

静的および動的三軸圧縮载荷を受けるコンクリート供試体の弾塑性解析 に対する個別要素法の適用性

A study on the capability of Distinct Element Method to elastic plastic analyses
of static and rapid speed tri-axial compressive test for concrete specimens

別府万寿博*, 園田佳巨**, 大野友則***

Masuhiko BEPPU*, Yoshimi SONODA**, Tomonori OHNO***

*博 (工) 防衛大学校助手, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 工博 九州大学助教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

***工博 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

This study presents the capability of distinct element method to perform elastic plastic analyses for concrete under high strain rate. Normal and tangential spring constants that are derived to be consistent with continuum mechanics proposed by Abe are used in the analyses. Bi-linear elastic plastic theory in compressive, tension-softening model in tension and Mohr-Coulomb yield criterion are employed to represent properties of concrete. First, analyses of static compressive tests are performed to show fundamental potential to simulate the fracture process of concrete. Then tri-axial rapid compressive tests for concrete specimen are simulated. Analytical results showed good agreements with tests qualitatively.

*Key Words: Distinct element method, constitutive model, concrete specimen,
tri-axial rapid compressive test*

キーワード: 個別要素法, 構成モデル, コンクリート供試体, 急速三軸圧縮試験

1. はじめに

衝撃荷重を受ける RC 構造物の合理的な耐衝撃設計法を確立するために, 数値解析的な研究の重要性が認識されつつある¹⁾。衝撃現象を数値的に解析する場合, 解析手法は大きく①有限要素法 (FEM) や境界要素法 (BEM) に代表される連続モデル, ②剛体ばねモデル (RBSM) や個別要素法 (DEM) などの離散モデルに区分できる。連続モデルでは, 支配方程式が連続体力学に基づいているため, 離散化を適切に行えば材料の弾性および弾塑性などの力学特性を精度良く表現できる。一方, 離散モデルの基本式は, 物理的考察に基づいて定式化されているため, ばね定数の決定法が問題となり^{2), 3)}弾性解の精度は数学的には保証されていない⁴⁾。逆に, 連続モデルを用いて材料の破壊や破断, 飛散などの不連続的現象を追跡することは難しいが, 離散モデルは元来不連続体の集合なので, これらを分離することにより容易に表現できる。どちらの解析手法を用いるかは, 対象とする現象に依存すると考えられる。

衝撃を受ける RC 構造物の破壊には, 衝突体の貫入, コンクリートの飛散, 裏面剥離などの現象をともなうことが多い。FEM 解析において, このような非線形性の強い現象を表現するための特別な要素^{5), 6)}が開発されつつあるが, ①適用例が少ないこと,

②アルゴリズムが複雑で計算時間が長い, ことなどから未だ実用的な段階にはない。したがって, 爆発や高速衝突を対象とした衝撃問題を解析する場合には離散モデルの方が適用性は高いと考えられる。

中でも, 大変形を表現できる DEM は, 静的から衝撃現象まで幅広い分野のシミュレーションに用いられている^{7) ~11)}。これらの研究より, DEM が載荷・衝突速度によらず広範な破壊現象に対して十分に適用できることが示されているが, 要素の配列やばね定数を試行錯誤的に決定していることが問題点としてあげられる。また, 解析結果の焦点は応力履歴や弾塑性状態よりも最終的な破壊状況に注がれる場合が多い。これは先に述べたように, DEM はコンクリートの破壊性状を再現できる点に大きな特徴があるためと思われる。この点に関して, 阿部¹²⁾は, 弾性域での挙動が適切にモデル化されていないと指摘し, 非線形域における解析結果の信頼性が低くなると指摘し, 連続体理論と DEM を整合させるばね定数を導いている。また, 非線形域での損傷や弾塑性プロセスも適切に表現できる必要があると考えられるが, DEM をコンクリートの弾塑性解析へ適用する際の問題点や適用限界について検討した研究はあまりない。目黒⁷⁾および森川¹⁰⁾は, DEM によりコンクリート供試体の一軸圧縮試験をシミュレートしているが, 構成モデルは完全弾塑性型を用いており, 材料のモ

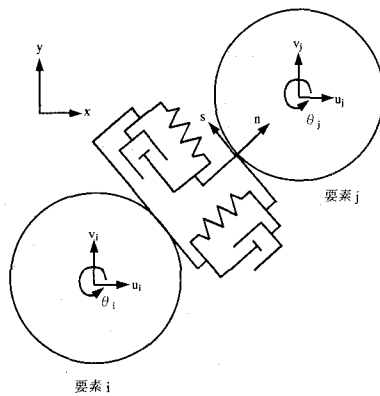


図-1 要素間のばね

デル化に問題を残している。とくに、コンクリート材料には圧縮、引張ともに軟化領域が存在することがわかっており、この領域のモデル化が構造物のポストピーク挙動やひずみの局所化を解析するうえで極めて重要であることが報告されている¹³⁾。さらに、DEM を高速衝撃問題へ適用する際には、ひずみ速度効果の影響についても考慮する必要がある。

本研究は、コンクリートの材料特性を反映させながらも比較的単純な構成モデルを用いて、DEM によりコンクリートの急速三軸圧縮試験をシミュレートし、急速荷重を受けるコンクリートの弾塑性解析への適用性について検討したものである。まず、弾性領域に阿部の弾性ばね定数を用いたうえで、法線方向ばねにコンクリートの一軸挙動を模擬したバイリニアの弾塑性モデル、接線方向ばねには Mohr-Coulomb 型破壊基準を適用した構成モデルを用いて静的圧縮試験をシミュレートした。この際、弾塑性パラメータが解析結果に与える影響やひずみの局所化現象の再現性についても検討した。次に、このモデルにひずみ速度効果を考慮して急速三軸圧縮解析を行い、DEM の動的弾塑性解析への適用性についても検討を行った。

2. 個別要素法とコンクリートの構成モデル

2.1 個別要素法の概要

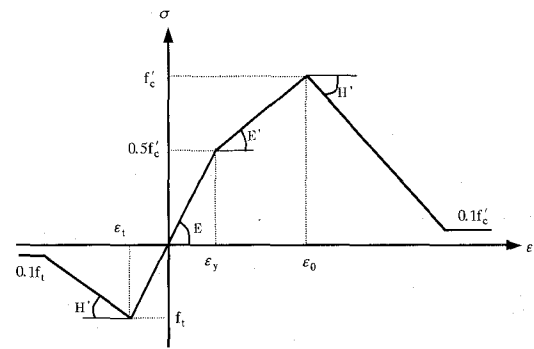
個別要素法とは、対象の構造物を剛体の集合であると仮定して有限個の微小要素で表し、その要素間を連続的に分布したばねで連結したものである。要素同士は、図-1 に示すように法線方向と接線方向に抵抗する2種類のばねにより連結されている。材料の弾性および非弾性的性質は、これらのばねによって表現される。要素*i*の水平変位u、鉛直変位v、および回転変位θに関する運動方程式は次のように与えられる。

$$m\ddot{u} = \sum_j F_x^{ij} \quad (1a)$$

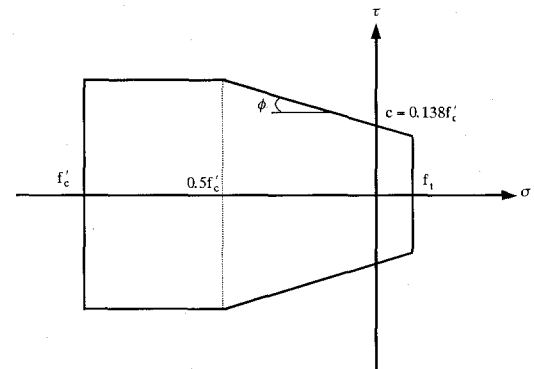
$$m\ddot{v} = \sum_j F_y^{ij} \quad (1b)$$

$$I\ddot{\theta} = \sum_j M^{ij} \quad (1c)$$

ここに、*m* は要素質量、*I* は慣性モーメント、 F_x^{ij} 、 F_y^{ij} 、 M^{ij} はそれぞれ、要素*j*が要素*i*に与える *x*、*y*、θ 方向の力とモー



(a)法線ばねの構成モデル



(b)接線ばねの破壊基準

図-2 コンクリートの構成モデル

メントを示す。

一般に、式(1)をオイラー法により陽的積分することが多いが、本研究では数値積分をより安定して行える中央差分法¹⁴⁾により積分演算を行った。

2.2 コンクリートの構成モデル

法線方向のばねは、図-2(a)に示すように圧縮側については降伏応力と圧縮強度を2直線で近似し、ピーク後に軟化させるモデルとした。ここで、降伏応力は圧縮強度の1/2とした。引張側はピークまで線形に上昇させ、引張強度に達した後は線形に軟化させた。ここで、引張強度は圧縮強度の1/10とした。また、圧縮、引張ともに軟化後の応力が最大応力の1/10を下回った場合は、降伏基準を最大応力の1/10とした。なお、除荷が発生した場合は、初期剛性で弾性復帰させている。

一方、接線方向のばねはコンクリート材料によく適用される図-2(b)の Mohr-Coulomb 型降伏基準^{15)、16)}とした。

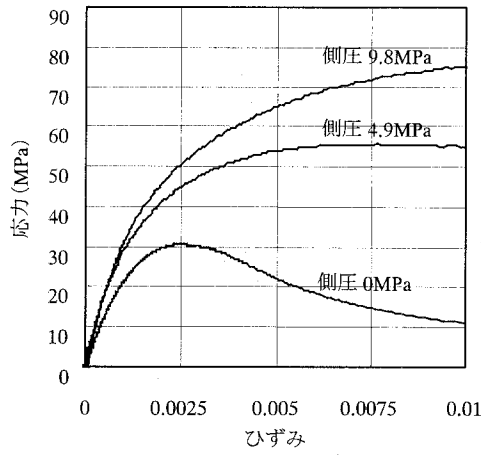
$$\tau_f = c - \sigma \tan \phi \quad (\sigma < 0.5f'_c) \quad (2a)$$

$$\tau_f = c - 0.5f'_c \tan \phi \quad (\sigma \geq 0.5f'_c) \quad (2b)$$

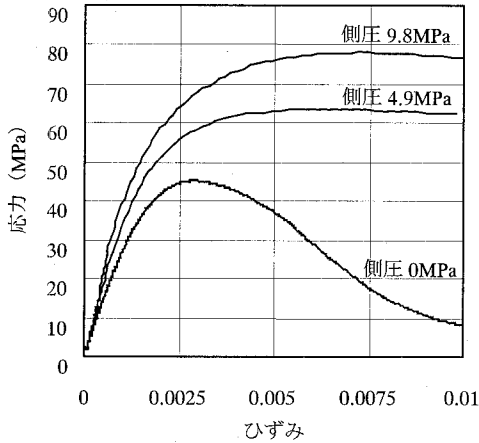
ここで、粘着力 *c* はせん断強度を表しており、 $c = 0.138f'_c$ とした。また、φ は内部摩擦角を示す。

せん断応力は①法線方向ばねが引張破壊した場合（ひび割れ発生）、②法線方向ばねが圧縮応力状態で、せん断ひずみが 4000 μ を超えた場合、に軟化させた。

以上の構成モデルにより求まる応力にばねの断面積を乗じて法線方向、接線方向のばね力 Q_n^{ij} 、 Q_s^{ij} を求め、座標変換して要素*j*が要素*i*に与える力成分 F_x^{ij} 、 F_y^{ij} 、 M^{ij} を求めた。



(a)静的試験結果



(b)急速試験結果

図-3 三軸圧縮試験による応力～ひずみ関係

$$F_x^{ij} = -Q_n^{ij} \cdot \cos \alpha_{ij} + Q_s^{ij} \cdot \sin \alpha_{ij} \quad (3a)$$

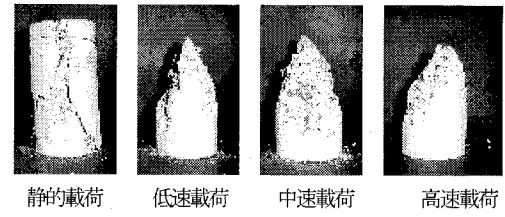
$$F_y^{ij} = -Q_n^{ij} \cdot \sin \alpha_{ij} - Q_s^{ij} \cdot \cos \alpha_{ij} \quad (3b)$$

$$M^{ij} = -r_i \cdot Q_s^{ij} \quad (3c)$$

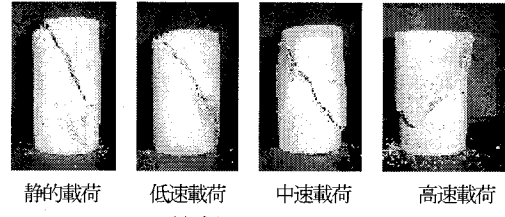
ここに、 α_{ij} は要素 ij のなす角、 r_i は要素 i の半径を示す。

3. 静的圧縮試験のシミュレーション解析

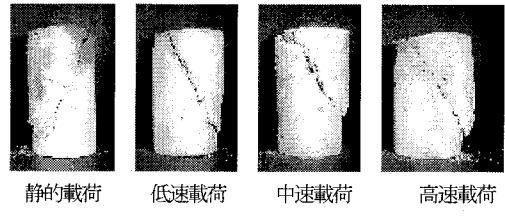
まず、阿部¹⁾が提案したばね定数を用いて弾性挙動を確認した後、弾塑性構成モデルを用いて静的圧縮試験のシミュレーションを行う。また、各構成モデルのパラメータが解析に及ぼす影響や側圧の効果について検討する。解析対象とする試験¹⁷⁾は、強度 30MPa の円柱コンクリート供試体（直径 5cm、高さ 10cm）に対する三軸圧縮試験である。この試験の特徴は、供試体内部にアクリル棒を軸方向に設置し、供試体の軟化挙動を精度よく計測していることである。試験は、静的載荷試験と急速載荷試験（最大ひずみ速度 10^0 (1/sec) 程度）を行っており、側圧は 0, 4.9, 9.8MPa の 3 種類を作用させている。実験から得られた応力～ひずみ関係を図-3 に示す。これより、側圧ゼロの場合は強度の 1/3～1/2 付近まで線形に上昇するが、その後徐々に非線形性を示しピークを



(a) 側圧 0MPa



(b) 側圧 4.9MPa



(c) 側圧 9.8MPa

写真-1 破壊状況

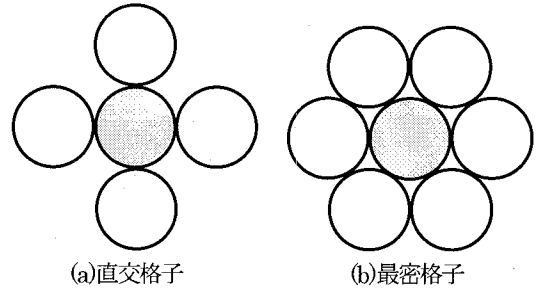


図-4 個別要素法の代表的な配列

迎えている。ピーク以降は緩やかに下降して最終的な破壊を迎えている。また、側圧を大きくすると軟化挙動がみられなくなる特徴がある。最終的な破壊状況は、写真-1 に示すように縦ひび割れをともなうせん断滑り破壊であることがわかる。また、本試験に適用した載荷速度や側圧の範囲内では、破壊性状の変化はあまりないようである。

3.1 解析モデルと弾性挙動

DEM 解析において等径要素を用いる場合、図-4 に示すような直交格子、最密格子の 2 つの配列が代表的である。阿部¹²⁾は、弾性係数 E 、ポアソン比 ν の弾性体をモデル化する場合のばね定数を理論的に誘導している。また、直交格子モデルではポアソン比ゼロの弾性体しか表現できないことを明らかにしている。そこで、本解析では最密格子を用いて解析モデルを作成した。最密格子のばね定数は次式で表される¹²⁾。

$$k_n = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{G}{1-2\nu} \quad k_s = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(1-4\nu)G}{1-2\nu} \quad (4)$$

表-1 基本ケースの解析定数

軸方向ばね定数 (GPa)	20.05	内部摩擦角 (°)	15
接線方向ばね定数 (GPa)	4.01	圧縮の軟化剛性 (GPa)	-5.0
圧縮強度 (MPa)	30.0	引張の軟化剛性 (GPa)	-5.0
引張強度 (MPa)	3.0	せん断軟化の限界ひずみ (法線ばね圧縮時, %)	10
せん断強度 (MPa)	4.1	せん断軟化剛性 (法線ばね引張時, GPa)	-5.0

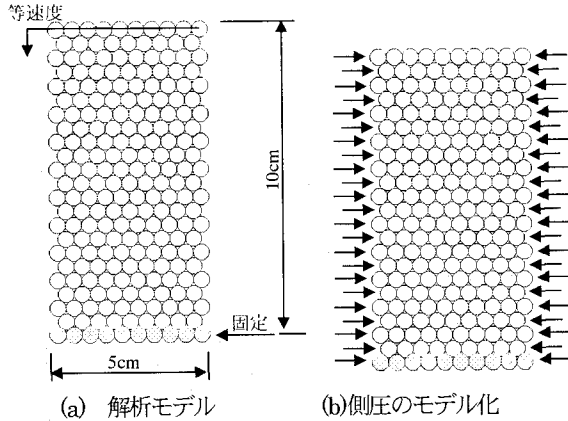


図-5 解析モデル

ここに、 k_n : 法線方向ばね定数、 k_s : 接線方向ばね定数、 G : せん断弾性係数であり、弾性力学より次式で表される。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

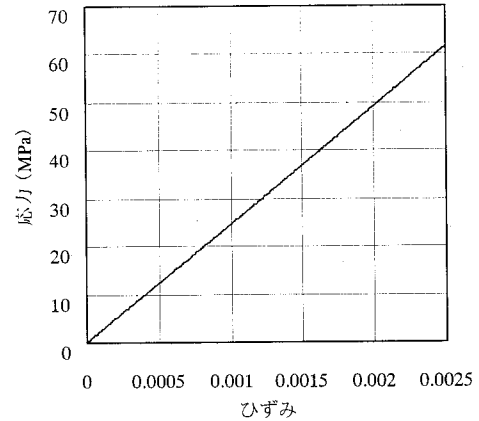
解析モデルを図-5に示す。実際の供試体は円柱であるが、本解析は2次元であるため、平面ひずみ問題として解析を行った。载荷条件は、解析モデルの最上部の要素に対して下方方向の速度 0.5cm/s を与え、時間ステップを 1.0×10^{-6} s として計算した。なお、減衰は考慮していない。弾性係数 E 、ポアソン比 ν は、実験結果を参考にそれぞれ $E = 25\text{GPa}$ 、 $\nu = 0.2$ として式(4)、(5)よりばね定数を算出した。便宜上、要素のばね定数に与える構成モデルと解析結果から得られる応力～ひずみ関係を区分して用いるため、解析において固定端で得られる反力と供試体軸方向の変形量をそれぞれ供試体の断面積と高さで除した応力とひずみの関係を巨視的応力～ひずみ関係と呼ぶ。また解析結果によるポアソン比は、まず载荷軸方向および载荷直交方向のそれぞれ2点を選び、2点間の軸方向および軸直交方向のひずみ ε_{11} 、 ε_{22} を求める。次に、このひずみ成分に基づいて平面ひずみの条件より、ポアソン比を次式で算出した。

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}} \quad (6)$$

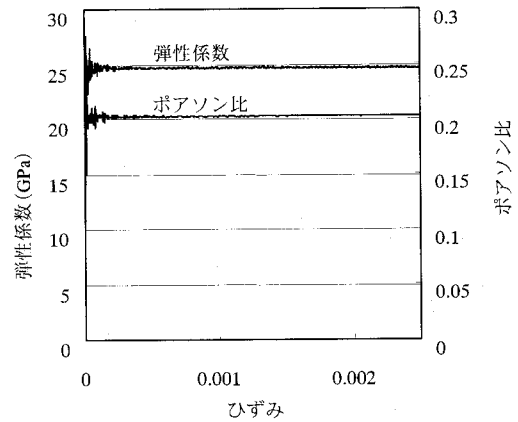
図-6に弾性解析で得られた巨視的応力～ひずみ関係および弾性係数とポアソン比の推移状況を示す。これより、解析により得られたマクロな弾性係数およびポアソン比は、解析当初において数値的問題によりやや乱れているが、まもなく想定した値に収束していることがわかる。

3.2 静的一軸圧縮試験のシミュレーション

法線方向および接線方向ばねの構成モデルにおけるパラメー



(a)巨視的応力～ひずみ関係



(b)弾性係数とポアソン比の推移

図-6 弾性解析結果

タ値は、以下のように決定した。まず、静的圧縮強度が 30MPa なので、法線方向ばねの強度を 30MPa とした。したがって、引張強度、せん断強度 (粘着力 c) は、それぞれ $f_t = 0.1f_c'$ 、 $c = 0.138f_c'$ で与えられる。一方、残されたパラメータは、法線方向ばねの①圧縮側の2次剛性、②圧縮側および引張側の軟化剛性、および接線方向ばねの③せん断応力の軟化剛性、④内部摩擦角である。ここでは簡単のため、法線方向ばねの軟化剛性は、圧縮、引張ともに同じ大きさとし、せん断応力の軟化については、①引張破壊時のせん断軟化剛性は引張軟化と等しくし、②法線方向ばねが圧縮応力状態のときは、10%のせん断ひずみまで緩やかに軟化させた。各パラメータが解析結果におよぼす影響は後で検討するが、実験をほぼよくシミュレートできる解析定数 (基本ケースという) を表-1に、解析から得られた巨視的応力～ひずみ関係を図-7に示す。これより、解析値はピーク前後でやや硬めの挙動を示しているが、立ち上がりやピーク後の軟化挙動まで比較的良好にシミュレートしていることがわかる。

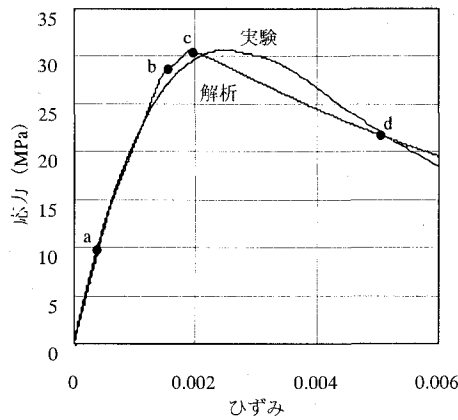


図-7 解析結果と実験結果の比較

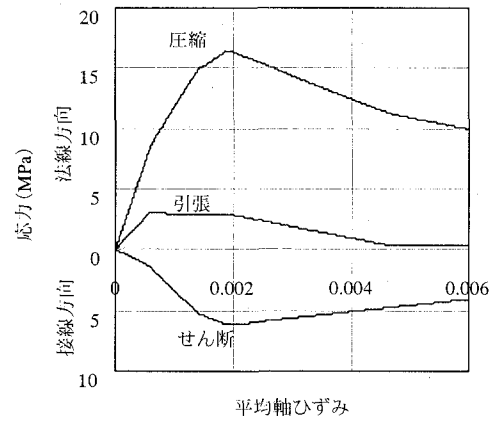


図-10 パート A の応力履歴の比較

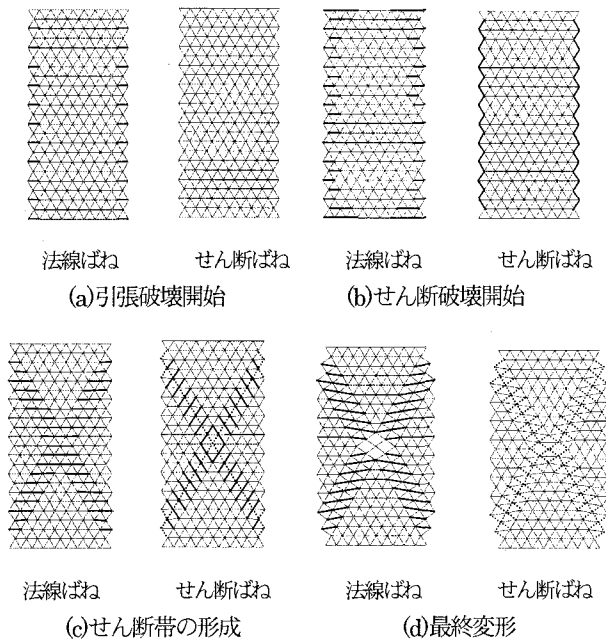


図-8 破壊進展過程

解析モデルの破壊進展過程を図-8に示す(対応する応力点は図-7参照)。図は、変形を10倍して示したものである。また図中の線は要素間の連結を示している。法線ばねの太線は、引張破壊して軟化プロセスにあることを示しており、完全に破壊した後は線を削除している。接線ばねの太線はせん断降伏を、点線は軟化プロセスにあることを示している。まず、図-8(a)のように、载荷初期の段階で供試体の外側からひび割れが内部に向かって進展し始める。続いて、供試体全体において軸方向のばねが圧縮降伏し、供試体外側からはせん断降伏が始まった(図-8(b))。最終的に図-8(c)のようにX型の引張軟化域とせん断帯が形成される。ちなみに、せん断帯Xにおける全てのばねが軟化領域に入った瞬間に全ての軸方向圧縮応力は除荷状態に入った(後述の図-10参照)。最終的には、引張およびせん断応力それぞれが軟化して図-8(d)のような樽状の変形状態となった。最終的な力の釣り合いは、主として軟化プロセスにあるせん断抵抗によって保たれている。この損傷・破壊プロセスは、実験と定性的によく対応している。

次に、供試体内におけるひずみの局所化について調べてみる。図-9にせん断帯内でひずみが局所化する部分(パートA)と、除

荷する部分(パートB)の応力履歴を示す。まず図-9(c), (e)より、パートA, Bにおける横方向の引張応力は、いずれも軸方向平均ひずみが0.0005程度のときに軟化領域に入る(図-7, 8および10参照)。この横方向の引張挙動は、ひずみの部位がせん断帯内にあるかどうかで、その後の挙動が異なる。すなわち、せん断帯内にあるパートAでは、せん断帯が軟化すると同時に大きな軟化を始めるが、パートBでは除荷挙動を示す。次に、パートAの軸方向圧縮応力は軸方向ひずみ0.0015程度で降伏して2次剛性にしたがって変形するが、せん断応力が軟化領域に入ると除荷した。図-9(d)は、パートAにおけるばね①のせん断方向の応力履歴を示しており、せん断降伏値に達した後、緩やかに軟化していることがわかる。

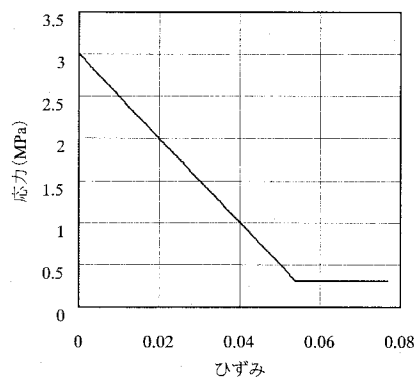
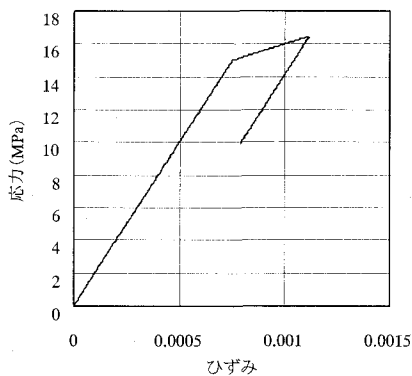
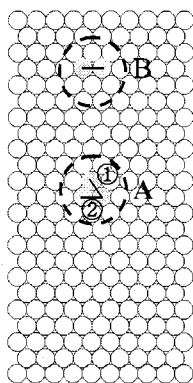
図-9(b), (c), (d)の各応力履歴を重ねて図-10に示す。図中の横軸は、供試体軸方向の巨視的な平均ひずみで、図-7の横軸と対応している。図-7と比較すると、せん断応力が軟化する以前の巨視的応力～ひずみ関係では、供試体全体に広がった横方向の引張応力や軸方向の圧縮応力の非線形性が支配的であるが、せん断帯が軟化するとせん断帯の応力挙動が支配的となる。以上の解析より、DEMにより静的な一軸圧縮試験の応力～ひずみ関係や破壊進展過程を比較的良好にシミュレートできることがわかった。

3.3 弾塑性パラメータの影響

図-11(a)に圧縮側の2次剛性を基本ケースの2倍にしたときの解析結果を示す。これより、ピークまで両者の挙動はほぼ等しいが、ピーク直前において破壊挙動が異なっている。すなわち、2次剛性を2倍にするとやや早くせん断降伏が始まっている。次に、引張軟化剛性およびせん断の軟化剛性を変化させたときの解析結果を図-11(b), (c)に示す。これより、引張とせん断の軟化剛性を大きくする(せん断破壊時のひずみを10%から5%に低減)と、ピーク以降の軟化勾配が急になることがわかる。とくに、せん断軟化の場合には、図-11(c)に示すように数値的な不安定を生じ計算が途中で発散した。内部摩擦角については、図-11(d)のように、角度が大きくなるにしたがいピーク値が大きくなるがわかる。

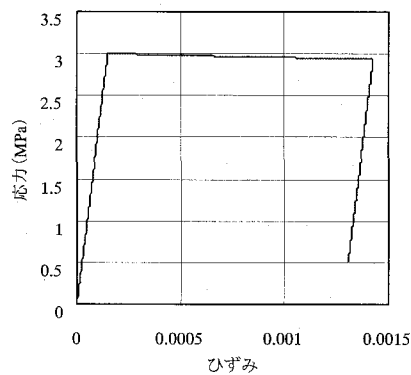
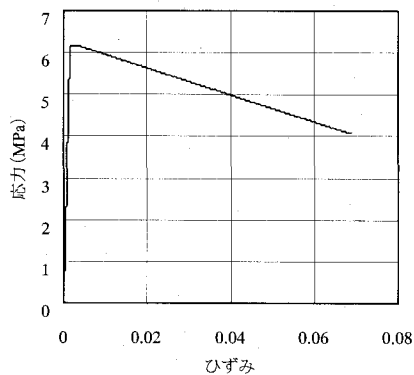
3.4 初期欠陥の影響

写真-1を見ると、せん断破壊の形はX型ではなくどちらか片



(a) 局所化部と除荷部の要素 (b) 圧縮応力～ひずみ関係 (パート A, ①)

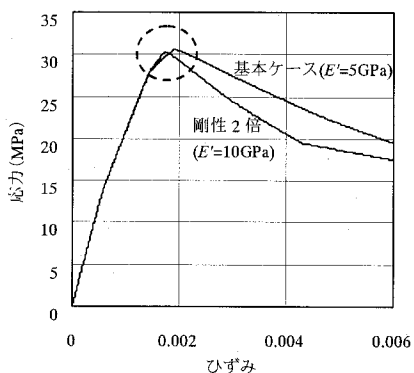
(c) 引張応力～ひずみ関係 (パート A, ②)



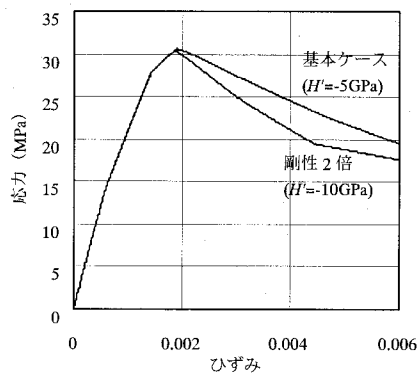
(d) せん断応力～ひずみ関係 (パート A, ①)

(e) 引張応力の除荷 (パート B)

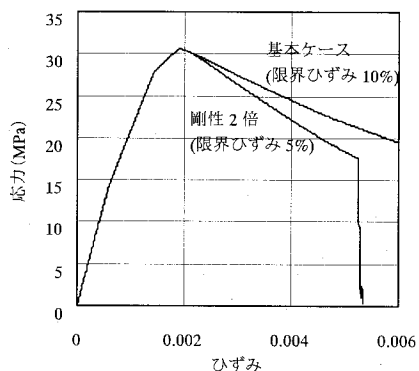
図-9 応力履歴



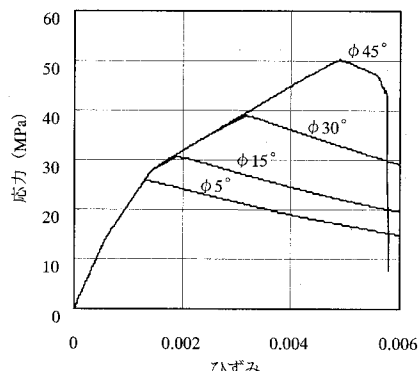
(a) 圧縮側の 2 次剛性の影響



(b) 引張側の軟化剛性の影響



(c) せん断軟化剛性の影響



(d) 内部摩擦角の影響

図-11 弾塑性パラメータの影響

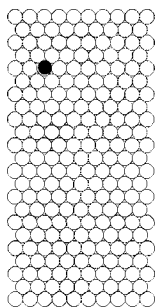
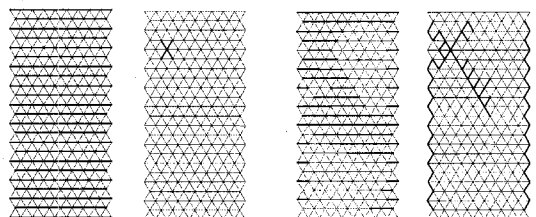
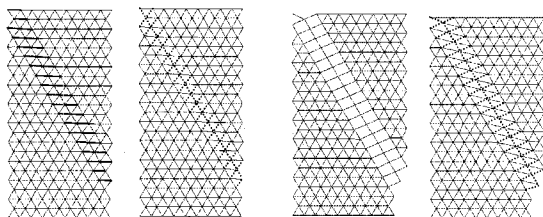


図-12 初期欠陥の位置



(a) せん断すべり発生 (b) 斜め方向への進展



(c) せん断帯の形成 (d) 最終破壊状況

図-13 初期欠陥を与えた場合の破壊進展過程

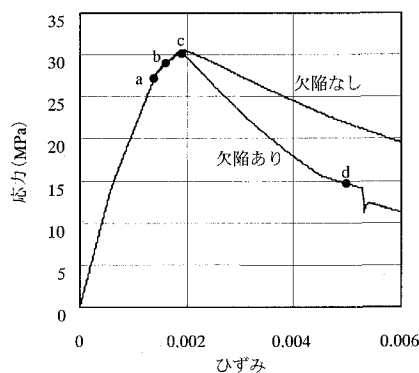
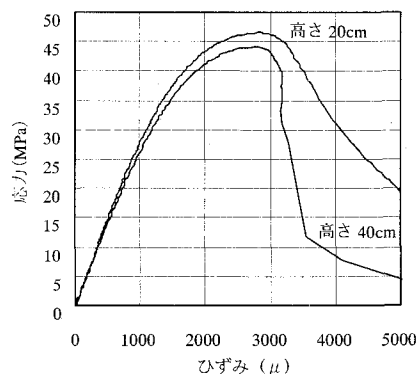


図-14 初期欠陥が巨視的応力～ひずみ関係に与える影響

側のみに滑っているケースが多い。この原因の一つとして、コンクリートは骨材や空隙などの局所的な欠陥を含んでいることが考えられる。本解析は2次元平面ひずみモデルであるため、実際の円柱供試体と直接対応づけることは難しいが、定性的な傾向を調べるために初期欠陥を考慮した解析を行った。図-12に初期欠陥を与えた位置を示す。初期欠陥の大きさは、圧縮強度、引張強度を2/3、せん断強度を1/2とした。図-13に破壊の進展過程を示す(対応する応力点は図-14参照)。まず、初期欠陥の位置にク



(a) 応力～ひずみ関係

(b) 破壊状況

図-15 高さの違いの影響を調べた実験結果¹⁸⁾

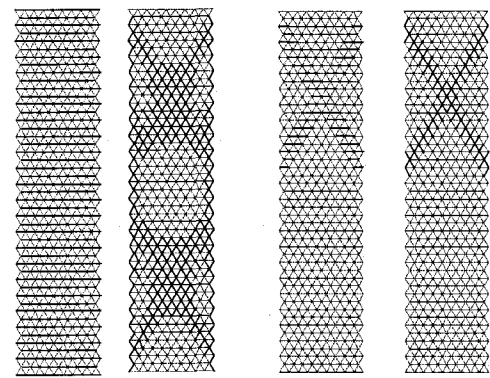
ラックが発生し、せん断降伏が生じる。次に、このせん断破壊が右下方向へ伝播し、せん断帯を形成している。最終的に、せん断軟化による滑り破壊が明瞭に生じ、せん断滑り面の角度も急な勾配となっている。図-14は欠陥の有無が巨視的応力～ひずみ関係におよぼす影響を示している。これより、両者の挙動はピークまではほぼ同じであるが、欠陥がある場合はポストピークの勾配が急になることがわかる。初期欠陥の位置を何通りかに変化させて解析を行ったが、ある弱部が破壊すると、その位置によって破壊が左右あるいは上下非対称に進展し、ポストピークの軟化勾配も変化した。

3.5 供試体高さの影響

藤掛ら¹⁸⁾は、直径10cmのコンクリート円柱供試体の高さを20cm、40cmに変化させて、供試体の高さが応力～ひずみ関係に及ぼす影響を調べている(図-15)。これより、供試体高さが高くなると、ポストピーク挙動が脆性的となることがわかる。この現象は、破壊が局所化することによって発生すると考えられている。そこで、解析モデルの高さを2倍にして計算を行い、供試体高さの影響を調べた。図-16に破壊の進展過程を示す。これより、供試体の高さを2倍にすると、まず供試体の上下にX型のせん断降伏が発生することがわかる。次に、上部のせん断降伏域に破壊が集中し、最終的には上部の片側方向に滑り面が発達した。この破壊位置がどのように決まるかは、今のところよくわからないが、陽解法にともなう数値誤差、要素数および境界条件などの影響が考えられる。図-17には、高さを変化させたときの巨視的応力～ひずみ関係を示している。これより、両者の挙動はピークまではほぼ同じであるが、ピークを過ぎると高さ2倍のケースでは巨視的応力が急激に低下して、せん断滑りが大きくなったところで数値的に発散した。このピーク後の挙動は、藤掛らの実験結果とよく対応しており、本研究で用いた構成モデルにより破壊の局所化の影響を適切に評価できることがわかった。

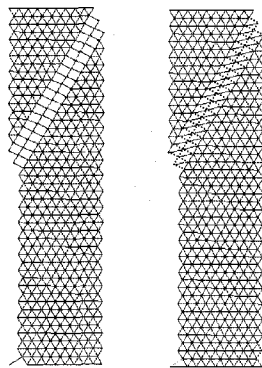
3.6 側圧の影響

ここでは、三軸圧縮試験のシミュレーションを行い、側圧の効果について調べた。実験では静水圧を設定した大きさまで作用させたうえで軸方向荷重を行っているが、解析では、側圧に要素の断面積を乗じて力に換算し、図-5(b)のように側方の要素に作用させた。側圧4.9MPaおよび9.8MPaの解析結果をそれぞれ図-18、



法線ばね せん断ばね
(a)初期のせん断降伏面

法線ばね せん断ばね
(b)上側への降伏集中



法線ばね せん断ばね
(c)最終破壊状況

図-16 高さ2倍のときの破壊状況

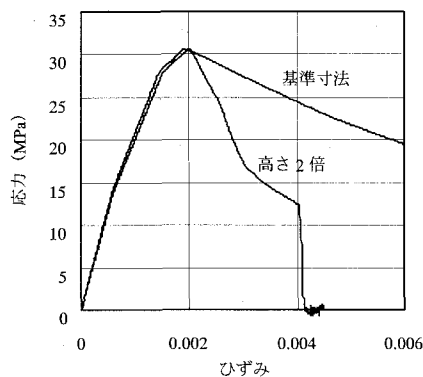
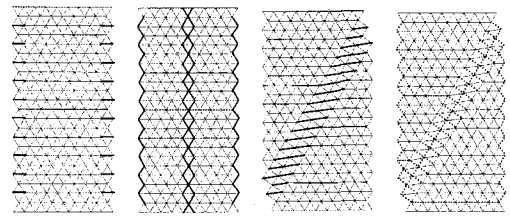
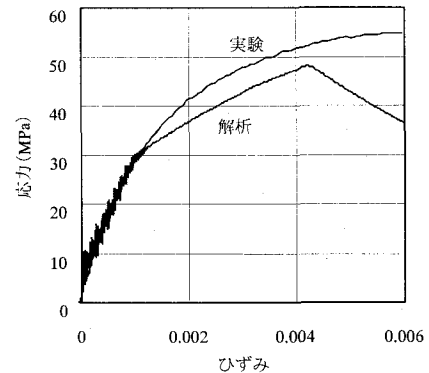


図-17 高さが巨視的応力～ひずみ関係に与える影響

19に示す。両図(a)の左側は、供試体の外側の要素に引張破壊が生じたときの破壊状況を、右側には最終破壊性状を示している。側圧が作用しない場合は、荷重当初に供試体全体にひび割れが発生するのに対し、側圧が大きくなるにしたがい、ひび割れの発生が抑制されている。また、最終的な破壊状況は、側圧 4.9MPa では左右非対称なせん断滑り、9.8MPa では上下の水平な層に破壊が局所化した。このような非対称な破壊モードになる理由は、図-18、19(b)の巨視的応力～ひずみ関係より、荷重当初にノイズのような振動を伴いながら応力が上昇している。これは、解析の初めから一定側圧を急激に作用しているためであり、このときに非対称性の原因となる数値的誤差が入り込んだものと考えている。しかし、図-18、19(b)の巨視的応力～ひずみ関係と実験結果を比べてみる

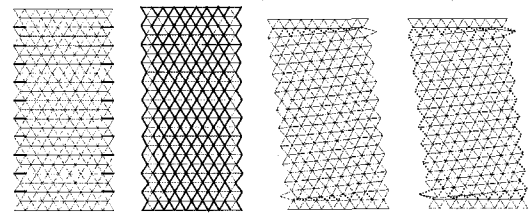


法線ばね せん断ばね 法線ばね せん断ばね
(a)破壊状況

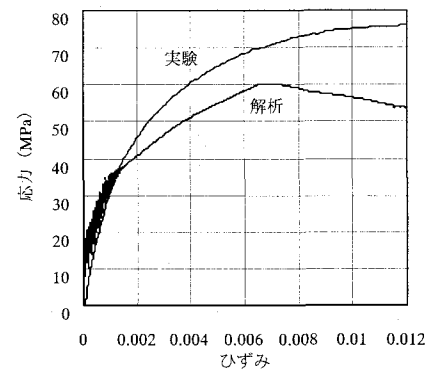


(b)巨視的応力～ひずみ関係

図-18 側圧4.9MPaの解析結果



法線ばね せん断ばね 法線ばね せん断ばね
(a)破壊状況



(b)巨視的応力～ひずみ関係

図-19 側圧9.8MPaの解析結果

と、最大応力はやや小さめであるが、側圧の上昇につれて増大しており、定性的な傾向はシミュレートできている。ピーク以降の軟化勾配が実験よりも大きいのは、これは破壊性状が側圧ゼロの場合と異なるため、今後詳細に検討する必要がある。実験に比べて最大応力が小さくなる理由としては、実験供試体は円柱であるのに対し、解析モデルは平板となっていることや構成モデルに問題があると考えている。すなわち、FEMなどの連続体解析において Mohr-Coulomb の破壊基準を用いる場合、偏差応力の大きさに関

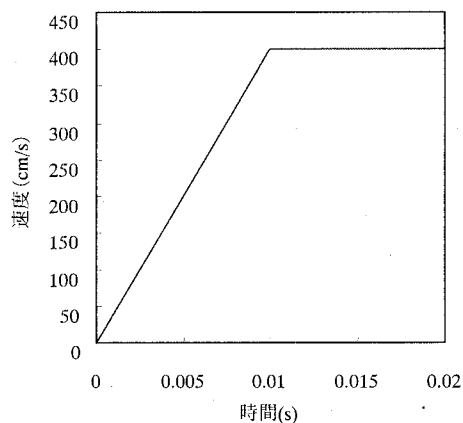
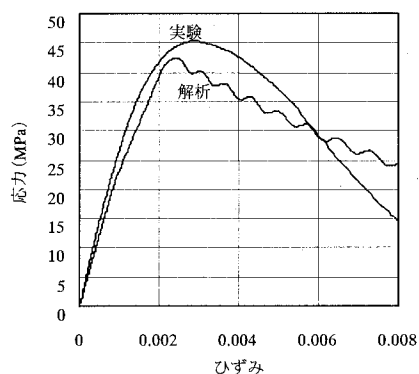
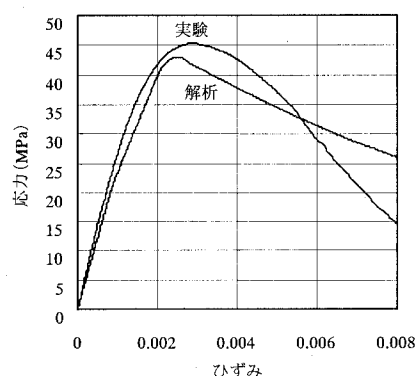


図-20 解析モデルに作用させた載荷速度



(a)減衰なし



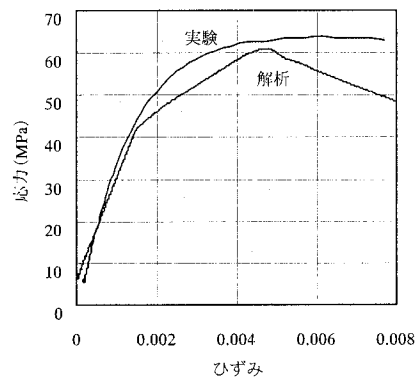
(b)減衰考慮

図-21 高速載荷の解析結果

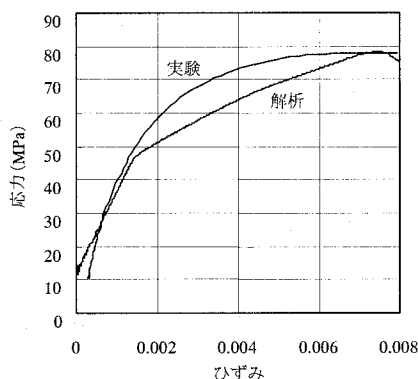
係する垂直応力は各主応力成分 σ_i によって求まるため側圧の影響を直接に考慮できる。しかし、DEM では 1 本の法線方向ばねのみによって垂直応力が求まるため、要素寸法や配列の影響を大きく受けるものと考えられる。したがって、今後は側圧をさらに精度よく考慮できるように工夫する必要がある。

4. 急速圧縮試験のシミュレーション解析

前章では、DEM によりコンクリートの静的圧縮挙動をシミュレートすることがわかった。ここでは、上林らが行った急速三軸圧縮試験のシミュレーション解析を行って高ひずみ速度、多軸



(a)側圧 4.9MPa



(b)側圧 9.8MPa

図-22 側圧を考慮した急速載荷解析結果

応力状態にあるコンクリートの挙動をどの程度表現し得るかを検討する。解析は、急速載荷実験に基づいて図-20 の速度～時間関係を与えて計算した。解析の条件はこれまでと同じであるが、載荷速度が速くなったので、時間ステップを 2.0×10^{-7} s まで小さくした。

急速載荷を受けるコンクリートの圧縮強度の増加について、藤掛¹⁸⁾ は次式を提案している。

$$\frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.006 \left[\log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^{1.05}} \quad (7)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的載荷のひずみ速度 (1.2×10^{-5} 1/sec) , $\dot{\epsilon}$ は急速載荷時のひずみ速度、 f'_{cs} は静的載荷時の圧縮強度、 f'_{cd} はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で載荷した場合の圧縮強度を示す。

本研究では、ひずみ速度が大きくなると構成モデルの降伏関数が等方的に大きくなるものと仮定した。すなわち、圧縮強度、引張強度およびせん断強度にひずみ速度効果を考慮し、内部摩擦角はそのままとした。上林らの実験によると、急速載荷時の軸方向のひずみ速度は 10^9 (1/sec) 程度である。そこで、このひずみ速度から式(7)により強度の増加率を求めると 1.44 となるので、各降伏基準値を 1.44 倍して解析を行った。図-21(a)に解析による巨視的応力～ひずみ関係と実験結果を比較して示す。これより、解析はひずみ速度効果を比較的良好に表現できているが、ピーク後に周期的な振動が確認できる。要素の加速度成分を確認したところ、引張破壊やせん断破壊が生じると大きな高周波加速度が発生し

ていた。そこで、減衰を考慮した解析(減衰係数 $1.0 \times 10^{-1} \text{N} \cdot \text{s/cm}$)を行って、この高周波加速度を低減させた。この解析結果を図-21(b)に示す。これより、振動成分が除去されていることがわかる。

ちなみに、静的と同じ降伏関数を用いて急速解析を行った場合、解析値は慣性力の影響で静的解析の結果よりもわずかに大きくなる程度であった。したがって、現象に応じて降伏関数にひずみ速度効果を適切に考慮する必要がある。

図-22 には、側圧を作用させたときの解析結果を示している。これより、側圧 4.9, 9.8MPa とともに実験とよく一致している。しかし、静的解析と同様に、せん断滑り面が形成されると軟化する挙動を示しており、今後実験結果を参考にして構成モデルを修正する必要があると考えている。また、本解析では全ての要素に対し、ひずみ速度効果を一律に与えた。しかし、実際は供試体内の部位によって異なる大きさを示すと考えられ、このひずみ速度の分布が解析結果に与える影響についても検討する必要がある。

5. 結論

本研究は、高ひずみ速度下にあるコンクリート材料の弾塑性解析に対する DEM の適用性を検討するため、コンクリートの静的圧縮破壊挙動や急速三軸圧縮試験のシミュレーションを行ったものである。本研究の成果を要約すると以下のとおりである。

(1) 法線方向ばねにコンクリートの一軸圧縮特性をバイリニアで直線近似し、接線方向ばねには Mohr-Coulomb 型の破壊基準を用いた構成モデルを DEM に適用して、コンクリートの静的圧縮挙動をシミュレートした。その結果、巨視的応力～ひずみ関係や破壊のプロセスを再現することができた。また、構成モデルの弾塑性パラメータが解析結果におよぼす影響についても調べた。

(2) コンクリート材料における初期欠陥の影響を考慮した解析を行った。その結果、初期欠陥がある場合には、せん断滑り面の形成位置やポストピークの軟化勾配が変化することがわかった。

(3) 供試体の高さが応力～ひずみ関係におよぼす影響について解析的に調べた。解析結果は、実験結果をよくシミュレートしており、本研究で用いた構成モデルにより破壊の局所化現象を適切に考慮できることが検証された。

(4) また、側圧の効果についても検討を行った。その結果、側圧の増大にともなう強度増加は表現できた。しかし、せん断滑りが発生すると軟化現象が発生した。また、側圧ゼロの場合の破壊面は上下、左右対称であったが、側圧を作用させると非対称のモードとなった。

(5) 上記の検討に加え、構成モデルの降伏強度にひずみ速度効果を考慮することにより、急速三軸圧縮試験をシミュレートできた。

今後は、ひずみ速度や側圧の影響をより正確に表現できるように、実験結果に基づいて構成モデルを修正する必要があると考えている。

謝辞：本研究を行うにあたり、防衛大学校建設環境工学科 藤掛一典助教授に貴重な実験データを提供していただきました。ここ

に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岸徳光, 安藤智啓, 井元勝慶, 河西良幸, 香月智, 上林厚志, 榎谷浩: 矩形 RC 梁の重錘落下衝撃挙動に関するラウンドロビンアナリシス, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1299-1310, 2003.
 - 2) 藤村尚, 西村強, 木山英郎: DEM 解析における要素定数の検討, 材料, 第 39 巻, 第 447 号, pp.97-103, 1990.12.
 - 3) 大町達夫, 荒井靖博: 個別要素法で用いる要素定数の決め方について, 構造工学論文集, Vol.32A, pp.715-723, 1986.3.
 - 4) 鷺津久一郎, 宮本博, 山田嘉昭, 山本善之, 川井忠彦: 有限要素法ハンドブック I 基礎編, 培風館, 1981.7.
 - 5) 松尾真紀, 恩田雅也, 二羽淳一郎: 埋め込み型要素を用いた RC はりのひび割れ進展解析, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.163-177, 2003.5.
 - 6) 竹本憲介, 上林勝敏, 香月智, 石川信隆: RBSM-FEM 混合型要素モデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.197-213, 2002.1.
 - 7) 目黒公郎: コンクリートの破壊解析への個別要素法の適用, コンクリート工学, Vol.31, No.5, pp.5-17, 1993.5.
 - 8) 鈴木真次, 石川信隆, 石川芳治, 水山高久, 古川浩平: 高速载荷を受ける主鉄筋で補強したコンクリート製砂防ダム袖部模型の動的挙動と個別要素法による破壊解析, 土木学会論文集, No.567/VI-35, pp.141-160, 1997.6.
 - 9) 中田吉彦, 榎谷浩, 梶川康男, 森嶋芳大: 個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1761-1771, 1998.3.
 - 10) 森川博司, 澤本佳和, 小鹿紀英: 個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 473 号, pp.127-135, 1995.7.
 - 11) 坪田張二, 河西良幸, 小鹿紀英, 澤本佳和, 森川博司: 縮尺模型と実物による鉄筋コンクリート板の衝撃実験と解析, 第 3 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.157-162, 1996.
 - 12) 阿部和久: 個別要素法による連続体解析におけるバネ定数の設定, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.83-90, 1996.
 - 13) コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, 日本コンクリート工学協会, 2003.8.
 - 14) 鷺津久一郎, 宮本博, 山田嘉昭, 山本善之, 川井忠彦: 有限要素法ハンドブック II 応用編, 培風館, 1981.7.
 - 15) 上田眞稔: 鉄筋コンクリート部材の離散化極限解析法に関する研究, 東京大学博士論文, 1995.11.
 - 16) 斉藤成彦, 中村光, 檜貝勇: 剛体～バネモデルを用いた RC パネルのせん断二次破壊に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.219-234, 2002.5.
 - 17) 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 高ひずみ速度・三軸圧縮応力下におけるコンクリートの動的軟化特性とそのモデル, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.135-148, 2001.2.
 - 18) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮载荷を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.37-54, 1999.8.
- (2003 年 9 月 12 日受付)