

いしまる まこと
氏 名 石 丸 真
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 破壊進展を考慮した軟岩斜面の地震時すべり安定性評価
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 風間 基樹 東北大学教授 京谷 孝史
東北大学准教授 河井 正 東北大学准教授 山川 優樹

論文内容要約

近年, 大規模地震時における重要構造物周辺の岩盤斜面の安定性評価が求められている. 特に, 原子力発電所の重要施設においては, 地震によって施設の周辺斜面が崩壊し, 施設の安全機能に重大な影響を及ぼさないことの確認が要求されている.

従来, 岩盤斜面の地震時すべり安定性については, 等価線形化法による動的有限要素解析 (以下, 等価線形解析と記載) を行い, 瞬間的な力のつり合いからすべり安全率を求めて安定性を評価してきた. しかし, この評価手法は変形が生じる可能性の有無を判定するものであり, 地震後の残留変位量まで評価できる手法ではない. したがって, すべり安全率が1を下回ることと斜面が崩落することは必ずしも等価ではなく, 特に急激な崩壊が発生しない場合には過度に保守的な評価となることが推測される. また, 巨大な地震動に対しては, 発生するひずみレベルが等価線形解析の適用範囲を超過し, 実現象を適切に反映できない可能性も指摘されている. 一方で, リスク評価やアクシデントマネジメントの一環として斜面崩壊による施設影響を評価する場合, 不連続体解析等による崩落岩塊・土塊の転動挙動の評価が求められる. この場合は, 不連続体解析の前提条件として斜面の実際の崩壊範囲 (大きく変形する領域) を評価する必要があるが, 等価線形解析に基づくすべり安全率評価では, 上記に述べた理由から具体的な崩壊範囲を予測することは困難である.

以上の状況を踏まえ, 大規模地震やリスク評価に対しては, 斜面内部ですべりが生じる過程を表現できる時刻歴非線形法 (逐次積分非線形法) による動的解析 (以下, 時刻歴非線形解析と記載) の実用化が望まれている. そこで, 本研究では, 軟岩斜面を対象として, 地震後の残留変位量まで含めて斜面の安定性を評価するとともに, 大規模な変形・変位が発生する場合はその崩壊範囲を予測することを目的として検討を行った.

(1) 軟岩材料の破壊進展挙動

軟岩の破壊後のモデル化に資するため, 均質な人工軟岩と堆積軟岩を用いて三軸試験を行い, せん断破壊後の強度変形特性について検討を行った. その結果, ピーク後のひずみ軟化過程で繰返し载荷を行っても, 軸差応力-軸ひずみ関係の骨格曲線の形状は単調载荷のみの場合とあまり変わらないことがわかった (図-1).

次に, テフロンシートで模擬した不連続面を有する人工軟岩の平面ひずみ圧縮試験とその画像解析を行い, 不連続面を有する場合の強度変形特性や破壊進展挙動について分析を行った. その結果, 拘束圧が小さい範囲 (本

試験では拘束圧 0kPa, 30kPa) では、模擬不連続面が強度変形特性に及ぼす影響が大きく、人工軟岩の実質部分のせん断破壊と亀裂の進展が複合的に生じる破壊形態となることがわかった。一方、拘束圧が大きい範囲（本試験では拘束圧 100kPa）では、人工軟岩自体の力学特性が支配的となり、強度変形特性に及ぼす模擬不連続面の影響は小さく、破壊面の形成においても模擬不連続面の配置が決定的な因子とはならないことがわかった。

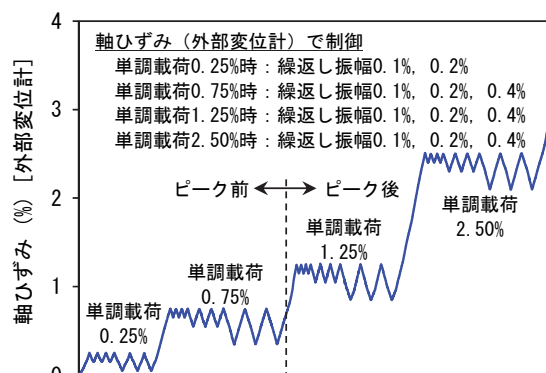
(2) 不連続面を有する軟岩斜面の地震時崩壊挙動

(1)の平面ひずみ圧縮試験と同一の人工軟岩と模擬不連続面を用いて斜面モデルを作製し（図-2）、50G 遠心力場において振動実験を行うことで、斜面のすべり崩壊時の破壊進展挙動について分析を行った。その結果、斜面モデルは斜面表層の模擬不連続面をつなぐ平面すべりで崩壊し（図-3）、法肩付近の引張り亀裂の発生が崩壊のきっかけであることを確認した。

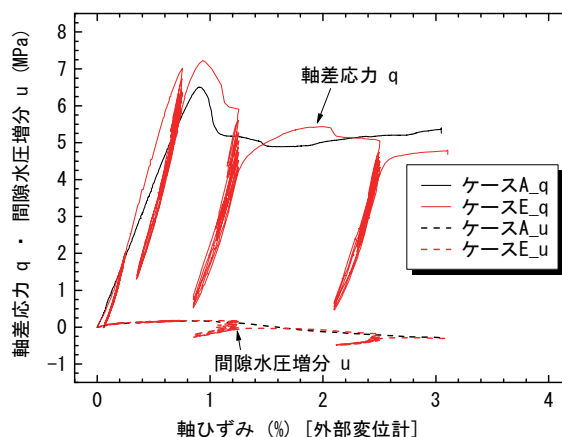
模型実験に対してすべり面法によりすべり安全率を算出したところ（図-4、表-1）、実験時に発生したすべり面の安全率が最小値とはならず、より深い位置に想定したすべり面の方が値が小さくなった。ただし、法肩付近の引張り亀裂の発生を考慮して当該部分のすべり面上の粘着力をゼロとした場合、実験結果との対応が向上したことから、崩壊範囲を予測するためには、全体的な崩壊に先立つ引張り亀裂の発生等の破壊の進行性を考慮することが重要であることがわかった。

(3) 破壊進展を考慮した軟岩斜面の崩壊範囲の評価

岩盤要素の破壊進展を考慮した時刻歴非線形解析を行うため、実務で使用することを重視した岩石の構成モデルとして、2次元平面ひずみ状態において、マルチスプリングモデルに基づいて導出された応力-ひずみ関係に、(1)で把握した破壊の影響を考慮した構成モデルを



(a) 繰返し載荷条件



(b) 試験結果 (拘束圧: 0.2MPa)

(ケース A: 単調載荷, ケース E: 単調+繰返し載荷)

図-1 三軸試験結果 (堆積軟岩)

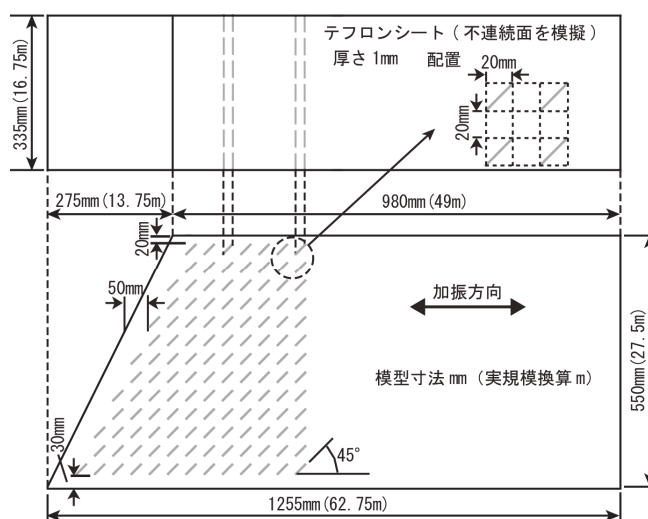


図-2 不連続面を有する斜面模型

開発した。(2)の動的遠心力模型実験を対象として解析手法の検証を行ったところ、破壊進展を考慮することにより、模型実験における斜面表層を通る浅いすべり面の発生が再現できることがわかった(図-5)。また、ピーク強度から残留強度に至るひずみ軟化の勾配が、崩壊範囲にも影響を及ぼすことを確認した。一方、動的遠心力模型実験を対象とした等価線形解析に基づくすべり安全率評価では、実験時に発生したすべり面よりも深い位置のすべり面の方が安全率が小さく、実験結果と対応しない結果となった。これは法肩付近の岩盤要素の破壊が再現できていないためであり、破壊進展を考慮した解析手法の優位性が示された。

(4) 破壊進展を考慮した軟岩斜面の地震時残留変位量の評価

延性的な破壊進展を示す軟岩斜面の地震時残留変位量の評価を主目的として、動的遠心力模型実験(図-6, 図-7)と、それに対するすべり安全率評価および時刻歴非線形解析を行った。まず、すべり安全率評価については、実験において有意な残留変位が発生した加振ステップ(d06)ですべり安全率が1を下回る結果となったことから、崩壊のきっかけを判定する手法としてのすべり安全率評価の妥当性を確認した。一方、動的遠心力模型実験を対象とした時刻歴非線形解析では、せん断破壊後のひずみ軟化過程における強度変形特性を適切に考慮することで、残留変位が発生し始める加振ステップが実験と整合する結果が得られた(図-8)。なお、時刻歴非線形解析の残留変位量は実験結果に比べて若干大きく保守的な評価となったが(図-9)、残留変位量をより定量的に評価するためには、破壊後の強度および剛性の異方性を考慮することが重要であることを確認した。

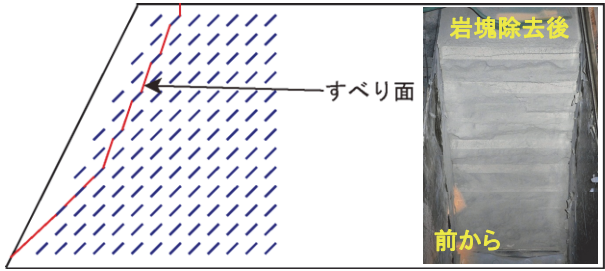
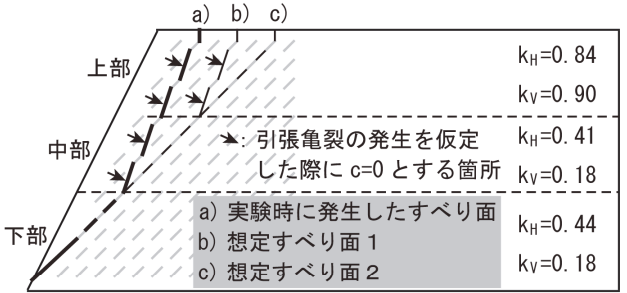


図-3 不連続面を有する斜面模型のすべり面形状



すべり安全率 F の算出式

$$F = \frac{\sum [c \cdot \ell + (W \cdot \cos \alpha - k_H \cdot W \cdot \sin \alpha + k_V \cdot W \cdot \cos \alpha) \tan \phi]}{\sum (W \cdot \sin \alpha + k_H \cdot W \cdot \cos \alpha + k_V \cdot W \cdot \sin \alpha)}$$

ここに、 W : すべりブロックの重量 c : すべり面の粘着力
 ℓ : すべり面の長さ ϕ : すべり面の摩擦角
 α : すべり面の角度 k_H : 水平震度
 k_V : 鉛直震度

図-4 すべり面法によるすべり安全率の算出条件

表-1 すべり面法によるすべり安全率

すべり面	常時	地震時
		鉛直震度：下向き
a) 実験時に発生したすべり面	2.26	1.09
a-1) 地震時に模型上部で引張り亀裂を仮定	—	0.82
a-2) 地震時に模型上・中部で引張り亀裂を仮定	—	0.55
b) 想定すべり面 1	1.77	0.80
b-1) 地震時に模型上部で引張り亀裂を仮定	—	0.62
c) 想定すべり面 2	1.64	0.72

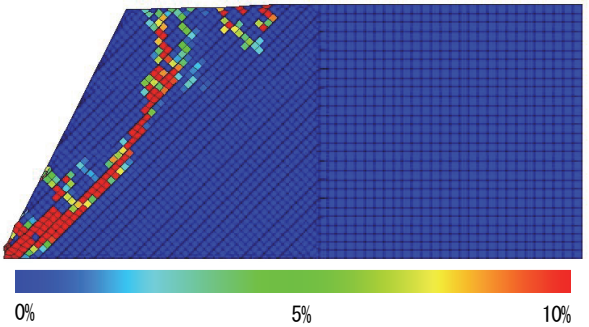


図-5 時刻歴非線形解析結果(最大せん断ひずみ分布)

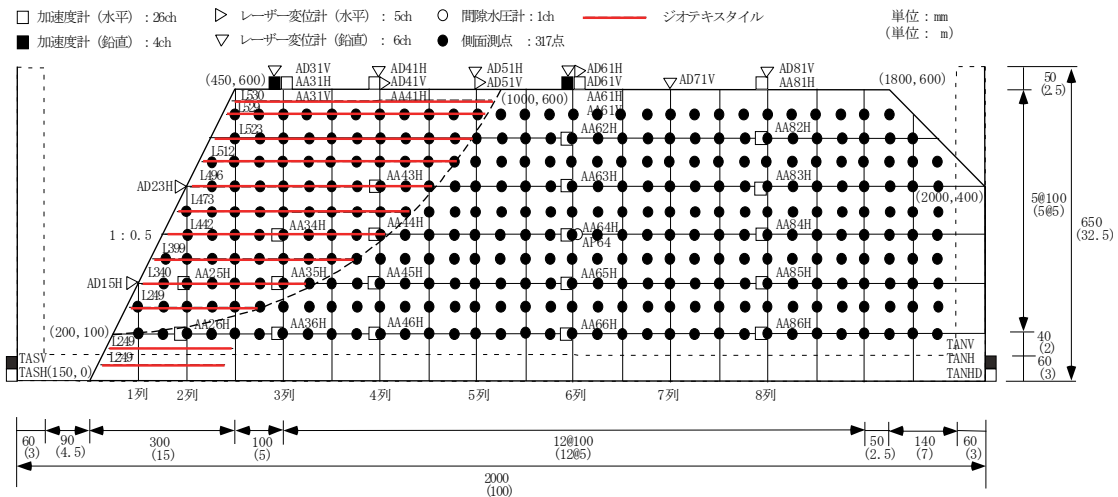


図-6 延性的な崩壊挙動を示す軟岩斜面の模型形状と計測器配置 (単位 mm, 括弧内は実規模換算値で単位 m)

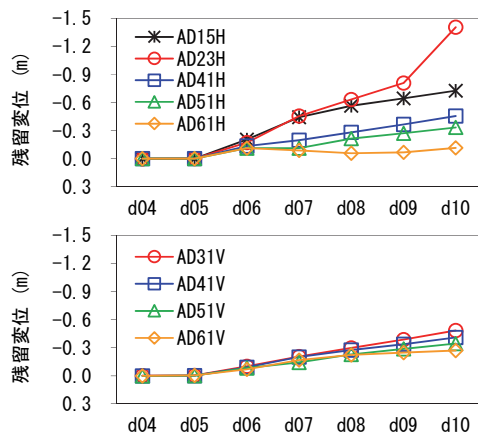
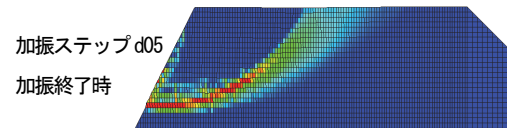


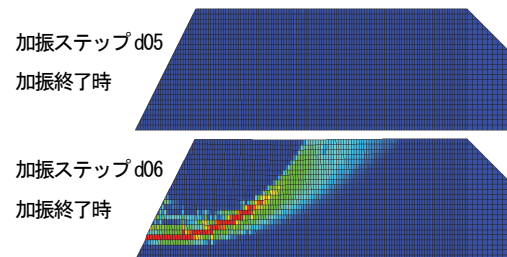
図-7 加振ステップと斜面模型の残留変位 (実験)

(5) 実務への展開

本研究で開発した時刻歴非線形解析では、等価線形解析に基づくすべり安全率評価に比べて、軟岩斜面の具体的な崩壊範囲の予測が可能である。したがって、設計地震動を超える地震動に対するリスク評価やアクシデントマネジメントの一環として、斜面崩壊による施設影響を評価する場合、崩壊土量を適切に設定することが可能となる。また、延性的な崩壊挙動を示す軟岩斜面に対しては、地震時残留変位量の評価への貢献が期待できる。



(a) ひずみ軟化を考慮しない場合



(b) ひずみ軟化を考慮した場合

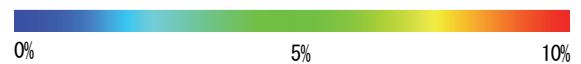


図-8 ひずみ軟化有無の比較 (最大せん断ひずみ分布)

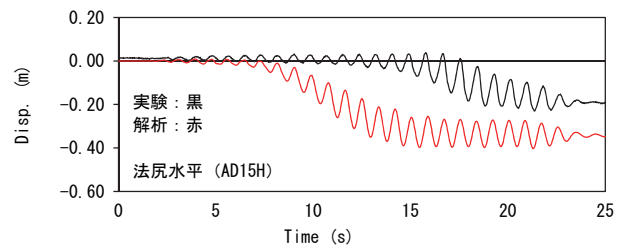


図-9 時刻歴非線形解析の変位応答 (加振ステップ d06)