

氏名	あさい みつてる 浅井 光輝
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	微視的構造特性を考慮した非均質脆性材料の破壊シミュレーション
指導教官	東北大学教授 池田 清宏
論文審査委員	主査 東北大学教授 池田 清宏 東北大学教授 岩熊 哲夫 東北大学教授 岸野 佑次 東北大学助教授 寺田 賢二郎

論文内容要旨

土木工学の分野で扱う脆性材料は、コンクリート・岩盤などのように非均質性を有しているものが多く、これが材料損傷過程において大きく関与し複雑な破壊性状を招く。こうした非均質脆性材料を構成材料とする構造物を対象として、材料の微視的構造特性を反映し得る巨視的構造解析技術として、本研究ではマルチスケール不連続変形解析手法を開発した。提案手法は、「ミクロスケールにおいて材料特性評価を行い、その材料特性を加味したマクロな構造物の境界値問題のモデル化を可能にする」均質化理論に基づくマルチスケールモデリングを採用しており、ミクロ・マクロそれぞれのスケールの問題において不連続変形解析手法を導入したことが最大の特徴である。また、局所的な材料損傷の進展を有する問題に対して、均質化理論を用いたマルチスケールモデリングを行う際には、ミクロ構造に課す周期境界条件の仮定から、ミクロ領域内での不連続変形の進展とマクロ領域での不連続変形との関連が曖昧であることが懸念されてきた。この解決策として、マルチスケール解析におけるミクロ問題を材料特性評価のためのモデル化手法と位置づけることにより、マクロ問題の数値解析においては材料損傷が分布して発生する状態においては均質化理論に準じた等価連続体解析を行い、その損傷がマクロ的な不連続面として成長した際には完全な不連続性を付加したマクロ不連続体解析へと移行するという新たな方法論を提案している。以下には、本研究の成果を各章ごとにまとめる。

第2章では、本論文にて一貫して使用するミクロ領域内の不連続変形解析ツールを提示した。ミクロ構造内の材料の非均質性と不連続な挙動の再現性を配慮し、それぞれイメージベースモデリングと不連続変形解析法の導入により、それらの特徴を近似表現している。この際、ミク

ロ構造内において複雑に分布する不連続挙動を効率的かつ容易に解析するために、剛体バネモデルと有限要素法の両者の特徴を併せ持つハイブリット型ペナルティー法と類似な手法を不連続変形解析法として提案している。また、その解析結果から与えられるマイクロつり合い状態から、マイクロ構造内に発生・進展する不連続変形特性を反映する均質化割線係数を定義している。そして、この係数により均質化割線アコースティックテンソルを定義し、古典的な材料安定性理論と照合することで、マクロ的な不連続面の発生を評価する手法(材料強度特性評価法)を提案した。この材料強度特性評価法については、数値解析例による適用性の検証から妥当な結果が得られることを確認し、これをマクロ不連続面発生条件として採用した。例として、ここでは図 1 に示す介在物形状のみが異なる 2 つのマイクロ構造を有するユニットセルに対して一軸引張载荷試験を行った。同図にはマクロ応力-ひずみ関係を示している。この結果からわかるように、マイクロ不連続変形がマクロ的な材料の軟化挙動を与え、マイクロ構造内の幾何性状のみの相違により異なるマクロ材料特性として評価される。このように、マイクロ構造内での不連続変形の進展状況はマクロ的な材料損傷として評価され、またマイクロ構造内での不連続変形の進展とマクロ不連続面の発生との関係が明確な条件として与えられる。

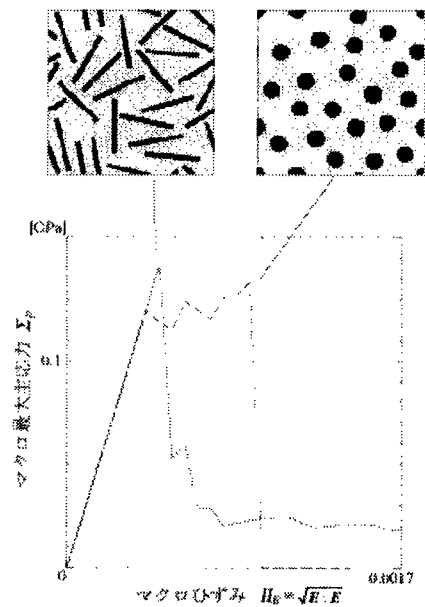


図 1. 微視的構造の相違から与えられる巨視的材料特性

第 3 章では、第 2 章において提示したマイクロ構造解析技術を用いて、実際にマイクロ・マクロ連成解析を實踐した。すなわち、非線形均質化理論においては、「マイクロ問題はマクロ問題における局所的な点での材料特性を与える」という数値モデルの特性を生かし、マイクロ・マクロ連成解析へと発展させた。このマルチスケール解析は、ひずみ軟化特性を示す構成モデルを用いた有限要素解析と同様な特性を有しており、要素寸法依存性は不可避である。このため、この種の要素分割依存性の解消方法として定評のある非局所理論を導入した非局所マルチスケール損傷モデルを提案した。これは、非局所理論のひとつである積分型平均化理論をマルチスケールモデリングに導入したものであり、材料の特性長さ内において重み付き平均した非局所ひずみか

らマクロ領域内での応力状態を評価するものである。この数値結果は、材料パラメータとして設定する材料の特性長さに依存する結果を与え、逆に要素分割に対する依存性が低減される。また本手法は、マルチスケールモデリング手法の恩恵を受け、ミクロ構造の影響を反映した損傷解析を可能とする。

第4章では、マクロ問題を定義する構造物内に発生すると判断される不連続面直接付加する技術の開発を目指し、メッシュレス法的な特徴を有する有限被覆法を整備した。有限被覆法とは、FEM と Discrete Deformation Analysis との統合化解析手法として提案された Manifold 法の近似特性を継承する解析手法であり、FEM との最大の相違点は「近似関数の定義される数学的部分領域（数学被覆）」と「支配方程式を満足すべき物理的な部分領域（物理被覆）」とを分離して考えることにある。また、

ハイブリット型の変分原理に従い定式化する手法を採用することで、定形メッシュにより変位場だけでなくひずみ場の不連続性の再現を可能とした。こ

こでは数値解析例としては、複数の円形介在物がランダムに配置する複合材料問題の界面剥離破壊解析結果を示す。

図2には界面剥離破壊の進展の様子とその際の応力分布図を示している。この図から、線形領域では異種材料界面においてスムーズに応力が伝達している様子が確認でき、さらに剥離破壊後には応力の伝達が遮断されている様子までもが的確に再現できていることが確認できる。

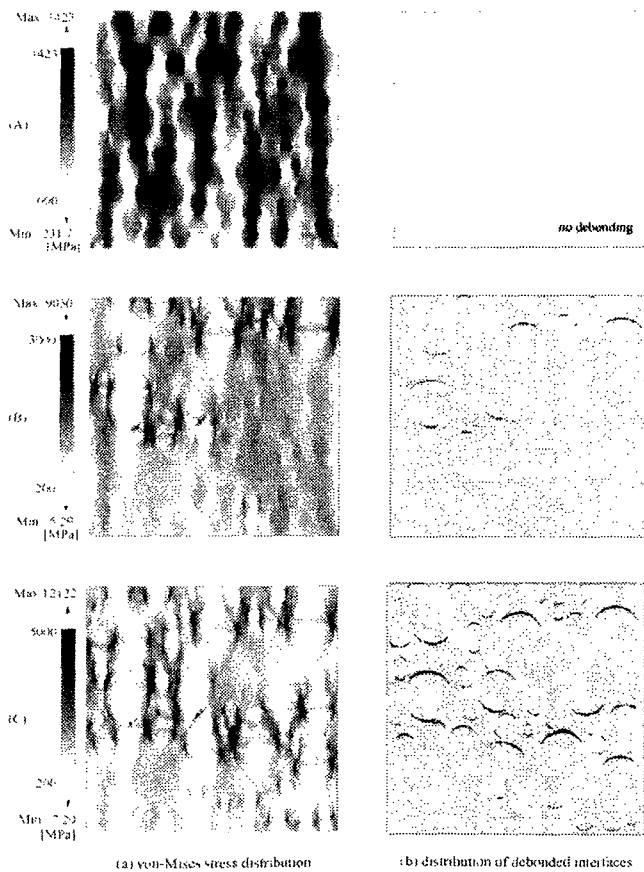


図2. 有限被覆法による界面剥離破壊解析結果

第5章では、非局所マルチスケール損傷モデルにおけるマクロ解析ツールに有限被覆法を採用することで、マルチスケール不連続変形解析法を構築した。このためにまず、第4章で整備した有限被覆法における数学的な要素の存在を意識しないという特性を生かし、不連続面の発

生・進展を逐次付加していく不連続変形解析手法へと発展させた。また、その不連続面発生条件としては、第2章において定義したマクロ材料不連続発生条件が採用されている。これは、「微視領域内における材料損傷が分布して発生しており、連続体としての近似が可能な状態においては均質化理論を用いて等価連続体として評価し、その損傷が巨視的にも無視できないほど成長した際には有限被覆法により不連続変形へと移行する」ものである。こうした等価連続体解析から不連続変形解析への段階を踏むことで、マイクロ領域内での不連続変形の進展状況とマクロ不連続変形発生との関連が明示され、非均質脆

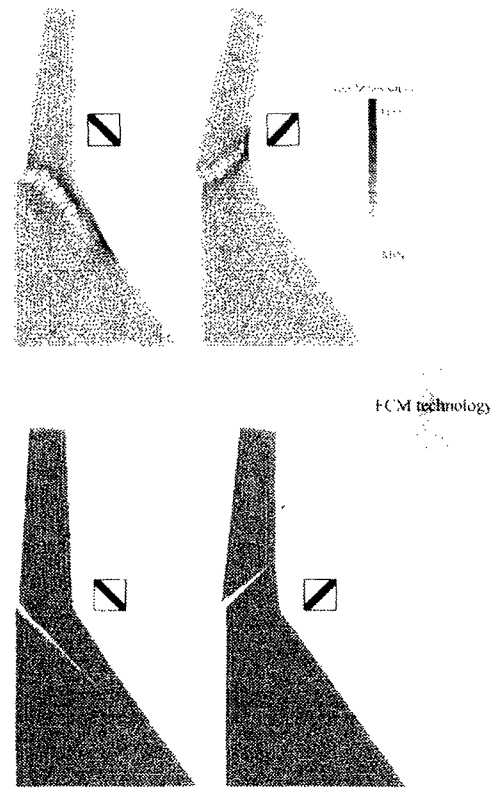


図3. 有限被覆法による亀裂進展評価例

性材料において複雑に発生する不連続変形現象をマイクロ・マクロの2つのスケールにより解析することが可能となった(図3)。

そして第6章では以下に示す内容の結論を述べている。本研究ではコンクリート・岩盤材料などの非均質脆性材料を対象としたマルチスケール解析技術の構築を目指し、非線形均質化理論に基づくマルチスケールモデリング、メッシュレス法などの最先端の解析技術を融合させることで、全く新しい解析手法「マルチスケール不連続変形解析法」を開発することができた。また、本手法では、異なる2つのスケールで観測されるマイクロとマクロの現象がそれぞれ連成した複雑な現象の再現を目指したものであるのと同時に、開発した計算ソフトウェアにはその利便性にも配慮したものである。例えば、マイクロ構造解析では、非均質な微視構造を有する材料の画像データから解析モデルを自動生成しており、イメージベース工学を踏襲したものになっている。また、非局所理論を導入したことによりメッシュ分割依存性の低減にも成功している。このように、材料および構造の設計プロセスにおける使用を目的としたCAEソフトウェアとしても有効な特徴を有しており、材料および構造の破壊破壊現象の解明に役立つ基礎的な解析ツールとして期待できる。

論文審査結果の要旨

現在、コンクリート構造から鋼構造までのさまざまな土木構造物の設計手法は、性能照査型設計へと移行が急速に進められている。今後は、今まで以上にある所望の材料特性を有する新材料の開発が盛んに行われ、実際の構造物へと供用されていくことが期待される。こうした未知なる材料特性を秘める材料および構造物の評価を事前に行うには、材料の微視的領域における構造特性や材料組成などの情報に基づいて、巨視的な材料特性を精度よく予測する技術が渴望されている。

こうした背景を受け、本論文ではコンクリート材料・岩盤などの非均質な微視構造を有する脆性材料に主眼をあて、均質化理論をもとにマイクロ・マクロの現象の連成解析を目指したマルチスケール不連続体解析手法の開発を研究成果として纏めたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、マイクロ問題における微視的非均質性および不連続挙動を追跡しえる数値解析技術として、それぞれイメージベースモデリング技術と剛体バネモデルと有限要素法の両者の特徴を有するハイブリット型ペナルティー法を整備している。また、マイクロ構造内に進展した不連続変形を反映した均質化割線係数を評価しており、その係数を用いた巨視的な材料安定性指標を提示し、その有用性を数値解析により示している。

第3章では、非線形均質化理論をもとに、微視的な不連続変形解析結果を巨視的な材料特性として採用するマルチスケール損傷解析を実施した。また、マクロ構造の要素分割依存性を低減させるべく、非局所理論を均質化理論に導入した非局所モデルを提案した。

第4章では、メッシュレス法的な特徴を有する有限被覆法を整備した。特に、この種の解析手法においてしばしば問題とされる境界条件付加に対する一対処法を提案しており、数値解析例を通してその精度を確認している。

第5章では、第3章で提示した非局所型マルチスケール損傷モデルにおけるマクロ解析ツールとして採用することにより、マクロ構造解析において逐次発生する不連続変形の記述を可能とするマルチスケール不連続変形解析手法を構築した。数値解析例では、微視的構造特性を反映した巨視的な不連続面の形成が再現されており、本手法の可能性が十分に示されている。

第6章は結論であり、本研究を総括している。

以上要するに本論文は、非均質脆性材料を対象とし、マイクロ・マクロの2つのスケールを導入したマルチスケール不連続変形解析という新たな解析技術を構築したもので、構造工学および計算力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。