

大型の天然軟岩を用いた室内繰返し一面せん断試験法の開発及び非線形解析の適用性検証

日高, 功裕

<https://hdl.handle.net/2324/7396245>

出版情報 : Kyushu University, 2025, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 日高 功裕

論文名 : 大型の天然軟岩を用いた室内繰返し一面せん断試験法の開発及び非線形解析の適用性検証

区 分 : 甲

論文内容の要旨

不連続性岩盤には不連続面の含有率等によらつきがあるため強度特性や変形特性に寸法効果がある。不連続性岩盤では、大型試料のサンプリングが困難なため、強度特性を調べる場合、大型試験体を用いた原位置岩盤せん断試験が用いられる。一方、不連続面が少ない軟岩では寸法効果の影響が小さいことが知られており、力学特性はボーリングコアを用いた室内試験（コア試験）により調査される。しかし、寸法効果の影響が小さい軟岩の定義は必ずしも明確ではないことから、重要土木構造物を対象とした調査では、コア試験と原位置岩盤せん断試験が併用される場合も多い。原位置岩盤せん断試験においては、せん断荷重の増加に伴い垂直荷重も増加するため、低垂直応力下での試験が困難であり、低拘束圧時に強度が低下する岩盤の調査には不向きである。また、試掘坑で実施する原位置岩盤せん断試験では、試掘坑の掘削による応力開放等を考慮した初期応力や境界条件が明確ではないため、試験結果の解釈は必ずしも容易ではないなどの課題もある。加えて、複数の試験を行う場合、試験体同士が相互に影響を受けないように施工する必要があるため、広い試験エリアが必要であり、試験コスト増加の一因となっている。

日本の原子力発電所の基礎地盤および周辺斜面の安定性評価では、硬岩に対しては線形条件（但し、風化したD級岩盤や表土等は等価線形条件）が、軟岩では等価線形条件（等価線形解析におけるひずみの適用範囲は1%程度）が用いられる。しかし、近年、2011年東北地方太平洋沖地震の影響から、設計用地震動が大きくなる状況となっている。大きな地震動が岩盤に作用すると、岩盤内で局所的にせん断破壊や引張り破壊が発生し、岩盤の強度および変形特性に徐々に影響を与え、部分的な岩盤破壊の蓄積により徐々に破壊が進行する。上記の解析手法では、岩盤破壊による強度等の変化を逐次考慮できないため、岩盤内部に発生する応力は過大に評価され、合理的に評価ができない場合がある。そこで、より現実的に評価できる非線形解析手法の確立が求められる。しかし、岩盤の破壊を考慮できる非線形モデルの検証データが不足しているのが現状である。

そこで、本研究では、非線形解析における非線形モデルの検証用データを取得するため、現地でサンプリングした大型試料を用いた室内繰返し一面せん断試験法を開発することで、様々な条件から非線形解析の比較が可能な検証用データを取得した。続いて、そのデータを用いて、岩盤破壊後の規準せん断強度の低下を考慮した構成モデルを提案し、非線形解析の適用性を検証した。

第1章では、現行の試験法の課題、非線形解析への移行の課題、岩盤の破壊を考慮した非線形モデルの適用性検証に分類して整理した。また、本研究の目的を述べ、論文全体の構成を示した。

第2章では、原位置岩盤せん断試験の課題を解決するとともに、非線形解析の検証用データの取得を目的とし、現地でサンプリングした大型試料を用いた室内繰返し一面せん断試験法を開発した。同試料で実施した室内要素試験の結果と比較することにより、開発した試験法の適用性を検証した。

本試験では様々な計測機器の設置および試験条件を考慮することにより、様々な比較項目や多段階の非線形解析の検証用データを取得した。

第3章では、第2章で記した繰返し一面せん断試験結果に基づき、せん断ひずみ－せん断応力関係に対して双曲線モデルをより一般化した GHE モデル (General Hyperbolic Equation model) に加え、岩盤破壊後の規準せん断強度の低下を考慮した構成モデルを用いて準静的数値解析を実施した。その結果、ピーク強度までの小さなせん断変位レベルでは試験結果を概ね再現することができた。一方、岩盤破壊が進行する大きなせん断変位レベルにおいて、解析結果と試験結果の間に乖離が生じており、岩盤破壊後のせん断応力－せん断変位関係における応力履歴ループが、解析結果では実験結果よりも小さくなることを明らかにした。

第4章では、第3章の結果より確認された岩盤破壊後のせん断応力－せん断変位関係における応力履歴ループが実験結果に比べ、解析結果の方が小さくなったことに着目した。履歴ループの大きさが実験結果よりも小さくなる原因として、実験では岩盤供試体に破壊が生じた場合、不連続面が形成される。形成された不連続面ですべりが生じると、岩盤供試体の塑性化がより顕著となり、履歴ループにおいてエネルギー吸収されやすくなり、減衰定数が大きくなる傾向がみられると推測される。そこで、岩盤破壊後の不連続面を模擬した一面せん断試験を別途実施し、減衰定数の特性を確認し、岩盤破壊後の減衰特性の増幅が顕著であることを明らかにした。次に、既往の岩盤破壊後の強度特性を考慮した非線形モデルに、岩盤破壊後の減衰特性を新たに組み込んだ。その結果、岩盤破壊が進行する大きなせん断変位レベルにおけるせん断荷重－せん断変位関係についても、減衰定数の履歴ループの大きさに対する誤差が 10%程度改善したため、岩盤破壊後の減衰特性の有意性が確認できた。しかし、実験値と誤差が 85%程度のケースもあるため、大ひずみレベルの現象にも適応できる非線形モデル構築には改善が必要であることが示唆された。

最後に、第5章では、全体の研究成果を総括するとともに、今後の展望と課題について述べた。