

# 論文 3次元 RBSM によるコンクリートの高速圧縮破壊解析

山本 佳士<sup>\*1</sup>・中村 光<sup>\*2</sup>・黒田 一郎<sup>\*3</sup>・古屋 信明<sup>\*4</sup>

**要旨:** 高速圧縮下におけるコンクリートの破壊挙動を解析的に評価することを目的とし、著者らが提案しているコンクリートの準微視的な力学挙動をモデル化した3次元 RBSM により、载荷速度および供試体高さを変化させた高速1軸圧縮解析を行った。解析により得られた供試体内部の応力・損傷分布性状を可視化することにより、ひずみ速度が1.0/secを超える高ひずみ速度域においては、慣性力の影響により圧縮強度が増加することを示した。さらに、高ひずみ速度域では、静的载荷時と比較して、応力波の影響により破壊局所化領域が広がることを示した。

**キーワード:** ひずみ速度効果, 1軸圧縮, 破壊局所化, 3次元 RBSM

## 1. はじめに

コンクリートは、その他の多くの材料と同様に、高速で荷重が作用し大きなひずみ速度が生じる場合には力学特性が著しく変化する、いわゆるひずみ速度効果と呼ばれる現象を示す。重量物の落下、高速飛来物の衝突あるいは火薬・ガス等の爆発など、高速度で荷重が作用する場合のコンクリート構造物の挙動を解析的に評価するためには、ひずみ速度効果の適切なモデル化が必要であり、このため、これまでにコンクリート供試体の高速载荷実験は数多く行われている。例えば、白井ら<sup>1)</sup>は油圧式高速载荷装置および Split Hopkinson Pressure Bar 法 (以下, SHPB 法) を用いて、ひずみ速度  $10^{-3} \sim 10^{-1}/\text{sec}$  および  $10^0 \sim 10^2/\text{sec}$  の領域の動的圧縮強度を定量的に評価しており、①静的強度に対する動的強度の倍率 (以下, 動的応答倍率) は、ひずみ速度  $10^0 \sim 10^1/\text{sec}$  付近から急激に増加すること、②動的応答倍率は、コンクリートの含水率に大きく依存し、乾燥試験体の場合、ひずみ速度  $10^1/\text{sec}$  以下では、動的応答倍率の顕著な増加は見られないことを明らかにしている。また、藤掛ら<sup>2)</sup>は、油圧式高速载荷装置を用いて、ひずみ速度  $10^{-2} \sim 10^0/\text{sec}$  の領域におけるコンクリートの圧縮強度および圧縮軟化・局所化挙動を定量的に評価しており、①同ひずみ速度域におけるコンクリートの圧縮破壊エネルギーは、载荷速度が大きくなるにしたがい増加すること、②破壊局所化長さおよび圧縮破壊エネルギーは、同ひずみ速度域において、静的载荷時と同様に供試体長さには依存しないことを明らかにしている。衝撃を受けるコンクリート構造物の終局に至るまでの挙動を精度よく評価するためには、高ひずみ速度域におけるコンクリートの圧縮軟化特性を適切に理解し評価する必要がある。藤掛らの実験では、ひずみ速度  $10^{-2} \sim 10^0/\text{sec}$  の領域における同材料特性のひ

ずみ速度依存性が定量化されているが、それ以上のひずみ速度域では、実験が困難であることから明らかにされていないのが現状である。

著者らは<sup>3)</sup>、コンクリートの粗骨材寸法程度の準微視的な力学挙動に着目し開発した構成モデルを3次元 RBSMに適用し、同手法により各種応力下のコンクリートの破壊解析を行っている。その結果、提案手法はプレーンコンクリートの圧縮軟化・局所化挙動、体積膨張挙動および拘束圧依存性挙動を定量的に再現でき、さらに、実験で観察される変形・破壊性状を良好に再現できることを明らかにしている。

本研究は、著者らが提案している3次元 RBSM を用いて、実験では未だ明らかにされていない、高速圧縮荷重下における破壊局所化挙動を解析的に評価することを試みた。具体的には、まず、コンクリート材料の標準試験供試体程度の寸法を有するコンクリートの、载荷速度をパラメータとした高速1軸圧縮解析を行い、ひずみ速度の増加に伴う圧縮強度の動的応答倍率の再現性の検証を行う。同時に、コンクリート内部の応力および損傷分布性状を可視化することにより、コンクリートの高速圧縮破壊メカニズムを評価する。さらに、供試体高さを変化させて高速载荷解析を行い、高ひずみ速度域にお

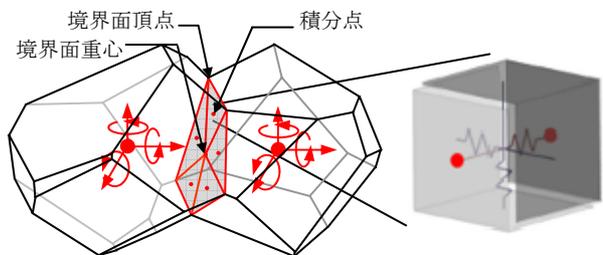


図-1 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

\*1 防衛大学校 建設環境工学科助教 修 (工) (正会員)

\*2 名古屋大学大学院 社会基盤工学専攻教授 博 (工) (正会員)

\*3 防衛大学校 建設環境工学科准教授 博 (工) (正会員)

\*4 防衛大学校 建設環境工学科教授 博 (工) (正会員)

る破壊局所挙動の評価を行う。

## 2. 解析手法

### 2.1 RBSM

本研究では、コンクリートのモデル化に、参考文献3)で提案している、Voronoi 分割を用いたランダムな要素形状を有する3次元RBSMを用いる。構成モデルおよび材料パラメータ同定法を含めた提案モデルの詳細は、参考文献3)を参照されたい。以下に、提案モデルの概要を示す。図-1に示すように、各要素内の任意点(本研究では要素重心)に6自由度の3次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には、境界面法線方向および接線方向に、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する(垂直バネが1個、せん断バネが2個)。本研究では、図-1に示すように、境界面を、境界面重心と境界面頂点からなる三角形に分割し、その三角形の重心に積分点を設定した。本提案モデルでは一つの境界面に対し複数の垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置することにより、回転バネを導入することなく、隣接する要素間の曲げモーメントおよびねじりモーメントの伝達およびその非線形特性を簡便に評価できる。本解析では、静的挙動に対しては、RBSMにより離散化された剛性方程式を解き、材料の構成モデルに従って非線形解析を行う手法を用いている。一方、動的挙動に対しては、RBSMにより離散化された運動方程式を、ルンゲ・クッタ法を

用いて解いた。また、本研究における全ての解析では減衰項を考慮していない。

### 2.2 構成モデル

コンクリートの材料特性は、垂直バネに圧縮・引張挙動、せん断バネにせん断すべり挙動を以下のようにモデル化することで表現した。垂直バネの引張挙動は、図-2のようにモデル化した。図中  $E$  は弾性係数、 $\sigma_t$  は引張強度および  $g_f$  は破壊エネルギーを示している。また、図中の  $h$  は、隣接する要素  $i, j$  の重心から要素境界面上に下ろした垂線の長さ  $h_i$  と  $h_j$  の和であり、以降、要素特性長さと呼ぶ。垂直応力  $\sigma$  が引張強度  $\sigma_t$  に達するまでは弾性とし、その後は破壊エネルギー  $g_f$  によって軟化勾配を変化させる1/4モデルに従って応力を低減させた。また、除荷過程は原点指向型とした。垂直バネの圧縮挙動は、図-3に示すような、2つの2次関数を用いた逆S字曲線でモデル化した。図-3中の、 $\sigma_c$ 、 $\epsilon_{c2}$ 、 $\alpha_{c1}$ 、 $\alpha_{c2}$  は垂直バネの圧縮挙動における非線形性を制御する材料パラメータである。除荷・再負荷は図-3に示すような経路を仮定した。

せん断バネの応力-ひずみ関係は、図-4に示すように、せん断強度に達するまでは線形と仮定し、応力がせん断強度に達すると、せん断バネのひずみの進展に応じて軟化するものと仮定した。図-4中の  $\tau_f$  はせん断強度、 $\gamma_f = \tau_f / G$ 、 $K$  はせん断軟化係数である。 $K$  は以降で示す、垂直バネの応力に依存するパラメータ  $\beta$  と  $G$  の積で算定される。せん断バネの応力-ひずみ関係の弾性係

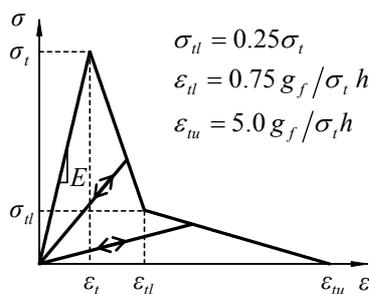


図-2 垂直バネの引張挙動

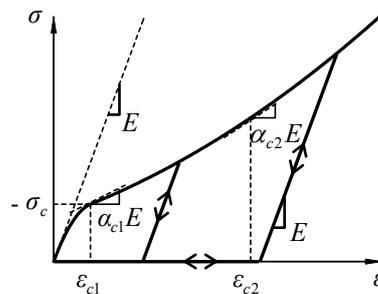


図-3 垂直バネの圧縮挙動

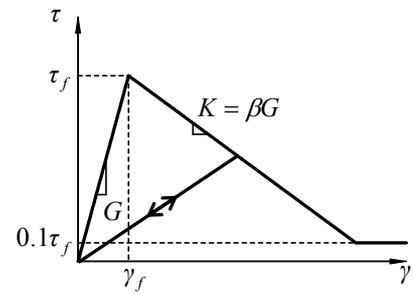


図-4 せん断バネの挙動

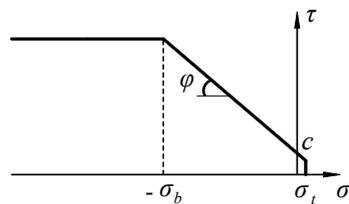


図-5 破壊基準

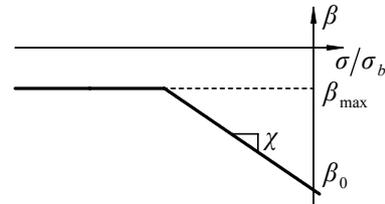


図-6 せん断バネの軟化係数

表-1 材料パラメータ

垂直バネ							せん断バネ							
弾性係数	引張領域			圧縮領域			弾性係数	破壊基準			軟化挙動			
$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$g_f$ (N/mm)	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{c2}$	$\alpha_{c1}$	$\alpha_{c2}$	$\eta = \frac{G}{E}$	$c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\varphi$ (degree)	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\beta_0$	$\beta_{max}$	$\chi$	$\kappa$
1.4E*	0.8f <sub>t</sub> *	0.5G <sub>f</sub> *	1.5f <sub>c</sub> '*	-0.015	0.15	0.25	0.35	0.14f <sub>c</sub> '*	37	f <sub>c</sub> '*	-0.05	-0.025	-0.01	-0.3

数  $G$  は、垂直バネの弾性係数  $E$  に係数  $\eta$  を乗じて設定した。せん断強度は、RBSM の構成モデルとしてよく用いられている、図-5 に示すモール・クーロン型の破壊基準を用いた。図-5 中の、 $c$  は粘着力、 $\varphi$  は内部摩擦角、 $\sigma_b$  はせん断強度が増加する圧縮応力の限界値（以下、圧縮限界値）である。せん断軟化係数  $K$  は、図-6 に示すように、垂直バネの応力に依存するものと仮定した。図-6 中の  $\beta_0$ 、 $\beta_{max}$ 、 $\chi$  は、せん断軟化係数の、垂直バネの応力依存性を制御する材料パラメータである。さらに、ひび割れ面（垂直バネが引張強度に達した面）においてはひび割れ開口に伴うせん断伝達特性の劣化を表現するためにせん断剛性の低減および軟化モデルを導入した<sup>3)</sup>。

表-1 に、参考文献 3) で同定した、1 軸引張、1 軸圧縮、静水圧圧縮および 3 軸圧縮応力下のコンクリートの巨視的な軟化・局所化挙動、体積膨張挙動および拘束圧依存性挙動を再現できる材料パラメータを示す。なお、表中の  $\kappa$  は、ひび割れ面のせん断剛性の低減および軟化性状を規定するパラメータである<sup>3)</sup>。上付き\*は、コンクリート材料試験により得られる材料特性値であることを示しており、 $E^*$ ：ヤング係数、 $f_t^*$ ：引張強度、 $G_f^*$ ：破壊エネルギー、 $f_c^*$ ：圧縮強度である。

### 3. 高速 1 軸圧縮破壊挙動の評価

#### 3.1 解析概要

図-7 に解析モデルを示す。円柱供試体は、直径 100mm、高さ 200mm であり、RBSM の要素特性長さ  $h$  の平均値は約 10mm とした。 $f_c^*$  は 30MPa と設定し、その他の解析に必要な上述の材料特性値、 $E^*$ 、 $f_t^*$ 、 $G_f^*$  は、参考文献 5) を参考に決定し、それぞれ、28kN/mm<sup>2</sup>、2.2N/mm<sup>2</sup>、0.084N/mm とした。円柱供試体の両端面には載荷板要素を設け、上側の載荷板に図-8 に示す速度-時間関係を与えて高速載荷を再現した。図中に示す  $v_l$  は載荷速度を表しており、ここでは、0.2m/sec、4m/sec、10m/sec の 3 ケースについて解析を行った。また、比較のため静的載荷解析も行った。

#### 3.2 巨視的応力-ひずみ応答と圧縮強度増加率

図-9 に、解析により得られた上縁および下縁載荷板に作用する荷重を供試体断面積で除したもの（以下、上縁部応力および下縁部応力）および両者の平均値（以下、平均応力）の時刻歴応答を示す。また、同図中には平均ひずみの時刻歴応答も示す。ここで、平均ひずみとは、供試体上縁および下縁断面の断面中心に位置する要素の鉛直方向相対変位をその要素間長さで除したものである。まず、平均ひずみの時刻歴応答に着目すると、応力が最大値に至る前もしくは直前に、平均ひずみ-時間関係の勾配が一定になっており、ひずみ速度がほぼ一定になっていることが確認できる。 $v_l$  が 4m/sec および

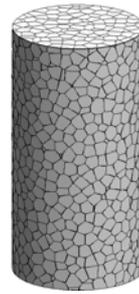


図-7 解析モデル

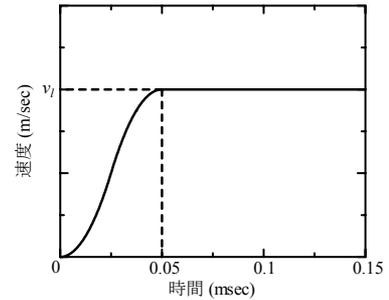
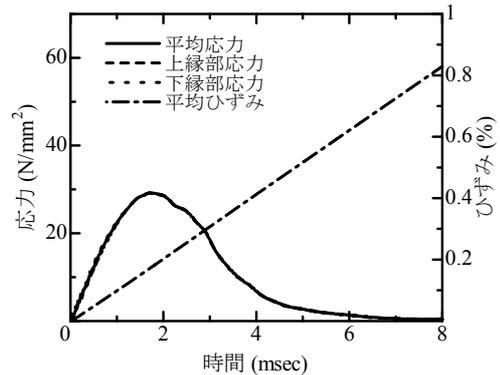
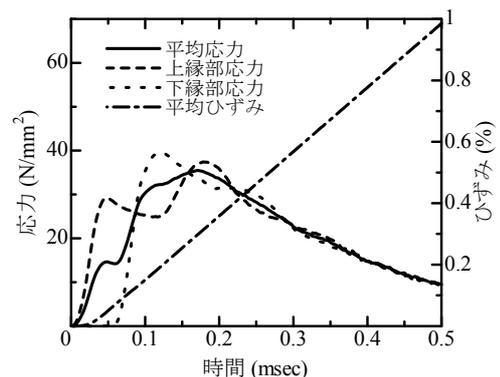


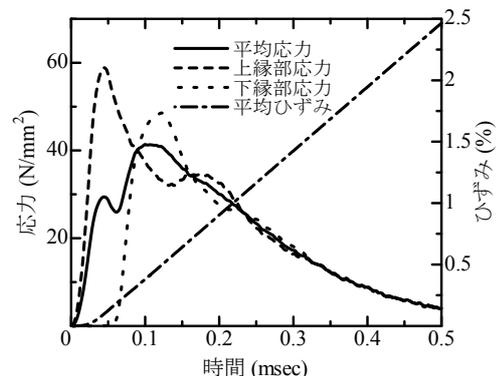
図-8 速度-時間関係



(a) 載荷速度 0.2m/sec



(b) 載荷速度 4m/sec



(c) 載荷速度 10m/sec

図-9 応力および平均ひずみの時刻歴応答

10m/sec のケースでは、両者とも、応力波が数回往復しながら荷重低下に至っていることが確認できる。載荷速度が大きい 10m/sec のケースで、下縁部応力および平均応力と比較して上縁部応力が著しく大きくなっている

様子が確認できる。これは、解析において、応力波が下縁まで伝播する前に、供試体上部で破壊が生じ、ひずみ軟化過程にある供試体上部領域を経て供試体下部に応力波が達するためであると考えられる。

図-10 に解析により得られた平均応力-平均ひずみ関係を示す。なお、図中のひずみ速度とは、図-9 に示した平均ひずみ-時間関係の直線領域の勾配である。ひずみ速度 1.0/sec では、静的解析結果とほぼ同様の応力-ひずみ関係が得られていることが確認できる。解析では、構成モデルにひずみ速度依存性を導入しておらず、また、減衰項を考慮していないにもかかわらず、既往の実験で観察されるように、ひずみ速度が大きくなるにつれて、弾性係数および圧縮強度が大きくなり、軟化勾配が緩やかになる様子が確認できる。

図-11 に、解析により得られた圧縮強度の動的応答倍率とひずみ速度の関係を示す。同図中には既往の実験結果も併せて示している<sup>1),2),4)</sup>。また、解析結果においては、動的圧縮強度を上縁部応力、下縁部応力および平均応力で評価した動的応答倍率を示している。以下、それぞれ、 $DIF_u$ 、 $DIF_l$  および  $DIF_a$  と記す。まず、実験値に着目すると、ひずみ速度  $10^{-5}/\text{sec}$  から動的応答倍率が増加し始め、さらに、ひずみ速度  $1.0/\text{sec} \sim 10^1/\text{sec}$  付近から急激に増加していることが分かる。白井らは、供試体内の水分が動的応答倍率に与える影響を検証するために、標準供試体とは別に、 $105^\circ\text{C}$  の乾燥炉中で、試験体の重量変化が 2 日で 1g 以下となるまで乾燥させた乾燥供試体を用意して実験を行っている<sup>1)</sup>。乾燥供試体の場合、ひずみ速度 1.0/sec 以下では、動的応答倍率は他の実験結果と比較して小さくなり、ひずみ速度が 1.0/sec より大きくなると、動的応答倍率が急激に増加している。解析結果に着目すると、ひずみ速度 1.0/sec 程度から動的応答倍率が上昇し始めており、乾燥試験体の実験結果と定性的に一致していることが確認できる。このことは、解析が水分の影響を除いたひずみ速度効果の発現メカニズムを評価している可能性を示唆している。なお、解析において、 $DIF_u$ 、 $DIF_l$  および  $DIF_a$  では値に大きな差が出ており、実験結果を定量的に再現できているとは言い難い。定量的な再現性については、実験と解析の境界条件の差異等も含めて今後詳細に検証していく予定である。

### 3.3 内部損傷・応力分布の進展過程

図-12 に、解析により得られた供試体内部の破壊進展性状を示す。図-12(a)および(b)は、垂直バネおよびせん断バネの損傷進展状況を示しており、(a)中の青色の線は垂直バネが引張強度に達し、応力とひずみが2直線と近似された軟化曲線における第一の直線上に在ることを、緑色の線は第二の直線上に在ることを示しており、赤色の線はひずみが進展し応力が 0 まで低下しているこ

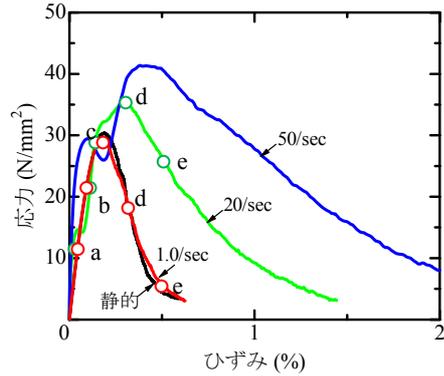


図-10 平均応力-平均ひずみ関係

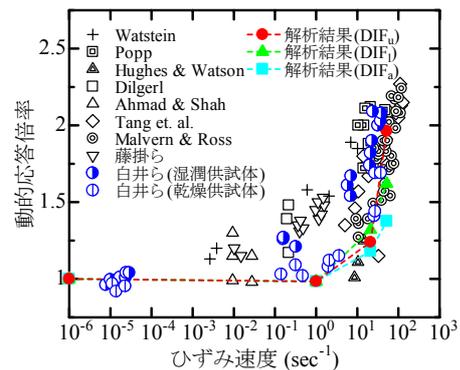


図-11 圧縮強度の動的応答倍率

とを示している。(b)の色付き線は、その面におけるせん断バネがせん断強度に達していることを示しており、線の色は、その面のせん断バネのひずみ量を示している。図-12(c)は、各要素の軸方向応力を示している。ここで、各要素の軸方向応力とは一つの剛体要素を、要素重心を通り載荷軸に直交する断面で切断し、その自由体の力の釣合いから切断面に作用する内力を求め、それを切断面積で除したものである。図-12(d)の赤色の実線は、各要素の各時間増分ステップ段階における変位増分ベクトルを表している。また、図中の a~e の記号は、図-10 に示す応力-ひずみ関係中の記号に対応している。まず、ひずみ速度 1.0/sec の解析結果に着目する。なお、ひずみ速度 1.0/sec のケースにおける内部破壊性状の進展過程は、静的解析結果とほぼ同様であった。載荷を開始して、a 点で、垂直バネが引張強度に達し始める。b 点から c 点にかけて、供試体全域で、せん断バネが破壊規準に達し、要素間のせん断すべり挙動が進展していることが確認できる。変位増分ベクトルに着目すると、要素間のせん断すべりの進展に伴い、徐々に横方向への変位成分が卓越し始めていることが分かる。最大荷重以降の d 点から e 点にかけて、供試体高さ中央付近に垂直バネおよびせん断バネの損傷が集中するとともに、供試体外縁の要素から横方向変位が卓越し、徐々に供試体内部まで破壊が進展していることが確認できる。軸方向応力分布に着目すると、各要素のせん断すべりに伴う横方向変位の進

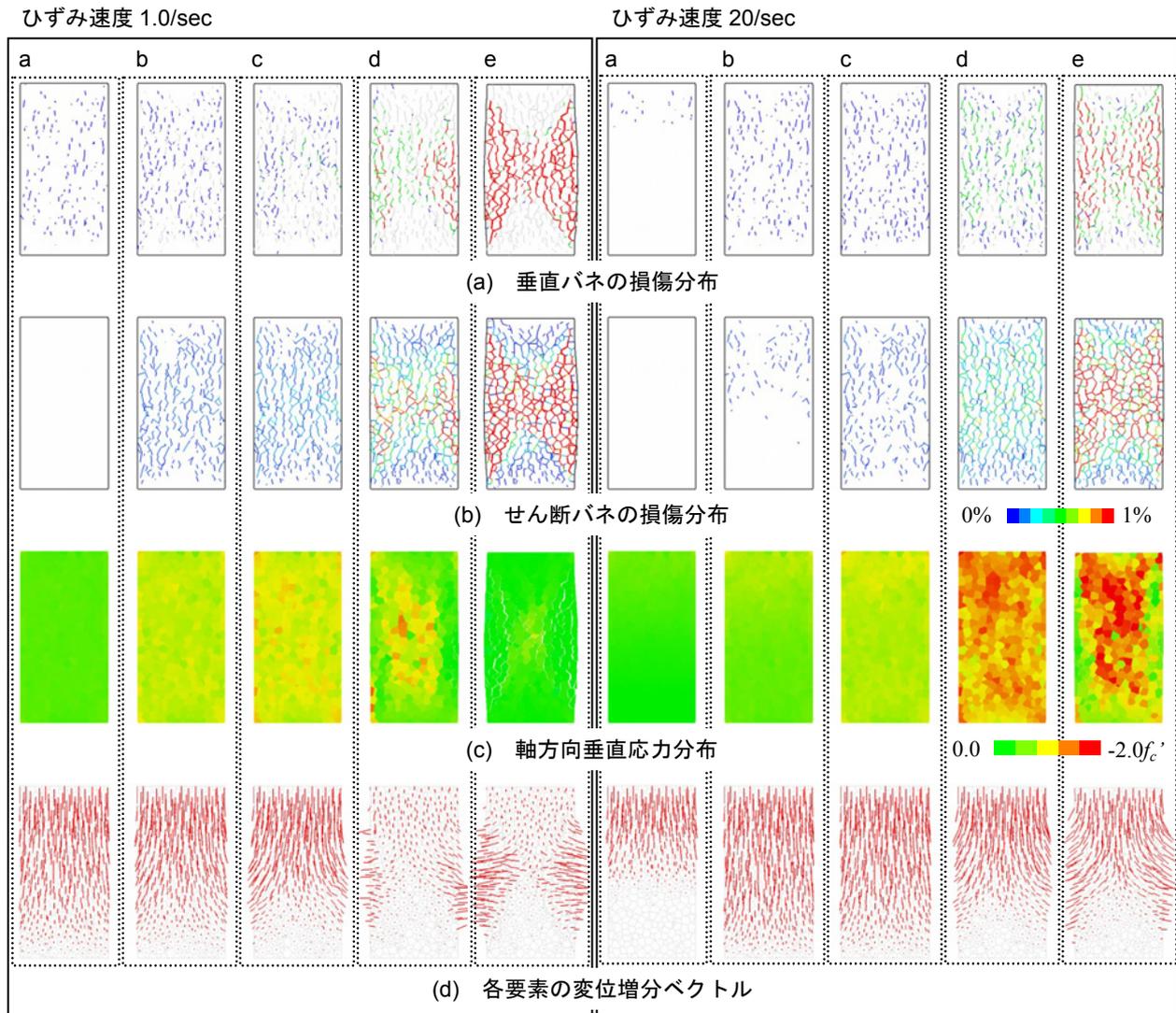


図-12 内部構造の破壊進展性状

展に伴い、圧縮応力を伝達する構造が、供試体外縁から徐々に消失していることが確認できる。つづいて、ひずみ速度 20/sec の解析結果に着目する。荷重を開始して、a 時点では、垂直バネの損傷が上縁部に集中していることが分かる。変位増分ベクトルからも分かるように、この時点では、変位が供試体下縁まで伝播しておらず、供試体上縁部だけで圧縮変形が生じている。b 点から c 点にかけて、まず、上縁で垂直バネおよびせん断バネの損傷が生じ、時間遅れで徐々に下縁まで損傷が進展していることが確認できる。ひずみ速度 1.0/sec のケースでは、要素間のせん断すべり挙動に起因して横方向変位が卓越することにより圧縮応力を伝達する構造が消失し荷重低下に至っていた。ひずみ速度 20/sec のケースでは、c 点において、要素間せん断すべり量および各要素の横方向変位が、ひずみ速度 1.0/sec のケースと比較して、小さいことが確認できる。これは、慣性力の影響によるものと考えられるが、このため、圧縮応力を伝達する構造が保持され、したがって、d 点まで平均応力は増大して

いく。d 点以降、せん断すべり挙動および横方向変位は卓越するが、その進展は、緩やかであり、従って、平均応力-平均ひずみ関係の軟化勾配は緩やかになる。

#### 4. 破壊局所化挙動の評価

##### 4.1 解析概要

ここでは、円柱供試体の高さを前章の解析対象モデルの2倍の400mmとして高速1軸圧縮解析を行い、高ひずみ速度域における破壊の局所化現象について解析的に検証する。解析モデルの平均要素寸法は約10mmとし、また、コンクリートの圧縮強度は30MPaとした。荷重要領は前章と同様であり、荷重速度  $v_f$  は0.4m/sec、10m/secの2ケースで行った。なお、2ケースの荷重速度におけるひずみ速度はそれぞれ1.0/secおよび25/secである。

##### 4.2 圧縮破壊領域の評価

図-13に静的および高速荷重解析により得られた、ポストピーク域における荷重軸方向の局所ひずみ分布およびポストピークにおいて上縁部応力が最大値の20%ま

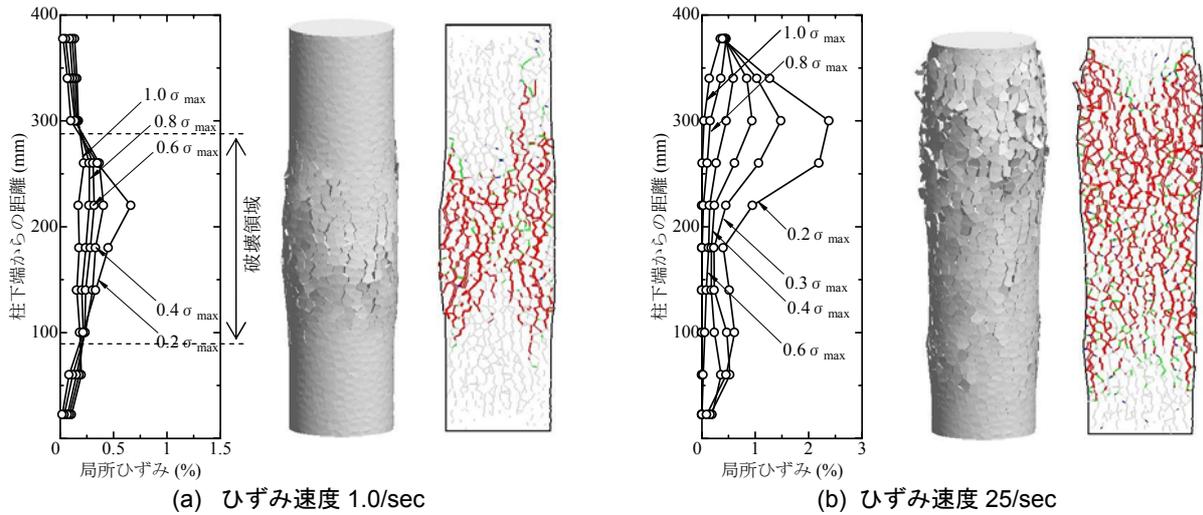


図-13 局所ひずみ分布と破壊性状

で低下した時点における垂直バネの損傷分布性状および変形図(変形倍率3)を示す。まず、ひずみ速度 1.0/sec の垂直バネの損傷分布およびひび割れ性状に着目すると破壊が供試体高さ中央部に集中していることが確認できる。局所ひずみ分布に着目すると、応力低下が進展するにつれ、軸ひずみの局所化は顕著になり、ひずみが増加する領域と、ひずみが減少する非破壊領域が存在していることが確認できる。藤掛ら<sup>2)</sup>は、最大応力以降ひずみが増加している領域を破壊領域と定義し、ひずみ速度約 1.0/sec 程度、供試体高さ 400mm のケースにおいて、破壊領域は、約 190mm であったと報告している。解析結果では、図に示すように破壊領域は約 200mm 程度であり、解析は実験の局所化領域長さを概ね捉えていることが分かる。ひずみ速度 25/sec の解析結果に着目すると、垂直バネの損傷は供試体全域に広がっており、ポストピークにおいても供試体全域で局所ひずみが増加していることが分かる。これは、载荷速度が速くなると応力波の影響が顕著になり、まず、供試体上部で破壊が生じるが、軟化領域を経て応力波は下方へ伝播していき、さらに、応力波が固定端反射することにより下縁で圧縮応力が増幅するため、供試体下部でも局所ひずみが進展し、破壊領域が広がったものと考えられる。

## 5. 結論

本研究は、コンクリートの準微視的な力学挙動をモデル化した 3 次元 RBSM を用いて、高速圧縮解析を行い、高ひずみ速度下における圧縮破壊挙動を評価したものである。本研究の成果をまとめると以下ようになる。

(1) 提案手法は、構成モデルにおけるひずみ速度依存性および減衰項を考慮していないにもかかわらず、ひずみ速度が 1.0/sec を超える高ひずみ速度域の圧縮強度の増加を定性的に表現できることが分かった。

- (2) ただし、ひずみ速度 1.0/sec 以下の領域における強度増加は再現できなかった。このひずみ速度域においては、既往の実験からも供試体内の水分が関連していると考えられ、その挙動を再現するためには、水分の影響を適切に評価する必要があると考えられる。
- (3) ひずみ速度が 1.0/sec を超える高ひずみ速度域における圧縮強度の増加は、慣性力が影響していることを解析により示した。
- (4) 提案手法は、ひずみ速度 1.0/sec 程度の圧縮応力下における破壊の局所化挙動を再現することができた。一方、これまで実験では評価されていない、ひずみ速度 25/sec ケースでは、破壊が局所化せず、供試体全域でひずみが進展する挙動が示された。

## 参考文献

- 1) 白井孝治, 島村和夫, 賽 晃司, 伊藤 千浩: コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化—ホプキンソン棒方式衝撃試験方法の適用と圧縮強度試験結果—, 構造工学論文集, Vol.44A, 土木学会, pp.1793-1804, 1998.
- 2) 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, 1998.
- 3) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3 次元剛体バネ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 E, Vol.64 No. 4, pp. 612-630, 2008.
- 4) Bischoff, P. H. and Perry, S. H. : Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates, Materials and Structures, Vol.24, No.144, 1991, pp.425-450
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2007.