

(続紙 1)

京都大学	博士（地球環境学）	氏名	Atitkagna Dok
論文題目	Tertiary Creep Behavior of Landslides Induced by Extreme Rainfall : Mechanism and Application		
(論文内容の要旨)			
本論文は、極端降雨中に発生する地すべりにおいてしばしば見られるクリープ現象、特に破壊直前の加速過程として知られる三次クリープに注目し、室内実験を通して再現を繰り返し、その発現メカニズムを明らかにすることにより、地すべり災害の早期警戒の信頼性を評価したものである。三次クリープは種々の材料の破壊前に現れる加速過程であり、既往研究事例ではこの過程で加速度と速度がべき乗の関係にあることが見出され、その関係に基づく速度の逆数を用いた地すべり崩壊時刻の予知方法は広く世界的に応用され成功例も多く報告されている。しかし、同過程の発生機構についてはまだ研究が少なく、発現機構は未解明である。そのため、本論文では応力制御リングせん断試験機を用いて三次クリープ過程を再現し、発現機構を解明し、さらに東南アジアで毎年頻発する極端降雨事象による地すべり災害の早期警戒への応用可能性を検討した。具体的には極端降雨時の斜面内に近い条件、すなわち垂直応力とせん断応力を一定に保ち、水圧のみを上昇させ破壊に至る過程を再現する実験を提案し、従来基礎研究対象試料として多くの研究で用いられてきた工業用試料と、実際の地すべりー土石流発生現場で採取した土砂を用いて実験的検証を行った。論文は6章からなっており、以下に各章の内容を説明する。 第1章は序論であり、本研究の背景となる極端降雨による地すべり災害と大規模降雨実験施設で実施された地すべり再現実験結果の説明、本研究の主たる目的であるクリープメカニズムと地すべり早期警戒技術との関係、本論文の構成について示している。 第2章では、関連する先行研究をとりまとめている。クリープについての概説、速度の逆数を用いた崩壊時刻予知法とその応用事例、過去に提案された各種モデルについて整理している。さらに、各種の早期警戒基準についてもレビューに基づいて論じている。 第3章では水圧制御リングせん断試験機の構造と対象の試料、試験の手順を示し、三次クリープを再現した結果を示している。従来の類似の研究では垂直応力一定の下でせん断応力を上昇させて破壊に至る試験で三次クリープ過程を再現できた事例があったが、間隙水圧を上昇させた試験で初めて三次クリープ過程を再現することができた。さらに速度の逆数法の背景となる加速度と速度の間のべき乗則が確認され、べき数αと比例係数Aについても従来研究と概ね同じ値が得られ、速度の逆数の方法が適用可能であることが示された。これらにより、水圧制御リングせん断試験が極端降雨時の地すべりのすべり面の状態を			

再現できる可能性を有することを明らかにした。また、現実の斜面では降雨浸透とともに垂直応力、せん断応力も若干増大することが予測されるため、垂直応力、せん断応力、間隙水圧が同時に増大する条件で試験を行ったところ、同様の三次クリープと速度－加速度のべき関係も得られた。

リングせん断試験による先行研究のうち、せん断応力制御試験で報告されている α 値が A 値の対数に概ね比例する関係についても同様の結果が得られた。これは、過去の地すべり地で観測された値とも整合している。ただし、比例係数 A は水圧制御試験がせん断応力制御試験より若干小さいことが示された。また、何度も繰り返し滑る再活動地すべりにおいては α が 2 近くになる傾向があることが示唆された。さらに粘土分が多いほど、 α が大きくなる傾向があることも示された。

第 4 章では、三次クリープの物理モデルを提案した。定応力定速度条件下の排水せん断試験結果を基に、せん断応力－せん断変位を表す指数関数モデルに水圧を含んだモデルを提案した。このモデルは、第 3 章で示した応力一定条件下で間隙水圧を一定の速度で上昇させるよう制御した試験により生じた加速過程、速度－加速度のべき乗関係、速度の逆数の減少傾向を再現できた。さらにこのモデルは応力－変位関係を破壊強度に達するせん断変位で正規化したせん断変位の指数関数を用いて表現しているが、関数を定義する定数によって α と A がともに表されることを示した。

第 5 章は得られた結果についての議論を行っている。 α 値の意味について、大きいほど破壊に近づいた際の土粒子骨格のコラプスの挙動が顕著になり大きな加速度が得られやすいと論じた。大きい過圧密比で α が小さくなる傾向がみられ、三次クリープ期間が長くなる傾向も示唆された。既往のせん断応力増大試験との比較から、 $\alpha - \log A$ 関係の比例係数の違いについても本論文で提案したモデルにより説明が可能であることが示された。また、今後の研究の方向性として、降雨観測衛星による観測データと土壌雨量指数を組み合わせ、本研究で得られた $\alpha - A$ 値関係を組み合わせることにより東南アジアで地すべりハザードマップと早期警戒システムを構築することの可能性について論じた。

第 6 章は結論であり、論文を総括するとともに今後の課題を示している。

(論文審査の結果の要旨)

気候変動に伴う極端降雨による地すべり、土砂災害は日本や東南アジアのみならず地球上の様々な国・地域における重要な環境課題の一つであり、信頼性の高い早期警戒技術の確立が求められている。本論文では、極端降雨時の地すべりで従来報告されている三次クリープ挙動に着目し、間隙水圧制御が可能なリングせん断試験機を用いた極端降雨時の地すべり三次クリープを再現する室内試験を実施し、三次クリープの発生機構を議論したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、工業用珪砂ならびに地すべり地で採取した土を対象とした試験で間隙水圧制御リングせん断試験により三次クリープが再現できることを示した。特に、従来世界的に適用されてきた変位速度の逆数を用いる方法の根拠となっていた変位速度の逆数が時間にほぼ比例して減少する傾向についても、地すべり地で実際に観測されたものと同様の挙動を再現できた。せん断応力制御による試験は既往研究があるが、より現地条件に近い水圧制御試験により三次クリープが再現できたのは本研究が初めてである。

第二に、速度の逆数の方法は三次クリープ過程で加速度が速度の α のべき乗に比例すること(比例係数A)を示すのが前提となっているもののそのメカニズムが未解明であったが、実際の極端降雨時の地すべり発生時に相当する垂直応力、せん断応力、間隙水圧すべてを上昇させた場合でも水圧上昇試験と同様の結果が得られた。 α とAの対数がほぼ比例関係であることを示し、せん断応力制御による既往研究でも同様の関係が報告されていたが、水圧制御試験では比例係数が小さいことが示された。 α とAが互いに独立ではなく、さらに破壊に至る応力経路によりその関係が異なるという新たな知見はメカニズムの解明に寄与し、地盤環境工学の成果として学術的意義が高い。

第三に、排水条件下での応力-せん断変位関係を変位の指数関数を用いて表し、破壊強度が有効応力に比例することから間隙水圧と変位の関係を表すモデルを提案した。指数関数形を用いたモデルは既往の研究でもあるが、破壊強度にほぼ到達するせん断距離と正規化した変位のべき乗の指数関数を用いて表したことにより、上記加速度-速度のべき乗関係も再現することができた。 α 値、A値が応力-せん断変位曲線を規定する2つの値により表すことができることを明らかにした。これらの成果はより簡単な土質試験により三次クリープ挙動の予想が可能となることを示唆している。

これらの成果は地球環境学の発展に貢献するとともに、地すべり災害早期警戒ならびに避難の実務に寄与するもので、社会的意義も高い。

以上の成果により、本論文は地球環境学の発展に大きく寄与した。よって本論文は博士(地球環境学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成25

年1月31日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降