

京都大学	博士 (工学)	氏名	袁 楷軒 (YUAN KAI XUAN)
論文題目	Mechanism investigation on weathered mudstone slope deformation under excavation process with geological complexity and folded structure (複雑な地質と褶曲構造を有する風化泥岩の斜面掘削過程における変形メカニズムの解明)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、膨潤性を示すスメクタイトを含有する風化泥岩で構成される斜面において、掘削過程で受けた強い降雨により 1 m 以上の大変形が生じた事象について、地質学的な複雑性を考慮した斜面の安定性評価を数値解析により実施し、その結果をまとめたものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文で取り扱う課題を紹介し本論文の目的を述べている。斜面崩壊のメカニズムは非常に複雑であり、様々な要因が複雑に絡み合っている。本論文では、掘削時の降雨により斜面崩壊が発生した斜面を対象とし、地質構造、地下水、地盤材料の特殊な挙動(膨潤挙動)に着目して大変形斜面崩壊のメカニズムの解明を行う事を述べている。本論文では、掘削に伴う大変位を考慮した斜面の変形挙動を検討するため、陽解法有限差分プログラムを採用している。また、風化泥岩の飽和・不飽和状態や降雨の浸透が斜面の変形挙動を支配する重要な因子であることから、地下水条件の影響を評価するために流体-力学連成解析を実施している。クリープや膨潤のような特殊な現象は、弾塑性応力-ひずみ関係とは無関係に、さらなる体積変化とそれに伴う軟化挙動を発生させる可能性がある。本論文では、このような膨潤に伴う体積変化の影響を、新たに構成モデルを定義することにより数値解析に反映させることを試みている。</p> <p>第2章は本論文で対象とする斜面の地質状況、実際の大変形挙動および斜面安定に関する既往の研究を述べ、本論文の構成を示している。まず、対象地点の地質構造であるが、当初、緩傾斜を有する水平堆積構造と想定して斜面掘削が実施されてきた。斜面掘削の過程において、斜面が緩やかに大きく変状する挙動が現れ、対策を実施するため Ohishi and Terakawa(2019)では、ボーリング調査、コアサンプル CT による調査分析、X線回折による成分分析が実施されている。これらの結果を元に、まず、地質構造が一部大きく褶曲していること、CT 分析では一部泥岩層は大きく風化し破砕されていることが確認されている。また、X線回折では、スメクタイトが多く存在することも確認している。実際に、対象斜面では、滑りだけでなく褶曲構造の影響と考えられるトップリングのような変形モードと時間遅れを伴う非常に緩やかな変形が確認されている。そこで本論文では、対象斜面の崩壊メカニズムを議論するにおいて、これらの結果を基に地質構造を考慮すること、地下水の影響を考慮すること、さらに地下水の浸透と応力の開放に伴う膨潤性挙動のモデル化とそれを援用した数値解析の実施の必要性を示し、本論文の構成を説明している。</p> <p>第3章は本論文で用いた解析手法について説明を行っている。本論文では、まず、地質調査や CT 分析結果を基に、凝灰角礫岩と比較的良質の泥岩は弾性体、表層堆積物および掘削土はモール・クーロンの破壊規準に基づく弾完全塑性体、過圧密粘土のような挙動を示す風化泥岩は限界状態モデル(修正カムクレイモデル)でモデル化を行っている。解析には、有限差分コードの一つである FLAC2D を用いている。まず、解析モデルと入力物性値の妥当性を確認するため、実際に行われた圧密非排水三軸試験の結果をシミュレートしている。数値解析の結果は、実験結果と一致しており、本論文で設定し</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	袁 楷軒 (YUAN KAI XUAN)
<p>た解析モデルや入力物性値が妥当であることを確認している。また、実地盤では斜面の崩壊挙動を抑止するための杭構造が挿入されており、杭のモデル化と杭と地盤のインターアクションのモデル化を行っている。さらに、膨潤挙動に関しては、修正カムクレイモデルの降伏関数に、膨潤線の更新に伴う参照応力 p_r に対する比体積の関数として示し、それにより更新される正規圧密応力 p_c を導入している。これより、正規圧密応力 p_c の低下に伴い、降伏曲面は収縮し、結果として膨潤に伴う軟化挙動を表現できるとしている。</p> <p>第4章は全応力解析の結果を示している。ここでは、褶曲した地質構造とその褶曲を生じさせる異方性応力状態が斜面の変形挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、全応力掘削解析を実施している。まず、褶曲構造を有するケースでは、褶曲底部に圧縮応力集中が確認されている。当初想定された緩傾斜の水平堆積構造と比べて、大きな変位が発生することも確認している。また、水平方向の地殻応力が卓越するケースでは、等方応力状態に比べて斜面の変形挙動が大きく変化し、風化しやすい泥岩層に沿ってせん断滑り現象が誘発されていることを確認している。これは、実際の斜面で発生した崩壊挙動と類似しており、斜面中腹に挿入された抑止杭が機能しなかった実地盤の挙動を説明している。一方で、実地盤で計測された変位量よりも解析結果は小さい値を示している。</p> <p>第5章は土-水連成解析の結果を示している。ここでは、飽和地盤の挙動を検討するための単相流モデルと雨水の浸透を考慮できる気液二相流モデルという2種類の土-水連成解析を実施し、斜面の崩壊挙動に対する地下水影響の検討を行っている。単相流モデルによる土-水連成解析では、褶曲層と段丘堆積物の境界、褶曲の変曲部にせん断ひずみが集中することを確認している。岩種の物性の境界部にせん断ひずみが集中することを示唆している。一方、雨水浸透の影響を考慮した気液二相流モデルによる土-水連成解析でも、同様の傾向を確認している。さらに、抑止杭の変形が大きくなっていることが確認されており、杭に作用する水平応力が杭の降伏を引き起こすのに十分な値であったことが示されている。地下水の影響は斜面の崩壊に大きく寄与していることが検証されたが、土-水連成解析でも実際に計測された変形よりまだ小さい変位を示している。</p> <p>第6章は膨潤特性を修正カムクレイモデルに援用したモデルの提案とそれを用いた解析の結果を示している。X線回折やCT撮影から、一部の泥岩は膨潤挙動を呈する可能性が示唆されており、限界状態モデルの一つの修正カムクレイモデルの降伏関数に逐次更新される正規圧密応力 p_c を導入するモデルを援用して数値解析を実施している。このモデルの導入により、泥岩の力学特性の劣化が検証されている。すなわち、降伏曲面が解析過程で収縮し、体積ひずみが増加する。体積ひずみの増加に伴い、間隙に地下水が浸潤し、さらなる変形挙動が生じることになる。結果として、せん断ひずみが集中する明瞭なすべり面が観察された。</p> <p>第7章は本論文の結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、長大斜面において発生した時間依存性を有する崩壊のメカニズムについて、地質構造と地殻応力の影響、雨水の地場への浸透に伴う斜面の不安定化、地下水の浸透による地盤材料の膨潤、についてそれぞれの影響を数値解析により検討を行ったもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 対象斜面において崩壊時に実施された地盤調査結果に基づき、従前想定されていた流れ盤の緩傾斜を有する堆積構造に褶曲構造が貫入していることが想定されている。本論文では、褶曲構造とそれを生成する地殻応力場を想定して数値解析を実施した。その結果、実際の斜面で発生した崩壊モードと一致した結果を得ており、解析結果より対象斜面が褶曲構造とそれを生成する地殻応力場を有する可能性を示唆している。
2. 雨水浸透の影響を考慮した気液二相流モデルによる土-水連成解析を実施し、実際の斜面で発生した崩壊モードと一致した結果を示すとともに、抑止杭に大きな変形が発生し、杭の降伏を引き起こす十分な値であることを確認した。結果として、地下水の影響が斜面の崩壊に大きく寄与することを説明している。
3. 調査で得られたコアサンプルに対して、X線回折やCT撮影から一部の泥岩が膨潤挙動を呈する可能性を確認している。さらに、限界状態モデルの降伏関数において、正規圧密応力を逐次更新させることで膨潤挙動を説明できる解析手法を示し、初期膨潤ひずみの設定法を提案している。
4. 土-水連成解析に膨潤挙動を説明できる降伏関数を搭載し、実際の斜面解析に適用した。結果として、従前の土-水連成解析と同様に、斜面の破壊モードを説明するとともに、現地で計測された変位と同等の結果を解析によって説明している。

以上より本論文は、地質構造・地殻応力、地下水影響、膨潤性といった3つの要素が斜面崩壊に及ぼす影響・メカニズムをそれぞれに明らかにし、数値解析的に論じる手法を提案したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月7日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。