

論文 粒子モデルによるコンクリートの引張軟化解析

須賀 啓晶 *1 · 白井 伸明 *2 · 森泉 和人 *3

要旨: 本研究では、コンクリート内部の複相構造を模擬する2次元粒子モデルの定式化を行い、破壊解析を通じてモデルの基本応答特性について検討を行った。その結果、本研究の粒子モデルは、骨材寸法の増大に伴う破壊エネルギーの増大傾向や寸法依存性を良好にシミュレートし、コンクリートの実際的な破壊現象を表現できることが確認された。

キーワード: コンクリート, 粒子モデル, 有限要素法, 破壊, 寸法効果

1. はじめに

近年の計算機能力の向上に伴い、コンクリート材料に対して微視構造解析モデルを適用する研究が徐々に行われている。中でも、物理学の粒子モデルや格子モデルをコンクリート材料に適用した Jirasek & Bazant^{1),2)} や Schlangenら³⁾の研究は、比較的単純な微視破壊条件を用いるだけでコンクリートの実際的な破壊シミュレーションを可能とし、多くの研究者の注目を集めている。一方、機械分野の複合材料の力学挙動の把握や材料開発において微視構造解析モデルが積極的に利用されていることから、セメント系材料においても、繊維補強コンクリートの開発等への応用が期待される。

本研究の目的は、Jirasek & Bazantにより提案された任意の準脆性材料の軟化特性の記述に優れた“粒子モデル”と呼ばれる微視構造解析モデルに注目し、セメント系材料のミクロマクロ破壊現象を解明する一般的な力学モデルへと拡張することである。本研究では、まず、モルタルおよび骨材からなるコンクリートの複相構造を模擬する2次元粒子モデルの定式化を行い、引張強度 f_t や破壊エネルギー G_f といった巨視材料パラメータから粒子モデルの微視材料パラメータを導く算出法を提案する。次に、引張応力下のコンクリート構造物の破壊シミュレーションを通じて、使用骨材寸法の違

いがコンクリートの全体応答に及ぼす影響や寸法効果現象を解析的に明らかにする。

2. 粒子モデル

本研究の粒子モデルは基本的に Jirasek らの定式化に従い、次のように作成される。

- 1) 粒子モデルによるラチスネットワークは、軸方向のみ負担するリンク要素によって構成される。各リンク要素には引張軟化特性を考慮した微視応力(σ)—微視ひずみ(ϵ)関係が各リンク要素に付与される(Fig.1)。なお、本研究では、この σ — ϵ 曲線によって囲まれる面積にリンク長さ(L)を乗じたものを微視破壊エネルギー(G_{fm})と定義し、コンクリートの破壊力学で一般に使用される破壊エネルギー(G_f)とは異なる点に注意する。

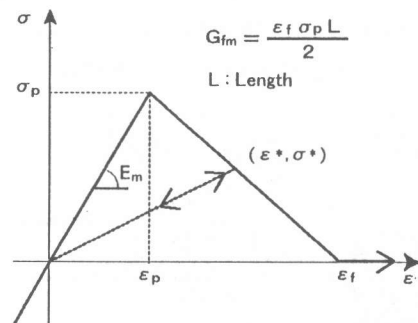


Fig.1 Microscopic stress-strain relation

*1 入江三宅設計事務所 工修 (正会員)
 *2 日本大学教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)
 *3 日本大学助手 理工学部建築学科 工修 (正会員)

2) リンク要素の断面積(A_i)は、微視ヤング係数(E_m)と構造物全体の巨視ヤング係数とを等価と仮定し、ラチスネットワークのひずみエネルギーが2軸等応力状態の平面材料に等しくなるように設定する($A_i=3V/\Sigma L_i$; ここで、 V および L_i は、対象とする平面解析モデルの体積および各リンク要素の長さ)。

3) 非線形求解法には非弾性力法²⁾を採用する。非弾性力法とは、r-min法のようなステップサイズ制御アルゴリズムに、全体剛性マトリクス中の破壊要素に対応した自由度の行列要素を操作するだけで演算を可能とするアルゴリズムを付与した非線形求解法である。

Jirasek による粒子モデルではコンクリートを単相材料と捉えた定式化をおこなっているが、本研究では、使用骨材径の違いがコンクリートの巨視的応答に及ぼす影響等を明らかにするため、モルタル、骨材および界面リンクからなるラチスネットワークを定義する(Fig.2)。ここで、本研究の粒子モデル作成方法について、実際の手順に従って説明する。まず、コンクリート内部の骨材径を考慮して、リンク長さ3mmの規則ラチスネットワークを作成する。次に、数種類の円形骨材とそれらの数量を仮定し、骨材径の大きなものから順番に、一様乱数に従って中心座標をラチスネットワークにマッピングすると、骨材およびモルタルリンクが定義された最終的な粒子モデルが完成する。なお、本研究では、モルタルおよび界面リンクのみ破壊が進展するように微視材料パラメータを設定し、骨材リンクは破壊の起こらない弾性体として扱

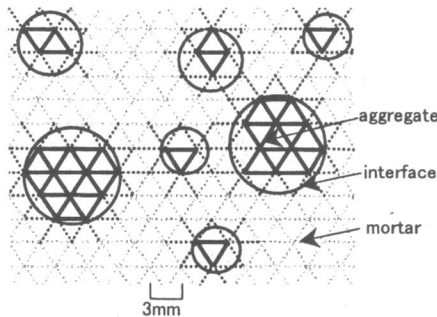


Fig.2 Particle model of three-component material

う。なお、モルタルリンクに用いた微視材料パラメータについては次節に述べる。

3. 引張応力下の破壊シミュレーション

3.1モルタルリンクの微視材料パラメータ

ここでは、モルタル単相粒子モデルを用いて、微視引張強度(σ_p)および微視破壊エネルギー(G_{fm})を変動させたパラメータ解析を行い、モルタルリンクの微視材料パラメータと巨視材料パラメータ(引張強度 f_t および破壊エネルギー G_f)との関係式を導く。

本検討では、Fig.3(a)に示されるノッチ入り角柱試験体⁴⁾の形状に倣った粒子モデルを用い、 $\sigma_p=2\sim 5\text{N/mm}^2$ まで0.5の刻み幅で変化させ、各 σ_p 値について $G_{fm}=0.02, 0.03, 0.04, 0.05\text{N/mm}$ の4ケースの解析を行った(計28ケース)。Fig.4および5に、パラメータ解析の結果をまとめて示す。まず、Fig.4より、 G_{fm} と G_f は、ほぼ線形関係にあることから図中の式(1)が導かれる。また、 G_{fm} が等しい場合、 σ_p の変化が G_f に与える影響は小さいことがわかる。一方、Fig.5より、 f_t について σ_p と微視限界ひずみ(ϵ_p)を用いて整理すると、それらは図中の式(2)によって近似される。この式(2)は、Fig.1の定義式($\epsilon_f=2G_{fm}/(\sigma_p L)$)を用いると、 f_t および G_{fm} を含む σ_p の2次方程式に変換される。つまり、2次方程式を解いて $\sigma_p>0$ の解を用いると、粒子モデルの微視材料パラメータは、 f_t および G_f といった巨視材料パラメータから自動的に決定される。

Fig.6に、前述した微視材料パラメータの算出法によってモルタル単相粒子モデルを作成したノッ

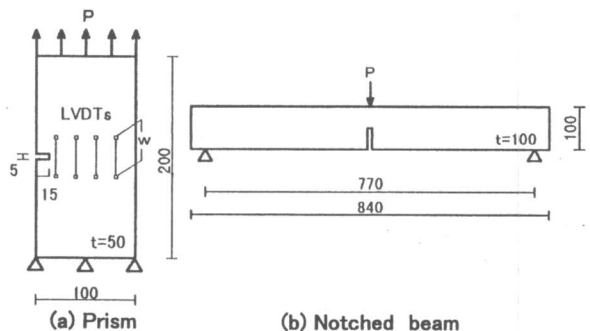


Fig.3 Specimen geometry (unit:mm)

チ入りモルタル角柱試験体 (Fig.3(a)) の実験値と計算値を示す。なお、計算に使用した G_f は、実験の荷重 (P) - 開口変位 (w) 曲線から別途求めた値を使用している。また、Fig.7に、Fig.3(b)に示されるモルタル製3点曲げ梁試験体⁵⁾の解析例を示す。なお、解析自由度数を低減するため、試験体中央部の破壊進行領域のみ粒子モデルで離散化し、他の部位は定ひずみ三角形要素を用いて解析を行った。モルタル製3点曲げ梁試験体についても、モルタル単相粒子モデルは実験の引張軟化挙動を良好にシミュレートしており、本研究の微視材料パラメータの算出法の妥当性が確認された。

3.2 複相粒子モデルによる破壊解析

ここでは、3.1で述べた方法に従ってモルタルリンクの微視材料パラメータを求め、骨材および界面リンクを含むコンクリートの複相構造を模擬した粒子モデルについて検討する。なお、以下の検討では粒子モデルに与える骨材分布情報が必要とな

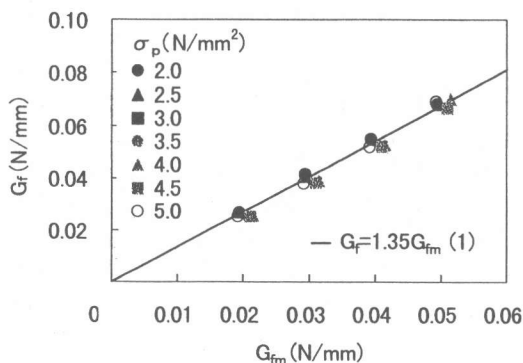


Fig.4 $G_f - G_{fm}$ relation

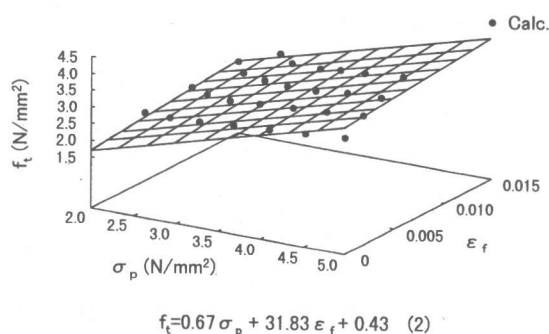


Fig.5 Microscopic material parameters (σ_p, ϵ_f) - macroscopic tensile strength (f_t) relation

るが、文献中から十分な情報が得られなかったため、JASS5に示される骨材粒度分布を参考に、文献に記載されている使用最大骨材寸法 (d_m) から数種類の円形骨材を仮定して破壊シミュレーションを行う。

まず、Fig.3(a)と同形状のコンクリート製ノッチ入り角柱試験体の実験値と計算値を Fig.8 に示す。なお、図中には骨材とモルタルに跨る界面リンクの ϵ_f をモルタルリンクの1.5および2.0倍にした計算結果を併せて示す。界面リンクにモルタルリンクと同等の ϵ_f を与えた場合、計算値は、実験値に比べて急な軟化勾配を予測することがうかがえる。これは2次元解析モデルである本研究の粒子モデルでは、骨材周囲のひび割れの3次元的破面特性を表現出来ないため、 G_f を低く見積もる傾向にあると思われる。一方、界面リンクの ϵ_f を2.0倍とした計算値は実験値を比較的良好にシミュレートしていることから、コンクリート試験体を対象とする場合、本研究の複相粒子モデルは、界面リンクの

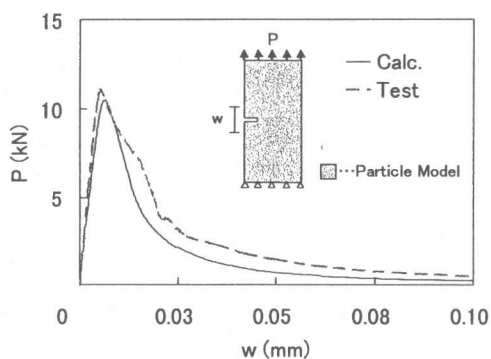


Fig.6 Load (P) - CMOD (w) curves

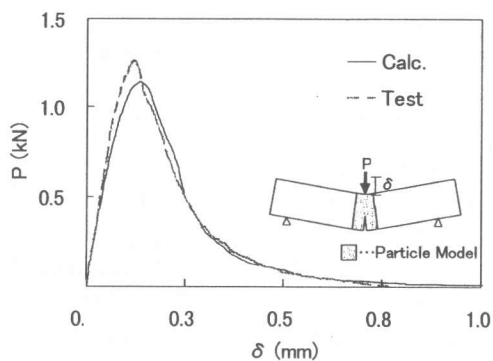


Fig.7 Load (P) - displacement (δ) curves

G_{fm} を割増することで軟化挙動を改善できると考えられる。

Fig.9にFig.3(b)に示されるコンクリート製三点曲げ試験体の使用最大骨材径 (d_a) を変化させた試験体 ($d_a=5, 25\text{mm}$) の実験値と計算値を示す。なお、図中には、異なる粒度分布を与えた計算結果 (4ケース) と実験の荷重 (P) - 開口変位 (w) 関係を併せて示しており、それらは全て界面リンク要素の ε_f をモルタルリンクの 2.0 倍として計算を行っている点に注意する。 $d_a=25\text{mm}$ の計算値は仮定した粒度分布によって応答が大きく変化しており、2次元問題における骨材分布の仮定にはさらに検討が必要と思われるが、それらの平均応答は、実験値を比較的良くシミュレートしているといえよう。Fig.10に、実験および計算結果から得られた d_a と G_f の関係を示す。なお、図中には、CEB-FIP MODEL CODE 1990による予測値も併せて示してある。本研究の粒子モデルは、骨材径の増大に伴う G_f の増加傾向についても実験値を捉えることに成功しているこ

とが分かる。Fig.11に、 $w=1.0\text{mm}$ まで破壊が進展した時のノッチ近傍のリンク状態とリンク要素が消費した微視破壊エネルギー G_{fm} の材軸方向における分布図を示す。支配ひび割れの形成後、その周囲の微細ひび割れが閉口するコンクリートの破壊の局所化を、粒子モデルは実際に表現している点が注目される。コンクリートの微視構造解析モデルとして粒子モデル^{1),2)}と格子モデル³⁾を比較する場合、リンク要素に徐々に軟化する微視応力-ひずみ関係を与える粒子モデルは、微視破壊条件に達した梁要素の残留応力をゼロとして扱う格子モデルに比べて、コンクリート材料に認められる破壊の局所化現象の記述に優れていると考えられる。また、 G_{fm} の分布形状を比べると、 d_a 値が増加する割合ほど G_{fm} の分布帯は狭くないことがうかがえる。これらの粒子モデルによる計算結果は、骨材の形状よりはむしろ、界面の実面積を破壊靱性向上のパラメータとして捉える方が有効であることをコンクリート試験体の破面測定より導いた三

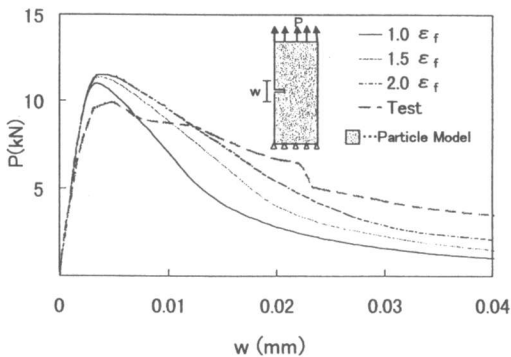


Fig.8 Load (P) -CMOD (w) curves

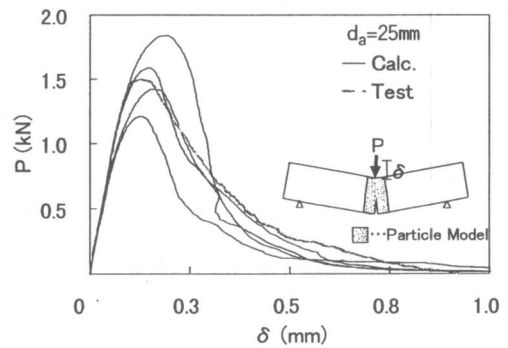


Fig.9 (b) Load (P) - displacement (δ) curves

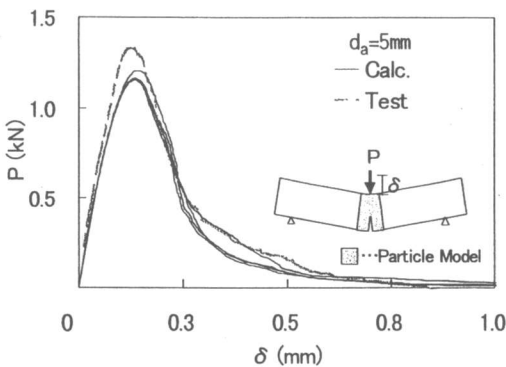


Fig.9 (a) Load (P) - displacement (δ) curves

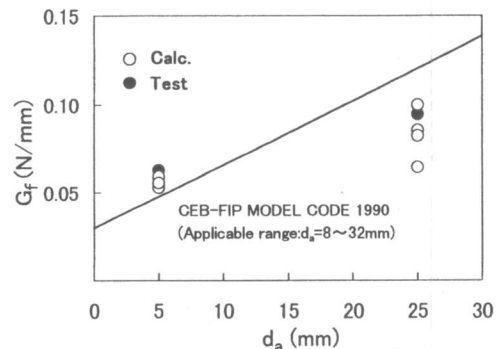


Fig.10 d_a - G_f relation

橋らの研究⁶⁾の妥当性を解析的に示唆していると考えられる。

次に、破壊エネルギー (G_f) の寸法依存性について検討したコンクリート製CT試験体⁷⁾の計算例を示す (Fig.12)。なお、これまでの破壊解析と同様に、粒子モデルによる離散化はノッチ下部の破壊領域のみとし、他の部位は定ひずみ三角形要素を用いている。Fig.13に、得られたピーク荷重をリガメント部断面積で除した引張強度 (f_t) とリガメント長さ (b) の関係を、また、Fig.14に、 G_f と b の関係をそれぞれ示す。実験の f_t が b 値の増大に伴い減少する、いわゆる強度の寸法効果を計算値は良好に表

現している。さらに、 b 値の増大に伴う破壊エネルギー G_f の増加傾向についても捉えており、それはある一定値に収束する傾向にあることが、実験および計算結果の両者からうかがえる。コンクリート複相粒子モデルによる破壊解析は、試験体の寸法および形状によらない微視材料パラメータを用いたシミュレーション結果を与えることから、材料試験方法の標準化に対して有益な情報を与えると思われる。Fig.15(a)および(b)に、ピーク荷重時および最終破壊時においてリンク要素が消費した微視破壊エネルギー G_{fm} の分布図を示す。まず、ピーク荷重時の G_{fm} の分布は、 b 値の増大に伴い、

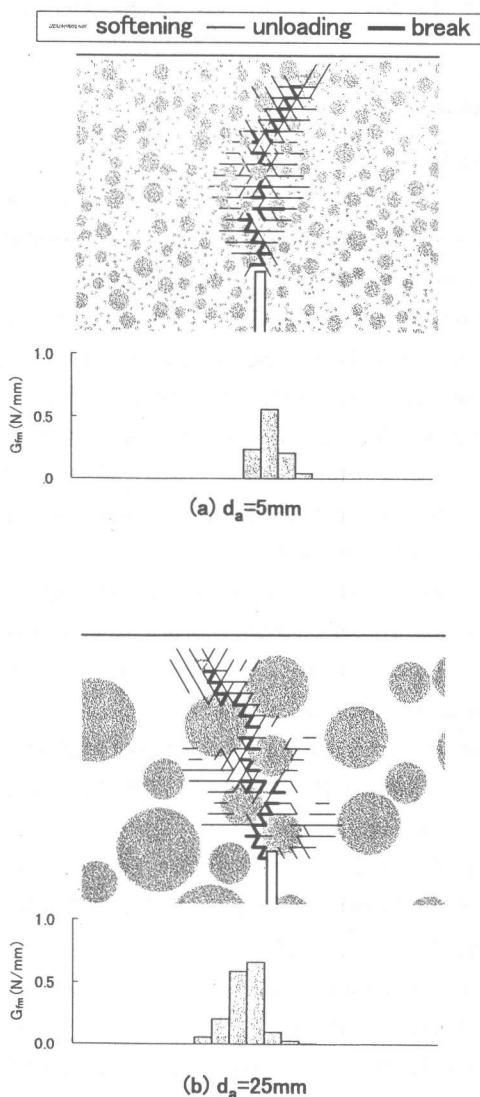


Fig.11 Damage distribution

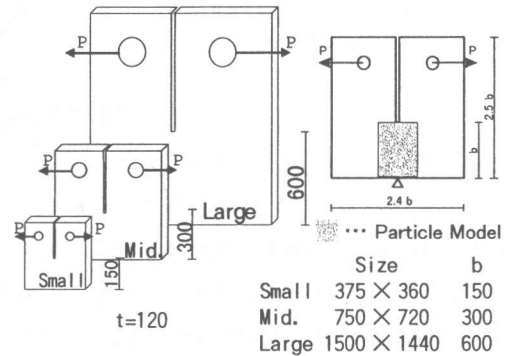


Fig.12 Specimen (unit : mm)

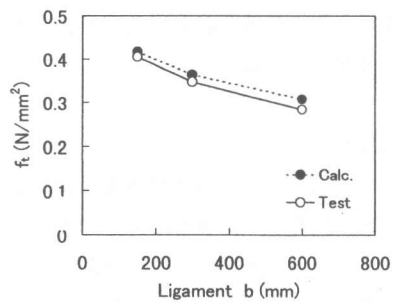


Fig.13 f_t - b relation

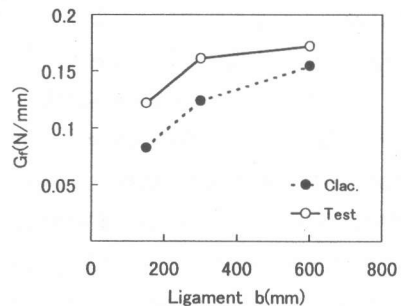


Fig.14 G_f - b relation

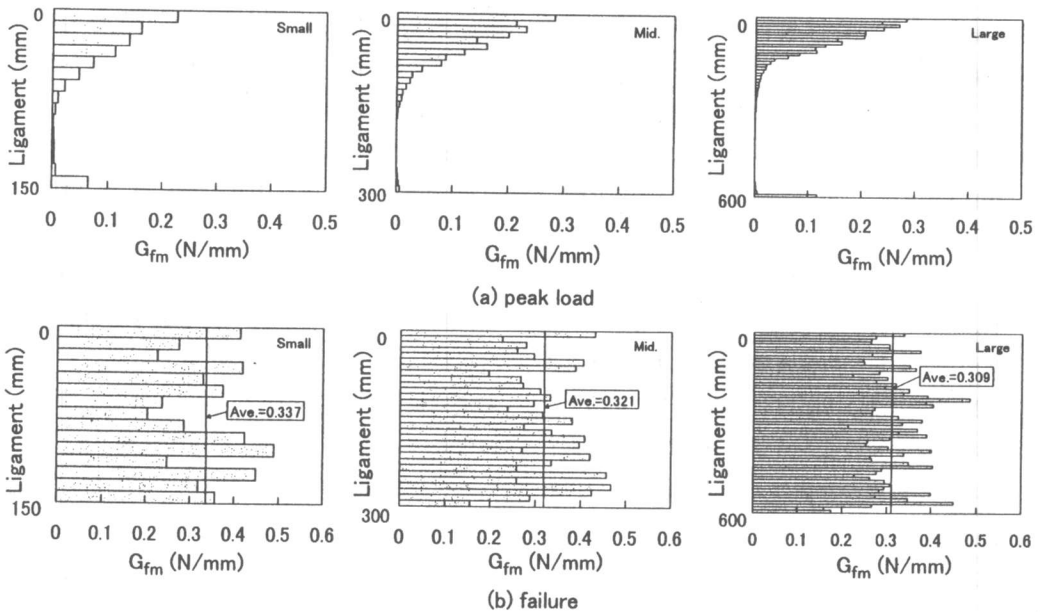


Fig.15 Energy distribution process

勾配が若干急になる様子が認められる (Fig.15(a)). 次に, Fig.15(b)をみると, 各試験体ともリガメント方向全域に G_{fm} が分散して最終破壊を迎えることが分かるが, その平均値 (図中の Ave.) は, b 値の増大に伴い, 減少する傾向がうかがえる. つまり, 試験体寸法が異なると, 破壊の進行に伴う微細な破壊エネルギーの消費過程や最終的な累積値にも変化が生じ, これが強度および G_f の寸法効果につながったと考えられる.

4. まとめ

以上, コンクリートの複相構造を模擬する粒子モデルを定式化を行い, 引張応力下のモルタルおよびコンクリートの破壊シミュレーションを通じて本研究の粒子モデルの妥当性を示した. 本研究の粒子モデルは, 使用骨材寸法がコンクリート全体の応答に及ぼす影響や強度および破壊力学パラメータ (G_f) の寸法依存性についても解析的に明らかにした. さらに, これらの巨視的破壊現象は, 粒子モデルから計算される微視破壊エネルギー G_{fm} によって統一的に説明される可能性を示した.

【謝辞】本研究の一部は, 文部省科学研究費補助金による総合研究(B)(課題番号: 08455265; 研究代表: 安達洋)によるものであり, ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1)Jirasek, M. and Bazant, Z.P. : Particle model for quasibrittle fracture and application to sea ice, Journal of Engineering Mechanics, pp.1016-1025, Sep. 1995
- 2)Jirasek, M. and Bazant, Z.P. : Macroscopic fracture characteristics of random particle systems, International Journal of Fracture, Vol.69, pp.201-228, 1994/1995
- 3)Schlangen, E. : Computational aspects of fracture simulations with lattice models, Fracture Mechanics of Concrete Structures (ed. F. H. Wittmann), Elsevier Applied Science, pp.913-928, 1995
- 4)Schlangen, E. and van Mier, J.G.M. : Experimental and numerical analysis of micromechanisms of fracture of cement-based composites, Cement and Concrete Composites, Vol.14, pp.105-118, 1992
- 5)三橋 博三 : コンクリートの強度特性が破壊力学パラメータに及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.6, pp.81-88, 1.1995
- 6)三橋 博三, 梅岡 俊治 : 骨材径を変えたコンクリート構造物の破面解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, pp.1-7, 1993年11月
- 7)Mihashi, H. and Nomura, N. : How to Predict Size Effect in Concrete Structures, Size Effect in Concrete Structures, edit. Mihashi, Okamura and Bazant, E & FN SPON, pp.269-280, 1994