

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560608

研究課題名(和文)土の残留状態におけるクリープ強度特性および地すべりの長期安定性評価

研究課題名(英文) Residual-state creep strength behavior of soils for long-term landslide stability evaluation

研究代表者

N. P. Bhandary (Bhandary, Netra Prakash)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10363251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：残留状態におけるクリープ破壊はせん断クリープ応力比が $>1\sim 1.03$ の範囲ないで得られたが、残留状態におけるせん断クリープ破壊範囲は非常の狭いことがわかった。せん断クリープ応力比に関わらず、第2次クリープから第3次クリープに変わるまでの変位量はほぼ一定で、「限界変位」が存在することがわかった。各種粘土試料を用いて得られた残留状態におけるせん断クリープ試験結果を基に力学モデルを構築し、実験結果から求めた各種パラメータを用いてモデルによる予測値と実験値の比較を行い、構築モデルの妥当性を検証した。その結果、多少のばらつきはあったが、構築モデルで残留状態におけるせん断クリープ破壊をほぼ表現できている。

研究成果の概要(英文)：In this experimental study, the range of shear creep displacement was found to be very narrow, from 1 to 1.03 in terms of shear creep stress ratio (i.e., ratio of applied creep stress to residual strength). Regardless of the ratio of creep stress to residual strength, it was found that a constant amount of displacement exists for each soil type, which when reached, the displacement changes from 2nd stage creep to 3rd stage creep leading to creep failure. The results obtained from a series of tests were then used in numerical modeling of residual-state shear creep failure for clay materials using spring (elasticity), dash-pot (viscosity), and slider (plasticity) models. The test results and the results predicted by the numerical model were compared to reveal that the model is well acceptable.

研究分野：地盤工学

キーワード：地すべり リングせん断試験 残留状態 せん断クリープ クリープ挙動 限界変位

### 1. 研究開始当初の背景

大規模地すべりの安定性は一般的にすべり層粘土の残留強度を用いて評価されるが、移動速度の低下によるせん断抵抗への影響について十分に調べられていない。粘土や粘性土の残留強度とは基本的に室内条件で求められる大せん断変位後のせん断抵抗であり、クリープ現象を有する地すべりの安定性は室内実験による土の残留強度のみで十分に評価できない。そこで、超低移動速度や移動停止によるすべり層粘土の強度回復や残留状態でのクリープ挙動を把握し、地すべりの長期安定性評価に役立たせる必要がある。しかし、これまで残留状態におけるすべり層粘土のクリープ強度特性に関する研究は殆どなされていない。通常の三軸圧縮試験によるクリープ試験では、ピーク強度に関わるクリープ強度特性についてしか調べられていない。そこで、地すべりのような大せん断変形問題では、残留状態でのクリープ挙動を調べ、室内での残留状態と原位置せん断状態の関連付けが重要である。また、地下水位の上下による地すべりの移動速度の変化と大変形後のクリープ強度の相関を調べる必要もある。これらの結果より、地すべりの長期安定性評価及び崩壊予測が可能になる。

### 2. 研究の目的

これまで、土のクリープ挙動はピーク強度前後のせん断状態について調べられており、その殆どが十数%のひずみに対するものである。しかし、地すべりのような大せん断変形問題の場合、土のピーク強度に対するクリープ挙動は無意味であるため、土の残留状態におけるクリープ挙動を把握し、鉱物摩擦のみに起因する土のクリープ強度とその工学的重要性について調べることを本研究の主目的としている。

大規模地すべりはすべり層粘土のせん断抵抗力より僅かに小さい起動力により移動することと考えられている。しかし、大変位に至った状態ではすべり面粘土のせん断抵抗はほぼ鉱物摩擦のみで支配されていると考えられ、その場合のせん断破壊のメカニズムは未解明であり、残留状態におけるせん断クリープ破壊特性についての検討が難しい。そこで、本研究ではクリープ試験可能なリングせん断試験機を試作し、残留状態に至っている粘性土のせん断クリープ特性を評価する。また、地すべりの移動挙動に及ぼす土の残留状態におけるせん断クリープ強度の影響についても検討した。

土のクリープ挙動は約 50 年前から着目されており、その殆どの研究が十数%のひずみに対するクリープ挙動に関するものである。さらに、大規模地すべりの場合でも土のクリープ挙動は定応力下の時間対ひずみの関係を用いて説明する場合が多く、地下水位の上昇による有効応力の減少が考慮されない。しかし、地すべりのような超低速斜地盤の移動

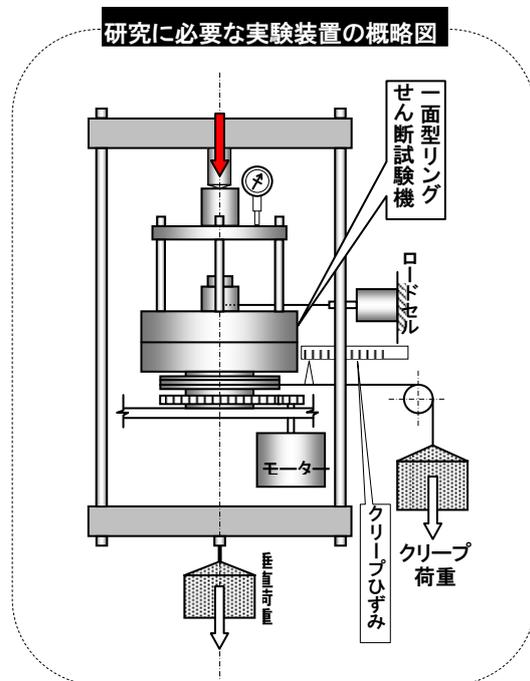
では、有効応力が一定になるとは言えない。そこで、残留状態やそれに近いせん断状態での土の場合に応力変化とともに時間に対するせん断変位特性を調べる必要がある。しかし、土の残留状態におけるクリープ強度の評価やクリープ破壊挙動は解明されていない。このような試験により、特に粘性土の大変形後のクリープせん断特性が明らかにされる。これらの結果により、地すべりの長期安定性評価及び崩壊や移動量予測が可能になる。特に、以下の点についての理解が深まり、今後大規模地すべりの長期安定性や経済的対策法の検討に役立つと考えられる。

- ・土の残留状態におけるクリープ挙動の解明
- ・有効応力変化による土のクリープ挙動への影響
- ・土のクリープ破壊応力範囲の把握および地すべりのクリープ移動特性の解明
- ・残留状態におけるクリープ強度による地すべりの長期安定性評価

### 3. 研究の方法

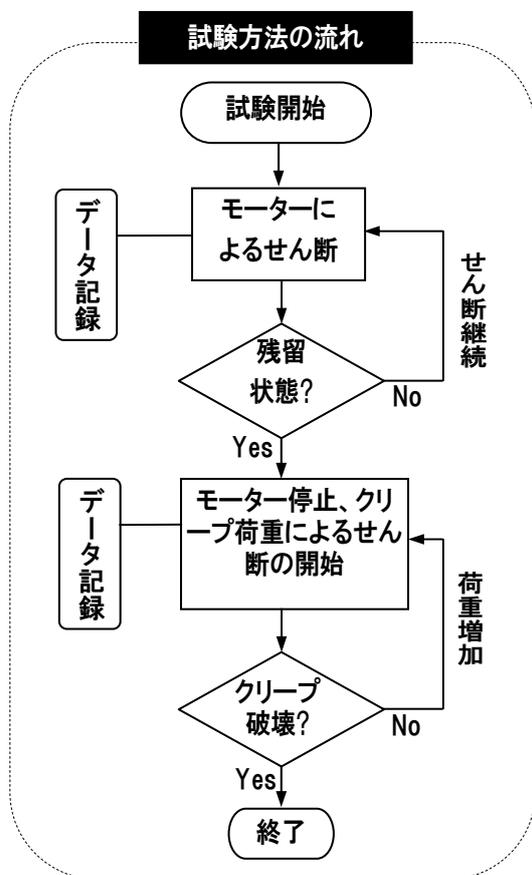
本研究以下の項目に分けて実施した。

残留状態におけるクリープせん断試験可能なリングせん断試験機の製作：試験機の製作において、通常的一面型リングせん断試験機の多少改変が必要だったため、主に、残留状態までのせん断変位は定ひずみ法（モーター使用）で与え、クリープ試験時のせん断変位は定荷重法で与える。このため、定ひずみ・定荷重両載荷法が可能なるせん断装置が必要となり、下図のような試験装置の製作した。



各種土の大せん断変形後のクリープせん断特性の解明：土のクリープ挙動に関するこれまでの研究によると土はクリープ荷重が小さいほどひずみ速度が小さく、大きくなるとひずみ速度が速くなり破壊状態に近づく。しかし、これは経過時間と関係し、低クリー

プ荷重下でもクリープ破壊状態が存在する。本研究では、残留強度の90%以上のクリープ荷重を対象とした各種粘土のクリープ強度及びその摩擦抵抗角を調べ、力学的・鉱物学的検討を行った。試験方法は下図に示すフローチャートの通りであり、全試料を残留状態までせん断し、落着いたせん断抵抗力及び体積無変化の確認後、クリープ試験を開始した。開始クリープ荷重は残留強度の90%とし、最終的に2週間程度までせん断クリープ破壊が生じるまで荷重を増やした。用いた試料は、主に標準砂の粉碎試料(75 $\mu$ m以下)、市販のベントナイト及びカオリン粘土、標準砂粉碎試料・ベントナイト及び標準砂粉碎試料・カオリン混合試料などであった。これらの試験結果より、各種粘土試料の残留状態におけるクリープ強度特性を解明した。



また、地すべり地におけるすべり面粘土の残留状態におけるクリープ挙動を鉱物学的検討するために四国の破碎帯地すべり地の数ヶ所よりすべり面粘土を採取し、上記同様残留状態におけるせん断クリープ試験を行った。四国の地すべりは主に破碎帯地質に起因しており、熱水変質現象の影響が大きい。そのため、すべり層粘土はスメクタイトやクロライトのような弱質粘土鉱物で構成されている場合が多い。このような地すべりのクリープ移動特性を調べるために、現地採取したすべり層粘土を用いてクリープ試験を行なう必要がある。さらに、X-線回折試験を行い土のクリープ強度及び粘土鉱物の種類や鉱物含有率が及ぼす影響について調べ、すべ

り面粘土鉱物の変化による地すべりの長期安定性について検討を行った。

最後に、全てのせん断クリープ実験結果を基に残留状態における粘土のせん断クリープ破壊モデルを構築検討を行った。その方法として、残留状態において粘土はバネ(弾性体)、ダッシュポット(粘性体)、そしてスライダー(塑性体)の要素と考え、力学モデルを構築した。

#### 4. 研究成果

本研究は土質力学を基礎とする実験的研究であり、これまでの実験結果から以下のことを明らかにした。

- ・改良型直接リングせん断試験を用いて残留状態における粘土のせん断クリープ試験を可能にした。

- ・完全残留状態ではクリープせん断応力比(せん断クリープ応力/残留強度)が1以下の場合、2次クリープにおけるひずみ速度はゼロとなり、クリープ破壊が生じないことがわかった。

- ・本研究に用いた各種粘土試料の場合、残留状態におけるクリープ破壊はせん断クリープ応力比が $>1\sim 1.03$ の範囲ないで得られたが、残留状態におけるせん断クリープ破壊範囲は非常の狭いことがわかった。

- ・残留状態におけるせん断クリープ試験では、せん断クリープ応力比に関わらず、第2次クリープから第3次クリープに変わるまでの変位量はほぼ一定であることがわかった。粘土試料によってこの変位量が異なることから残留状態における粘土のせん断クリープ特性を理解する上で重要なパラメータと定め「限界変位」ということにした。残留強度の大きい土の場合限界変位が小さい、そして残留強度の小さい土の場合限界変位が大きいこともわかった。

- ・各種実験結果を基に、せん断クリープ応力比と残留強度(残留状態における摩擦抵抗角 $\phi_r$ )から残留状態におけるせん断クリープ破壊までの時間の予測を試み、回帰分析によりそのクリープ破壊時間予測式を提案した。本提案式は残留状態に至っている地すべりの崩壊予測への応用について検討した。

- ・また、第2次クリープにおけるひずみ速度から破壊時間を予測する斉藤モデル(斉藤1968)に基づき残留状態における破壊予測モデルを提案したが、本研究から得られた結果と斉藤による結果はほぼ一致することが分かった。

- ・最後に、各種粘土試料を用いて得られた残留状態におけるせん断クリープ試験結果を基に力学モデルを構築し、実験結果から求めた各種パラメータを用いてモデルによる予測値と実験値の比較を行い、構築モデルの妥当性を検証した。その結果、多少のばらつきは見られたが、構築したモデルで残留状態におけるせん断クリープ破壊をほぼ表現できることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. Tiwari RC, Bhandary NP, and Yatabe R, 2015. 3-D elasto-plastic spectral element application to evaluate the stability of large-scale landslides, Geomechanics and Geoengineering: An International Journal, p.1-19 (Online First: 2015. 2. 5; DOI:10. 1080/17486025. 2014. 985337) 【査読有】
2. Timilsina M, Bhandary NP, Dahal RK, Yatabe R, 2014. Distribution probability of large-scale landslides in central Nepal, Geomorphology 226: 236-248 (Published: 2014. 12. 1; Online: 2014. 6. 27; DOI: 10. 1016/j. geomorph. 2014. 05. 031) <IF: 2. 577> 【査読有】
3. Bhat DR, Bhandary NP, Yatabe R, 2013. Residual-state creep behavior of typical clayey soils. Nat Hazards, 69(3): 2161-2178. (IF=1.639) 【査読有】
4. Bhat DR, Yatabe R, Bhandary NP, 2013. Study of preexisting shear surfaces of reactivated landslides from a strength recovery perspective, J. of Asian Earth Sciences, 77: 243-253. (IF=2.379) 【査読有】
5. Bhat DR, Bhandary NP, Yatabe R, 2013. Effect of shearing rate on residual strength of kaolin clay, Electronic J. of Geotech. Eng., 18(G): 1387-1396. (IF=1.212) 【査読有】
6. Bhandary NP, Dahal RK, Timilsina M, Yatabe R, 2013. Rainfall event-based landslide susceptibility zonation mapping, Nat Hazards, 69:365-388, DOI 10. 1007/s11069-013-0715-x 【査読有】
7. Bhandary, NP, Yatabe, R, Dahal, RK, Hasegawa, S, Inagaki, H, 2013. Areal distribution of large-scale landslides along highway corridors in central Nepal, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, DOI:10. 1080/17499518. 2012. 743377 (Online 2013. 1) 【査読有】
8. Bhat, DR, Bhandary, NP, Yatabe, R, 2013. Method of residual-state creep test to understand the creeping behavior of landslide soils. Proc. The 2nd World Landslide Forum, Landslide Science and Practice, C. Margottini et al. (eds.), 2:635-642, Springer

Berlin Heidelberg, ISBN  
978-3-642-31444-5 (DOI  
10. 1007/978-3-642-31445-2\_83)

[学会発表] (計 11 件)

1. Bhat DR, Bhandary NP, and Yatabe R, 2014. Residual-state Creep Behavior of Clayey Soils and its Implication in Landslide Displacement Prediction, Proc. Int' l Symposium on Geohazards: Science, Engineering, and Management, 20-21 November 2014, Kathmandu Nepal, p. 212-223.
2. 酒井啓太, ネトラ P. バンダリ, Bhat DR (2014). 室内実験による地すべりのクリープ崩壊発生時期予測モデルの検証, 平成 26 年度地盤工学会四国支部技術研究発表会, 平成 26 年 11 月 13 日, 徳島県, 神山町 (神山温泉)
3. Bhandary NP, Bhat DR, and Yatabe R, 2014. Understanding Large-Scale Landslide Displacement Behavior Through Residual-State Creep Shear Tests in a Modified Ring Shear Machine, Proc. 12th International Symposium on Geo-disaster Reduction, B. Tiwari et al. (eds.), p. 32-41, USA, 2014. 9. 4-5.
4. Bhat DR, Bhandary NP, Yatabe R (2014). Effect of shear rate on residual strength of clayey materials, 第 49 回地盤工学研究発表会, 福岡県, 北九州市, 平成 26 年 7 月 15 日~17 日, p. 1841-1842.
5. 岡本有希加, Bhandary NP, 矢田部龍一, Bhat DR (2013). 地すべり粘性土の残留状態におけるクリープ破壊予測に関する研究, 第 49 回地盤工学研究発表会, 福岡県, 北九州市, 平成 26 年 7 月 15 日~17 日, p. 1839-1840.
6. Bhat DR, Bhandary NP, Yatabe R (2014). Effect of discontinued shearing on residual shear strength of clayey soils, 平成 26 年度土木学会四国支部第 20 回技術研究発表会, 平成 26 年 5 月 31 日, 徳島県, 徳島市 (徳島大学)
7. 岡本有希加, バンダリ・ネトラ・P., 矢田部龍一 (2014). 粘性土の残留状態におけるクリープせん断試験と地すべり移動挙動に関する研究, 平成 26 年度土木学会四国支部第 20 回技術研究発表会, 平成 26 年 5 月 31 日, 徳島県, 徳島市 (徳島大学)
8. Deepak R Bhat, ネトラ P. バンダリ, 矢田部龍一 (2013). Effect of discontinued shearing on residual strength of clayey soil materials, 地盤工学会四国支部平成 25 年度技術研究発表会, 平成 25 年 11 月 21 日, 高知県, 高知市
9. Bhat DR, Bhandary NP, Yatabe R (2013).

Experimental study of strength recovery from residual strength of landslide soils, 第48回地盤工学研究発表会, 富山県, 富山市, 平成25年7月23日~26日, pp.2033-2034.

10. 岡本有希加, バンダリ・ネトラ・P., 矢田部龍一, 猪飼桃加 (2013). 粘性土の残留状態におけるクリープ型直接せん断破壊に関する研究, 平成25年度土木学会四国支部第19回技術研究発表会, 平成25年5月11日, 愛媛県, 松山市(愛媛大学), 講演概要集 pp157-158.
11. Bhat DR, Bhandary NP, Yatabe R (2013). Residual-state creep behavior of clayey soils, 平成25年度土木学会四国支部第19回技術研究発表会, 平成25年5月11日, 愛媛県, 松山市(愛媛大学), 講演概要集 pp155-156.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

研究成果記載ホームページ:

<http://www.soil.cee.ehime-u.ac.jp/papers.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

N. P Bhandary (ネトラ・ピー バンダリ)  
愛媛大学大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 10363251

### (2) 分担者

なし.