

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360176

研究課題名（和文） コンクリート材料の強度発現機構に対する非均質性の影響再考

研究課題名（英文） RE-CONSIDERATION OF INHOMOGENITIES FOR STRENGTH DEVELOPMENT MECHANISM OF CONCRETE

研究代表者

寺田 賢二郎（TERADA KENJIRO）

東北大学・災害科学国際研究所・教授

研究者番号：40282678

研究成果の概要（和文）：

コンクリート材料のメソスケールおよびミクロスケールの非均質内部構造について、微細なひび割れ生成からより大きなひび割れに成長する過程および、ひび割れによってブロック化した部分構造の崩壊挙動までを、無用な近似を使うことなく忠実に数値的にシミュレートする数値実験を行い、コンクリート供試体の“構造強度”の発現メカニズムに対する非均質性の影響を再考するとともに、その“材料強度”の適切な評価方法を示した。

研究成果の概要（英文）：

Conducting numerical experiments to simulate accurately as much as possible the growing process of fine-scale cracks to larger ones and the collapse phenomena of partially failed brocks in heterogeneous meso- and micro-scale structures of concrete, we re-considered the effects of heterogeneities on the development mechanism of “structural strength” of concrete specimens and presented the evaluation method of actual concrete’s “material strength”.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2012年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：応用力学、計算力学、コンクリート、破壊力学、非均質性、有限変形

1. 研究開始当初の背景

コンクリート材料は、ナノ・ミクロ・メゾの各スケールで観察すると複数の材料が混ざり合った非均質性が認められ、典型的な複合材料であることは周知のことである。そして、その微視的スケールにおける非均質性、構成材料の物性および力学挙動が、コンクリートの巨視的挙動を支配していることも事

実である。しかし、コンクリート構造物の設計に際しては、規格化された標準実験により得られる「みかけの強度」を用いることになっており、微視的非均質性を有するコンクリート供試体の「構造強度」と、均質体としての「材料強度」の線引きが明確にされていないのが現状である。

コンクリート材料の強度とその発現機構

については、古典的なテーマといえ、膨大な量の実験研究により、学術的には一定の解釈が与えられている。しかし、供試体を用いた実験で観察される複雑な力学現象を、数値解析により忠実に再現した例はなく、これを実現すれば、その強度発現メカニズムに対する非均質性の役割を明らかにできるので、どこまでが供試体の構造体としての「構造強度」なのかを定量的に把握できるようになり、結果として、コンクリート構造物の設計・解析に用いられる「材料強度」の正しい評価手法が確立できると考えられる。

2. 研究の目的

コンクリート材料のメソスケールおよびミクロスケールの非均質内部構造について、微細なひび割れ生成からより大きなひび割れに成長する過程および、ひび割れによってブロック化した部分構造の崩壊挙動までを、無用な近似を使うことなく忠実に数値的にシミュレートする大規模数値実験を行い、コンクリート供試体の“構造強度”の発現メカニズムに対する非均質性の影響を再考するとともに、コンクリートの“材料強度”の適切な評価方法を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

- (1) コンクリートの大規模数値シミュレーションを可能とする、有限要素法（以下、FEM）をベースとする破壊解析手法を整備し、並列計算機を導入して通信やMPIなどのライブラリの設定を行うとともに、比較的小さい自由度のモデルによるパイト的な解析を行う。
- (2) ミクロオーダーにおける構成材料の物性を実験・計測する。
- (3) 本格的な大規模数値実験を「レベル2構造」（ミクロオーダー）、「レベル1構造」（ミリあるいはセンチメートルオーダー）の順に進め、平行して対応する強度実験により検証用データを取得する。
- (4) 計算結果のデータを整理して、各構造の破壊に至るプロセスを可視化・分析することで、供試体の構造強度の発現メカニズムに対する非均質性の影響を明らかにし、材料強度の適切な評価方法を提案する。

4. 研究成果

(1) 準脆性材料の破壊のモデル化

ここでは、本研究における数値解析手法について説明する。まず、数値解析に用いた材料モデルと連続体損傷モデルの定式化について紹介し、解析のアルゴリズムに沿って準脆性材料のひび割れの発生や進展の本研究における表現方法について述べる。

本研究では、等方性損傷モデルを用いてコ

ンクリートのひび割れを表現することとし、フックの法則にスカラー変数である損傷変数 D を用いて、応力ひずみ関係式を次式で表す。

$$\overset{\nabla}{S} = (1 - D)\overset{\square}{\square} : \mathbf{d} \quad (1)$$

ここで、 $\overset{\nabla}{S}$ は Cauchy の応力テンソルの Jaumann 速度、 $\overset{\square}{\square}$ は 4 階の弾性テンソル、 \mathbf{d} は変形速度テンソルである。 D は損傷の密度と分布を特徴づける、連続体損傷モデルにおける損傷変数である。この損傷変数 D は損傷の進展を $0 \leq D < 1$ で表し、 $D=0$ の場合、材料は損傷のない弾性挙動を表すが、 $D \approx 1$ の場合、材料は完全に剛性を失って破壊状態となる。この構成則における応力-ひずみ曲線を図 1 に示した。

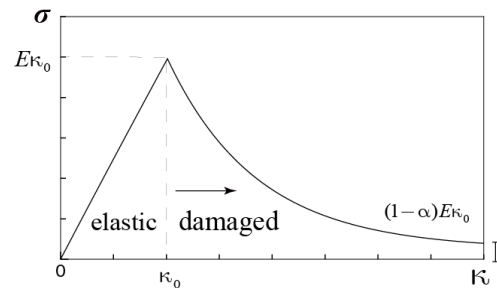


図 1 : 損傷モデルにおける応力-ひずみ曲線

損傷の進展は、等価ひずみの増加によって決定する。本研究では準脆性材料に適した等価ひずみとして次式に示す de Vree *et al.*¹⁾ による定義式を採用する。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{eq}(I_1, J_2) = & \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 \\ & + \frac{1}{2k} \sqrt{\frac{(k-1)^2}{(1-2\nu)^2} I_1^2 + \frac{12k}{(1+\nu)} J_2} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 I_1 、 J_2 は蓄積ひずみの第 1 不変量とその偏差成分の第 2 不変量、 ν は Poisson 比、 k は圧縮引張強度比である。本研究では、コンクリートについての圧縮と引張の強度比を $k=10$ とする。なお、材料が経験した最大の等価ひずみ κ として、荷重状態の载荷と除荷の区別は次のように定義できる。

$$\begin{cases} \kappa = \varepsilon_{eq} (\text{除荷}) & (\text{if } \kappa \leq \varepsilon_{eq}) \\ \kappa = \kappa (\text{载荷}) & (\text{if } \kappa > \varepsilon_{eq}) \end{cases} \quad (3)$$

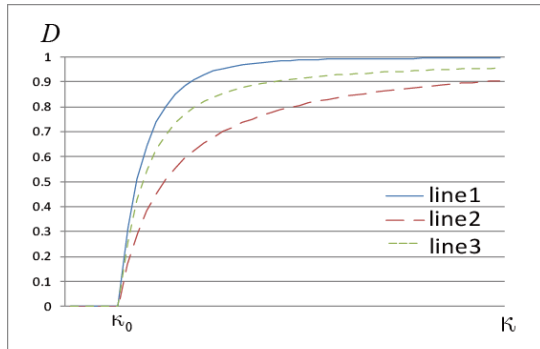
また、損傷の進展については Mazars と Pijaudier²⁾ により定義された次の関数を用いる。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \left(1 - \alpha + \alpha e^{\beta(\kappa_0 - \kappa)} \right) \quad (4)$$

ここで、 κ_0 は材料が経験した最大の等価ひず

み、 κ_0 は損傷開始の閾値であり、図2に示すような弾性境界である。 α 、 β は実験結果とのキャリブレーション等により定まる材料パラメータである。なお、損傷の判定は次のようになる。

$$\begin{cases} D=0 & (\text{if } \kappa \leq \kappa_0) \\ D=D(\kappa) & (\text{if } \kappa > \kappa_0) \end{cases} \quad (5)$$



	κ_0	α	β
line1	0.1	0.96	10
line2	0.1	0.96	0.2
line3	0.1	0.6	10

図2：損傷変数

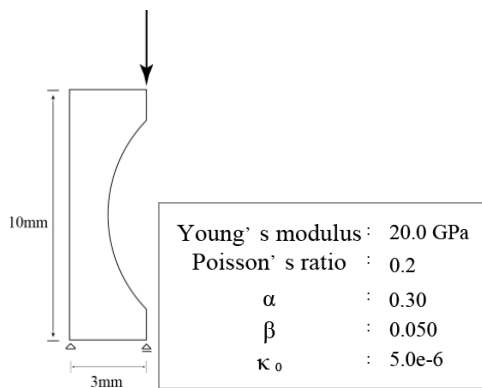


図3：圧縮問題の解析モデル

(2) 解析結果と考察

① 圧縮問題

まず圧縮問題を対象として、本モデルによれば引張・圧縮強度を区別した数値シミュレーションが可能であることを確認する。図3に示すような円形の切欠きを有する構造物に偏心荷重を与える解析を圧縮・引張強度比を $k=1$ と $k=10$ の2種類の解析を行った。また、微小変形理論を用いた解析結果との比較を通して有限変形を考慮することの重要性を確認する。

図4に各モデルの損傷係数の分布の結果を示し、図5に荷重-変位曲線を示した。この結果から、圧縮・引張強度が等しい $k=1$ のモデルでは圧縮部で損傷が生じているのに対し、引張に脆性的な $k=10$ のモデルでは、圧縮破壊が発生せず、引張部でのひび割れの進展によって座屈が生じていることがわかる。

また、グラフに示したように微小変形理論ではピーク応力を再現できていないが、有限変形を考慮した本モデルではピーク応力を再現しており、強度評価が可能であることがわかる。このように、本モデルでは k の値を設定することで、圧縮に強く引張に脆性的な準脆性材料の損傷プロセスを再現可能である。さらに、この種の破壊挙動を再現するには、有限変形を考慮することが重要であることが確認された。

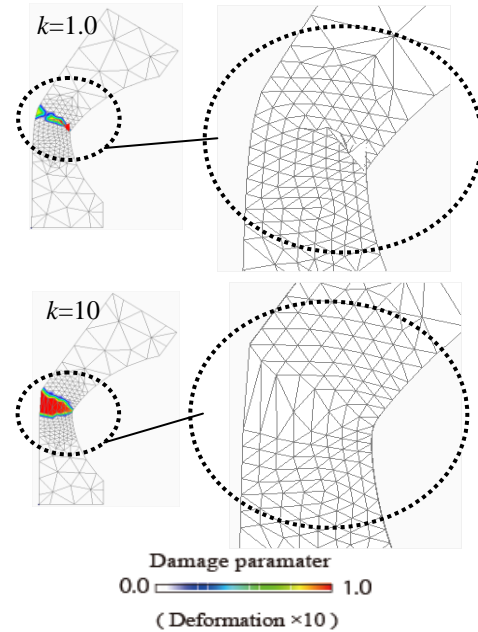


図4：圧縮解析の結果

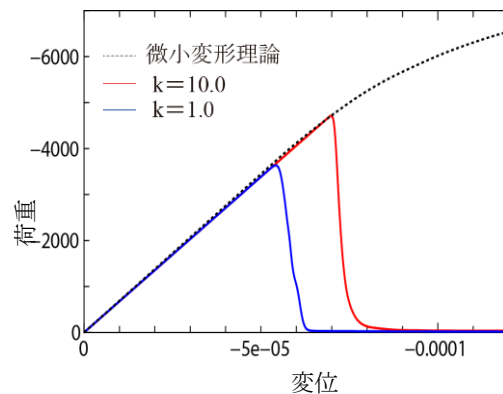


図5：圧縮問題の荷重-変位曲線

② コンクリートメゾ構造の圧縮破壊問題

コンクリートの非均質メゾ構造を模擬したモデルを用いた解析結果を示す。図6に示したように、骨材などの介在物を有するコンクリート供試体を想定してモデル化し、5000ステップに分けて圧縮ひずみを1.0%与えた。ボクセル要素を用い、全要素数は60000、材料パラメータは図6に示した通りである。こ

ここで、骨材は損傷しないと仮定した。

図7において、ダメージパラメータの値が1.0に限りなく近い値（つまり、剛性をほぼ完全に失った要素）を黒色でコンター表示することで、材料に生じたひび割れを表現した。解析の結果、初期段階では、骨材とモルタルの界面で微細な亀裂が多数発生し、それが進展、連結していく様子が見られる。さらにひずみを与えていくと、連結したひび割れが徐々に横方向にも進展し、全体の剛性が低下していく挙動が図8に示すグラフからもわかる。最終的に、斜め約45度方向に滑るように破壊が生じ、全体の剛性を完全に失った。このように、本研究における損傷モデルを用いることで、非均質準脆性材料におけるひび割れの進展・連結を可視化し、材料全体の軟化挙動を再現することができる。

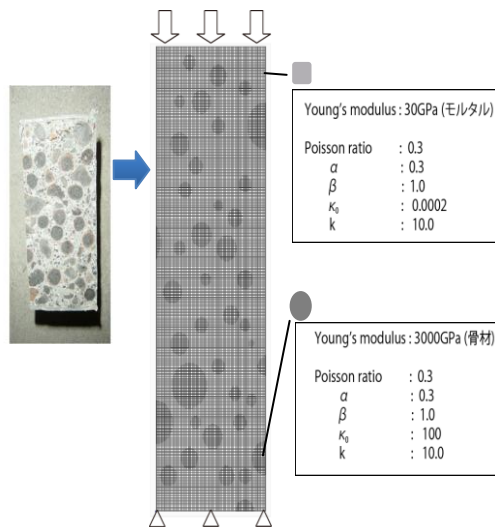


図6 ひび割れ進展問題の解析モデル

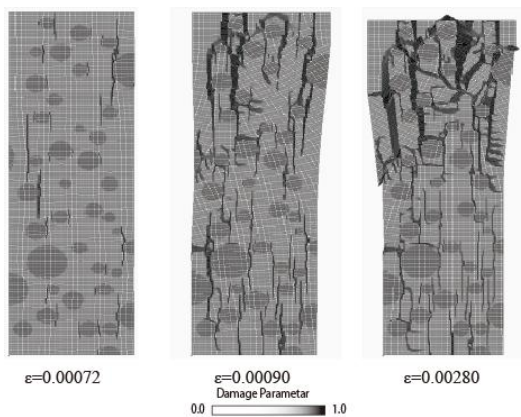


図7 ひび割れ進展問題の損傷変数の分布図

③ 円孔孔空き材の圧縮破壊問題

実験結果と比較することで、破壊モードにおける本モデルの妥当性を検証した。ここでは、和泉らによる実験結果³⁾と破壊のモード

について比較検討をする。中心の円孔の大きさなど、モデルの寸法は和泉らによる実験条件に準ずるものとし、材料パラメータは図9に示す通りである。

解析の結果、図10に示すように、和泉らによる実験結果と同様に、はじめ円孔の上下方向にクラックが生じ（一次クラック）、その後、せん断方向にひび割れが進展していく（二次クラック）破壊のモードを再現することができた。

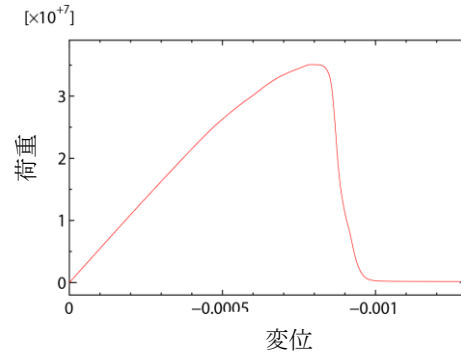
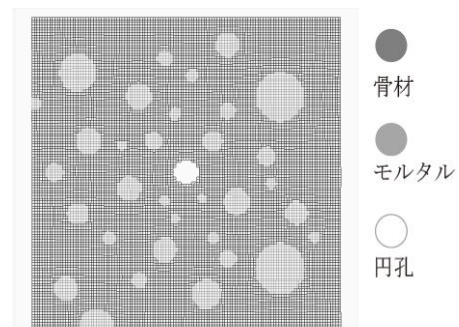


図8 荷重-変位曲線



[モルタル] $E: 30\text{MPa}$, $\kappa_0: 0.0002$

[骨材] $E: 3\text{GPa}$, $\kappa_0: 100$

ポアソン比 : 0.2 , $\alpha: 0.3$, $\beta: 1.0$, $k: 10.0$

図9 円孔モデル問題の解析モデル

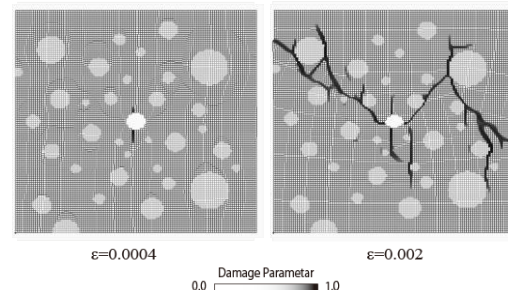


図10 円孔モデル問題の解析

④ 切欠きを有するコンクリートのメゾ構造の損傷解析

構成則に損傷モデルを用いて、動的陽解法を導入し、載荷速度による破壊挙動を比較し、

荷重-変位関係や破壊モードについて詳細な考察を行った。

図 11 に示すような、モルタルと骨材の二種類の材料からなる切欠きを有するコンクリートのメゾ構造に対する損傷解析を行う。下端の節点の全方向の自由度を拘束し、上端を z 軸正方向に解析対象を引っ張るような強制変位を与える。ここで、モルタルの材料パラメータは Young 率 $E=20\text{GPa}$, Poisson 比 $\nu=0.2$, $\alpha=1.0$, $\beta=0.3$, $\kappa_0=0.0001$ とし、骨材の材料パラメータは Young 率 $E=40\text{GPa}$, Poisson 比 $\nu=0.2$, $\alpha=1.0$, $\beta=0.3$, $\kappa_0=0.0001$ とした。また、強制変位量は 0.002mm に固定し、荷重時間を変えることによって 200mm/s (高速荷重) とし、低速荷重を 2mm/s (低速荷重) とした。ここで図 11 の解析モデルを節点数 31080, 要素数 20244 のボクセルメッシュに分割し、これらの条件により解析を行った。

解析結果として、図 12 に荷重点の荷重-変位曲線を示す。低速荷重では荷重点変位に比例して荷重点反力も線形的に大きくなり、やがて軟化挙動を示す。しかし、高速荷重の場合では低速荷重と比較して荷重直後から大きな反力が発生していることが分かる。ここで、図 13 と図 14 に、それぞれ高速荷重と低速荷重でのひび割れの再現を示す。損傷図は損傷パラメータが $D \geq 0.8$ となった要素を表示せずに表現した。

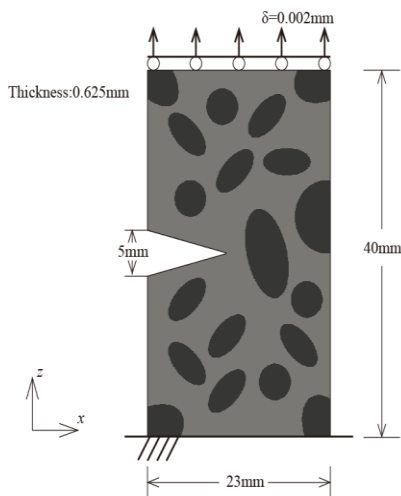


図 11 : 切欠き問題の解析モデル

図 13 を見ると、低速荷重の場合では、切欠き部に応力の大きな部分が生じ、やがて損傷が発生することが分かる。このケースでは最初に骨材とモルタルの界面を沿うような損傷が生じているが、その損傷の進展の先にある骨材にはより大きな引張応力が働いていると考えられ、その結果、骨材を通過するような破壊の形態となっている。

一方、図 14 の高速荷重の結果を見ると、荷重の早い段階から骨材とモルタルの界面

から損傷が発生していることが分かる。局所的に損傷が発生した部分は応力の伝達性能を失い、構造としてひび割れが発生しやすい切欠きの部分の先端に応力が伝達する前に、荷重部周辺が局所的に損傷することが分かる。局所的に材料の剛性が大きくなることから図 12 で見たように反力が大きくなったのは応力波が比較的小さい応力で破壊する切欠き部に達する前にこのように局所的な材料挙動が生じたことの現れであるといえる。

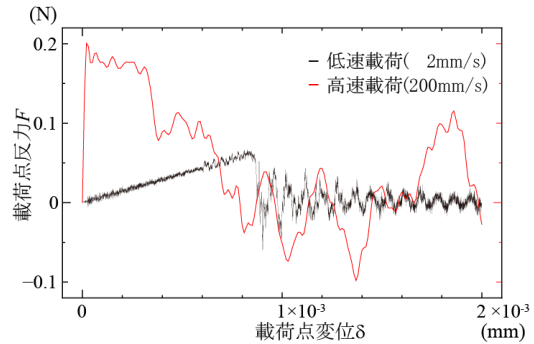


図 12 : 切欠き問題の荷重-変位曲線

以上、ここでは、回転などの有限変形を考慮できる弾性モデルと連続体損傷モデルを組み合わせた構成モデルを構築し、その性能の検証を行った。準静的荷重を行った場合には、非均質性と引張・圧縮の強度のちがいや有限変形の影響を加味することの重要性を示し、ひび割れの進展の解析や、破壊のモードを実験に近い形で再現できる性能を確認した。

その上で動的荷重の場合では、荷重速度による強度、損傷パターンの違い等を調査した結果、低速荷重では、曲げ変形により典型的な曲げひび割れが卓越し、鉄筋が梁構造全体の強度を支配しているのに対して、高速荷重では、局所的な材料の応答が構造全体のみかけの耐力として現れ、押し抜きせん断挙動によるひび割れが鉄筋界面と厚さ方向に進展することで脆性的な破壊に至ることが示された。

⑤ 参考文献

- (1) J.H.P. de Vree, W.A.M. Brekelmans and M.A.J. van Gils : Comparison of nonlocal approaches in continuum damage mechanics, *Comput. Struct. , Res*, Vol.17,pp. 441-452, 1995
- (2) Mazars, J., Pijaudier-Cabot, G.: Continuum damage theory-application to concrete, *J. Eng. Mech.*, 115(2), pp.345-365, 1989.
- (3) 和泉正哲, 三橋博三, 佐々木達也 : コンクリートの圧縮破壊発生機構に関する基礎的研究, *日本建築学会論文報告集* (289), 11-25, 1980

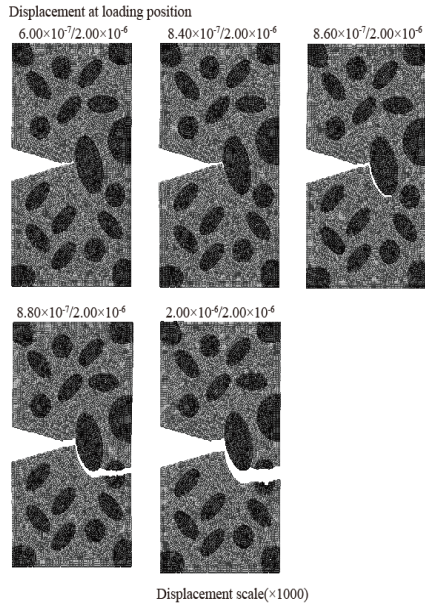


図 13 : 低速載荷 (2mm/s) 時の亀裂

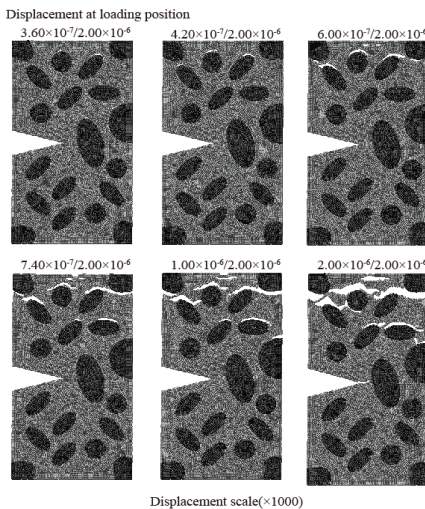


図 14 : 高速載荷 (200mm/s) 時の亀裂

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) 笹川 崇, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 閑田徹志, 全 振煥, 百瀬晴基 超高強度セメントペースト微細構造のひび割れ挙動解析と圧縮強度評価, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 13, 2010, pp. 283-291 (査読有)
- (2) 加藤準治, Ramm Ekkehard, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 損傷を受ける繊維複合材料の繊維形状最適化, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 67(1), 2011, pp. 54-68 (査読有)
- (3) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, X-FEM による非均質材料の波動伝搬解析に関する

基礎的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 67(1), 2011, pp.69-81 (査読有)

- (4) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 一般化有限要素法による不連続性の近似に関する比較考察, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 15, 2012, I_129-I_138 (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 神野真弥, 鈴木茂成, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 榎山和男, 微視的な引張破壊とせん断破壊を考慮した圧縮破壊シミュレーションに関する基礎的研究, 第 17 回計算工学講演会, 2012 年 5 月 29 日~31 日, 京都教育文化センター, 京都
- (2) 青葉勇樹, 京谷孝史, 寺田賢二郎, 加藤準治, 車谷麻緒, 榎山和男, 準脆性材料の損傷プロセスにおける非均質性と幾何学的非線形性の影響再考, 第 17 回計算工学講演会, 2012 年 5 月 29 日~31 日, 京都教育文化センター, 京都
- (3) 佐藤義浩, 青葉勇樹, 加藤準治, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 車谷麻緒, 榎山和男, 高瀬慎介, 流体力を受けるコンクリート構造物の動的破壊シミュレーション, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 6 日~8 日, 東京工業大学, 東京
- (4) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 加藤準治, 榎山和男, 不連続体解析のための構造要素を用いた離散体解析法, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 6 日~8 日, 東京工業大学, 東京

6. 研究組織

(1)研究代表者

寺田 賢二郎 (TERADA KENJIRO)
 東北大学・災害科学国際研究所・教授
 研究者番号: 40282678

(2)研究分担者

京谷 孝史 (KYOYA TAKASHI)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 00186347
 久田 真 (HISADA MAKOTO)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 80238295
 皆川 浩 (MINAGAWA HIROSHI)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 10431537
 加藤 準治 (KATO JUNJI)
 東北大学・災害科学国際研究所・助教
 研究者番号: 00594087
 榎山 和男 (KASHIYAMA KAZUO)
 中央大学・理工学部・教授
 研究者番号: 10194721
 車谷 麻緒 (KURUMATANI MAO)
 茨城大学・工学部・講師

研究者番号：20552392