



	くるまたに まお	
氏 名	車 谷 麻 緒	
授 与 学 位	博士 (工学)	
学位授与年月日	平成19年3月27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	非均質材料に対する多重被覆を用いた有限被覆法の開発と ひび割れ劣化問題への応用	
指 導 教 員	東北大学教授 岸野 佑次	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 岸野 佑次	東北大学教授 岩熊 哲夫
	東北大学助教授 寺田 賢二郎	東北大学助教授 久田 真

論 文 内 容 要 旨

本論文は、解析メッシュに制約されない非均質脆性材料の数値モデル生成とそのひび割れ進展解析が可能な解析手法を開発し、これをベースに異なる空間スケールの非均質性や多重複合物理現象をモデル化することによって、非均質材料や構造物のひび割れ劣化問題に応用するものである。

ひび割れ進展を伴う非均質材料・構造の劣化過程を再現するには、具体的かつ適切なひび割れ進展挙動に加えて、劣化に起因するミクロ（ローカル）と使用環境が規定されるマクロ（グローバル）の連成をモデル化する必要がある。本論文では、一般化有限要素法の一つである有限被覆法（FCM）をベースに、ひび割れ進展挙動がメッシュに制約されない解析手法を構築し、その精度保証を与えるとともに、-1 に示されるような全体構造物における局所的な領域でのみ劣化が生じる「構造的な劣化」と -2 に示されるような微細な劣化が分布して進行する「材料的な劣化」を対象に、異なる空間スケールの連成を考慮した数値シミュレーション手法を開発した。

本論文は全6章で構成されており、第1章では、近年の土木工学あるいは土木構造物にとって重要視されているコンクリートのひび割れ挙動を伴う経年的な環境劣化現象に焦点を当て、塩害のような「構造的な劣化」やアルカリ骨材反応のような「材料的な劣化」を定義し、それぞれの非均質性を含む空間スケールの大きさに即したモデル化や解析手法の必要性を論じた。そして、非均質脆性材料のひび割れ進展挙動に対する数値解析技術やコンクリートの劣化予測法、材料・構造のマルチスケール解析法に関する現状や既往の研究についてまとめた。ここでの背景を踏まえて、まずコンクリートの劣化過程におけるひび割れ形成の重要性に着目し、メッシュに制約されずに非均質脆性材料のひび割れ進展挙動を追跡可能な解析手法の開発とその精度検証、これをベースに種々の環境的劣化現象に対応する非均質性や物理現象のモデル化、そして劣化過程の予測やメカニズムの解明に貢献しうるマルチスケール（グローバル・ローカル）解析手法の構築など、本研究の方向性や位置づけを示した。

第2章では、コンクリートに代表される非均質脆性材料の界面剥離やひび割れの進展挙動を再現するための不連続面進展解析手法に加えて、そのための数値モデルの生成やひび割れ進展に伴う境界の

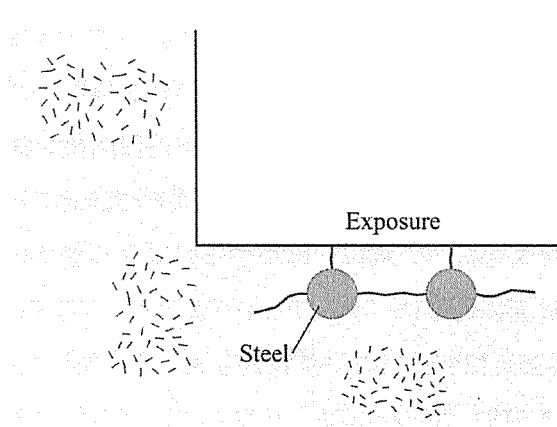


図-1 塩害のような「構造的な劣化」

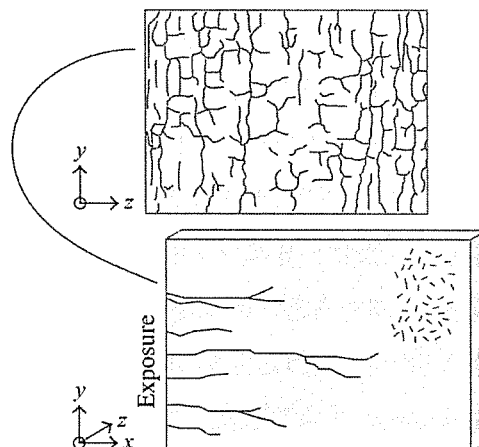


図-2 アルカリ骨材反応のような「材料的な劣化」

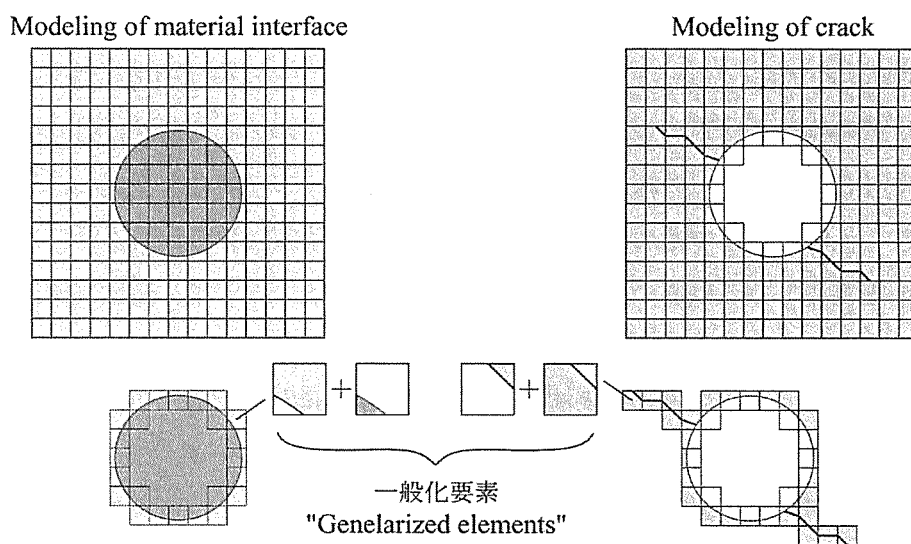


図-3 FCMと定型メッシュによる解析手法と一般化要素

捕捉に対するモデリング手法を開発した。まず、複雑な幾何性状を有する非均質材料の数値モデル生成およびメッシュに依存しない空間近似と任意のひび割れ形成に着目し、両者に対して優位な図-3に示されるような定型メッシュとFCMによる解析手法を基礎とした。そして、定型メッシュのみを用いて複合材料の界面を近似するための界面接合手法や破壊進行過程の力学応答を表現するCohesive crackモデルを導入し、不連続面の発生・進展解析のための解析アルゴリズムを提示した。さらに、定型メッシュとレベルセットを用いて、多相複合材料の数値モデル生成やひび割れ進展に伴う境界捕捉を容易に可能とするFCMのための多重モデリング手法を構築した。また最後に、数値解析例を通して、これら一連の非均質脆性材料の解析のためのFCMの妥当性を検証し、材料界面での剥離進展と材料内部でのひび割れ進展に対して、定型メッシュのみを用いてメッシュフリー的な解析が行えることを例示し、解析手法としての有効性を示した。

第3章では、本研究で提示する定型メッシュとFCMによる解析手法の近似特性や解析精度を重点

的に検討した。まず、非均質材料の解析あるいはその不連続面進展解析において、必ず配置されることになる要素内に部分的に物理領域を有する「一般化要素」の変形性能や近似特性を検討した。そして、定型メッシュを用いた FCM では、任意の物理領域に対して常に定型要素で近似関数を構成するが、一般化要素単体の変形性能や近似特性は、標準的な有限要素と同等あるいはそれ以上であることを検証した。次に、定型メッシュを用いた FCM を複合材料の解析に適用する際に生じる「一般化要素界面」（界面を含む一般化要素）に照準を定め、界面の近似にペナルティ法・ALM による Lagrange 未定乗数法・不連続 Galerkin 法を適用する際の界面近似特性について検討した。その結果、ALM による Lagrange 未定乗数法では、ペナルティ法や不連続 Galerkin 法と比較して、反復的な解法により解析結果に対する係数依存を回避でき、異種材料界面を含む種々の界面に対して高精度な近似が行えることを示した。

第 4 章では、「構造的な劣化」の代表例である RC 建造物の塩害劣化を対象に、提案手法によれば鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動をシミュレート可能であることを例証した。また同時に、より実的な応用を意図して、異なる空間スケールの非均質性に対して個別に生成した異なる解像度の FCM メッシュを結合するグローバル・ローカル解析法を提案し、その適用例を示した。まず、既往の供試体実験で確かめられている鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートひび割れモードに着目し、これを再現しうる鉄筋の腐食膨張モデルを検討した。そして、変位制御法よりも荷重制御法の方が、コンクリートひび割れモードの再現に適していることを確認した上で、本解析手法を用いてかぶりを変化させたケーススタディを実施し、塩害劣化の進行を評価・予測する上で極めて重要なかぶりの相違によるコンクリートひび割れモードの変化をシミュレートすることに成功した。次に、RC 建造物における実的な塩害劣化を模擬した数値シミュレーションを実施し、鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動について考察した。ここでは、実的な塩害劣化が RC 建造物の局所的な部分領域で発生することを加味し、大領域中における局所的な非均質構造のひび割れ進展解析を行うために、階層型解析法と FCM を応用したグローバル・ローカル FCM を開発した。そして、いくつかの検証例を用いてこの手法の解析精度を確認した後、実的な RC 建造物における鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動を解析した。その結果、供試体実験や供試体レベルの数値シミュレーションとは異なるコンクリートのひび割れ進展挙動となる可能性を示し、塩害劣化を予測する際は、建造物の使用環境を考慮した数値解析が必要であることを指摘した。

第 5 章では、コンクリートのアルカリ骨材反応・乾燥収縮・熱膨張ひび割れなどにおける材料の膨張・収縮に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動を対象に、「材料的な劣化」に対する本解析手法の適用例を示した。まず、このような材料劣化を再現するためには、損傷が発生する「ミクロ」と劣化を評価する「マクロ」といった異なる空間スケール間での物理現象の連成問題に加えて、温度・物質・イオンの拡散作用とこれに伴う固体の膨張・収縮作用といった異なる物理現象間の連成問題をモデル化する必要があると考え、熱拡散問題を例にとって均質化法に基づく拡散と変形の弱連成マルチスケ

ール・マルチフィジックス解析手法を開発した。さらに、コンクリートが元来有する多孔質性やひび割れ損傷により、ミクロスケールの孔表面からの内部伝達が発生し、マクロな拡散作用が促進されるという現象を考慮した新規の熱拡散問題の均質化法を定式化した。次に、熱拡散問題を対象に、本研究で新たに提示した多孔質体ミクロスケールの内部伝達を考慮した均質化法に基づくマルチスケール熱拡散解析の解析精度を検討した。そして、本解析手法によれば、ミクロスケールの多孔質性に起因する内部伝達を考慮することができ、物理的にも妥当な解を与えることを確認した。さらに、拡散による膨張・収縮、およびこれに起因するミクロスケールでのひび割れ進展を考慮した簡単なマルチスケール・マルチフィジックス問題の数値実験を行い、弱連成かつ非線形解析において懸念要素の一つである数値解析に対する計算時間や解析ステップ数の影響が小さいことを確認した。そして最後に、開発した手法を用いて、使用環境を考慮した経年的な材料劣化に対する数値シミュレーションを実施し、本研究で提示したマルチスケール・マルチフィジックス解析手法により、損傷が進むにつれてひび割れ表面から物質移動が促進され濃度分布が高くなる現象やミクロスケールでの構造的な損傷を反映した平均的な材料劣化などが評価可能であり、さらには劣化の状況やメカニズムを調べる上で重要なミクロ・マクロの両スケールの挙動を可視化できることを例示した。

第6章では、本研究および本論文で得られた成果や結論の総括を行うとともに、今後の課題や展望について述べた。

本研究では、まずコンクリートの劣化過程におけるひび割れ形成の重要性に着目し、FCMと空間近似に優位な定型メッシュによる非均質材料の数値モデル生成法とメッシュ制約の少ないひび割れ進展解析手法を開発した。さらに、その解析精度を検証するとともに、「構造的な劣化」や「材料的な劣化」において着目すべき非均質性や異なる空間スケールの連成・物理現象の連成に対応した手法の拡張を行った。そして、実際的な使用環境を考慮した構造物のひび割れ進展を伴う劣化過程を数値的にシミュレートすることに成功し、土木工学における数値解析技術の向上に貢献することができた。

論文審査結果の要旨

社会基盤構造物に関しては、その機能を備えるために必要とされる性能を規定するだけでなく、供用期間中その性能を確保することが求められるようになり、構造物のライフサイクルにおける劣化予測を行うことが喫緊の課題となっている。本論文は、様々なレベルの力学的劣化要因や劣化進行を考慮することのできる精度の高い非均質材料の解析法を確立することを目的とし、メッシュ制約なしに、異なる空間スケールの非均質材料におけるひび割れ進展解析を可能とする手法の開発とその応用を示したものであり、全編6章から成る。

第1章は緒論である。

第2章では、空間近似に優位な定型メッシュと有限被覆法 (FCM) によるメッシュ制約の少ないひび割れ進展解析手法とその数値モデル生成法を提示している。この手法は構造物の劣化過程におけるひび割れ形成の解析手法として合理的な手法であると認められる。

第3章では、開発した手法の精度の保証について、物理境界や材料界面付近において用いられる特殊な要素に関する検討など、多岐にわたる FCM の近似性能や解析精度を検討している。本論文において開発した手法は信頼性の高いものであると認められる。

第4章では、開発した手法の「構造的劣化」への応用として、全体構造と同時に局所構造のひび割れ進展解析が可能なグローバル・ローカル FCM への展開を行い、塩害に起因する鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れモードを再現している。この解析結果は、使用環境を考慮したマルチスケールの評価の重要性を示唆するものとなっている。

第5章では、開発した手法の「材料的劣化」への応用として、多孔質性を考慮した拡散解析手法への展開を行い、FCM ひび割れ進展解析との組み合わせによるマルチスケール・マルチフィジックス解析手法を提示し、経年的な材料劣化問題への応用例を示している。開発した手法は、異なる物理現象の相互作用に起因するマイクロ・マクロの両スケールでの劣化の進行をシミュレートできることを実証しており、有用性が認められる。

第6章は結論である。

以上、本論文は、非均質材料・構造物のひび割れ劣化問題に対する新たな解析手法の開発、特に、マルチスケール・マルチフィジックス解析への展開を行い、これらの精度検証や適用事例を通して開発した手法の有用性を示したものであり、その研究成果は、計算力学および土木工学に大きく貢献するものと考えられる。

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。