

高速引張载荷を受けるコンクリートの メソスケール破壊シミュレーション

Meso-scale dynamic fracture simulation of concrete in tension under high strain-rate

岩田 暁*・車谷 麻緒**・寺田 賢二郎***・岡澤 重信****・樫山 和男†

Satoshi IWATA, Mao KURUMATANI, Kenjiro TERADA,

Shigenobu OKAZAWA and Kazuo KASHIYAMA

*学生会員 修(工) 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
**正会員 博(工) 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
***正会員 Ph.D. 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
****正会員 博(工) 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)
†正会員 工博 中央大学 理工学部 都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

To examine the strain-rate dependency of the deformation and tensile strength characteristics of concrete, we perform the numerical simulations for the dynamic fracture behavior of the concrete's meso-scale structure. The concrete is regarded as a three-phase composite composed of mortar matrix, aggregated inclusions and the interfaces, and its heterogeneity is explicitly considered in our numerical models. In the suggested analysis method, the standard dynamic explicit solution method with the finite element method is used to solve the equations of motion, and at the same time, the discrete crack model is employed together with the cohesive crack model, which is known as an energy-based fracture mechanics model, to approximate the local tensile softening behavior of concrete. Two numerical experiments are carried out; one is to examine the origin of the strain-rate dependent behavior of concrete, which results in strengthening effects and the other is to compare the failure modes or the fracture patterns obtained with high and low strain-rates.

Key Words : *high strain-rate, concrete, tensile fracture simulation, explicit dynamic analysis, discrete crack, cohesive crack model*

1. はじめに

土木構造物の多くは材料にコンクリートを用いていることから、その力学特性を正確に把握し、コンクリート構造物の破壊現象を解明することは重要である。ただし、コンクリートは載荷速度が大きい場合、その力学特性は、静的な載荷での力学特性とは大きく異なることが知られている^{1),2),3)}。そのため、コンクリートの破壊現象を包括的に評価するためには、広く行われている静的な載荷(低速載荷)だけではなく、高速載荷を受ける動的破壊現象も評価する必要がある。そして、コンクリートのような準脆性材料でかつ非均質複合材料の破壊現象を数値解析により再現するためには、母材・介在物の破壊や界面剥離が考慮できる数値解析手法が必要である。

ひび割れ進展を伴うコンクリートの破壊挙動は、ガラスなどの脆性材料とは異なり、準脆性的に破壊に至ることがその特徴として挙げられる。その破壊時の特徴として、材料の非均質性や不均一性に伴い、ひび割れ先端部に微細なひび割れが累積した破壊進行領域(Fracture Process Zone)が形成されることが知られている^{4),5)}。この破壊進行領域とは、未破壊の弾性領域と破壊後の応力フリーのひび割れ面の中間領域で、開口変位の増大に伴い応力伝達が減少する軟化現象が生じる領域であ

る。数値解析において、この破壊進行領域での破壊力学挙動を再現しうる Cohesive crack model⁶⁾(仮想ひび割れ・結合力モデル)は、開口変位に対応した結合力をひび割れ面に作用させることで、破壊進行領域における軟化現象を再現するモデルである。数値解析により準脆性材料の破壊挙動を適切に評価するためには、これを不連続面の形成過程に導入したひび割れ進展解析手法の適用が不可欠である^{7)~10)}。

コンクリートの引張変形・強度特性は、ひび割れのメカニズムや力学特性を解明する上で重要であるので、引張載荷試験が広く行われており^{11)~14)}、動的問題においては載荷速度が大きくなると、見かけの強度や見かけの弾性係数が増加することが報告されている^{14),15)}。その原因としては、コンクリートの材料的な粘性効果と載荷速度による慣性効果が影響していると考えられている^{14),15),16)}。しかしながら、特に高速載荷での引張試験は、コンクリートの引張強度が圧縮強度の1/10程度であり、極めて脆弱な破壊挙動を示すために、その試験自体が非常に難しく、信頼できるデータが少なく、そのバラツキも大きいことが問題視されている。また、既往の実験において、載荷速度の違いにより破壊形態が異なることも示されている^{12),14)}。図-1は、その破壊形態の違いを表した模式図である。低速載荷では界面剥離とモルタルひび割れが支配的であるのに対して、高

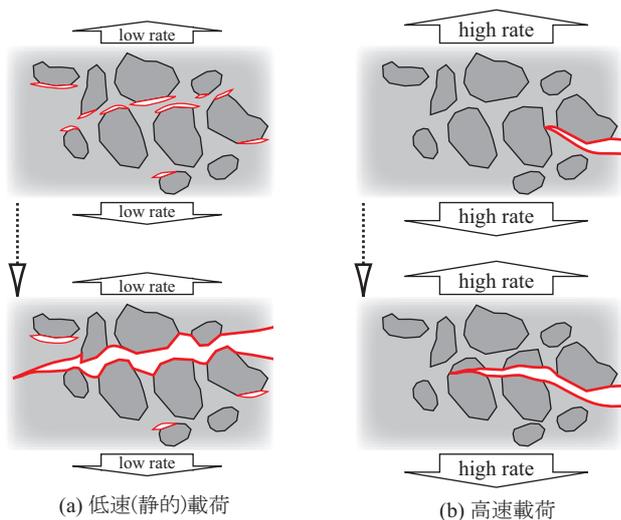


図-1 荷速度の違いによる破壊形態の模式図

速載荷では骨材の破壊が発生することや、破断面がフラットになることが実験で確認されている。

以上のように実験的研究は散見されるが、変形・強度特性や破壊形態の相違を数値解析により再現した例は無い。また、既往の数値解析的研究では、高速載荷時の力学挙動を評価するために、速度依存パラメータを用いている場合が多い^{17),18)}。しかし、速度依存パラメータを用いれば、速度に依存した挙動を表現できるのは当然であり、これではコンクリートの材料特性を正しく評価したことにはならず、図-1のような破壊形態の相違を説明することはできない。

そこで本研究では、速度依存パラメータを用いない、準脆性材料の材料レベルでの局所的な破壊発生・軟化特性を考慮した動的破壊解析手法を用いて、荷速度の異なる引張破断解析を行い、コンクリートの見かけの速度依存特性とメソスケールでの破壊挙動の再現を行う。第2節では、Cohesive crack modelを用いたひび割れ挙動のモデル化と、本論文で採用した動的破壊解析手法を示す。第3節では、この解析手法を用いて、荷速度の異なるコンクリートの数値解析例を示す。具体的には、まず、コンクリートの見かけの力学特性に対する荷速度依存性の再現を行い、そのメカニズムを考察する。次に、メソスケールでの詳細な破壊挙動の再現を行い、荷速度の違いが破壊形態に及ぼす影響について考察する。第4節では、本研究の総括を行い、今後の課題や展望について述べる。

2. Cohesive crack model を用いた動的破壊解析手法

本節では、本研究で採用する動的破壊解析手法の概要とひび割れ挙動のモデル化について示す。まず、Cohesive crack modelを用いた有限要素解析における離散

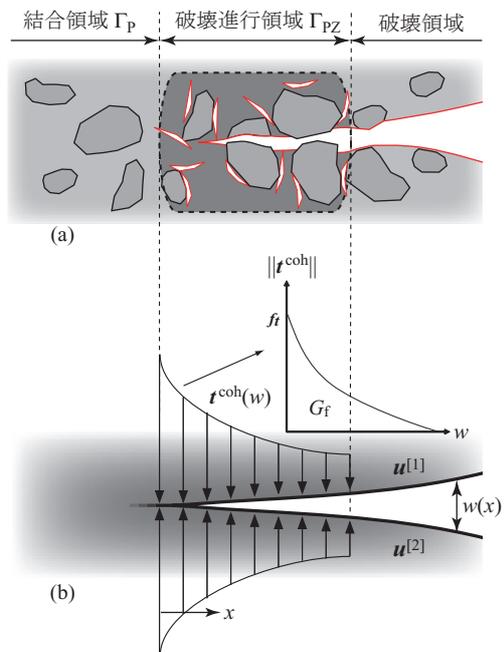


図-2 ひび割れ先端部の模式図と Cohesive crack model

ひび割れの形成について説明する。そして、動的陽解法に基づく Cohesive crack model の近似方法と、離散ひび割れ進展シミュレーションについて説明する。

2.1 Cohesive crack model

コンクリートは、破壊開始後に軟化現象を示す準脆性材料である。軟化現象とは、図-2(a)に示す破壊進行領域において発生する現象である。破壊進行領域とは、未破壊の結合領域と完全に破壊した応力フリーのひび割れ面との中間領域であり、巨視的な開口変位がまだ十分でなく応力伝達が残る領域である。この応力伝達が開口変位の増大とともに減少していくため、破壊進行領域では軟化現象が起こる。

Cohesive crack model⁶⁾ (仮想ひび割れ・結合力モデル)は、図-2(b)に示すように、破壊進行領域の応力伝達を結合力でモデル化するものである。結合力の値は、実験結果に基づいて決定された非線形な表面力-開口変位関係により定められる引張軟化曲線を結合力として与える。この引張軟化曲線下の面積は破壊エネルギーと呼ばれ、単位破断面を形成するのに必要なエネルギーである。

本研究で用いる表面力-開口変位関係 (引張軟化則)は、指数関数型で引張強度と破壊エネルギーをパラメータとする次式の通りである¹⁹⁾。

$$\|t^{\text{coh}}(w)\| = f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} w\right) \quad \text{on } \Gamma_{\text{PZ}} \quad (1)$$

ここで、 $\|t^{\text{coh}}(w)\|$ は結合力ベクトルの大きさ、 f_t は引張強度、 G_f は破壊エネルギーを表す。 w は変形履歴における最大開口変位であり、次式で表される不連続面

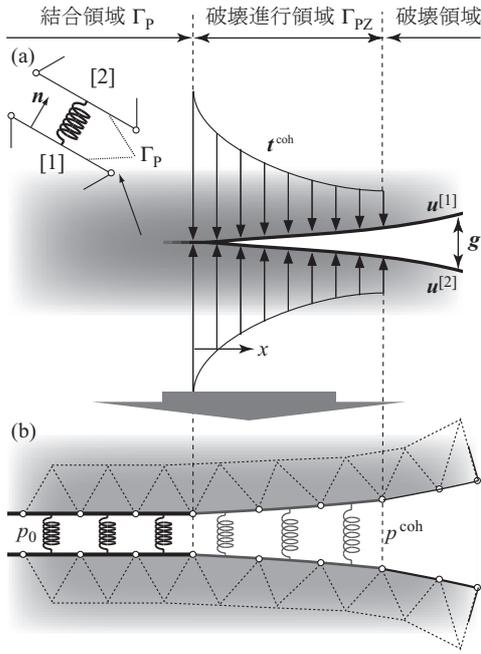


図-3 バネによる Cohesive crack model のモデル化

における開口変位ノルムにより定められる。

$$w \Leftarrow \|g\| = \|u^{[1]} - u^{[2]}\| \quad (2)$$

上式において、 $u^{[1]}$ 、 $u^{[2]}$ は図-2 に示されるような不連続面における変位ベクトルを表す。

Cohesive crack model は、静的解析において提案されたモデルであるが、Cohesive crack model に用いるパラメータとして、 f_t は図-2(b) に示すように破壊進行領域の形成応力であり、静的・動的に依らないものである。また、 G_f は単位破断面を形成するのに必要なエネルギーであり、この考え方は静的・動的に依らないと考えられる。したがって、本研究では、局所的な材料応答としては速度に依存しないモデル化を採用することになり、見かけの応答は全体系の運動方程式を解くことにより評価される。

2.2 Cohesive crack model の動的問題への導入

オリジナルの Cohesive crack model は、結合力を分布外力による力学的境界条件のようにして扱い、収束計算により軟化挙動の再現を行うものである。しかしながら、動的破壊解析においては、極めて複雑な離散ひび割れ挙動を伴うことから、従来の方法では、アルゴリズムの複雑化や計算の不安定化を招くことは必須である。そこで本研究では、より簡便に、効率よく数値解析を進めるために、図-3 に示すように、Cohesive crack model で与えられる結合力をバネの反力で置き換える^{10),20)}。

$$t^{coh} = p^{coh} g \quad (3)$$

ここで、 p^{coh} は不連続面における相対変位間をつなぐ非線形バネの剛性となり、次式で求める。

$$p^{coh} = \frac{\|t^{coh}\|}{\|g\|} \quad (4)$$

これに加えて、非常に小さい時間増分で解析を進める動的陽解法を採用すれば、上式の p^{coh} は前の時間ステップの値で近似することにより、十分な精度で Cohesive crack model を考慮した動的破壊解析を行うことができる¹⁰⁾。また、 p^{coh} は開口変位が増大する場合のみ更新を行う。

2.3 Cohesive crack model を用いた動的ひび割れ問題の弱形式

本論文では、破壊のモデル化に、ひび割れの発生・進展を有限要素境界で表現する離散ひび割れモデルを適用する。ひび割れが発生する不連続面にあらかじめ二重節点を配置させ、界面要素にペナルティ法を適用する。図-3(a) に示すように、破壊の発生前はペナルティ係数によるバネ剛性 p_0 を用い、破壊判定条件を満たした時点で p^{coh} に代えて解析を進めることにする。ペナルティ係数 p_0 は、構成材料の母材ヤング率の 10^4 倍の値を用いる。

以上より、ペナルティ法と Cohesive crack model を適用した場合の弱形式は、通常の弾性体の弱形式にペナルティ係数による剛性、Cohesive crack model による剛性による項が加わったものとなり、次式ようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \rho \delta u \ddot{u} d\Omega + \int_{\Omega} \nabla \delta u : \sigma d\Omega \\ & + \int_{\Gamma_P} p_0 \delta g \cdot g d\Gamma + \int_{\Gamma_{PZ}} p^{coh} \delta g \cdot g d\Gamma \\ & = \int_{\Omega} \delta u \cdot \bar{b} d\Omega + \int_{\Gamma_f} \delta u \cdot \bar{t} d\Gamma \quad \forall \delta u (\forall \delta g) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 ρ は密度、 \ddot{u} は加速度ベクトル、 δu は仮想変位ベクトル、 σ はコーシー応力テンソル、 \bar{b} は物体力ベクトル、 \bar{t} は外力ベクトル、 Ω は全体領域、 Γ_f は Neumann 境界であり、 Γ_P がペナルティ法を適用する結合領域、 Γ_{PZ} が Cohesive crack model によるバネ剛性が適用される破壊進行領域である。

2.4 離散ひび割れ進展のモデル化

コンクリートの動的破壊問題の特徴として、非常に多数のモルタルひび割れの発生が想定される。しかしながら、これをすべて正確に捕捉することは困難かつ非現実的である。そこで本論文では、図-4 に示すように、古典的ではあるが、全有限要素境界に二重節点をあらかじめ配置し、要素境界を切り離すことでひび割れ進展を扱う離散ひび割れモデルを採用し、ひび割れ進展を近似的かつ数値的に扱うこととする。ただし、破壊発生前はペナルティ法、発生後は Cohesive crack model によるバネをそれぞれ導入し、破壊発生前の弾性応答

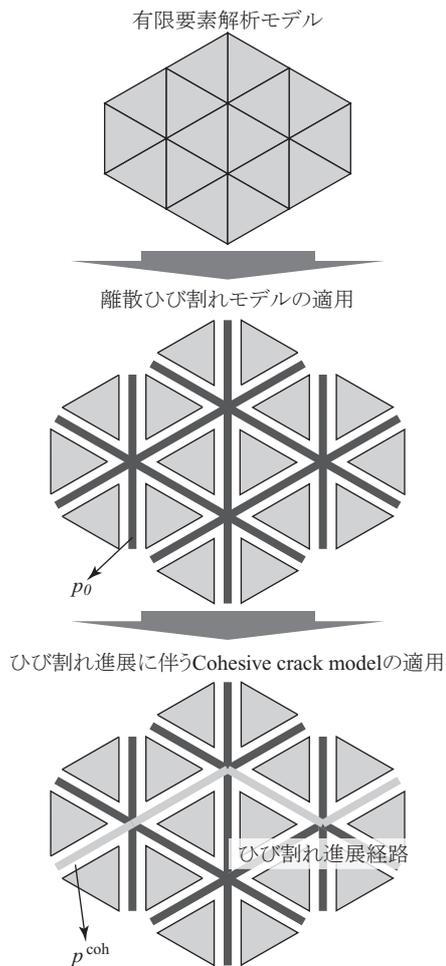


図-4 離散ひび割れ進展による破壊のモデル化

から破壊後の非線形軟化応答を一貫して扱えるモデルである。

材料内部および材料界面での破壊（離散ひび割れ）の発生については、有限要素境界での表面力を用いて評価する。本論文では、図-3(a) および図-4 に示すように、ペナルティ法を用いて要素界面の連続条件を近似しているため、界面での表面力 t_p は相対変位を用いて次式 (6) で求められる。

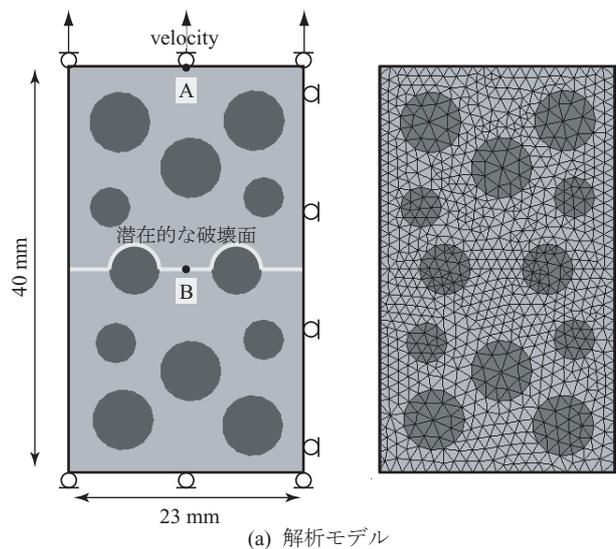
$$t_p = p_0 g \quad (6)$$

この表面力 t_p と外向き法線ベクトル n を用いて、次式 (7) を満たした場合に破壊が発生、つまり破壊進行領域が形成される、ものとする。

$$t_p \cdot n > 0 \quad \text{and} \quad \|t_p\| \geq f_t \quad (7)$$

3. 高速荷を受けるコンクリートの力学特性・破壊形態に関する数値実験

本節では、前節で示した Cohesive crack model を用いた動的破壊解析手法を用いて、まず、簡単な例題を対象にコンクリートの見かけの力学特性の荷速度依



荷荷ひずみ速度： $\begin{cases} \text{高速： } 0.5 \text{ 1/sec} \\ \text{低速： } 0.005 \text{ 1/sec} \end{cases}$

	母材	骨材
ヤング率	20000 MPa	40000 MPa
ポアソン比	0.10	0.10
密度	2000 kg/m ³	2500 kg/m ³

(b) 材料定数

引張強度	2.0 MPa
破壊エネルギー	0.03 N/mm

(c) 材料の破壊力学パラメータ

図-5 単純化したコンクリートの解析モデル

存性の再現を行い、そのメカニズムを考察する。次に、メソスケールでの詳細な破壊挙動の再現を行い、荷速度の違いが破壊形態に及ぼす影響について検討する。

3.1 見かけの力学特性に対する速度依存性

コンクリートは荷速度の増大とともに、見かけの強度の増加、見かけの弾性係数の増加といった、力学特性が変化することが知られている。ここでは、慣性力の無視できる低速荷と、慣性力の無視できない高速荷、さらに破壊力学モデルである Cohesive crack model を用いない高速荷を比較し、荷速度の相違がコンクリートの見かけの力学特性に及ぼす影響について検討する。なお、Cohesive crack model を用いないケースとは、破壊進行領域での軟化挙動を経ずに、破壊判定後は瞬時に応力フリーの不連続面を形成するモデル化である。

(1) 解析対象と条件

はじめに、本論文における動的破壊解析および破壊力学モデルの検証例題を示す。解析対象は、図-5 に示

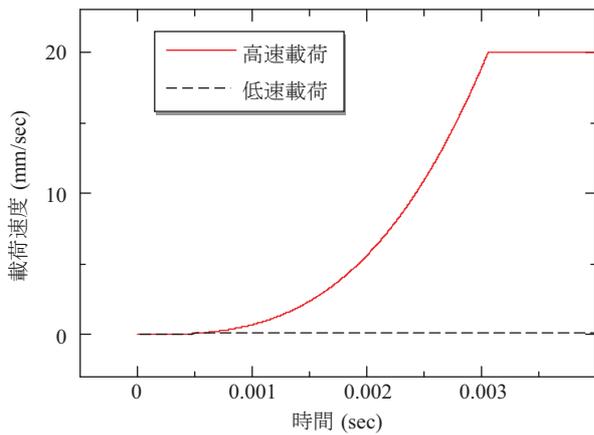


図-6 载荷速度の時刻歴

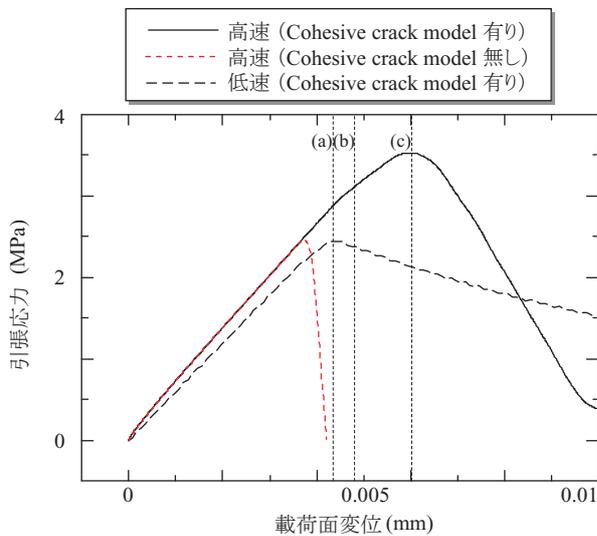


図-7 载荷面での見かけの荷重-変位関係

されるような、領域中央に限定した破壊面をあらかじめ設けた単純なメソスケールモデルである。この問題に対する境界条件として、下端と右端を変位拘束し、上端面に図-6に示されるような低速と高速の2ケースの速度を与える。ここで、本研究では、問題設定が衝撃解析とならないように、载荷速度は低速・高速ともに、立ち上がりが滑らかになるよう関数的に速度を与えて、载荷による応力波の発生を低減させることとする¹¹⁾。なお、立ち上がりの関数形は低速・高速ともに同様であり、速度の最大値は、低速が0.2 mm/sec (ひずみ速度 5.0×10^{-3} /sec)、高速が20.0 mm/sec (ひずみ速度 5.0×10^{-1} /sec) である。

材料パラメータは同図の通りである。数値解析にはほとんど影響のないポアソン比は0.1とし、それ以外のパラメータは見かけの応答がコンクリートのそれと近くなるよう設定した。動的陽解法における微小時間 Δt と解析ステップ数は、低速载荷において 1×10^{-7} sec と1,000,000ステップ、高速载荷において 1×10^{-7} sec と

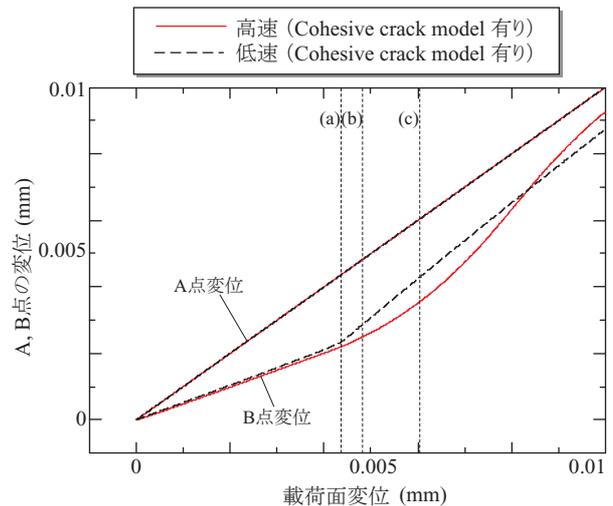


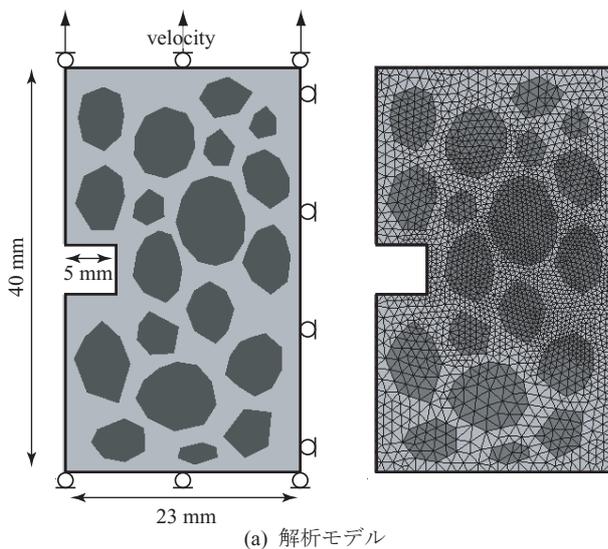
図-8 A, B点での変位と载荷面変位の関係

50,000ステップである。Cohesive crack modelを用いた高速载荷と低速载荷、さらにCohesive crack modelを用いない高速载荷の3通りの動的破壊解析を行い、それぞれの結果について検討・考察する。

(2) 解析結果と考察

解析結果として、図-7に载荷面での見かけの荷重-変位関係を示す。ここで、見かけの荷重とは载荷面での反力の総和をモデル断面積で除したものである。図中の3本の縦点線は、(a)が低速载荷で破壊が開始した時点、(b)がCohesive crack modelを用いた高速载荷で破壊が開始した時点、(c)がCohesive crack modelを用いた高速载荷でピーク強度を示した時点をそれぞれ表している。なお、ここでの破壊の開始とは数値解析における破壊の判定と同義である。本例題では、破壊設定箇所における破壊発生の時間差はほとんどなく、ほぼ瞬時にすべての箇所で破壊が開始する。結果を見ると、低速载荷では、破壊が判定された時点でピーク強度を示している。また、Cohesive crack modelを用いた高速载荷が最も高いピーク強度を示し、見かけの弾性係数の増加も確認でき、簡単な検証例題であるが、コンクリートの力学特性に対する速度依存性を再現できていることが分かる。

見かけの強度の増加について、Cohesive crack modelを用いない高速载荷では、破壊開始後の応力の低下が急激に起こるため、ピーク値の増加は見られない。それに対してCohesive crack modelを用いることで、その準脆的な挙動により破壊開始後の応力の低下が遅くなる。低速载荷では、この応力低下の速度の方が、载荷速度よりも大きく、破壊開始後のピーク強度の増加は見られない。それに対して高速载荷では、载荷速度による慣性力の影響の方が強く、破壊開始後も見かけのひずみが増加し、ピーク強度の増加につながっている。それを裏付ける結果として、図-8にA, B点での



解析モデル
 荷重ひずみ速度：

$$\begin{cases} \text{高速} : 0.5 \text{ 1/sec} \\ \text{低速} : 0.005 \text{ 1/sec} \end{cases}$$

	母材	骨材
ヤング率	20000 MPa	40000 MPa
ポアソン比	0.10	0.10
密度	2000 kg/m ³	2500 kg/m ³

(b) 材料定数

	母材	骨材	界面
引張強度	3.5 MPa	6.0 MPa	3.0 MPa
破壊エネルギー	0.03 N/mm	0.0003 N/mm	0.03 N/mm

(c) 材料の破壊力学パラメータ

図-9 メソスケール構造の解析モデル

変位と載荷面変位の関係を示す。上側の線が A 点変位、下側の線が B 点変位である。これによると、低速載荷では、破壊開始後に A-B 点間での相対変位は一定であることが分かる。それに対して高速載荷では、破壊開始後も A-B 点間での相対変位が増加していることが分かる。

他方、図-7 からは、高速載荷時の見かけの弾性係数の増加も見て取れる。これは、低速では変形が構造全体に一樣に分布するのに対して、高速では速度載荷面に近いほど変形が大きく構造全体で一樣でないためである。また、高速での見かけの弾性係数は低速の約 1.1 倍であった。これは、既往の報告¹⁵⁾と定量的に一致しており、本数値解析結果の妥当性を示すものである。

以上から、載荷速度の増大が見かけの力学挙動に与える影響の主な原因は、載荷速度による慣性力の影響と破壊進行領域での準脆性挙動であると考えられる。つまり、この力学挙動は、材料というよりむしろ、供試体の構造全体の応答を反映するものである。したがっ

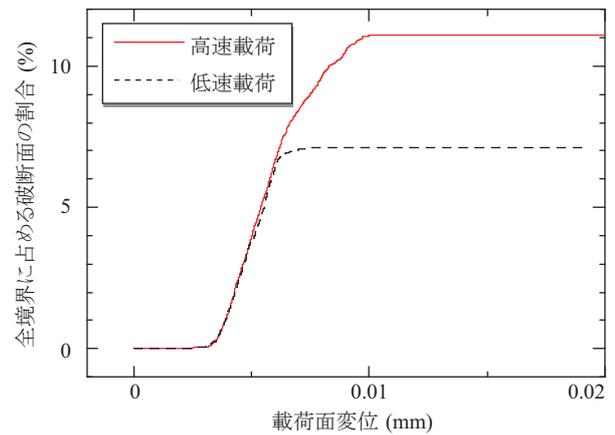


図-10 全境界に占める破壊面の割合と載荷面変位の関係

て、数値解析においては、局所的な破壊発生と破壊発生後の軟化挙動を考慮した上で、構造の全体系の運動方程式を取り扱う必要があるといえる。

3.2 載荷速度の相違による破壊形態の違い

次に、既往の実験¹²⁾を参考に、骨材を含むメソスケールモデルでの動的引張破断解析を実施し、載荷速度の相違による破壊形態の違いを検証するとともに、見かけの力学特性に与える影響について検討する。

(1) 解析対象と解析条件

解析対象は、図-9 に示すような、骨材を含むコンクリートのメソスケールモデルであり、全有限要素境界を破壊面とする。既往の実験¹²⁾を参考に、骨材寸法は 10 mm 以下とした。

材料パラメータを同図に示す。材料の引張強度は、骨材 > 母材 > 界面の順になるように設定した。骨材内部でひび割れの停滞や分岐が起こることはなく、ひび割れは瞬時に進展する、という考察をもとに、骨材には小さな破壊エネルギーを設定した。境界条件は、下端と右端を変位拘束し、上端面に前の例題と同様に、図-6 で与えた低速と高速の 2 ケースの速度を与え、載荷速度の相違による破壊形態の違い、および見かけの力学特性の違いを検討する。なお、本例題では破壊後の界面の再接触や摩擦応答は考慮しないこととするが、本研究では破壊判定後に Cohesive crack model の軟化応答を表すバネが導入されているので、破壊発生後ただちに応力フリーの不連続面が形成されることはない。また、開口変位が微小である間は応力が伝達する仕組みとなっているので、破壊時の解放力によって物体同士が重なり合わないようになっている。

(2) 解析結果と考察

解析結果として、まず、図-10 に全境界に占める破壊面の割合と載荷面変位の関係を示す。全境界に占める破壊面の割合とは、全有限要素境界に占める破壊した境界の割合、つまり最終的な破断面形成までの局所的

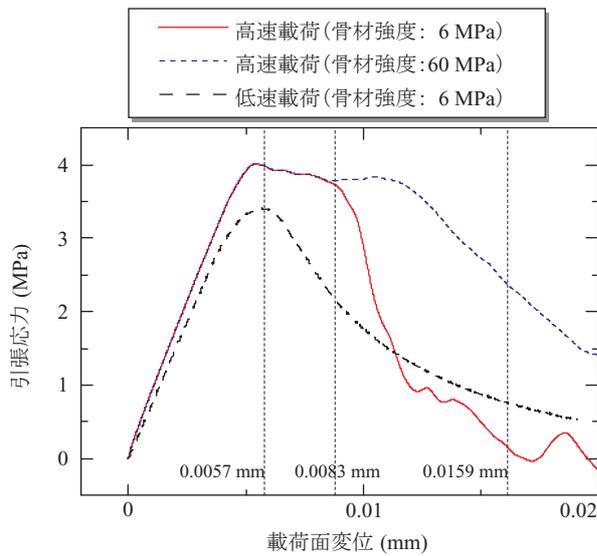


図-11 載荷面での見かけの荷重-変位関係

なひび割れの数を表している。これより、高速載荷ほど破断面形成に至るまでの局所的なひび割れの数が多いことが分かる。

図-11 に、載荷面での見かけの荷重-変位関係を示す。図中、骨材強度を 10 倍に設定した高速載荷（骨材強度：60 MPa）のケースも同時に示している。低速載荷に比べ、高速載荷の方がピーク強度が高いことが分かる。また、見かけの弾性係数も高速載荷の方が高い値を示していることが分かり、載荷速度の相違による見かけの力学挙動の違いを再現できていることが分かる。ピーク後の軟化勾配は高速載荷（骨材強度：6 MPa）ほど急勾配を示している。これは、高速載荷（骨材強度：60 MPa）と低速載荷では骨材は破壊しないのに対して、高速載荷（骨材強度：6 MPa）では骨材が破壊し、それにより急激に破断面が形成されたため、より脆性的な挙動として、急な軟化勾配を示したと考えられる。

図-12 と図-13 に、載荷面での変位が 0.0057 mm, 0.0083 mm, 0.0159 mm の際の変形図、および最大主応力分布図をそれぞれ示す。これらの図から、ひび割れ進展の初期段階（0.0057 mm）では、低速、高速ともに、ひび割れの進展、および主応力分布に大きな違いがないことが分かる。しかしながら、変形が進むにつれ、低速載荷では母材-骨材界面を中心に破断面が形成されているのに対して、高速載荷では、モデル中央付近において骨材の破壊が生じていることが分かる。これは、低速載荷では、変形する速度が遅いため、強度の低い箇所をひび割れが進展する時間が十分に存在することにより、最も強度の低い母材-骨材界面に沿う形で最終的な破断面の形成に至ると考えられる。しかしながら、高速載荷では変形が急速に起こるため、母材-骨材界面を回り込む時間がなく、構造内部を最短経路でひび割れが進展し、その進展過程に骨材が存在

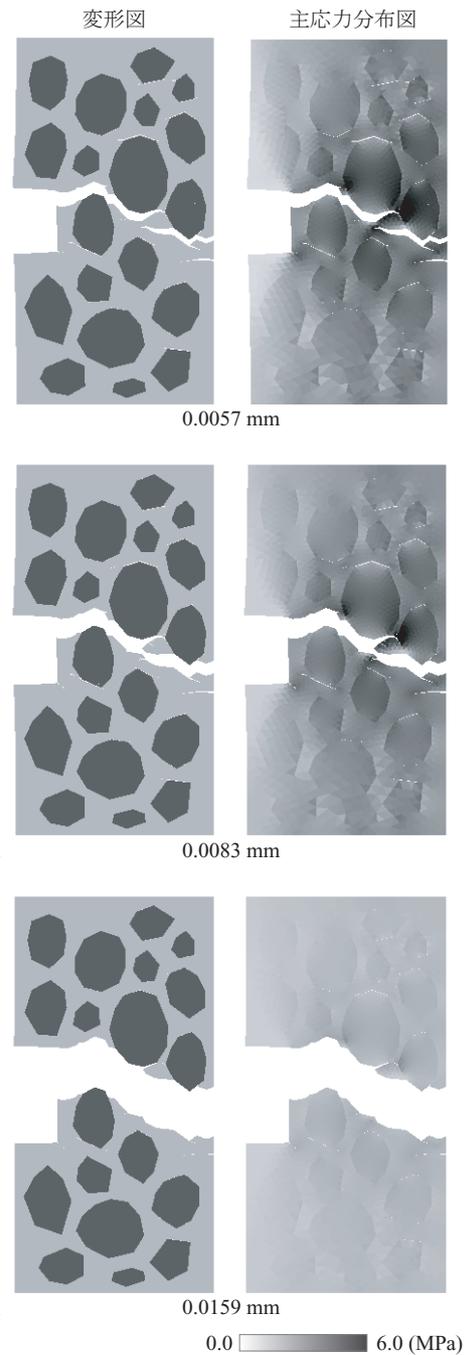


図-12 低速載荷での変形図と最大主応力分布図

する場合は、骨材を破壊するに至る。また、低速載荷では、母材-骨材界面に沿う形でひび割れが進展するため、最終的な破断面は凸凹しているのに対し、高速載荷では、骨材を破壊し最短距離でひび割れが進展することにより、比較的フラットな破断面を形成していることが分かる。これらの結果は、既往の実験結果¹⁴⁾とも一致したものとなっている。

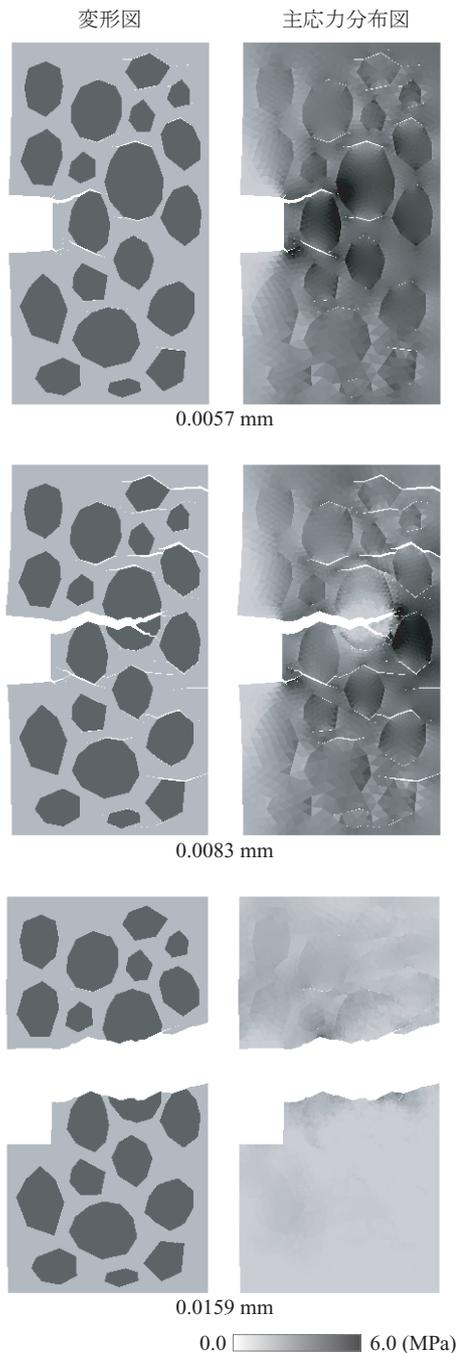


図-13 高速載荷での変形図と最大主応力分布図

4. おわりに

コンクリートは、載荷速度の増大に伴いその力学挙動や破壊形態が異なることが知られており、コンクリートの破壊挙動を適切に評価するには、高速載荷時のコンクリートの力学挙動および破壊形態を再現し、そのメカニズムを考察する必要がある。しかし、その原因については、載荷速度による慣性力の影響やコンクリートの粘性的性質によるものであると示唆されているが、それを数値解析により詳細に検証した例はなく、載荷速度の相違が破壊形態に及ぼす影響について検討した

例も存在しなかった。また、既往の数値解析においては、速度依存パラメータを用いて、見かけの力学特性の載荷速度依存性を表現しているに過ぎず、コンクリートの材料特性を正しく評価したことはなっていない。

本論文では、速度依存パラメータを用いない、準脆性材料の材料レベルでの局所的な破壊発生・軟化特性を考慮した動的破壊解析手法を用い、載荷速度の異なる引張破断解析を行い、以下の結論を得た。

まず、コンクリートの見かけの力学特性に対する載荷速度依存性の再現を行い、載荷速度の増大に伴う見かけの強度、見かけの弾性係数の増加を再現することができた。さらに、高速載荷での見かけの弾性係数は低速載荷の約 1.1 倍であり、実験結果と定量的な一致を示し、本数値解析結果の妥当性を示すことができた。また、見かけの力学特性に対する載荷速度依存性の主な原因は、載荷速度による慣性力の影響、および破壊進行領域での準脆性挙動であることを示し、これは、材料というよりむしろ、構造全体の問題であることを指摘した。

次に、コンクリートのメソスケール解析により、低速載荷では骨材表面に沿う形で破断面を形成するのに対して、高速載荷では骨材が破壊しフラットな破断面を形成するといった、既往の実験結果と同様の破壊形態を再現できた。また、見かけの力学特性に対する載荷速度依存性として、載荷速度の増大に伴う見かけの強度、見かけの弾性係数の増加も確認でき、同時に、高速載荷時の軟化挙動は、骨材が破壊することにより脆性的な挙動となることを示した。

今後の課題として、本論文では載荷速度を 2 ケースのみとしたが、より載荷速度を細かく設定した詳細な検討とともに、荷重-変位関係における見かけのピーク強度の再現性を定量的に比較する必要がある。また、引張破壊だけでなく、圧縮破壊でも同様の検討を行い、コンクリートの破壊メカニズムの検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、平成 19 年度科学研究費補助金（基盤研究(B)：19360207）の援助を得て行われました。また、本研究は、第二著者が日本学術振興会特別研究員であった期間に行われ、特別研究員奨励費の援助により行われました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) S. Mindess, N. Banthia and C. Yan: The fracture toughness of concrete under impact loading, *Cem. Concr. Res.*, Vol.17, pp.231-241, 1987.
- 2) C.A. Ross, J.W. Tedesco and S.T. Kuennen: Effects of strain rate on concrete strength, *ACI Material Journal*, Vol.92, pp.1-11, 1995.
- 3) L.J. Malvar and C.A. Ross: Review of strain rate effects for

- concrete in tension, *ACI Material Journal*, Vol.95, pp.735–739, 1998.
- 4) N. Nomura, H. Mihashi and M. Izumi: Correlation of fracture process zone and tension softening behavior in concrete, *Cem. Concr. Res.*, Vol.21, pp.545–550, 1991.
 - 5) K. Otsuka and H. Date: Fracture process zone in concrete tension specimen, *Engng. Fract. Mech.*, Vol.65, pp.111–131, 2000.
 - 6) A. Hillerborg, M. Modeer and P.-E. Petersson: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cem. Concr. Res.*, Vol.6, pp.773–782, 1976.
 - 7) P. Bocca, A. Carpinteri and S. Valente: Mixed mode fracture of concrete, *Int. J. Solids. Struct.*, Vol.27, pp.1139–1153, 1991.
 - 8) A. Carpinteri, S. Valente, G. Ferrara and G. Melchiorri: Is mode II fracture energy a real material property?, *Comput. Struct.*, Vol.48, pp.397–413, 1993.
 - 9) 湯本達也, 車谷麻緒, 山田真幸, 寺田賢二郎, 京谷孝史: 結合力クラックモデルを用いた準脆性材料の破壊エネルギー評価法の提案, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.11, pp.351–359, 2008.
 - 10) 車谷麻緒, 岩田暁, 寺田賢二郎, 岡澤重信, 樫山和男: Cohesive crack モデルを用いた準脆性材料の動的破壊解析手法に関する基礎的研究, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.11, pp.201–209, 2008.
 - 11) 藤掛一典, 山根茂樹, 大野友則, 水野 淳, 鈴木 篤: 急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.83–95, 1998.
 - 12) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 江守克彦: ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.125–134, 2001.
 - 13) 秋田 宏, 小出英夫, 三橋博三: コンクリートの直接引張試験における4つの誤解, コンクリート工学論文集, Vol.16, No.1, pp.77–86, 2005.
 - 14) D. Yan and G. Lin: Dynamic properties of concrete in direct tension, *Cem. Concr. Res.*, Vol.36, pp.1371–1378, 2006.
 - 15) P. Rossi and F. Toutlemonde: Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete: description of the physical mechanisms, *Mater. Struct.*, Vol.29, pp.116–118, 1996.
 - 16) D. Zheng and Q. Li: An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity, *Engng. Fract. Mech.*, Vol.71, pp.2319–2327, 2004.
 - 17) J.F. Georgin and J.M. Reynouard: Modeling of structures subjected to impact: concrete behaviour under high strain rate, *Cem. Concr. Compos.*, Vol.25, pp.131–143, 2003.
 - 18) R.R. Pedersen, A. Simone and L.J. Sluys: An analysis of dynamic fracture in concrete with a continuum visco-elastic visco-plastic damage model, *Engng. Fract. Mech.*, Vol.75, pp.3782–3805, 2008.
 - 19) G.N. Wells and L.J. Sluys: A new method for modelling cohesive cracks using finite elements, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.50, pp.2667–2682, 2001.
 - 20) 車谷麻緒, 寺田賢二郎: Cohesive crack モデルに対する陽的近似アルゴリズムの提案とその性能評価, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.3, pp.627–638, 2008.

(2009年4月9日受付)