

氏名	こばや かわ ひろ あき 小 早 川 博 亮
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成21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	均質化理論を応用した岩盤の強度特性評価法の開発と岩盤構造物の維持管理への適用
指導教員	東北大学教授 京谷 孝史
論文審査委員	主査 東北大学教授 京谷 孝史 東北大学教授 風間 基樹 東北大学准教授 寺田 賢二郎

## 論文内容要旨

本研究は、不連続性岩盤を対象とした、均質化理論を応用したマルチスケールモデリングの枠組みを利用した岩盤の巨視的破壊規準の評価手法において、新たに不連続面のかみ合わせによる剛性の変化と内部構造の破壊の状態を考慮した方法を開発し、さらにこの強度評価法を岩盤構造物の安定性評価などに適用し、合理的な維持管理手法の提案を行ったものである。

不連続性岩盤の力学特性には、岩盤内に存在する不連続面が影響する。不連続面の影響程度は、対象とする構造のスケールによって異なることから、どのスケールでの力学特性を把握しなければならないかを意識することは重要である。このスケールの問題を考えたとき、従来から数多く実施されてきた原位置試験による評価方法では、岩盤の力学特性の代表性に関する明確な説明を与えることは必ずしも容易ではない。この課題に対し数値解析的は有効であり実用的な手法の開発が望まれている。均質化理論に基づくマルチスケールモデリングによる岩盤の力学特性評価手法は、岩盤の内部構造を十分に含んだスケールを対象とすることが可能で、さらにそこに含まれる不連続面の力学的な挙動を反映できることから、岩盤の代表性に関する明快な説明を与える。このような背景のもと、均質化理論を応用したマルチスケールモデリングの枠組みを利用した岩盤の巨視的破壊規準の評価法が開発されてきた。さらに、地盤材料としての強度評価が可能になったとしても、斜面などの岩盤構造物の維持管理においては、岩盤構造物としての強度の評価、つまり斜面の安定性の評価が重要である。そのために、材料強度の評価手法は安定解析に反映されることが必要である。安定性の評価は、安定解析の結果のみだけでなく、斜面の日常の点検や管理の記録の情報や、現地の変状などの調査結果、斜面に設置された計測の情報も踏まえて総合的に行う必要がある。これは、各々の地盤に関する情報を位置と属性を持つ空間情報として整理し、一元管理していくことで容易に実現し、この管理は結果的に斜面の維持管理の迅速化、効率化につながると期待される。

そこで、まずこれまでに開発されてきた均質化理論に基づく弾性モデルを用いた岩盤物性評価法(線形システム)を不連続性岩盤および不均質な岩盤に適用し、変形特性及び強度特性を評価した。その結果、変形特性に関しては、不連続性岩盤、不均質な岩盤ともに計算された弾性係数と実験から求められた弾性係数はよく一致し、本評価法によって変

形特性を評価できることがわかった。一方、強度特性に関しては、不連続性岩盤においては、不連続面を剛性の小さな開口亀裂としてモデル化した場合には、計算された強度は試験値よりも過小に評価されること、さらに不連続面である亀裂の垂直応力の増加に伴う剛性の増加をモデル化することによって強度を評価できる可能性があることが明らかになった。

不均質な岩盤(礫岩)に対しては、不均質さの程度である礫率が増加すると、計算される強度は実験値よりも小さく評価される傾向が認められた。強度が実験値よりも小さく評価される原因を調べるために、異種材料の境界面という一種の不連続

面を有する人工礫岩に対する載荷試験を行い、試験時の AE を計測した。その結果、構造全体の終局を示す荷重よりもはるかに小さい荷重で局所的な破壊が生じていることが明らかになった。以上のことから、不連続面を含む岩盤の強度評価に対する線形システムの適用に関して、(1)ユニットセルの内部においてマイクロ応力が岩石材料の強度を超える点が一つでも現れた場合を破壊として定義した場合には、過度に安全側の評価となっていること、(2)不連続面のかみ合わせによる剛性の変化を考慮しない場合には、強度を過小評価することがわかった、

これに対し、不連続面がかみ合うことによる剛性の増加を考慮するために、不連続面を含む領域を体積ひずみに応じて剛性が変化する非線形弾性体としてあつかう弱層モデルを提案した。モデルの構築にあたっては、亀裂の閉合挙動を表現するモデルが備えているべき条件を整理し、その条件を満たすものとして、亀裂を含んだ連続体の割線弾性係数を指数関数で表現する弱層モデルを提示するとともに、モデルのパラメータを実験に基づいて設定する方法を提示した。提示したモデルを用い、亀裂を含んだ材料の一軸圧縮試験の計算を行った結果、試験の応力ひずみ曲線と計算結果はよく一致し、亀裂を含む供試体の全体挙動を表現するのに有効であることを示した。さらに、弱層モデルを組み込んだ均質化理論に基づく岩盤の強度特性評価法を開発し、安山岩の原位置せん断試験結果と比較した。計算による破壊時のせん断応力と試験結果は良い一致を示し、弱層モデルを用いることで、亀裂性の岩盤の強度を評価できることを確認した(図1)。しかしながら、亀裂が複雑かつ多数分布する場合には、亀裂の集中する箇所の周辺で、過度に応力集中する箇所が生じるために、強度が過小評価される場合もあることがわかった。

そこで、さらに岩盤の限界ひずみに基づいて内部構造の強度を評価する方法を新たに考案し、弱層モデルを組み込んだマルチスケールモデリングによる岩盤の強度評価法へ導入した。破壊規準の算定においては、破壊時のひずみの算定式から、破壊時の偏差ひずみの第二不変量を導出した。これは、従来定式化されていた Mohr-Coulomb の破壊規準に基づく三軸圧縮状態下での破壊ひずみを、より一般的な形で表現する為に、Drucker-Prager の破壊規準に基づいてあらゆる三軸応力状態下に拡張したものであり、破壊時の偏差ひずみの第二不変量として導出したものである。岩盤の破壊規準は、岩石の限界ひずみと関係づけられた岩盤の破壊時ひずみに対応する応力を求め、その応力を岩盤の降伏状態

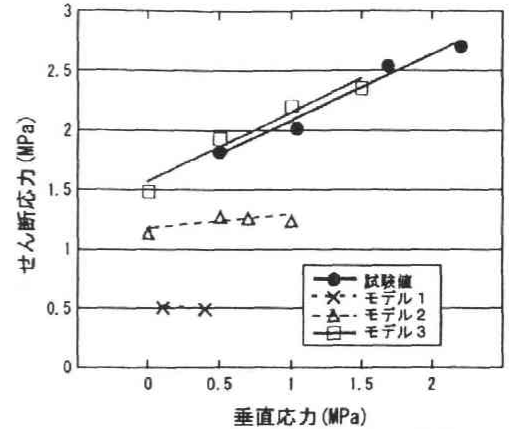


図1 原位置せん断試験による強度  
かみ合わせを考慮していないモデル1では垂直応力の増加に伴うにせん断応力の増加を表現できないが、かみ合わせを考慮したモデル3場合には表現できている

ととらえて評価した。限界ひずみを導入した評価法を健全な材料に適用した。計算結果は材料の強度よりもやや小さく評価されたものの、拘束圧の増加による強度の増加を表現可能であることがわかった。同様に、弱層モデルで扱った亀裂を一枚含む材料に適用した。計算の結果、亀裂の方向による強度の異方性を表現できることがわかった。さらに、実岩盤を対象とした解析を行った結果、限界ひずみを考慮した場合には、岩盤の巨視的破壊規準として適切なものが得られることがわかった。限界ひずみはそもそもばらつきをもった値であるので、実用的には、ばらつきの範囲内で岩盤のせん断試験結果を適切に表現するように限界ひずみを設定できることが重要である。実際の現場での適用を考慮し、既往の原位置せん断試験結果を基に、岩盤の巨視的破壊規準をキャリブレーションする方法を考案した(図2)。限界ひずみをばらつきの範囲内で変化させた場合の巨視的破壊規準によって得られる強度の分布範囲を把握した結果、限界ひずみを適切に設定することにより、岩盤の巨視的破壊規準において強度の拘束圧依存性を評価できることがわかった。この評価法は、岩盤構造物の維持管理において、岩盤の安定解析の際の地盤の力学特性評価の効率化につながるものと考えられる。

開発した岩盤の強度評価法を、既往の安定解析コードにおける岩盤の安全率評価に組み込み、岩盤構造物の安定性評価を可能とした。さらに、岩盤構造物の合理的な保守・管理に役立てるために、GIS(地理情報システム)を用いて岩盤構造物に関する情報を一元管理し、それらのデータを分析できる斜面維持管理支援システムを構築した(図3)。そのプロトタイプシステムを水力構造物に近接する斜面に適用し、システムを構成するツールの機能検証を行った。システムを構成する3つのツールをGISで利用可能にすることで、合理的に地盤情報を一元管理できることを示した。そして、安定性評価に用いる材料の強度を評価する方法として、均質化法による岩盤物性評価法を統合することにより、斜面の維持管理の合理化につながることを示した。以上を踏まえ、考案したシステムをGIS上で稼動するプロトタイプシステムとして開発した。DBは斜面の点検管理記録や地盤の調査結果などの地盤情報と、地表面変位や地中変位などの計測情報を収録した。また、計測情報に基づいて斜面の全体的な挙動を把握するために、GIS上で稼動する主成分

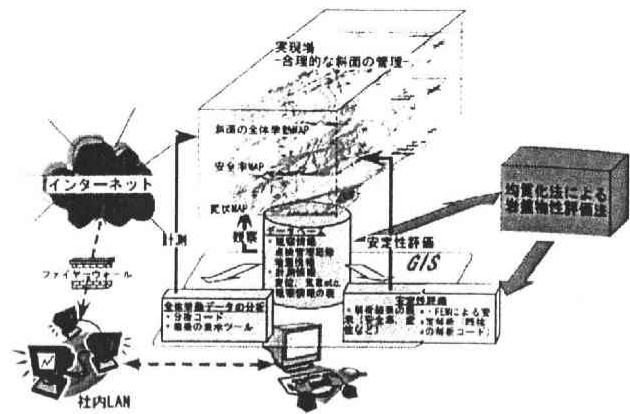


図3 GISを用いた斜面維持管理支援システムのシステムは、データベース、全体挙動データの分析ツール、安定性評価からなり、安定性評価における地盤の強度は、均質化法に基づく岩盤物性評価によって算定された強度を用いる。

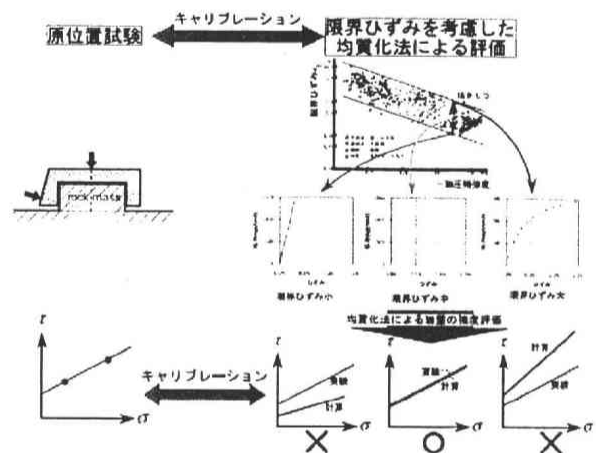


図2 数値解析と原位置試験のキャリブレーション限界ひずみを導入した均質化理論に基づく岩盤強度評価法を用いて、限界ひずみのばらつきの範囲で適切に設定することにより原位置試験結果とキャリブレーションする方法の概念図

分析法を用いた分析ツールを開発し、分析の結果を斜面の全体挙動マップとして表現できるようにした。さらに、均質化法による解析によって評価した物性を安定性評価に用いる材料の強度として用いて、斜面全体の安定性評価を行う方法を示した。そして、その結果を GIS にフィードバックし、安全率マップとして作成することのできるツールを開発した。これらのツールで、地盤情報の一元管理、分析、安定性評価を GIS で実行可能とした。開発したシステムを既往の水力構造物周辺の斜面に適用し、DB に収録された地盤情報による変状マップの作成機能、全体挙動データの分析ツールを用いた斜面の全体的な挙動の把握とマップの作成機能、均質化法による解析で斜面の安定性の評価可能機能などを検証した。この維持管理支援システムは結果的に斜面の維持管理の迅速化、効率化につながると期待される。

# 論文審査結果の要旨

人口減少および高齢化社会の到来と、戦後の高度経済成長期に整備された社会資本の更新の時期とが重なる我が国において、社会資本の延命化は最重要課題であり、岩盤構造物についても合理的な維持管理が必要とされている。本研究は、均質化理論を応用したマルチスケールモデリングの枠組みを不連続性岩盤に適用し、不連続面のかみ合わせによる剛性の変化と、内部構造の破壊を定義する限界ひずみに注目することによって、岩盤の巨視的破壊規準を精度よく評価する方法を開発し、さらにその強度評価法を岩盤構造物の安定性評価に応用した合理的な維持管理手法についての研究であり、全6章よりなる。

第1章は序論であり、研究の背景、岩盤構造物の維持管理に関する既往の方法および岩盤の強度評価に関する既往の研究を整理し、研究の目的を述べている。

第2章では、原位置試験や室内試験の評価を行い、既往の均質化理論に基づく岩盤物性評価法では、岩盤の基本要素であるユニットセルの破壊の定義方法および岩盤に分布する亀裂の変形特性の扱い方に課題があることを見出している。

第3章は、第2章で明らかになった課題に対し、亀裂のかみ合わせによる剛性の増加を考慮する非線形弾性弱層モデルを提案している。提案したモデルを均質化理論に基づく岩盤物性評価法に適用し、実岩盤の原位置せん断試験に適用した結果、亀裂性岩盤の強度評価において、拘束圧に依存した強度を評価できることを明らかにしている。

第4章では、ユニットセルの内部の破壊に対し、岩盤の限界ひずみに基づいて破壊を規定する方法を提案し、均質化理論に基づく岩盤物性評価法に導入している。提案手法を実岩盤の原位置せん断試験に適用した結果、限界ひずみを考慮することによって試験結果の説明性の高い強度を評価できる可能性があることを示している。さらに、実務への適用を考慮して、試験結果とのキャリブレーションによって破壊規準を評価する方法を提案している。

第5章では、岩盤構造物の合理的な保守・管理に役立てるために、GISを用いて水力構造物周辺斜面に関する情報を一元管理し、それらのデータを分析できる斜面維持管理支援システムを構築している。

第6章では、本研究の結論および今後の課題について述べている。

以上、本論文は、均質化理論を応用した岩盤の強度特性評価法を提案し、岩盤構造物の合理的な維持管理を可能とするGISを用いた維持管理システム構築したものである。本研究の成果は、岩盤構造物の合理的な維持管理に大きく寄与するもので、その工学的な意義は大きい。

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。