

3.2.6 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カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成15年度業務目的

(2) 平成15年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 構成モデルの選定、設定
 - 2) 構成モデルベンチマーク有限要素解析の実行
 - 3) 解析手法検証用解析の対象と解析モデル化
- (c) 業務の成果
 - 1) 構成モデルベンチマーク有限要素解析の結果および考察
 - 2) 解析手法検証用解析の設定
- (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16年度業務計画案

(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
清水建設株式会社 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。

(d) 3カ年の年次実施計画(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、コンクリート構成モデル、破壊モデルの精度検証を行なう。
- 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する。

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を行なうことにより、構造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。
- b) 鉄筋コンクリート耐震壁の震動破壊実験を対象とした動的破壊シミュレーション解析を行ない、破壊モデルならびに解析手法の有効性・妥当性を検討する。
- c) 総合評価・改良を行なう。
- d) 全体のまとめを行なう。

(e) 平成 15 年度業務目的

本プロジェクトに適したコンクリート材料に関して適切な構成モデルを設定し、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応用、実施する。設定した構成モデルは、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⁾で使用されたコンクリートに対するものであり、選定した構成モデルを用いてこの静的破壊実験をシミュレーションすることを前提としてこの静的破壊実験の試験体の有限要素解析モデル化も実施する。構成モデルベンチマーク有限要素解析手法の適用を通して、構成モデルの設定における手順、問題点を整理し、また得られた解析結果の評価、整理を行なうことによって構成モデルの精度を検証する手順を示す。

(2) 平成 15 年度の成果

(a) 業務の要約

開発した構成モデルベンチマーク有限要素解析手法を設定したコンクリートの構成モデル適用した。設定した構成モデルは、圧縮応力場に対して Drucker-Prager 弾塑性ひずみ硬化軟化モデル、引張応力場に対しては非線形破壊力学に基づく固定多方向ひび割れモデルであり、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ものである。構成モデルの設定は本プロジェクトの RC 耐震壁の静的破壊実験で使用されたコンクリートを対象とし、その有限要素モデル化も行なった。1 軸圧縮解析、1 軸引張解析、2 軸圧縮・圧縮解析、2 軸圧縮・引張解析、2 軸引張・引張解析、圧縮子午線上の 3 軸圧縮解析、1 軸圧縮・せん断解析を実行した結果、1) 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うる；2) 最大応力以降の応答をとらえることが困難である；一様せん断応力場の解析は不可能である、などの点を明らかにした。

(b) 業務の実施方法

1) 構成モデルの選定、設定

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⁾で使用されたコンクリートを選定して、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適用することとした。具体的にはその静的破壊実験¹⁾の試験体が第 1 層壁部で破壊しているため、第 1 層壁部コンクリートを解析対象とした。

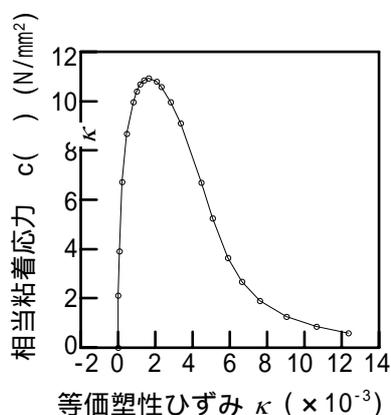
設定した構成モデルは、鉄筋コンクリート構造物に関する現状の実務的な有限要素解析で比較的一般に採用されているものである。以下に構成モデルの仕様を示す。

a) 圧縮応力場に関する弾塑性モデル

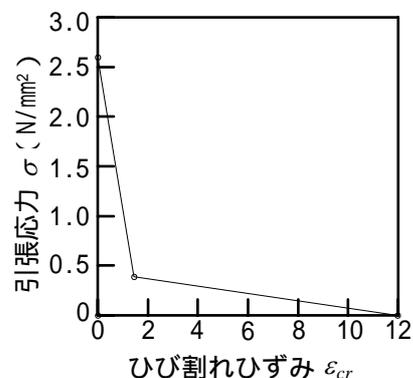
- i) コンクリートの 1 軸圧縮強度 f_c' は、静的破壊実験¹⁾の第 1 層壁部コンクリートの $f_c' = 26.0 \text{ N/mm}^2$ とした。
- ii) コンクリートの弾性係数 E_c 、ポアソン比 ν_c は、1 軸圧縮強度に基づき、CEB-FIP Model Code 1990³⁾より $E_c = 30k \text{ N/mm}^2$ 、 $\nu_c = 0.2$ と設定した。
- iii) Drucker-Prager の降伏条件に基づく等方ひずみ硬化・軟化塑性モデル。
- iv) Drucker-Prager の塑性ポテンシャル関数を降伏条件と一致させる関連流れ則。
- 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²⁾

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 1990³⁾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 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 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ひずみ軟化ひび割れモデル

- i) 1軸引張強度 f_t は、1軸圧縮強度に基づき CEB-FIP Model Code 1990³⁾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 1990³⁾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) せん断低減モデル

- i) ひび割れ発生にともなってせん断剛性をゼロまで低減するモデルを設定した。

本研究で採用した構成モデルはその簡易さゆえにすべての応力状態に対して同等の精度を確保することは難しく、構造解析対象の卓越する応力場の範囲で高精度を発揮できるようにその材料定数を設定するのが現実的である。そこで、本研究の構造解析対象である壁構造は主に平面応力状態が卓越するものであるため、ここでは、平面応力状態で高精度を確保できるようにした。

2) 構成モデルベンチマーク有限要素解析の実行

実行した構成モデルベンチマーク有限要素解析のケースを以下に示す（各解析ケースの厳密な定義については、平成14年度の報告書を参照）。

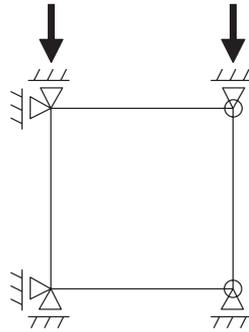
- a) 1軸圧縮解析 PU-01
- b) 1軸引張解析 PU-02
- c) 2軸圧縮・圧縮解析 PB-01 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = -0.05/-1$
- d) 2軸圧縮・圧縮解析 PB-02 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = -0.20/-1$
- e) 2軸圧縮・圧縮解析 PB-03 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = -0.50/-1$
- f) 2軸圧縮・圧縮解析 PB-04 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = -0.70/-1$
- g) 2軸圧縮・圧縮解析 PB-05 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = -1.00/-1$
- h) 2軸圧縮・引張解析 PB-06 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = +0.05/-1$
- i) 2軸圧縮・引張解析 PB-07 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = +0.10/-1$
- j) 2軸圧縮・引張解析 PB-08 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = +0.20/-1$
- k) 2軸引張・引張解析 PB-09 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = +0.50/+1$
- l) 2軸引張・引張解析 PB-10 : $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = +1.00/+1$
- m) 圧縮子午線上の3軸圧縮解析 NT-01 : 設定周圧 $\sigma_c/f_c' = -0.02$
- n) 圧縮子午線上の3軸圧縮解析 NT-02 : 設定周圧 $\sigma_c/f_c' = -0.10$
- o) 圧縮子午線上の3軸圧縮解析 NT-03 : 設定周圧 $\sigma_c/f_c' = -0.20$
- p) 圧縮子午線上の3軸圧縮解析 NT-04 : 設定周圧 $\sigma_c/f_c' = -0.60$
- q) 1軸圧縮・せん断解析 RU-01B : 設定圧縮応力 $\sigma_{yy}^C/f_c = 0.41$
- r) 1軸圧縮・せん断解析 RU-02B : 設定圧縮応力 $\sigma_{yy}^C/f_c = 0.77$
- s) 1軸圧縮・せん断解析 RU-03B : 設定圧縮応力 $\sigma_{yy}^C/f_c = 0.86$

解析に用いたプログラムは汎用有限要素解析コード DIANA⁴⁾であり、a)~l)および q)~s)は2次元平面応力問題として、また m)~p)は軸対称問題として静的解析を行なった。図・3は、各解析ケースの境界条件をまとめたものである。各解析増分ステップでは、Newton-Raphson法による収束計算を行ない、収束条件としては変位制御解析と荷重制御解析の場合に節点残差力ノルム 1%とした。弧長増分制御解析の場合にはエネルギーノルムで 0.01%とした。

3) 解析手法検証用解析の対象と解析モデル化

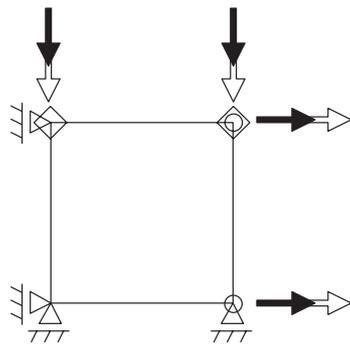
本プロジェクトの震動破壊実験では耐震壁を含む多層鉄筋コンクリートフレーム構造物を対象とするので、本研究の解析手法検証用解析の対象構造物もそれに近いものを考える必要があるが、連続体有限要素解析はその緻密性のため、大規模な構造物を解析するのは多くの困難をとまなう。そこで本研究では、本プロジェクトの一連の実験的研究として行なわれた2層鉄筋コンクリート耐震壁の静的破壊実験¹⁾を対象とすることとした。

解析PU-01,PU-02

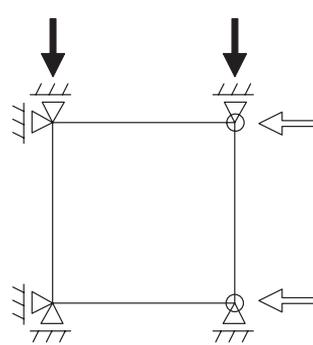


- ← 節点強制変位制御
- ⇐ 節点力制御
- ⇐⇐ 弧長増分制御
- X方向自由度の拘束
- ◇ Y方向自由度の拘束

解析PB-01 ~ 10

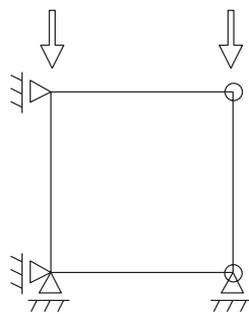


解析NT-01 ~ 04

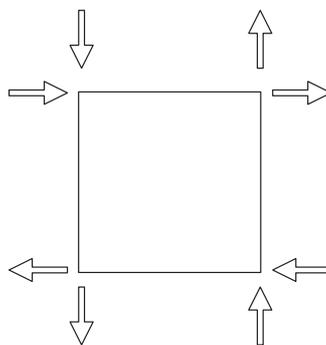


解析RU-01 ~ 03

Phase I



Phase IIA



Phase IIB

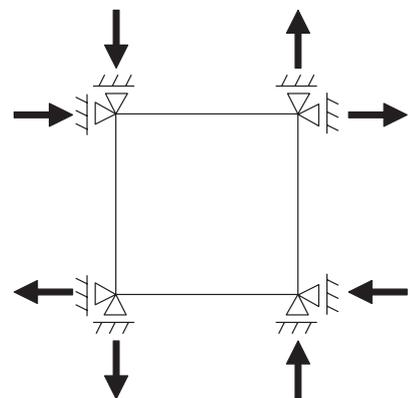


図 - 3 各解析ケースの境界条件

(c) 業務の成果

1) 構成モデルベンチマーク有限要素解析の結果および考察

a) 2 軸応力状態の解析

図-4 は、1 軸圧縮解析および 2 軸圧縮・圧縮解析から得られた応答構成関係を示したものであり、図-5 は、それらの中の 3 ケースの解析について既往の実験結果²⁾と比較したものである。1 軸圧縮解析の結果は実験結果と良好に一致しているが、2 軸圧縮・圧縮解析の結果は最大耐力前においても実験結果とさほど良く一致してないばかりか、ひずみ増分の正負がまったく実験と逆の傾向を示すものもある。2 軸圧縮・圧縮解析では弧長増分制御法を用いたこともあり最大耐力後の応答を十分にとらえることができなかった。解析では最大応力時に xy 面に平行なひび割れ面が発生しこれにより解析不能に陥ってしまった。この現象が弧長増分制御法を採用したことに起因するのか、または構成モデル自体が安定な軟化挙動を記述できないことによるものなのか、については不明であった。2 軸圧縮・圧縮応力場において xy 面に平行なひび割れ面が発生するという現象は実験事実と一致することではあると考えられるが、これを平面応力場の解析でどうとらえるかについてはほとんど議論がなされていないのが現状である。

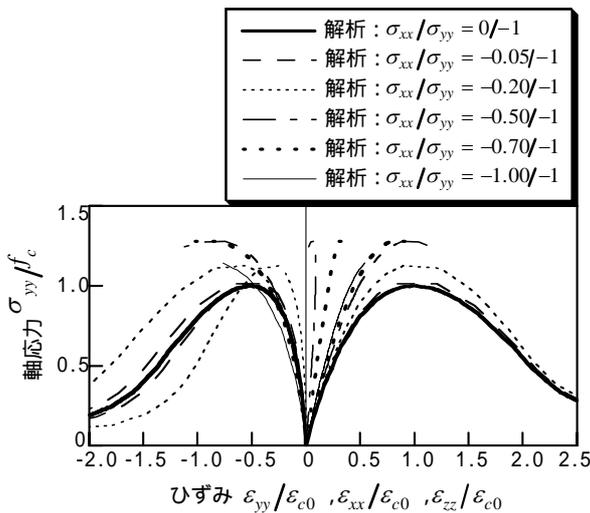


図-4 1 軸圧縮解析および 2 軸圧縮・圧縮解析

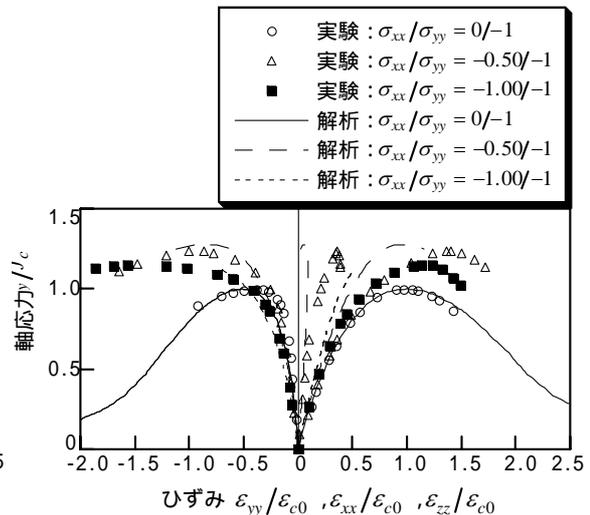
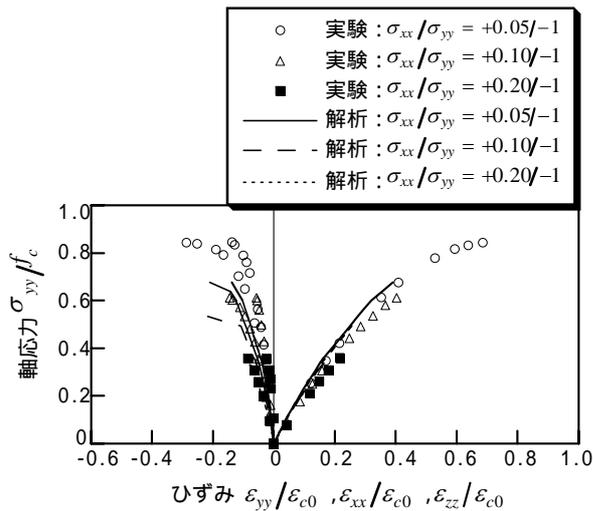


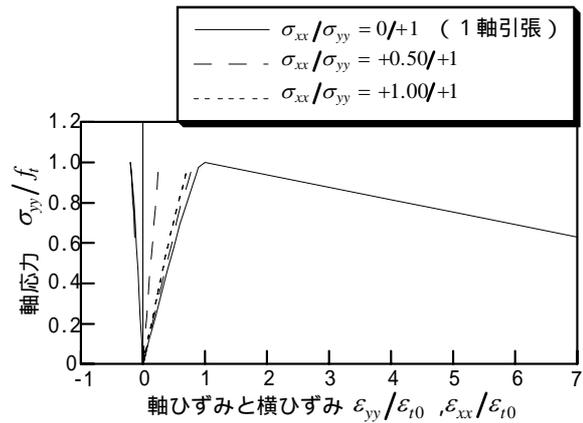
図-5 1 軸圧縮解析および 2 軸圧縮・圧縮解析 (実験との比較)

図-6 は、2 軸圧縮・引張解析から得られた応答構成関係を既往の実験結果と比較したものである。2 軸圧縮・引張強度包絡線は 1 軸圧縮強度と 1 軸引張強度を直線で結ぶものとして構成モデルで設定されているので、図-6 の最大応力が実験と解析で大きく異なっているのは必然である。しかしながらここで問題とすべき点は、解析においては最大応力以降の挙動が得られなかったことである。弧長増分制御解析における様々なパラメータを設定してみたが基本的には最大応力時に剛性マトリックスに負固有値が発生し解析続行不能に陥った。構成関係としても最大応力を乗り越えることが不可能なのか、それとも有限要素解析として極限点を乗り越えられないのかについては慎重な検討と議論が必要とされる。

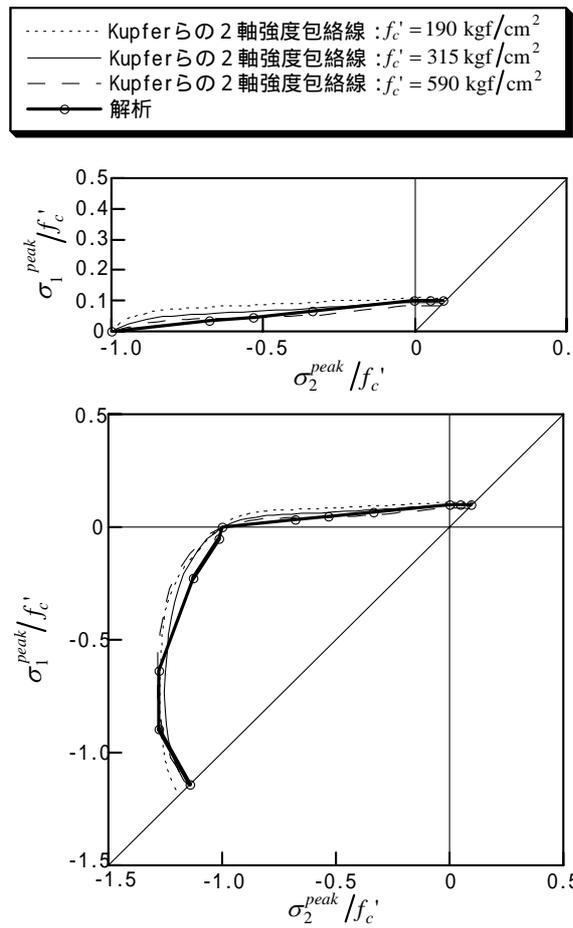
図-7 は、1 軸引張解析および 2 軸引張・引張解析から得られた応答構成関係である。1 軸引張解析では安定なひずみ軟化挙動を得ることができたが、前述の 2 軸圧縮・圧縮解析および 2 軸圧縮・引張解析と同様に最大応力時に解が発散してしまった。



図・6 2軸圧縮・引張解析
(実験との比較)



図・7 1軸引張解析および2軸引張・
引張解析



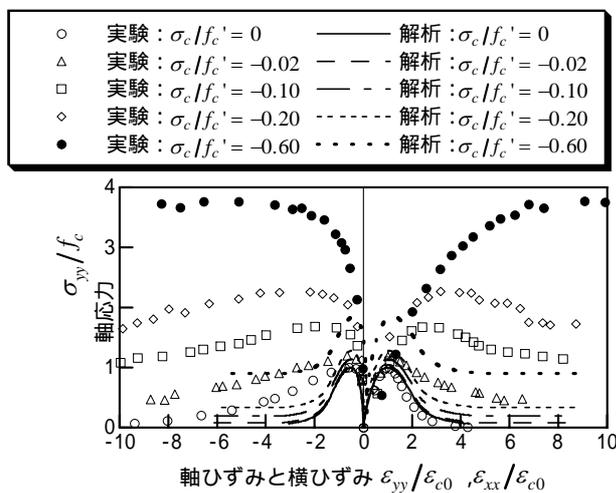
図・8 2軸強度包絡線

図・8は、1軸圧縮解析、1軸引張解析、2軸圧縮・圧縮解析、2軸圧縮・引張解析、2軸引張・引張解析から得られた各最大応力を用いて描いた2軸強度包絡線であり、実験結果との比較もなされている。前述したように本研究では平面応力状態に対して高精度が得られ

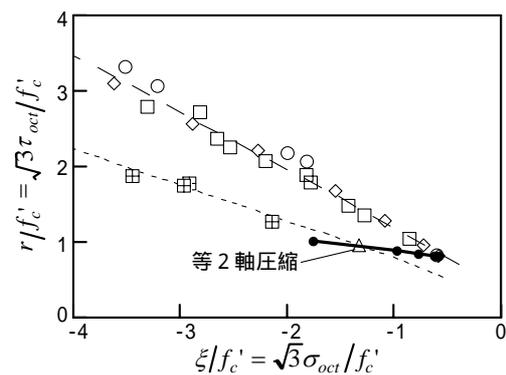
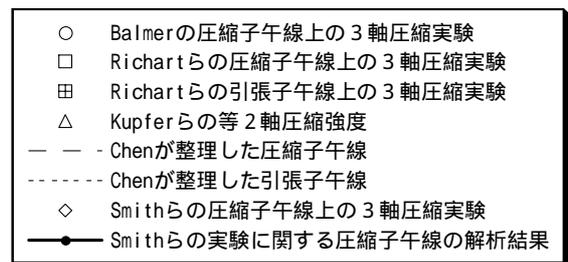
るように弾塑性モデルのパラメータを調整したため、2軸強度包絡線の解析結果は比較的良好なものであるといえる。

b) 3軸応力状態の解析

圧縮子午線上の3軸圧縮解析から得られた応答構成関係が図・9において既往の実験結果⁵⁾と比較されている。図・10は、圧縮子午線上の3軸圧縮解析から得られた各最大応力を用いて描いた3軸強度包絡線(破壊曲面の圧縮子午線)であり、実験結果^{5) 6) 7)}との比較もなされている。本解析で用いた構成モデルは明らかに3軸圧縮応答(3軸圧縮強度とじん性能)を過小評価するものである。この原因は、本構成モデルが2軸応力状態に対して調整、設定されたためであり、具体的にはDrucker-Pragerの降伏条件としての内部摩擦角が 9.87° という小さい値に設定されたためであると考えられる。2パラメータ塑性モデルとして知られコンクリート構造解析で多用されるDrucker-Pragerモデルは簡便である一方、その材料定数の設定法によって2軸圧縮場と3軸圧縮場の応答に関する精度が大きく異なることがあるため注意が必要である。本プロジェクトでの対象構造物に関しては、低層階における高帯筋比の鉄筋コンクリート柱部材と上層階における鉄筋コンクリート耐震壁とではその応力状態は高3軸圧縮応力状態と平面応力状態と大きく異なるため、本解析で示されたように同一の簡易な塑性モデルを用いると解析精度に大きな違いが生じることが考えられる。



図・9 圧縮子午線上の3軸圧縮解析
(実験との比較)

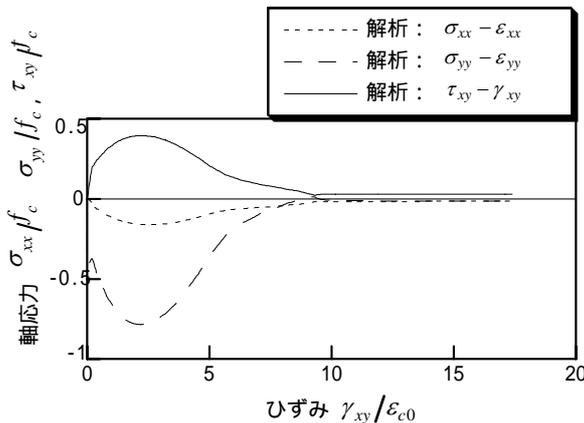


図・10 3軸強度包絡線
(実験との比較)

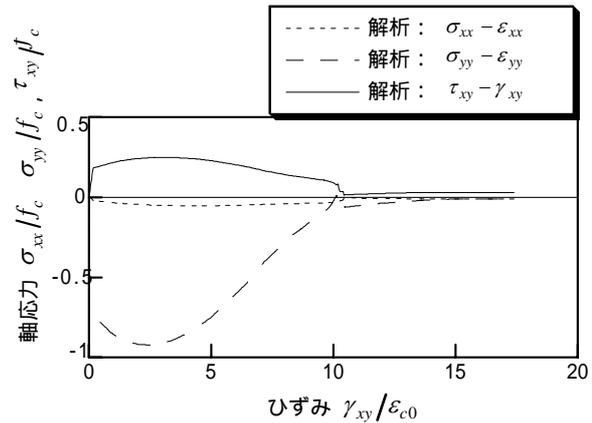
c) 3軸応力状態の解析

図・11~13は、1軸圧縮・せん断解析の応答構成関係を示すものである。1軸圧縮・せん断解析は、1軸圧縮を与えた後に一様なせん断応力のみを生じさせるために図・3の解析RU-01~03のPhase IIAで示されるように元々、節点力を載荷する予定であったが、Phase IIAの境界条件では有限要素が剛体回転してしまうため解析を実施できない。そこで、

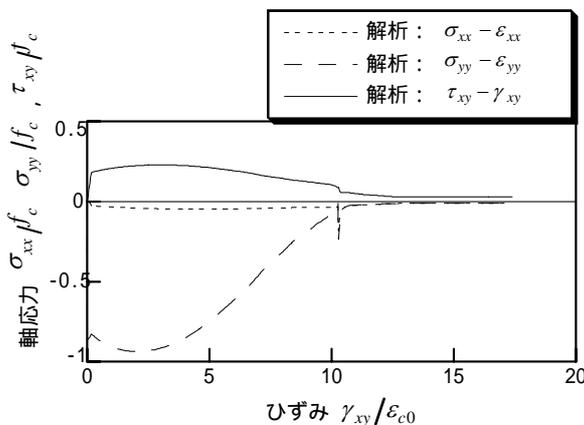
Phase IIB のように節点変位制御に変更した。そのため、純せん断応力状態とはならず、純せん断ひずみ状態となった。その場合、せん断によるダイラタンシーが発生するためにその体積膨張を直方向に拘束し大きな直応力が生じている。このように一様せん断応力場の解析は実行が難しいため、本解析のような有限要素解析による方法とは別に構成関係式の直接解法などを行なう必要があると考えられる。図・14 は、3 ケースの 1 軸圧縮・せん断解析のせん断応答のみをまとめたものである。1 軸応力レベルが高い場合には最大せん断応力が低下するという現象が再現されている。



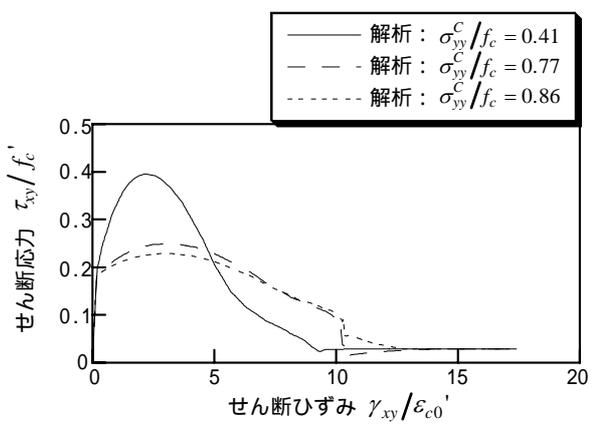
図・11 1 軸圧縮・せん断解析 RU-01B



図・12 1 軸圧縮・せん断解析 RU-02B



図・13 1 軸圧縮・せん断解析 RU-03B

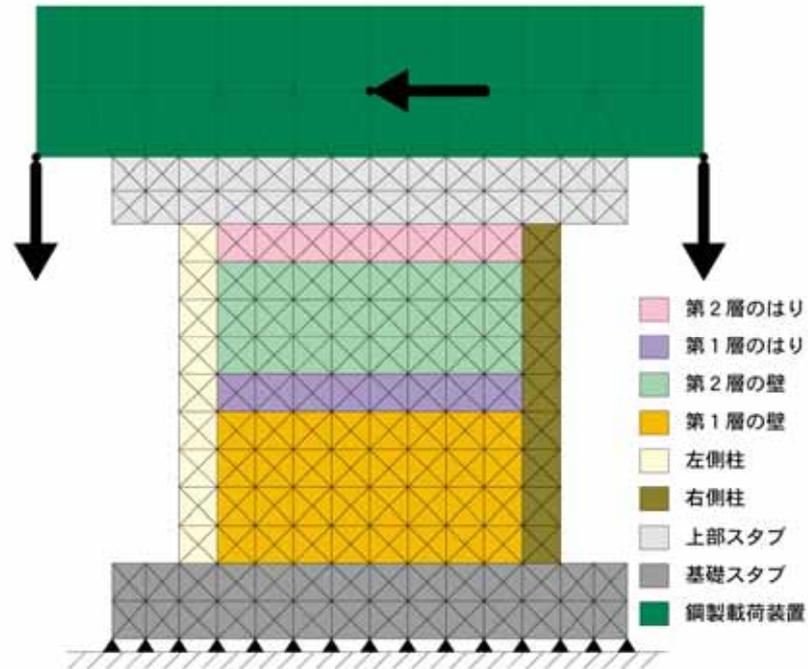


図・14 1 軸圧縮・せん断解析
RU-01B, RU-02B, RU-03B

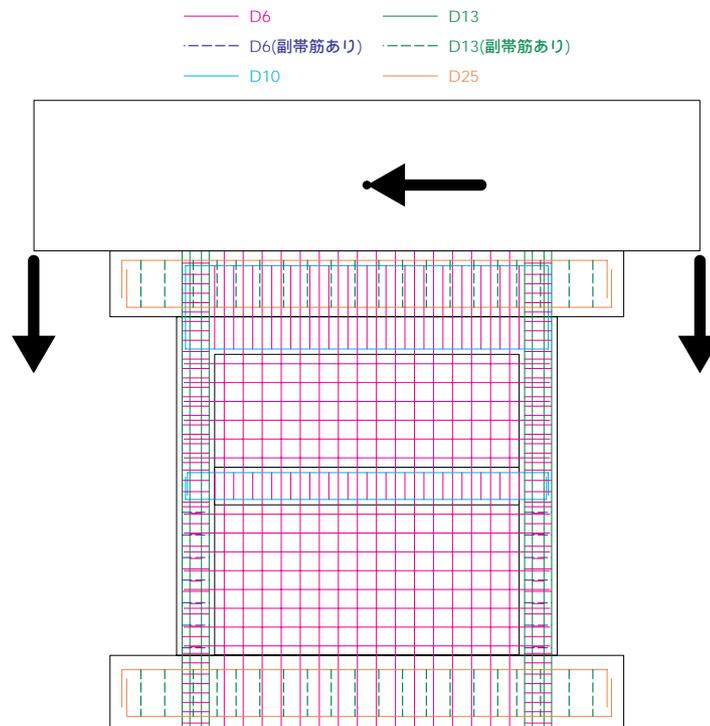
2) 解析手法検証用解析の設定

図・15 は、解析手法検証用解析で対象とする 2 層鉄筋コンクリート耐震壁試験体の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。実験では、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、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する。図・16 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。



図・15 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・16 2層鉄筋コンクリート耐震壁試験体の埋込み鉄筋要素

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 構成モデルベンチマーク有限要素解析

- a) 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⁾で使用されたコンクリートを選定して、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適用した。設定した構成モデルは、圧縮応力場に対して Drucker-Prager 弾塑性ひずみ硬化軟化モデルであり、引張応力場に対しては非線形破壊力学に基づくひずみ軟化を仮定した固定多方向ひび割れモデルである。これは、鉄筋コンクリート構造物に関する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ものである。構成モデルの材料定数の具体的な設定法を提示した。
- b) 構成モデルベンチマーク有限要素解析として、1軸圧縮解析、1軸引張解析、2軸圧縮・圧縮解析、2軸圧縮・引張解析、2軸引張・引張解析、圧縮子午線上の3軸圧縮解析、1軸圧縮・せん断解析を実行した。本構成モデルは2軸応力状態に対して高精度が得られるように材料定数を設定したため、2軸解析については比較的良好な応答構成関係が得られたが、3軸応力状態に関しては非常に精度が低くなった。2軸応力状態と高拘束圧下の3軸圧縮応力状態とが混在する構造物の解析においてはこの点に注意が必要とされる。多くの解析では最大応力以降の応答をとらえることが困難であったが、この原因が有限要素解析自体に起因するものなのか、構成モデル自体の問題なのかを特定することはできなかった。一様せん断応力場の解析は実行が難しく、構成関係式の直接解法などを行なう必要があると考えられる。
- c) 解析手法検証用解析は、構成モデルの精度とそれを用いて実施する構造解析の精度がどのような因果関係で影響されているかについて検討するために実施するものであるが、本プロジェクトで実施すべき解析手法検証用解析の選定を行ない、構造モデルならびに材料モデルの設定を行なった。

(e) 引用文献

- 1) 文部科学省、防災科学技術研究所：鉄筋コンクリート造連層耐震壁の動的挙動と静的挙動の比較に関する研究，大都市大震災軽減化特別プロジェクト 震動台活用による構造物の耐震性向上研究 平成15年度成果報告書、3.2.2、2003.
- 2) Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., and Rusch, H.: Behavior of concrete under biaxial stresses, ACI Journal, Vol. 66, No. 8, pp.656-666, 1969.
- 3) CEB-FIP Model Code 1990: Comite Euro-International du Beton, 1993.
- 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.
- 5) Smith, S. S., Willam, K. J., Gerstle, K. H., and Sture, S.: Concrete over the top, or: Is there life after peak?, ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 5, pp.491-497, 1989.
- 6) Balmer, G. G.: Shearing strength of concrete under high triaxial stress - computation of Mohr's envelope as a curve, Structural Research Laboratory Report, No. SP-23, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1949.
- 7) Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L.: A study of the failure of concrete

under combined compressive stresses, University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin, No. 185, 1928.

(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16年度業務計画案

- a) 平成15年度に選定した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を行なうことにより、鉄筋コンクリート構造物の破壊構造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や精度の関係について調査する。これによって鉄筋コンクリート構造物の震動破壊解析における構成モデルならびにその精度確認の重要性を明示する。
- b) 鉄筋コンクリート耐震壁の震動破壊実験を対象とした動的破壊シミュレーション解析を行なうことにより、構成モデルベンチマーク有限要素解析で対象とした構成モデル、破壊モデルならびに解析手法の有効性・妥当性を検討する。この検討を通して鉄筋コンクリート構造物の震動破壊解析における構成モデルならびにその精度確認の重要性を明示する。
- c) 3年間にわたる本研究の総合評価、まとめを行なう。

