

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ヵ年の年次実施計画
- (e) 平成14年度業務目的

(2) 平成14年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) コンクリート材料の構成モデルや破壊モデルの調査
 - 2) 構成モデルのベンチマーク有限要素解析手法の開発
- (c) 業務の成果
 - 1) コンクリート材料の構成モデルや破壊モデルの調査
 - 2) 構成モデルのベンチマーク有限要素解析手法の開発
- (d) 結論ならびに今後の課題
 - 1) コンクリート材料の構成モデルや破壊モデルの調査
 - 2) 構成モデルのベンチマーク有限要素解析手法の開発
- (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15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	役 職	氏 名
清水建設株式会社 技術研究 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

(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。また、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予備事前解析を実施する。

(d) 3ヵ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

- ① 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う。
- ② コンクリートの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。

2) 平成15年度：

- ① 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。
- ② 解析手法検証用解析の対象として適切な既往の部材実験を調査し、解析手法検証用試験体を選定する。
- ③ 解析手法検証用の鉄筋コンクリート試験体の破壊シミュレーション解析を行ない、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。

3) 平成16年度：

- ① 本プロジェクトにおいて実施された鉄筋コンクリート耐震壁の振動破壊実験を対象とした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。
- ② 総合評価・改良を行なう。
- ③ 全体のまとめを行なう。

(e) 平成14年度業務目的

- ① 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する。
- ② コンクリート構成モデルの精度や能力を見極めるためのベンチマーク有限要素解析の手法を開発する。

(2) 平成14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

- 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。
- 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た。

(b) 業務の実施方法

- 1) コンクリート材料の構成モデルや破壊モデルの調査
コンクリート工学、コンクリート構造工学、応用力学、材料力学の主要な論文集、書籍などの文献調査による方法
- 2) 構成モデルのベンチマーク有限要素解析手法の開発
 - a) 主要な論文集、書籍などの文献調査によってコンクリート構造物の破壊解析を実施する際に重要となるコンクリートの応力経路ならびにひずみ経路を抽出した。
 - b) 抽出したコンクリートの応力経路ならびにひずみ経路を再現するベンチマーク有限要素解析の手法、手順を開発した。

(c) 業務の成果

- 1) コンクリート材料の構成モデルや破壊モデルの調査結果の概要¹⁾²⁾³⁾⁴⁾
 - a) コンクリート工学の分野で研究され用いられてきたコンクリートの構成則は、現象モデル (phenomenologic model) と物理モデル (physical model) に大別される。前者は、コンクリートにおける非線形性の発生メカニズムを特に意識せず、みかけの応力とひずみの関係を記述するものである。現象モデルに属する構成則では、微視的挙動を形式的に弾性、塑性、粘性、破壊、損傷などとしてモデル化する場合が多く見受けられるが、非均質材料であるコンクリートの微視的構造や微視的な耐荷機構が直接的に反映されていない。一方、後者の物理モデルは、コンクリートの微視的構造を幾何学的に規定し、コンクリートの非線形性や破壊を支配する微視的な耐荷機構を直接的に考慮するものである。構成則において微視

的機構を考慮することは、モデルに力学的合理性や理論的な明快さを与え、モデルの高性能化につながるばかりではなく、巨視的な強度破壊特性や寸法効果などへの洞察を深めることになる。

- b) 既往のコンクリートの構成則は、現象モデルに属するものがほとんどであった。より巨視的なレベルからモデル化を出発させた現象モデルとしては、体積係数とせん断係数による亜弾性モデル、非線形 (Cauchy) 弾性モデル、等価 1 軸応力-ひずみ関係に基づく直交異方性モデルなどがあげられる。またコンクリートの物理現象 (マイクロクラックの発生やマイクロクラック面でのすべりなど) を意識した現象モデルとしては、弾塑性理論に基づくモデル、破壊理論・損傷力学に基づくモデル、エンドクロニックモデル、破壊力学における結合力モデルなどがあり、最近はそれらの数種を組み合わせるモデルが多く研究されている。
- c) 物理モデルに属する構成則は、現象モデルに属するものに比較して非常に数限られているが、破壊力学における引張応力下の結合力モデルとしては、近年いくつかのモデルがこの物理モデルに属するものとして開発されている。圧縮応力下の構成則については、その微視的メカニズムの複雑さのため物理モデルに属するものが非常に少ない。
- d) 古典的な現象学的構成モデルのひとつである体積係数とせん断係数による亜弾性モデルや非線形 (Cauchy) 弾性モデルは、最大応力前で単調載荷を受けるコンクリートの平面圧縮応力状態に対してはよい精度が得られるが、最大応力近傍での体積膨張や最大応力後のひずみ軟化を記述できない。高拘束圧下の非線形性やひずみ軟化、ダイラタンシーなどを記述するには、体積係数とせん断係数の連成効果を考慮する、または応力テンソルやひずみテンソルに依存する複雑な非線形項を導入する必要がある。
- e) 代表的な現象学的構成モデルのひとつである等価 1 軸応力-ひずみ関係に基づく直交異方性モデルは、主応力軸とともにその方向が回転する等価 1 軸ひずみに関して軟化損傷則を記述するため、コンクリートの損傷異方性を十分に記述することができない。主に主軸の固定した最大応力前の 2 軸応力状態に対しては適用例も多く、精度も比較的良好であるが、拘束圧の増大にともなう耐力とじん性の向上 (ぜい性-塑性遷移挙動) を記述することが不可能である。
- f) 古典的な現象学的構成モデルである弾塑性理論に基づくモデルは、応力テンソルの 1 次不変量、偏差応力テンソルの 2 次不変量、偏差応力テンソルの 3 次不変量が考慮された適切な降伏関数 (載荷関数) および塑性ポテンシャル関数を選定することによって、コンクリートの多軸強度特性を良好に表現することが可能である。しかし高応力レベルおよび軟化領域で生じる除荷剛性の漸進的低下を表現できず、また加工硬化材料に対する Drucker の安定仮説に述べられるように塑性理論そのものはひずみ軟化挙動を合理的に記述できるものではない。
- g) 破壊・損傷理論に基づくモデルは、現象学的に損傷変数や破壊を定義することができるが、一般的応力状態においてその進展を記述する損傷発展則を決定することが困難である。また引張応力下で開口したマイクロクラックが圧縮応力下で閉口するような損傷の可逆性を表現することがむずかしい。

- h) エンドクロニックモデルは、イントリンシック時間の概念によってくりかえし応答をも含めた広範な応力状態について有効であることが示されているが、その数学的定式化はあまりにも現象学的であって、モデルに含まれる材料パラメータの物理的意味が不明快であり、また、その数が多すぎるものが指摘されている。
- i) 多くの現象学的構成モデルは、くりかえし載荷応答に関して剛性低下やヒステリシスを考慮しない線形弾性である。
- k) 引張応力下の構成関係は通常、最大応力まで弾性とし、その後はぜい性またはひずみ軟化を仮定する直交異方性モデルが一般的であるが、最近是非直交ひび割れを許容する多方向ひび割れモデルが多く用いられるようになってきた。これとは別にひび割れ方向と主応力軸方向が一致するようにひび割れ方向が回転するモデル（回転ひび割れモデル）も広く用いられている。
- l) コンクリートは、弾性、塑性、破壊損傷の各特性が応力とひずみの状態に依存して顕著化する材料であるため、最近、現象学的構成モデルの数種を組合せてひずみ硬化からひずみ軟化へ至るより広い適用範囲を網羅するモデルが開発されている。特に塑性モデルと損傷モデルを組合せることによって、圧縮応力下のコンクリートの非弾性特性をかなり良好に表現できるものが開発されている。
- m) 塑性理論と損傷理論とを組合せた現象モデルとは対照的に、コンクリートの微視的な物理モデルや中間レベルをより強く意識した構成則を開発しようとする動きもある。マイクロプレーンモデルは、そのような構成則のひとつであり、非均質材料であるコンクリートの非弾性の源がモルタルマトリックスと粗骨材との界面領域（マイクロプレーン）から発生するマイクロクラックや界面ひび割れであるという仮説に基づくところに特徴がある。このモデルは圧縮応力状態と引張応力状態、硬化領域と軟化領域などを区別することなく、統一的にかなり広範な応力状態に対して適用可能である。
- n) 現状の実務解析や汎用解析コードで最も多用されているタイプは引張応力状態に対して非線形破壊力学モデルを考慮した多方向分布ひび割れ構成モデルであり、圧縮応力状態については弾塑性理論に立脚した構成モデルである。現状の多くのコンクリート構造解析ではこれらを組み合わせて解析を実施している。

2) 構成モデルのベンチマーク有限要素解析手法の開発

- a) コンクリート構造物の破壊解析を実施する際に重要となるコンクリートの応力経路ならびにひずみ経路として以下のものを抽出した。
 - I) 比例1軸 (PU) 載荷経路
 - II) 比例2軸 (PB) 載荷経路
 - III) 非比例3軸 (NT) 載荷経路
 - IV) 比例3軸 (PT) 載荷経路
 - V) 主軸回転1軸 (RU) 載荷経路
 - VI) 主軸回転2軸 (RB) 載荷経路

ここで、P は比例載荷 (proportional loading)、N は非比例載荷 (nonproportional loading)、R は主軸回転載荷 (loading with rotating principal axes)、U は1

軸載荷 (uniaxial loading)、B は2軸載荷 (biaxial loading)、T は3軸載荷 (triaxial loading) をそれぞれ意味する。

- b) 抽出したコンクリートの応力経路ならびにひずみ経路を再現するベンチマーク有限要素解析の目的、定義などについて表1～6に示した。5)
- c) コンクリート構成モデルのベンチマーク有限要素解析は、1有限要素を用いて I)～VI)の境界条件、載荷条件を満足する計算を行なうものである。応力とひずみに関する境界条件が混合したひずみ硬化領域からひずみ軟化領域までの計算となるため、以下のように変位増分制御法、荷重増分制御法、弧長増分制御法を組み合わせた有限要素解析が必要とされる。図1は、例として4節点アイソパラメトリック有限要素を用いた主軸回転1軸 (RU) 載荷解析の境界条件 (支持条件、載荷条件) を示したものである。
- I) 比例1軸 (PU) 載荷解析
平面応力状態、変位増分制御法
 - II) 比例2軸 (PB) 載荷解析
平面応力状態、弧長増分制御法
 - III) 非比例3軸 (NT) 載荷解析
 - (i) 第1載荷ステップ：軸対称応力状態、荷重増分制御法
 - (ii) 第2載荷ステップ：軸対称応力状態、変位増分制御法
 - (iii) 第3載荷ステップ：軸対称応力状態、荷重増分制御法
 - IV) 比例3軸 (PT) 載荷解析
軸対称応力状態、荷重増分制御法
 - V) 主軸回転1軸 (RU) 載荷解析
 - (i) 第1載荷ステップ：平面応力状態、荷重増分制御法
 - (ii) 第2載荷ステップ：平面応力状態、変位増分制御法
 - VI) 主軸回転2軸 (RB) 載荷解析
 - (i) 第1載荷ステップ：平面応力状態、変位増分制御法
 - (ii) 第2載荷ステップ：平面応力状態、変位増分制御法
- d) 各載荷解析から得られた応力-ひずみ関係などを1軸圧縮強度または1軸引張強度ならびに1軸圧縮強度時ひずみまたは1軸引張強度時ひずみで無次元化し、適切な既往の実験結果⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾または解析的研究結果¹³⁾と比較する。この比較を通して対象としている構成モデルの精度や能力を見極めるのが本ベンチマーク有限要素解析の目的である。

表 1 PU 解析 (比例 1 軸載荷解析)

解析 No.	解析名	目的	解析の定義	出力結果
PU-01	1 軸圧縮	基本的な強度・変形特性の把握	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ ($= \varepsilon_x$) 関係, 破壊曲面の圧縮子午線, 2 軸強度包絡線
PU-02	1 軸引張	基本的な強度・変形特性の把握	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_t$; 応力条件: $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ ($= \varepsilon_x$) 関係, 破壊曲面の引張子午線, 2 軸強度包絡線

表 2 PB 解析 (比例 2 軸載荷解析)

解析 No.	解析名	目的	解析の定義	出力結果
PB-01	2 軸圧縮-圧縮	$\sigma_2 > \sigma_3$ の場合の 2 軸圧縮-圧縮応力状態における破壊モードと強度包絡線を確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = -0.05 / -1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-02	2 軸圧縮-圧縮	$\sigma_2 > \sigma_3$ の場合の 2 軸圧縮-圧縮応力状態における破壊モードと強度包絡線を確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = -0.20 / -1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-03	2 軸圧縮-圧縮	$\sigma_2 = 0.5 \sigma_3$ の場合に最大の 2 軸圧縮強度が得られること, および破壊モードを確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = -0.50 / -1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-04	2 軸圧縮-圧縮	$\sigma_2 = \sigma_3$ の場合の 2 軸圧縮-圧縮応力状態における破壊モードと強度包絡線を確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = -0.70 / -1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-05	2 軸圧縮-圧縮	等 2 軸圧縮応力状態における破壊モードと強度包絡線を確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = -1.00 / -1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-06	2 軸圧縮-引張	1 軸圧縮状態にわずかな引張の最大主応力が載荷された場合の強度・変形性能の変化を確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = +0.05 / -1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-07	2 軸圧縮-引張	引張破壊が生じる 2 軸圧縮-引張状態の強度・変形特性を確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = +0.10 / -1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-08	2 軸圧縮-引張	引張破壊が生じる 2 軸圧縮-引張状態の強度・変形特性に及ぼす圧縮最小主応力の影響を確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_c$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = +0.20 / -1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-09	2 軸引張-引張	2 軸引張-引張応力下では Rankine の最大引張応力破壊基準に従い, 最大応力までほぼ線形の挙動が得られることを確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_t$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = +0.50 / +1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線
PB-10	2 軸引張-引張	2 軸引張-引張応力下では Rankine の最大引張応力破壊基準に従い, 最大応力までほぼ線形の挙動が得られることを確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta \varepsilon_{yy} = \alpha_t$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy} = +1.00 / +1$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \varepsilon_{zz}$ 関係, 2 軸強度包絡線

表3 NT解析（非比例3軸載荷解析）

解析 No.	解析名	目的	解析の定義	出力結果
NT-01	圧縮子午線上の3軸圧縮	圧縮子午線に沿った低拘束圧下の圧縮（軟化）挙動を確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； ひずみ条件： $\varepsilon_{yy} = 0$ ； 設定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_c$ ； $\sigma_c / f_c' = -0.02$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_c$ ； $\sigma_c / f_c' = -0.02$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 破壊曲面の圧縮子午線
NT-02	圧縮子午線上の3軸圧縮	圧縮子午線に沿った低拘束圧下の圧縮（軟化）挙動を確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； ひずみ条件： $\varepsilon_{yy} = 0$ ； 設定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_c$ ； $\sigma_c / f_c' = -0.10$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_c$ ； $\sigma_c / f_c' = -0.10$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 破壊曲面の圧縮子午線
NT-03	圧縮子午線上の3軸圧縮	圧縮子午線に沿った中拘束圧下で、ぜい性-塑性遷移を確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； ひずみ条件： $\varepsilon_{yy} = 0$ ； 設定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_c$ ； $\sigma_c / f_c' = -0.20$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_c$ ； $\sigma_c / f_c' = -0.20$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 破壊曲面の圧縮子午線
NT-04	圧縮子午線上の3軸圧縮	圧縮子午線に沿った高拘束圧下の塑性挙動を確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； ひずみ条件： $\varepsilon_{yy} = 0$ ； 設定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_c$ ； $\sigma_c / f_c' = -0.60$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_c$ ； $\sigma_c / f_c' = -0.60$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 破壊曲面の圧縮子午線
NT-05	引張り子午線上の3軸圧縮	引張り子午線に沿った低拘束圧下の挙動および破壊包絡線を確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 設定静水圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -1.00$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -1.00$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 破壊曲面の圧縮子午線
NT-06	引張り子午線上の3軸圧縮	引張り子午線に沿った低拘束圧下の挙動および破壊包絡線を確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 設定静水圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -2.00$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -2.00$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 破壊曲面の圧縮子午線
NT-07	引張り子午線上の3軸圧縮	引張り子午線に沿った中拘束圧下の挙動および破壊包絡線を確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 設定静水圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -3.00$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -3.00$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 破壊曲面の圧縮子午線
NT-08	引張り子午線上の3軸圧縮	引張り子午線に沿った高拘束圧下の挙動および破壊包絡線を確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 設定静水圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -4.00$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -4.00$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 破壊曲面の圧縮子午線
NT-09	楔試験（3軸圧縮）	圧縮子午線に沿った3軸圧縮から除荷を行なった場合、非正の2次塑性仕事の発生が不安定破壊を引き起こさないことを確認する。	(i) 第1 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 設定静水圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -1.00$ (ii) 第2 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\varepsilon_{yy} = \alpha_c$ ； 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ ； 固定周圧 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \sigma_h$ ； $\sigma_h / f_c' = -1.00$ ； 設定軸応力： $\sigma_{yy} = 2.4f_c$ (iii) 第3 載荷ステップ 制御ひずみ増分： $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_t$ ， $\Delta\sigma_{yy} = g\beta_t$ ， $g \leq 1.00$ 応力条件： $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$	$\sigma_{yy} - \varepsilon_{yy}$ 関係， $\sigma_{yy} - \varepsilon_{xx} (= \varepsilon_{zz})$ 関係， 載荷ステップ $N-2$ 次塑性仕事 $\Delta^2 W_p$ 関係 $\Delta^2 W_p = \Delta\sigma_{yy} \Delta\varepsilon_{yy}^p$

表 4 PT 解析 (比例 3 軸載荷解析)

解析 No.	解析名	目的	解析の定義	出力結果
PT-01	静水圧圧縮	静水圧軸上の非線形挙動および最大応力がなく破壊が生じないことを確認する。	制御ひずみ増分: $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{zz} = \beta_c$; 応力条件: $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_h$	$\sigma_{oct} - \epsilon_{oct}$ 関係, $\sigma_{oct} - \epsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{oct} - \epsilon_{yy}$ 関係, $\sigma_{oct} - \epsilon_{zz}$ 関係

表 5 RU 解析 (主軸回転 1 軸載荷解析)

解析 No.	解析名	目的	解析の定義	出力結果
RU-01	1 軸圧縮 —せん断	1 軸圧縮の後にせん断応力が導入されると、主軸が回転しダイラタンシーが生じることを確認する。	(i) 第 1 載荷ステップ 制御応力増分: $\Delta\sigma_{yy} = \beta_c$; 応力条件: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$; 設定応力 $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^c : \sigma_{yy}^c / f_c = 0.41$ (ii) 第 2 載荷ステップ 制御ひずみ増分: $\Delta\gamma_{xy} = \alpha_s$; 応力条件: $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$	$\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係, $\theta_\sigma - \gamma_{xy}$ 関係, $\theta_\epsilon - \gamma_{xy}$ 関係, $\frac{\partial \epsilon_{yy}}{\partial \gamma_{xy}} \cdot \frac{f_c'}{f_c} - \frac{\tau_{xy}}{f_c}$ 関係
RU-02	1 軸圧縮 —せん断	1 軸圧縮の後にせん断応力が導入されると、主軸が回転しダイラタンシーが生じること、およびその現象の圧縮応力レベル依存性を確認する。	(i) 第 1 載荷ステップ 制御応力増分: $\Delta\sigma_{yy} = \beta_c$; 応力条件: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$; 設定応力 $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^c : \sigma_{yy}^c / f_c = 0.77$ (ii) 第 2 載荷ステップ 制御ひずみ増分: $\Delta\gamma_{xy} = \alpha_s$; 応力条件: $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$	$\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係, $\theta_\sigma - \gamma_{xy}$ 関係, $\theta_\epsilon - \gamma_{xy}$ 関係, $\frac{\partial \epsilon_{yy}}{\partial \gamma_{xy}} \cdot \frac{f_c'}{f_c} - \frac{\tau_{xy}}{f_c}$ 関係
RU-03	1 軸圧縮 —せん断	1 軸圧縮の後にせん断応力が導入されると、主軸が回転しダイラタンシーが生じること、およびその現象の圧縮応力レベル依存性を確認する。	(i) 第 1 載荷ステップ 制御応力増分: $\Delta\sigma_{yy} = \beta_c$; 応力条件: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$; 設定応力 $\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^c : \sigma_{yy}^c / f_c = 0.86$ (ii) 第 2 載荷ステップ 制御ひずみ増分: $\Delta\gamma_{xy} = \alpha_s$; 応力条件: $\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$	$\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係, $\theta_\sigma - \gamma_{xy}$ 関係, $\theta_\epsilon - \gamma_{xy}$ 関係, $\frac{\partial \epsilon_{yy}}{\partial \gamma_{xy}} \cdot \frac{f_c'}{f_c} - \frac{\tau_{xy}}{f_c}$ 関係

表 6 RB 解析 (主軸回転 2 軸載荷解析)

解析 No.	解析名	目的	解析の定義	出力結果
RB-01	2 軸引張 —せん断	せん断応力が作用し、主応力軸が回転する場合のせん断応答 (軟化) とせん断強度、ならびに主引張応答が 1 軸引張応答を上回らないことを確認する。	(i) 第 1 載荷ステップ 制御ひずみ増分: $\Delta\epsilon_{xx} = \alpha_t$; 応力条件: $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$; 設定応力: $\sigma_{xx} = f_t$ (ii) 第 2 載荷ステップ 制御ひずみ増分: $\Delta\epsilon_{xx} : \Delta\epsilon_{yy} : \Delta\gamma_{xy} = 0.5 : 0.75 : 1.0$, $\Delta\gamma_{xy} = \alpha_s$; 応力条件: $\sigma_{zz} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$	$\tau_{xy} - \gamma_{xy}$ 関係, $\sigma_1 - \epsilon_1$ 関係, $\sigma_{xx} - \epsilon_{xx}$ 関係, $\sigma_{yy} - \epsilon_{yy}$ 関係, $\theta_\sigma - \gamma_{xy}$ 関係, $\theta_\epsilon - \gamma_{xy}$ 関係,

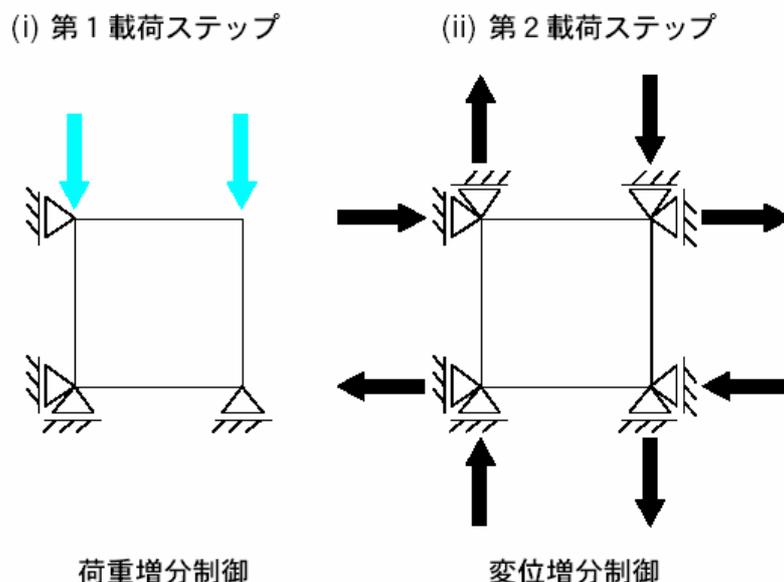


図1 RU解析（主軸回転1軸荷重解析）の境界条件

(d) 結論ならびに今後の課題

1) コンクリート材料の構成モデルや破壊モデルの調査

本年度の調査の結果、主に以下のことが明らかにされた。

- a) コンクリート材料は複雑な非線形特性を示すのでこれを表現するために様々なタイプの構成モデルが開発されてきた。
- b) 現状の実務解析や汎用解析コードで最も多用されているタイプは引張応力状態に対して非線形破壊力学モデルを考慮した多方向分布ひび割れ構成モデルであり、圧縮応力状態については弾塑性理論に立脚した構成モデル（圧縮塑性-多方向分布ひび割れ構成モデル）である。現状の多くのコンクリート構造解析ではこれらを組み合わせて解析を実施している。

今後は、現状最も多用されている圧縮塑性-多方向分布ひび割れ構成モデルを標準的なコンクリート構成モデルとして位置付けて調査研究を進めていく。

2) 構成モデルのベンチマーク有限要素解析手法の開発

コンクリート構造物の破壊解析を実施する際に重要となるコンクリートの応力経路ならびにひずみ経路を抽出しそれらを再現するような構成実験（コンクリート要素実験）を選定して、その構成実験を構成モデルでシミュレートすることによってその構成モデルの精度や能力を見極めるといった構成モデルのベンチマーク有限要素解析手法を開発できた。今後は、適当なコンクリート構成モデルを選定し、それに対して開発したベンチマーク有限要素解析手法を適用しその構成モデルの精度検証を実際に行なってみる。

(e) 引用文献

- 1) 前川宏一, 長谷川俊昭: コンクリート構成則の研究動向と課題, コンクリート工学, Vol. 32, No. 5, 1994.5
- 2) 長谷川俊昭: コンクリートの非線形現象と数値解析, 土木学会応用力学委員会 応用力学フォーラム資料, pp.1-6, 1995.8
- 3) 長谷川俊昭: コンクリートの破壊の力学: 技術の現状と展開, 数値解析手法の現状と課題, コンクリート工学, Vol.37, No.9, pp.34-45, 1999.9
- 4) Chen, W. F.: Plasticity in reinforced concrete, McGraw-Hill Book Company, New York, 1982.
- 5) 長谷川俊昭: コンクリート構成則の検証手順の標準化と検証例, 土木学会コンクリート委員会 構成モデル小委員会 (301) 成果報告書, pp.57-67, 1997.7
- 6) Kupfer, H., Hilsdorf, H. K., and Rusch, H.: Behavior of concrete under biaxial stresses, ACI Journal, Vol. 66, No. 8, pp.656-666, 1969.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Etse, G., and Willam, K.: Fracture energy formulation for inelastic behavior of plain concrete, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 120, No. 9, pp.1983-2011, September, 1994.
- 11) Green, S. J., and Swanson, S. R.: Static constitutive relations for concrete, Report No. AFWL-TR-72-2, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, 1973.
- 12) 李宝禄, 前川宏一: 連続主応力軸回転経路を受けるコンクリートの変形特性, RC 構造の有限要素解析に関するコロキウム 論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.29-34, 1984.
- 13) Rots, J. G.: Computational modeling of concrete fracture, Ph. D. thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1988.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
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

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 15 年度業務計画案

(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の手法を応用し、コンクリート構成モデルの精度検証を行なう具体的には平成 14 年度の調査で現状最も多用されていることが判明した圧縮塑性-多方向分布ひび割れ構成モデルを対象にして開発したベンチマーク有限要素解析手法を適用する。この構成モデルベンチマーク有限要素解析を通して構成モデルの精度検証の手法を確立する。

(b) 解析手法検証用解析の対象として適切な既往の部材実験を調査し、解析手法検証用試験体を選定する。圧縮塑性-多方向分布ひび割れ構成モデルを用いて選定した解析手法検証用の鉄筋コンクリート試験体の破壊シミュレーション解析を行ない、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。