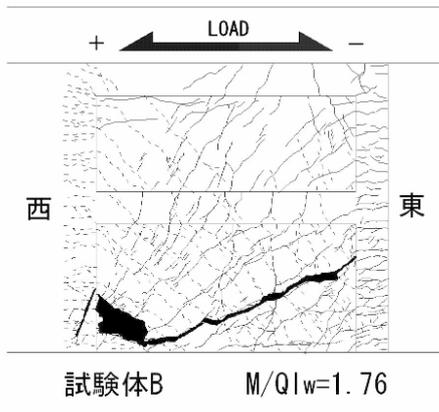


図 2 2 試験体 B の最終ひび割れ性状

c) 最小主ひずみ分布と最小主応力分布

図 2 3 と図 2 4 および図 2 5 と図 6 は、解析ケース A01 および B01 から得られた最大耐力時の最小主ひずみ分布と最小主応力分布である。これらの図より本試験体には右上から左下へ向かうコンクリートの圧縮ストラットが発達していたことが理解できる。その応力の流れ状況は本実験のふたつの試験体のせん断スパン比の違いでは有意な差異として現れないと考えられる。

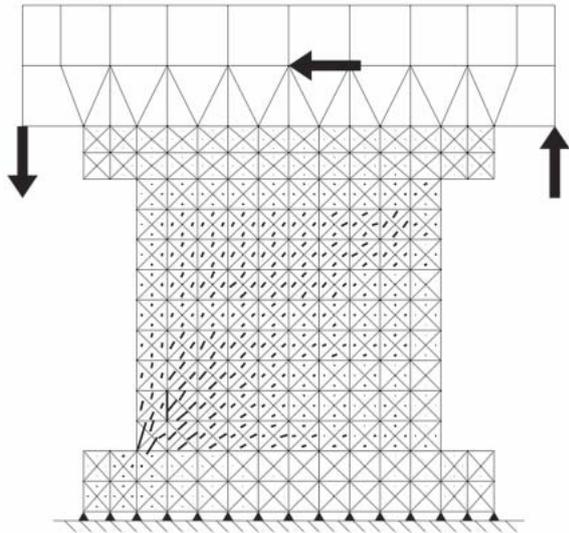


図 2 3 解析ケース A01 の最小主ひずみ分布 ($V/V_{max}=1.00$)

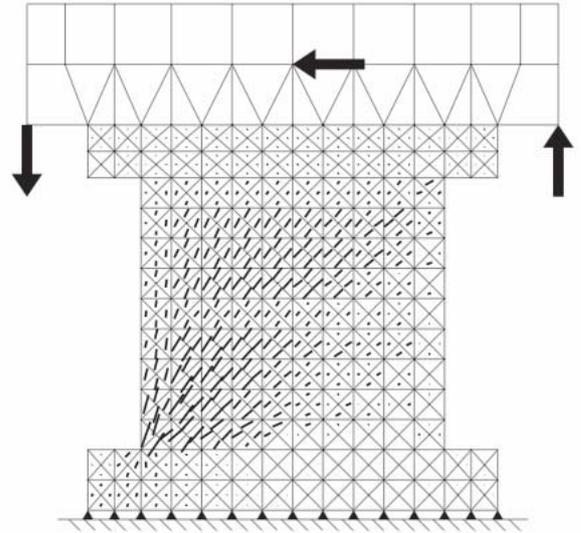


図 2 4 解析ケース A01 の最小主応力分布 ($V/V_{max}=1.00$)

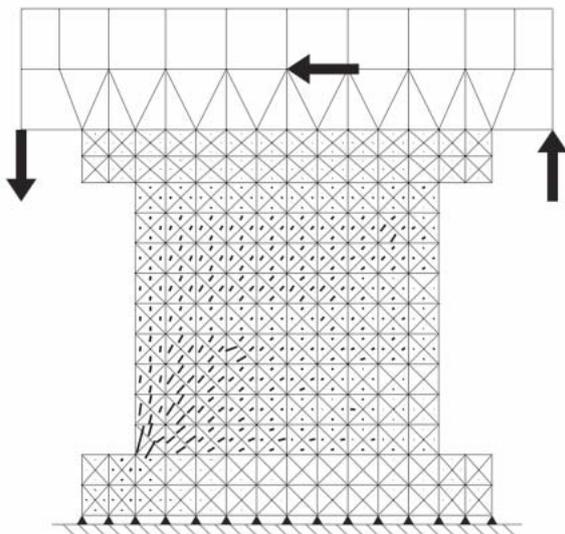


図 2 5 解析ケース B01 の最小主ひずみ分布 ($V/V_{max}=1.00$)

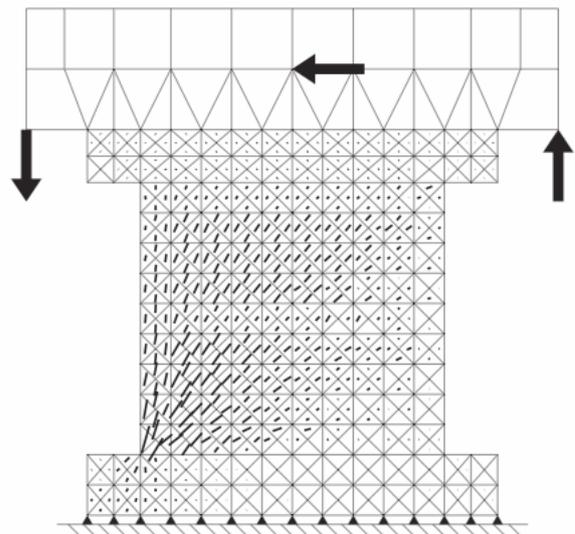


図 2 6 解析ケース B01 の最小主応力分布 ($V/V_{max}=1.00$)

d) 応力-ひずみ応答

試験体の構造応答性状や破壊性状をより詳細に検討するために、解析ケース A01 においてクリティカルな破壊応答を示す有限要素を取り上げ、その応力-ひずみ応答を検討することにした。

図 2 7 は、応力-ひずみ応答を検討した有限要素の位置を示すものである。図 2 8 は実験において最初にコンクリートの圧壊が観察された柱の基部の要素 123 の応力-ひずみ応答を示したものである。この要素 123 に圧縮軟化つまり圧壊が開始した直後に最大耐力に至ったことがわかり、本解析が実験の破壊メカニズムを良好にとらえていることが理解できる。要素 123 は柱のフープ筋の拘束効果のために 2 軸圧縮状態となっており、実現象での 3 軸圧縮状態を平面応力解析で再現しているものと解釈される。

図 2 9 および図 3 0 は柱の基部と同様に最初に圧壊が開始した壁の基部の要素 114 および 154 の応力-ひずみ応答を示したものである。これらの要素では最大耐力時に圧壊に達していないことがわかる。すなわち本解析によれば、本耐震壁構造の圧縮破壊は壁部からではなく柱部から開始することが明らかにされたのである。また、基礎スタップに近い壁部の要素 114 の最小主応力レベルは基礎スタップから離れた壁部の要素 154 のそれよりも低いことが最大耐力時のそれらの値を比較することで理解できる。そのため実験では基礎スタップから少し離れた壁部すなわち要素 154 の部位で激しい圧壊性状を呈したものと考えられる。

以上のように要素の応力-ひずみ応答は、構造全体の破壊メカニズムを良好に説明できることが多く、それゆえに構造物において生じる応力-ひずみ応答や破壊挙動を精度よく再現できる構成モデルが鉄筋コンクリート構造物の破壊解析において非常に重要であるといえる。

図 3 1 および図 3 2 は、本構造の曲げ引張側の壁基部に位置する要素 139 および 151 の応力-ひずみ応答である。これらの要素は非常に大きな引張軟化ひずみを生じているが、その引張軟化領域において非常におかしの応力-ひずみ応答を示していることがわかる。これらの応答が生じた際には解析プログラムからひび割れモデルのルーチンで多方向ひび割れの算定に破綻をきたしたという警告メッセージが発せられていた。すなわちこれらの現象はひずみ軟化と多方向ひび割れを取り扱う構成モデルの能力不足に原因あり、解析はこれらの原因によって発散に至ったものと考えられる。

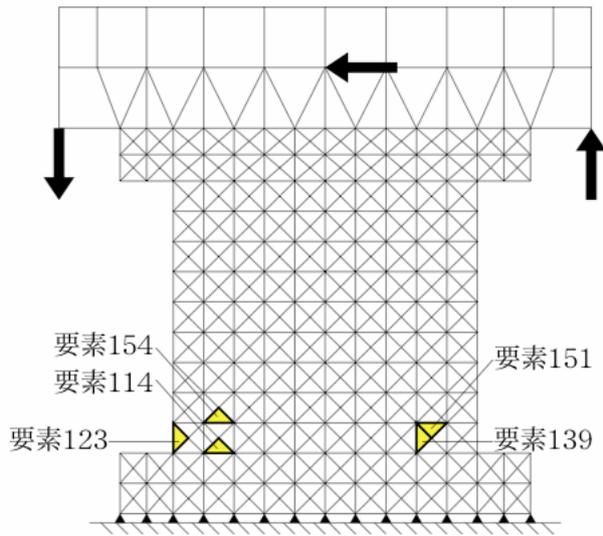


図 2 7 応力-ひずみ応答を検討する有限要素 (解析ケース A01)

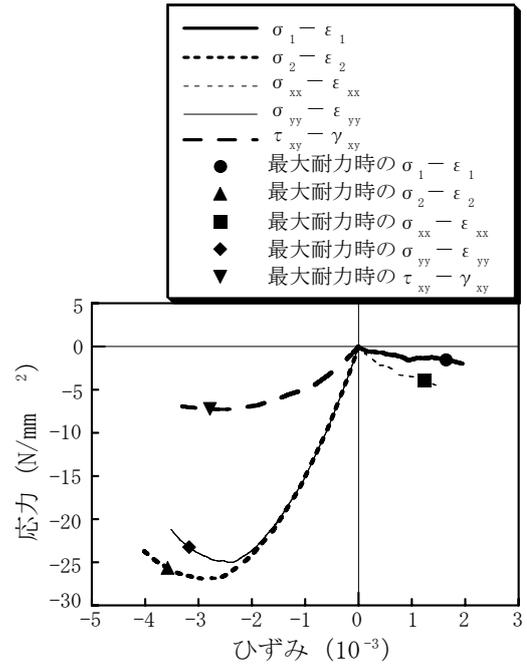


図 2 8 要素 123 の応力-ひずみ応答 (解析ケース A01)

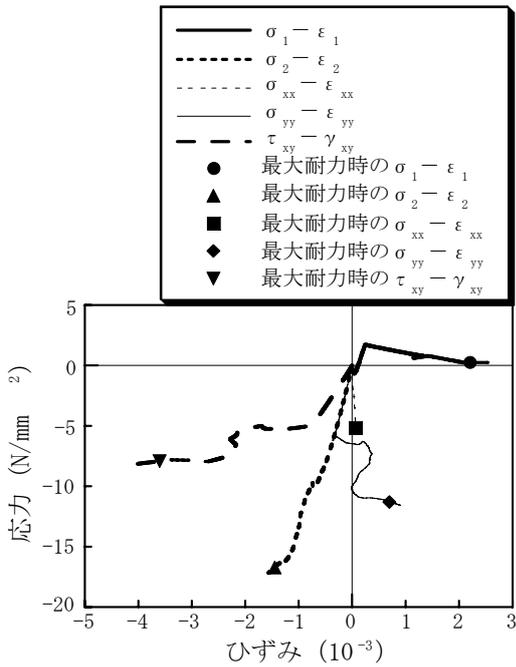


図 2 9 要素 114 の応力-ひずみ応答 (解析ケース A01)

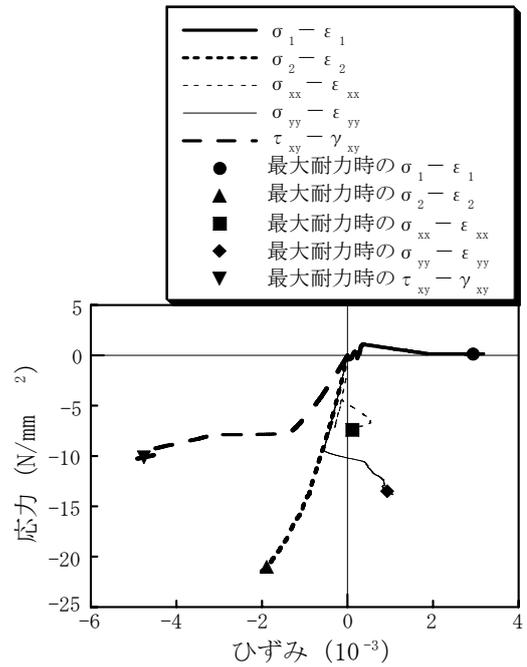


図 3 0 要素 154 の応力-ひずみ応答 (解析ケース A01)

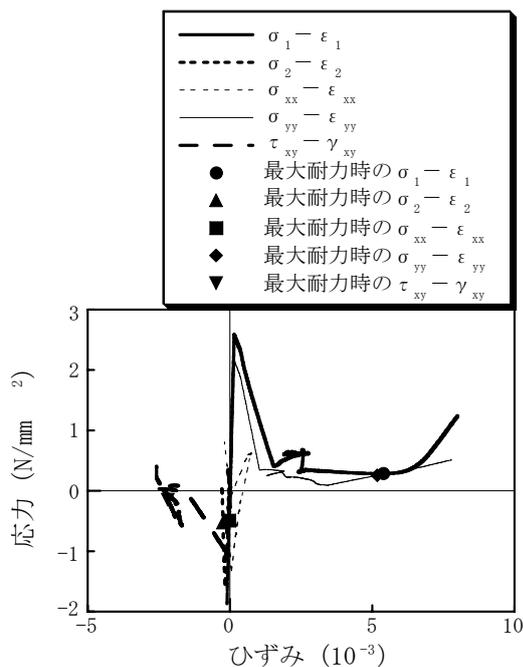


図 3 1 要素 139 の応力-ひずみ応答 (解析ケース A01)

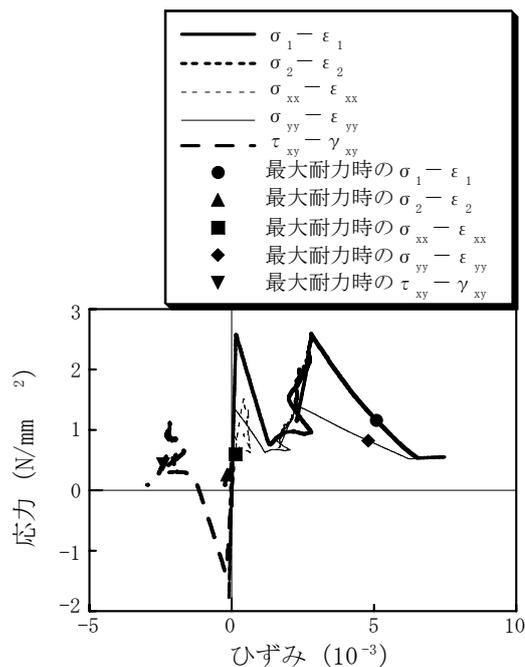


図 3 2 要素 151 の応力-ひずみ応答 (解析ケース A01)

2) 鉄筋コンクリート構造物の破壊解析とコンクリート構成モデルの精度

前述の考察からも明らかなように、鉄筋コンクリート構造物の破壊解析ではここで用いるコンクリート構成モデルの精度や能力、ロバスト性が成否の鍵となることはいままでの間もない。鉄筋コンクリートの破壊解析においては遭遇する収束不能や発散の原因がコンクリートの構成モデルの能力不足や精度不足に起因することが少なくないと考えられる。精度の高い鉄筋コンクリート構造破壊解析を実現するためには、使用するコンクリート構成モデルの精度、限界、能力、ロバスト性を見極めるベンチマーク解析を十分に行なう必要があると考えられる。

(d) 結論ならびに今後の課題

- a) 平成 14 年度に開発した構成モデルベンチマーク有限要素解析手法を平成 15 年度に適用しその精度や能力を検証したコンクリート構成モデルを用いて、本プロジェクト内で実施された鉄筋コンクリート耐震壁の静的破壊実験の有限要素解析を行なった。解析は実験の構造応答や破壊性状を良好に再現することができた。これは本解析で選定したコンクリート構成モデルの能力に負うところが大きいと考えられる一方、その構成モデルの能力不足によって本破壊解析の発散が生じたと思われ、破壊解析の事前にベンチマーク有限要素解析を行なうことの重要性が理解される。
- b) 解析における要素の応力-ひずみ応答が、構造全体の破壊メカニズムを良好に説明

できることが示され、それゆえに構造物において生じる応力-ひずみ応答や破壊挙動を精度よく再現できる構成モデルが鉄筋コンクリート構造物の破壊解析において非常に重要であるといえる。

- c) 今後は本研究で取り上げたような単純なベンチマーク解析の応力経路やひずみ経路のみではなく、実際の鉄筋コンクリート構造物やその解析において生じるような複雑で構成モデルの能力限界に関係する条件などについても精度検証を続けていく必要があると考えられる。

(e) 引用文献

- 1) 秋田知芳、倉本洋、松井智哉、島崎伸彦：鉄筋コンクリート造耐震壁の静的加力実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.2, pp.577-582, 2004.
- 2) CEB-FIP Model Code 1990: Comite Euro-International du Beton, 1993.
- 3) Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., and Rusch, H.: Behavior of concrete under biaxial stresses, ACI Journal, Vol. 66, No. 8, pp.656-666, 1969.
- 4) Witte, F. & Feenstra, P. 1998. DIANA - Finite element analysis, User's manual, Release 7. Delft: Building and Construction Research, Netherlands Organization for Applied Scientific Research.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等
なし

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願
なし

- 2) ソフトウェア開発
なし

- 3) 仕様・標準等の策定
なし

(3) 平成14～16年度業務のまとめ

- 1) コンクリート材料の構成モデルや破壊モデルの現状調査ならびに文献調査を行い、現在広く用いられているコンクリート材料の構成モデルと破壊モデルの能力や限界を明らかにした。
- 2) 一般的に使用されているタイプの構成モデルについてその精度や能力を見極めるベンチマーク有限要素解析の手法を開発し、それを応用して現状の実務的な有限要素解析で比較的一般に採用されているコンクリート構成モデル、破壊モデルについて精度検証を行なった。その結果、2軸応力状態と3軸応力状態において大きな精度

の差異が生じることや最大応力以降の応答をとらえることが困難であることなどが明らかになった。

- 3) 開発した構成モデルベンチマーク有限要素解析手法によって精度や能力を検証したコンクリート構成モデルを用いて、本プロジェクト内で実施された鉄筋コンクリート耐震壁の静的破壊実験の有限要素解析を行なった。その解析は実験の構造応答や破壊性状を比較的良好に再現することができた。これは本解析で選定したコンクリート構成モデルの能力に負うところが大きいと考えられる一方、その構成モデルの能力不足によって本破壊解析の発散が生じたと思われ、破壊解析の事前にベンチマーク有限要素解析を行なうことの重要性が指摘された。解析における要素の応力-ひずみ応答が、構造全体の破壊メカニズムを良好に説明できることが示された。