

(7) RBSM 解析による高ひずみ速度下における

コンクリートの圧縮破壊挙動評価

Evaluation of compression fracture behavior of concrete at high-strain rates using RBSM

山本佳士*, 中村光**, 黒田一郎***, 古屋信明****

Yoshihito YAMAMOTO, Hikaru NAKAMURA, Ichiro KURODA, Nobuaki FURUYA

*博(工), 防衛大学校助教, システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

**博(工), 名古屋大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

***博(工), 防衛大学校准教授, システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

****博(工), 防衛大学校教授, システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

Key Words: (Strain rate effect, Uniaxial Compression, Localization of Fracture, RBSM)

キーワード: ひずみ速度効果, 1軸圧縮, 破壊局所化, RBSM

1. はじめに

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, コンクリート材料のひずみ速度効果の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の各種高速載荷実験は数多く行われている。しかしながら, 高速荷重下におけるコンクリートの破壊は, 材料中の水分に起因する粘性効果や慣性力, 応力波の影響等が複雑に絡み合う現象であり, そのメカニズムは十分に解明されているとはいえない状況にある。また, 静的圧縮荷重下において, コンクリートは巨視的に見てひずみ軟化挙動を示す。さらに変形・破壊が3次元的な広がりを持つ領域に集中し, その他の領域で除荷挙動が生じる, いわゆる破壊局所化挙動を示すことが知られている。高速荷重下におけるコンクリート構造物の終局に至るまでの挙動を適切に評価するためには, 高ひずみ速度域における圧縮軟化・局所化挙動の把握・評価も重要な課題である。藤掛ら¹⁾は, 油圧式高速載荷装置を用いて, 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, 載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, 静的載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。しかしながら, 実験が困難であることから, ひずみ速度 $10^0/\text{sec}$ を超える領域にお

ける圧縮軟化・局所化現象は明らかにされていないのが現状である。

一方, 著者らは^{2,3)}, 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, 供試体内部の応力分布性状や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。

そこで本研究では, 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, 載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載荷解析を行い, 高ひずみ速度域における破壊局所挙動の評価を行う。

2. 解析手法

本研究では, コンクリートのモデル化に, 参考文献2)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2)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、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評価するために、図-1に示すように、境界面に複数の積分点を設定している。また、本解析では、RBSMにより離散化された運動方程式を、ルンゲ・クッタ法を用いて陽的に解いた。なお、現象評価の簡略化を目的として、本研究における全ての解析で減衰項は考慮していない。

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、 σ_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 σ が引張強度 σ_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、 σ_c 、 ε_{c2} 、 α_{c1} 、 α_{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 τ_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 β 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数 G は、垂直バネの弾性係数 E に係数 η 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、 φ は内部摩擦角、 σ_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 β_0 、 β_{max} 、 χ 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。

表-1に参考文献2)で同定した、材料パラメータを示す。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。

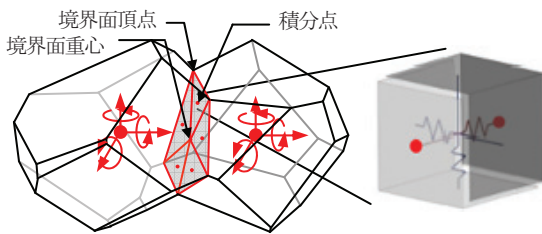


図-1 剛体要素の自由度と要素境界面上の積分点

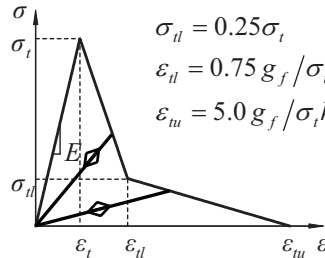


図-2 垂直バネの引張挙動

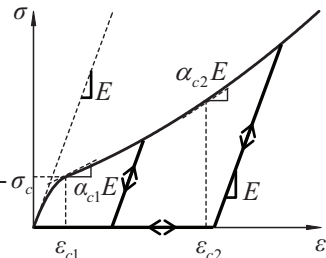


図-3 垂直バネの圧縮挙動

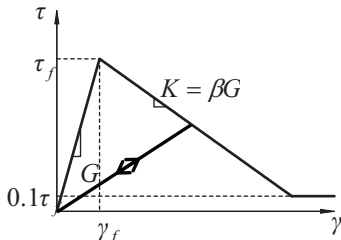


図-4 せん断バネの挙動

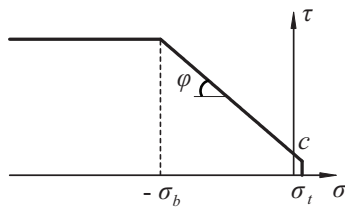


図-5 破壊基準

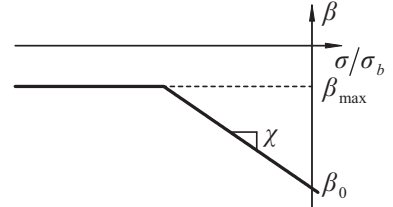


図-6 せん断バネの軟化係数

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 ²)	σ_t (N/mm ²)	g_f (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	ε_{c2}	α_{c1}	α_{c2}	$\eta = \frac{G}{E}$	c (N/mm ²)	φ (degree)	σ_b (N/mm ²)	β_0	β_{max}	χ	κ
1.4E*	0.8f _t *	0.5G _f *	1.5f _c '*	-0.015	0.15	0.25	0.35	0.14f _c '*	37	f _c '*	-0.05	-0.025	-0.01	-0.3

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4)を参考に決定し、それぞれ、28kN/mm²、2.2N/mm²、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。

3.2 巨視的応力-ひずみ応答と強度の動的応答倍率

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。 v_l が4m/secおよび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。

図-10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。ここで、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。同図中には既往の実験結果も併せて示している^{1),5),6)}。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_w 、 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

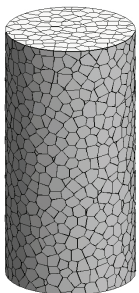


図-7 解析モデル

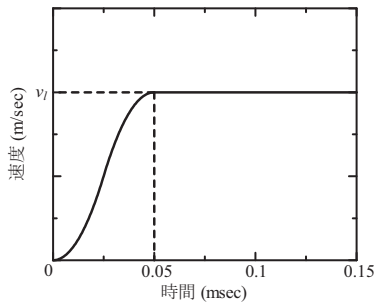
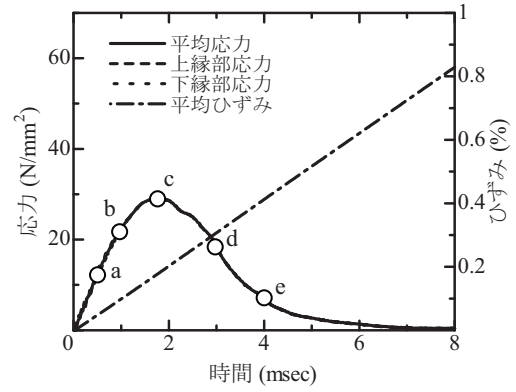
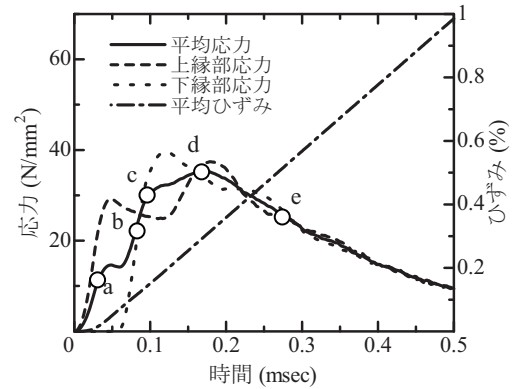


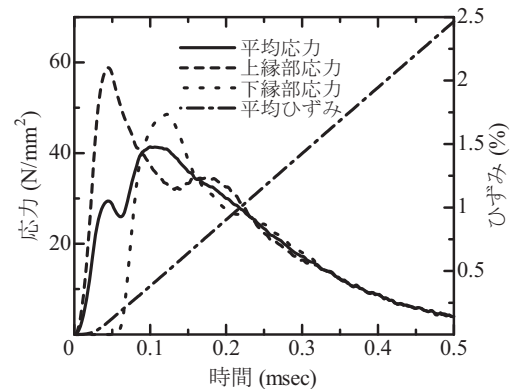
図-8 速度-時間関係



(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

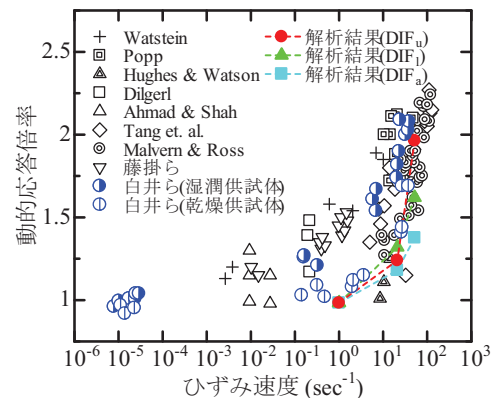


図-10 圧縮強度の動的応答倍率

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°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⁹⁾。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ことを示唆している。また、解析において、 DIF_w 、 DIF_l および DIF_a で値に大きな差が出ていることが分かる。これは、前述のように、载荷速度が上がるにつれて応力波の影響が無視できなくなるためである。すなわち、応力が伝播する過程における、供試体軸方向の応力およびひずみの分布が一様になる前の過渡的段階で破壊が進展したためである。

3.3 内部損傷・応力分布の進展過程

図-11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-11(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直線に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-11(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、要素重心を通り载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、それを切断面面積で除したものである。図-11(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-9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。载荷を開始して、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、

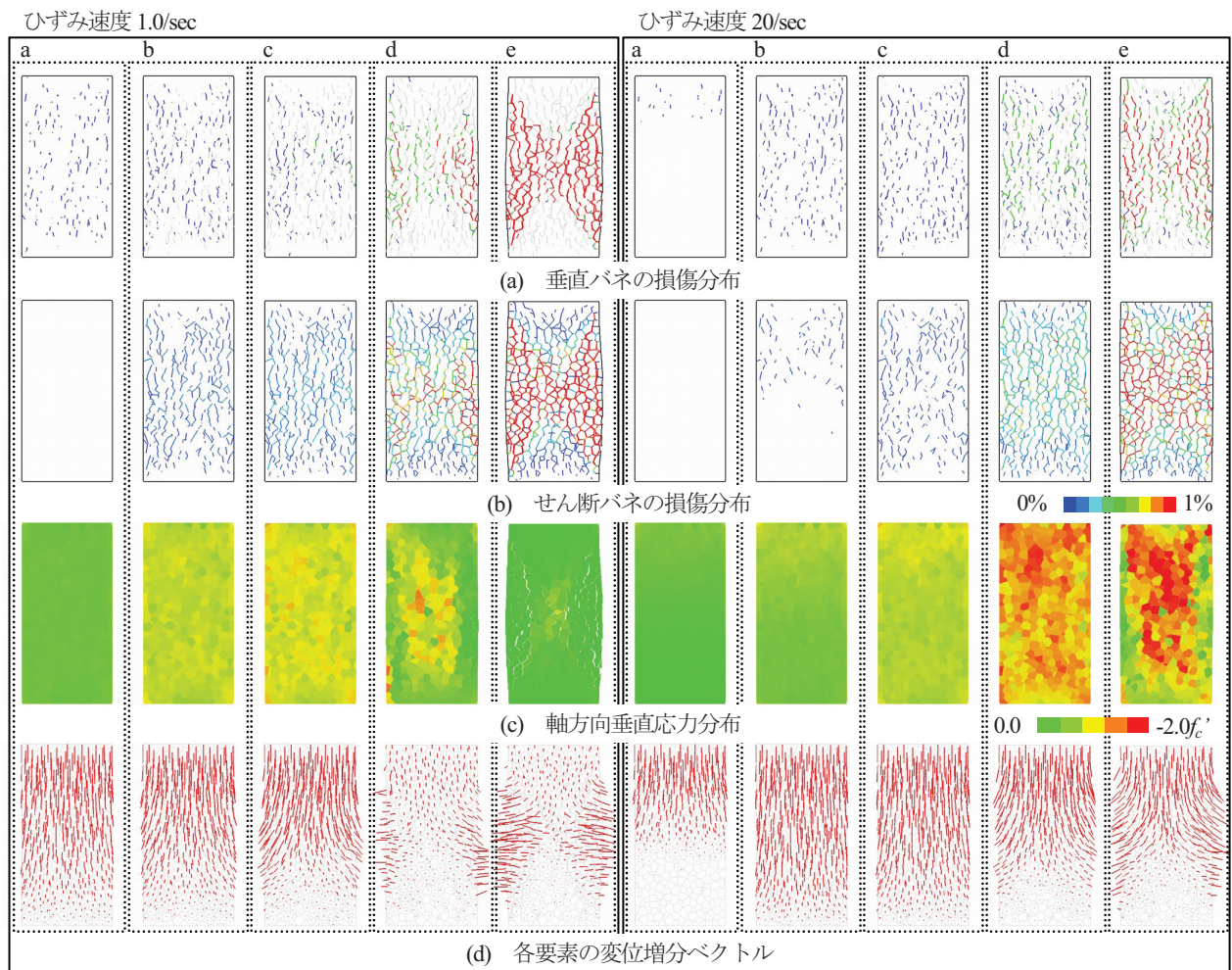


図-11 内部構造の破壊進展性状

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。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²⁾とほぼ同様であった。

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。なお、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、ひずみ速度 1.0/sec のケースと比較して、c 点における要素間せん断すべり量および各要素の横方向変位が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 点まで平均応力が増大していったものと考えられる。

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。載荷要領は前章と同様であり、載荷速度 v_f は 0.4m/sec, 10m/sec の 2 ケースで行った。なお、2 ケースの載荷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-12 に解析により得られた、ポストピーク域における載荷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¹⁾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。一方、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。

図-13 および図-14 に、ひずみ速度 25/sec の解析により得られた応力の時刻歴応答および供試体内部の破壊進展性状を示す。荷重を開始して、まず供試体上縁部で応力が卓越し、b 時点で上縁部の垂直バネの損傷が顕著になり、応力分布も、上縁部の供試体側面から低下していく挙動が観察される。c 時点で上縁部のコンクリートの破壊はさらに進展するものの、応力は下縁へと伝播していき、e 時点では、応力波が固定端反射して入射波と干渉して、応力が増幅している様子が確認できる。このよ

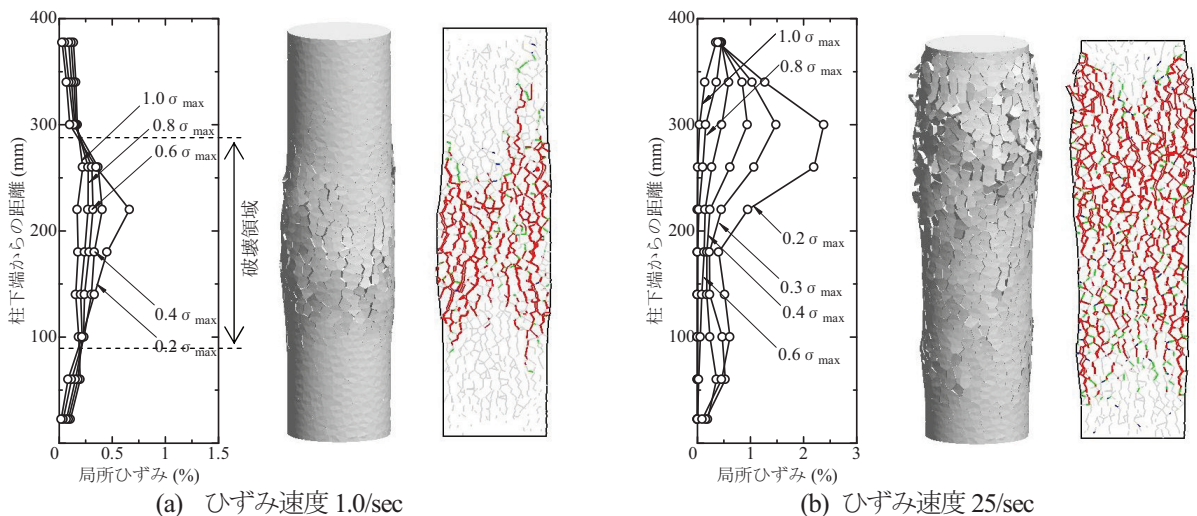


図-12 局所ひずみ分布と破壊性状

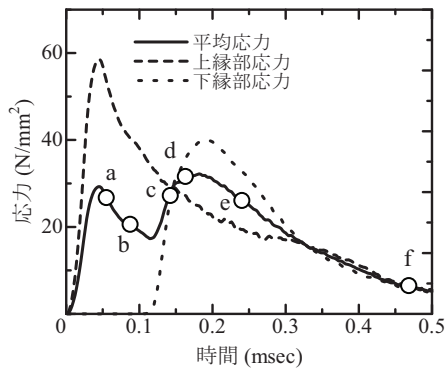
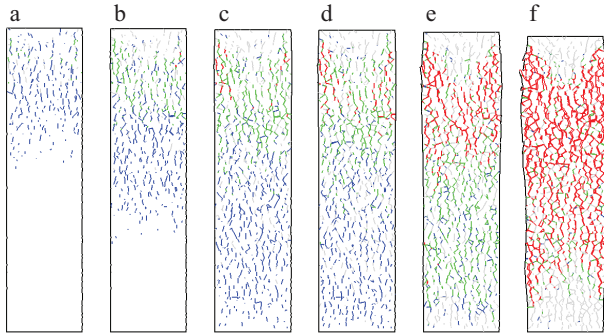
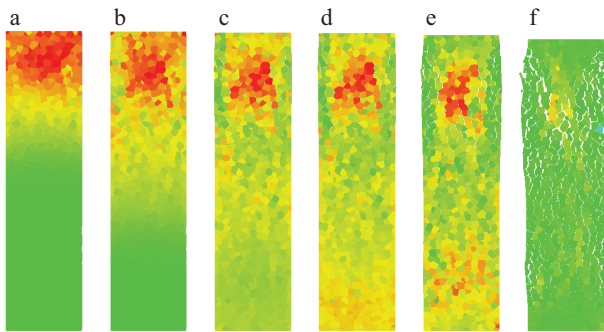


図-13 応力の時刻歴応答



(a) 垂直バネの損傷分布



(b) 軸方向垂直応力分布

図-14 内部構造の破壊進展性状

うに、荷重速度が大きい場合、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、f 時点のように、供試体下部でも破壊が進展し、破壊領域が広がっていく。

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。
- (5) コンクリート供試体の内部構造の破壊進展性状を可視化することで、高ひずみ速度域で破壊領域が広がる現象のメカニズムを検討した。荷重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。

参考文献

- 1) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮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.
- 2) 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.
- 3) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3 次元 RBSM による横拘束コンクリートの 1 軸圧縮破壊解析, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, 2010.(掲載予定)
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2007.
- 5) 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
- 6) 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.