

氏名	いし い た て き 石 井 建 樹
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成17年3月25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	不連続面の閉合を考慮した非均質脆性材料の破壊進展解析
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 東北大学教授 風間 基樹 東北大学助教授 京谷 孝史

## 論文内容要旨

土木工学が対象とする材料の多くは、内部に微視構造を有する非均質な複合材料であり、その力学挙動は複雑に構造化された内部構造に支配される。特に、岩盤やコンクリートなどの材料は、主として圧縮に対して抵抗する材料として扱われ、その変形強度特性は構成材料内部における不連続面の発生・進展、異種材料界面での剥離、およびそれら不連続面の接触・摩擦すべりなどの閉合挙動が絡み合った結果として現れる。したがって、非均質準脆性材料の強度特性評価の成否は、こうした変形破壊挙動まで含む内部構造の力学挙動をいかに合理的に取り扱うかにかかっている。

強度特性評価に際し、要素試験を通して十分な材料特性・力学特性の把握が可能ならば、それらの知見に基づき強度特性を評価することが可能であるが、実験的な方法だけでは限られた情報しか得ることができないのが現状である。特に、岩盤では、節理や礫等のように試験可能な寸法と比べてはるかに大きな内部構造が存在し、それらを十分に含んだ供試体の作成および試験を実施すること自体が困難である。そのため、岩盤やコンクリート材料などの強度特性評価を意図して、材料内部で生じる不連続面発生・進展に伴う構造変化を的確に反映した数値解析法の開発が重要な課題として残されている。本論文ではこの課題を克服すべく、不連続面の発生・進展に伴う構造変化および不連続面の接触・摩擦すべり挙動を考慮した新規の破壊進展解析手法を開発した。

本論文において開発した解析法は、不連続面の先端特性を記述する粘着クラックモデル(Cohesive crack モデル)ならびに異種材料界面の固着・剥離を表現する界面要素を、一般化有限要素法の一つである有限被覆法に導入することで、要素形状に依存せずに任意の不連続面発生・進展を追跡するものである。そして、それらの不連続面において接触摩擦解析を組み込むことにより、材料内部における不連続面形成および不連続面の摩擦すべりが絡み合う一般的な破壊進展挙動の解析が可能となる。本論文は、このような不連続面での閉合・摩擦すべり挙動までを加味した破壊進展解析法を構築し、既存不連続面を有する供試体に対する一軸圧縮試験をはじめ種々の数値シミュレーションを実施して、破壊進展解析法としての優位性、有用性を検証したものである。

第1章では、不連続面発生・進展と不連続面の摩擦すべりが絡み合うような、岩盤やコンクリートなど非均質準脆性材料における一般的な変形破壊挙動に焦点をあて、破壊進展問題に関する数値解析法の現状についてまとめた。この結果として、不連続面進展解析と接触摩擦解析との融合を試みた本研究の

方向性と位置づけを明らかにした。

第2章では、異種材料界面の剥離および構成材料内部での不連続面の発生・開口進展を一貫して追跡する不連続面発生・進展解析手法を開発し、その解析アルゴリズムを提示した。この手法は、破壊進行過程にある不連続面の力学応答を記述する粘着クラックモデルと異種材料界面での剥離・進展を表現する界面要素を、一般化有限要素法の一つでありメッシュフリー的な性質を併せ持つ有限被覆法に導入したものである。

有限被覆法は、解析対象を分割して再構築するという点では有限要素法と同じであるが、物理量を関数近似する離散メッシュと解析対象である物理領域を独立して定義する点で有限要素法と大きく異なる。有限被覆法では、物理領域に独立な離散メッシュで、解析対象をその形状に囚われることなく任意に覆うことで境界値問題の離散近似を実現することができる。この有限被覆法のメッシュフリー的な性質により、新たに不連続面形成された場合でも、初期の要素形状（離散メッシュ）に依存せず任意に不連続面発生・進展を表現することが可能となる。粘着クラックモデルは、不連続面先端の破壊進行領域において連続体から不連続面形成に至る過程の挙動を、不連続面に作用する結合力-開口変位関係により表現するものである。また、異種材料界面の固着・剥離の過程は、Lagrange 未定乗数法と粘着クラックモデルを組み合わせた界面要素を導入することで表現することができる。

これら複数の手法を組み合わせた提案手法は、

- ・ 不連続面を要素形状に依存せずに表現でき、引張強度に注目した不連続面の形成と粘着クラックモデルの組み合わせにより構成材料内部での不連続面の発生・進展を表現できる
- ・ Lagrange 未定乗数法と粘着クラックモデルを組み合わせた界面要素により、異種材料界面の剥離・進展の過程を表現できる

といった性能を有しており、異種材料界面の剥離および構成材料内部での不連続面の発生・開口進展に対して力学的に整合性を有する一貫した取り扱いが可能である。

第3章では、第2章で開発した数値解析法の特徴を把握するために、曲げおよび引張荷重下における種々の境界値問題に対してシミュレーション解析を行っている。

まず、破壊進展解析において問題とされる数値解の要素寸法依存性を検討するために、要素寸法の異なる解析モデルを用いて引張試験および梁の4点せん断試験を行った。その結果、破壊進行領域を考慮する粘着クラックモデルの効果により、要素寸法依存性のない数値解を得られることを示した。

次に、寸法効果について検討を行った。寸法効果は、構造物の強度はその構造物の寸法が大きくなる程に低下する現象である。寸法の異なる供試体に対して引張試験を行った結果、図-1に示すように、Bazantの寸法効果則に沿うような傾向が得られ、寸法効果の再現性を例証することができた。

複数の材料から成る複合構造体の数値シミュレーションでは、異種材料界面の剥離と材料内部の不連続面発生・進展を一貫して表現できることを確かめた。ただし、

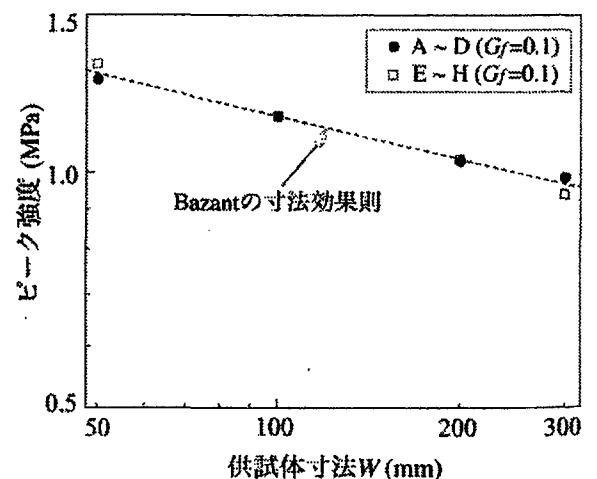


図-1 ピーク強度と供試体寸法の関係

介在物を有する非均質な構造体では引張荷重下であっても不連続面の開閉・接触を考慮する必要があることを確認した。

さらに、界面要素を用いた解析領域の分割に基づくグローバル・ローカル解析手法との併用により、提案手法が容易にグローバル・ローカル解析手法へ拡張できること示した。

第4章は、本研究の中核を為す章であり、第3章までに開発した数値解析法に不連続面での接触・摩擦すべり解析を加え、不連続面の閉合を考慮した新規の数値解析法へと拡張している。基本的な静的接触問題として知られる Signorini 問題に基づき接触摩擦問題を定式化し、破壊進展問題と組み合わせることで、不連続面の接触・摩擦すべりを考慮した破壊進展問題の支配方程式を示した。そして、この支配方程式に基づき、不連続面の閉合を考慮した有限被覆法破壊進展解析アルゴリズムを構築した。併せて、不連続面の開閉を考慮した粘着クラックモデルを導入している。ここで提案した解析法は、材料内部および材料界面での不連続面形成、ならびにそれら不連続面の接触・摩擦すべりが絡み合った複雑な変形破壊挙動の追従を実現し、一般的な変形破壊挙動の解析を行う上で有力な手法となり得ることを示した。

第5章では、本研究で開発した数値解析法を用いて一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行い、圧縮荷重下における不連続面の発生・進展を追跡する数値解析法としての性能について検証している。

まず、図-2に示すような既存不連続面を有する石膏供試体を用いた一軸圧縮試験とその数値シミュレーションを行い、それぞれの結果を比較検討した。その結果、本解析法によるシミュレーション解析は、石膏供試体の一軸圧縮試験において、開口不連続面にまつわる影響に起因するひび割れの発生・進展挙動を追跡する数値解析法として十分な性能を有していることが確認した(図-3)。

閉じた不連続面を有する供試体に対しても同様の一軸圧縮試験のシミュレーション解析を行い、不連続面での接触および摩擦すべり挙動が新たな不連続面の発生・進展挙動へ与える影響について検討を行った。その結果、

既存不連続面が接触してすべり現象が発生する場合には、圧縮荷重下であっても局所的に大きな引張力が生じ、ひび割れが大きく進展する要因と成り得ることを示した(図-4)。これにより、不連続面での接触挙動は、ひび割れ進展を抑制したり、逆にひび割れを増長する可能性があることを確かめられた。また不連続面で摩擦すべりが発生する場合、不連続面の経路・長さ・発生方向などが接触面の摩擦特性に

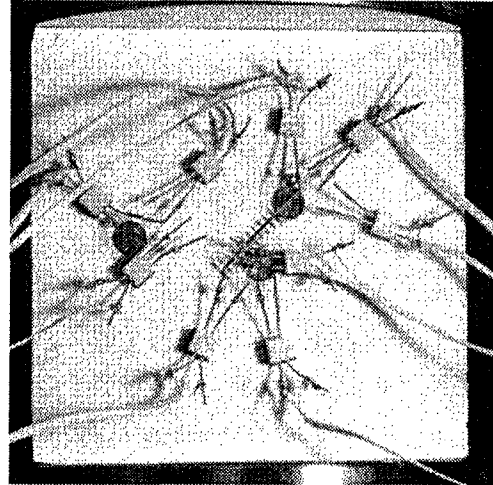
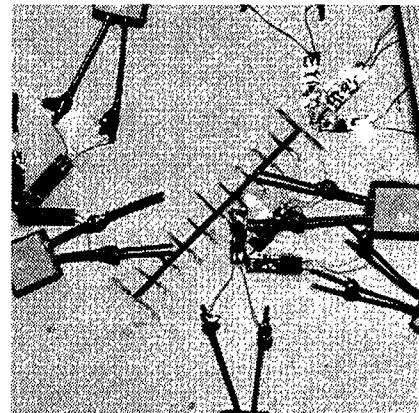
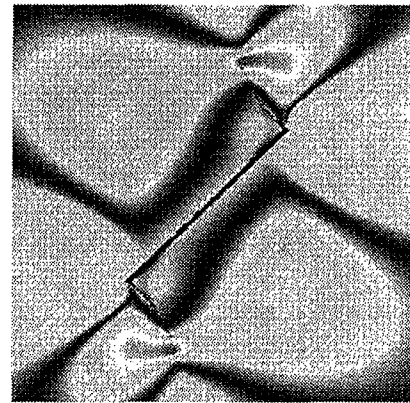


図-2 石膏供試体の一軸圧縮試験



(a) 実験結果



(b) シミュレーション解析結果

図-3 一軸圧縮試験結果(載荷変位0.33mm)

依存することを確かめ、圧縮荷重下での変形破壊挙動を評価する上では摩擦すべり挙動の評価が不可欠であることを明らかにした。

第6章は、結論を整理して示した。提案した数値解析法は、不連続面発生・進展解析および不連続面の接触摩擦解析を融合させた数値解析法であり、材料内部における一般的な変形破壊挙動の解析を行う上で有力な手法となり得るとの結論を述べた。また各章で得られた主たる結論と今後解決されるべき問題点や研究の発展性について総括した。

本論文で開発した数値解析法は、内部で発生する不連続面の発生・進展にともなう構造変化と、不連続面での接触・摩擦すべり挙動を共存させて解析し得る新規の数値解析法である。本解析法を用いることで、岩盤やコンクリートなどの非均質脆性材料に対して、従来よりも精緻なメカニズムに基づく検討および考察を行うことができ、その結果として効率よく正確な強度特性評価につながるものと考えられる。また本解析法は、均質化理論に基づくマルチスケールモデリングなどの数値解析法と組み合わせることにより、巨視的強度特性評価手法へと発展することが期待されると同時に、圧縮荷重下における不連続面の接触・摩擦すべり挙動までを含んだ不連続面発生・進展の複雑なメカニズムの解明に少なからず寄与するものと考えられる。さらに、不連続面発生と摩擦挙動が絡んだ地盤の地滑りや破損した構造物のメンテナンスなどの工学的問題に関して、新しい知見を与え得るものと考えている。

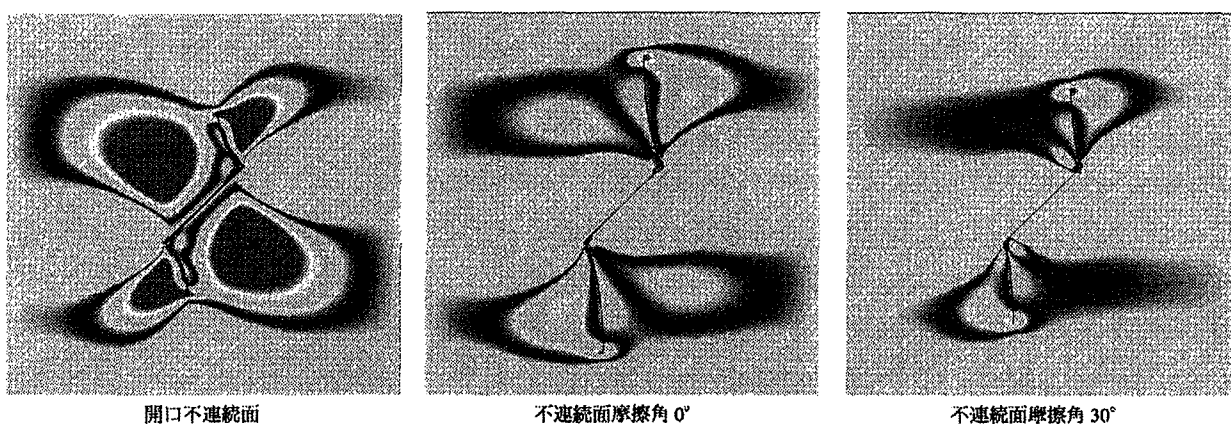


図-4 不連続面の摩擦特性とひび割れの発生・進展

# 論文審査結果の要旨

岩盤やコンクリートなどの準脆性材料は内部に非均質な微視構造を有し、その巨視的力学挙動は、不連続面の発生・進展、異種構成材料界面での剥離および不連続面の閉合・摩擦すべりなど、材料内部における微視的力学挙動の複雑な時空間分布の変化として現れる。したがって、このような材料について強度特性評価を合理的に行うためには、材料内部の微視構造に由来する力学特性を的確に反映した数値解析手法を開発する必要がある。本研究は、非均質準脆性材料を対象に、不連続面の発生・進展および不連続面の閉合・摩擦すべりなどの微視的非線形挙動を考慮した新たな破壊進展解析手法を開発し、材料内部の破壊進展特性について考察したものであり、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、異種構成材料界面の剥離および構成材料内部での不連続面の発生・開口進展に着目し、これらを一貫して追跡するための解析手法を提案している。ここで用いられている手法は、一般化有限要素法の一つである有限被覆法に異種材料界面の固着・剥離を表現するための界面要素および粘着クラックモデルを導入したものである。これにより、不連続面の発生・進展を有限要素形状に依存することなく解析を進めることが可能となり、界面剥離および材料内部での不連続面形成に関して力学的に整合性のある取り扱いを可能としている。

第3章では、前章で提案した手法の解析性能について検討を行っている。その結果、破壊進展数値解析で問題とされる有限要素寸法依存性のない数値解が得られること、材料要素強度に関する寸法効果が再現可能なこと、異種材料界面の剥離と材料内部の不連続面発生・進展が一貫して表現できること、グローバル・ローカル解析にも組み入れることが可能であることを示している。これらの検討結果より、ここで提案した手法がかなり有用であると判断される。

第4章では、前章までに開発した不連続面進展解析法に、不連続面における閉合・摩擦すべりを考慮した数値解析手法の提案を行っている。ここでは、Signorini 問題として捉えられる接触摩擦問題を破壊進展問題と組み合わせた支配方程式を誘導し、これに基づいて、不連続面の発生・開口進展および不連続面の閉合・摩擦を考慮した有限被覆解析手法を構築した。この手法は、材料内部における一般的な破壊進展挙動の解析を進める上で極めて有効であると認められる。

第5章では、本研究で開発した数値解析手法の有効性を示すため、既存不連続面を有する供試体に対する一軸圧縮試験の数値シミュレーションと実験を行っている。実験結果との比較を通して、本解析手法により内部不連続面の発生・進展パターンなどの挙動の予測を行うことができることが示されている。また、不連続面で摩擦すべりが発生する場合、不連続面の経路・長さ・発生方向などが接触面における摩擦すべり挙動に大きく依存することから、とくに圧縮荷重下において変形破壊挙動を把握するためには、本解析のように、摩擦すべり挙動を正しく評価することが重要であることを明らかにしている。これは本解析手法を用いることにより得ることができた重要な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、岩盤やコンクリートなどの非均質準脆性材料を対象に、不連続面の発生・進展に伴う構造変化および不連続面の閉合・摩擦すべりを考慮した新たな破壊進展解析手法を開発し、この手法が材料内の破壊進展特性を知る上で極めて有用であることを示したものであり、非均質材料の力学研究とその工学的応用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。