

崩壊性地すべりのすべり面に見られる粘性土の力学特性

Mechanical characteristics of clayey soil found at slip surface of collapsible landslides

○飛田哲男・河原尚徳・千木良雅弘

○Tetsuo TOBITA, Takanori KAWAHARA, Masahiro CHIGIRA

Slopes constituted of volcanic clays may typically collapse during large earthquakes. In the 2011 Tohoku earthquake, it was reported that this type of collapsible landslides occurred in gentle sloping areas in Fukushima prefecture. Laboratory tests of undisturbed samples indicated dependency on strain rate on strength of soil, which is commonly observed in clayey material.

1. はじめに

大地震時に、火山降下火砕物から成る斜面が流動的に崩壊する事例が報告されている (Chigira, 2014). 2011年東北地方太平洋沖地震では、福島県白河市葉の木平でそのような崩壊が発生し多くの方が犠牲になった(写真 1)(Sugimoto et al., 2012; Wang et al., 2014). 調査の結果、すべり面は粘土鉱物の一種であるハロイサイトに富む古土壌であった。ハロイサイトは、火山灰等の風化生成物でありナノスケールの中空管状構造を持つ。既往の調査により、火山性堆積物からなる斜面が地震時に流動的に崩壊しやすいこと、またこのような崩壊ではすべり面付近にハロイサイトを含む古土壌が存在することがわかってきた(例えば吉田・千木良(2012)). 本稿では、このような斜面が地震時に地すべりを引き起こすメカニズムを調べるため、現地採取した土試料の力学特性について考察する。

2. 要素試験結果

土試料は、福島県白河市葉の木平で発生した地すべりのすべり面と推測される地層から採取した。採取に当たっては、不かく乱試料の採取を意図して内径 100mm、長さ 200mm の塩ビ管を当該土層に貫入させた。その際、塩ビ管の縁に打撃を加えているため厳密には不かく乱試料とは言えないが、打撃による間隙水の染み出しは確認できなかった。

粒度試験 (図 1)、密度試験、最大最小間隙比試験、圧密試験、CU 三軸試験 (等方圧密、ひずみ制御、単調載荷) (有効拘束圧: 30, 45, 60, 90 kPa)、CU 中空ねじり単調載荷試験 (ひずみ制御)、CU 中空ねじり繰返し載荷試験 (異方圧密、応力制御) (図 4) を実施した。ここで示す圧縮試験結果は、すべて自然含水状態で行った。表 1 に上記物理試験結果ならびに静的三軸試験から得られた内部摩擦角と粘着力を示す。同表には参考として Ishihara and Nagano (1983) の実験値をあわせて示す。圧密降伏応力は、約 80~90kPa であり、試料採取地点の深度約 5m から 6m を考慮すると、やや過圧密状態にあるといえる。粒径加積曲線 (図 1) から本試料の平均粒径は約 0.006mm、細粒分含有率は 90% 以上であることがわかる。

Table 1 Physical properties of the clay at the site of Hanokidaira slide

Properties	Notation	This study	Ishihara and Nagao (1983)
Specific gravity	G _s	2.67	2.70
Water content	w	88.60%	110 -140%
Sat. unit weight	γ _{sat}	14.7 kN/m ³	13.3 kN/m ³
Void ratio	e	2.36	3.5 - 4.0
Liquid limit	w _L	97	93
Plasticity index	I _p	50	30
Friction angle	φ	14.8 deg	16 deg
Cohesion	c	20.0 kN/m ²	20 kN/m ²
Pre-consolidation pressure	p _y	80 - 90 kPa	-

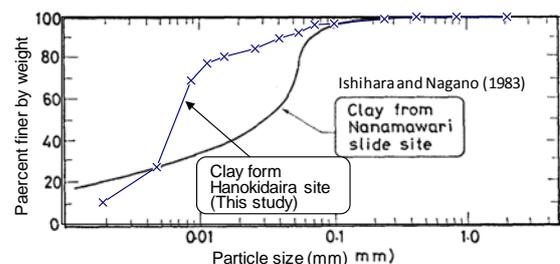


Figure 1 Grain size distribution curve of Hanokidaira clay and Mitaka-iriya clay (Ishihara and Nagano (1983)).

図 2(a)と(b)は、ひずみ速度 0.1 と 2.0 mm/min とした場合の軸ひずみ-偏差応力関係である。同図より、ひずみ速度が大きい場合(図 2(b))に最大せん断強度が大きくなるのがわかる。また、同図(a)に示すように、いずれの拘束圧下においても応力ひずみ関係のピークはそれほど明瞭ではないが、同図(b)のそれは、軸ひずみが大きくなるにつれ偏差応力が減少し、浅いピークを形成している。ひずみ速度の大きい場合が非排水条件に相当するとみなせば、今回得られた応力ひずみ関係の傾向は、せん断強度に関しては一般的な過圧密粘土の挙動であるといえる。載荷速度が 0.1 から 2.0mm/min に増加した時、内部摩擦と粘着力は、それぞれ 14.8 度から 17.5 度、20.0kPa から 21.0kPa 増加した。載荷速度 20 倍に対するこれらの増加率は、摩擦角 18%，粘着力 5%である。せん断強度(図 2 のピーク値)の増加率は 8%から 24%であった。

さらに大きなひずみ速度で載荷した場合の強度定数の変化調べるため、CU 中空ねじり試験を行い繰返しひずみ速度を変化させた時のひずみ速度と割線剛性の関係を求めた(図 3)。本実験は、一つの供試体に対し図 3 に(1)から(3)で示す実験条件で行った。図 3 は、これら一連の実験より得られた最大せん断応力を平均ひずみ振幅で除した割線剛性を求め、載荷速度に対して示したものである。全般的な傾向として、載荷速度の増加とともに割線剛性が増加する傾向にあることがわかる。載荷速度が 0.5m/s から 2.5m/s に変化した時の割線剛性の増加は約 10~30%であった。

3.まとめ

福島県白河市葉の木平で現地採取した土試料に対し、自然含水状態で載荷速度を変化させたせん断試験を実施し、載荷速度と強度定数の関係を求めたところ、両者の間には正の相関があることがわかった。単調載荷速度が 0.1 から 2.0mm/min に増加した時、内部摩擦と粘着力の増加率は、摩擦角 18%，粘着力 5%であった。せん断強度の増加率は 8%から 24%であった。繰返し中空ねじり試験では、載荷速度が 0.5m/s から 2.5m/s に変化した時の割線剛性の増加は、約 10~30%であった。今回得られた実験結果からは、なぜハロイサイトを含む古土壌からなる斜面が、大地震時に流動的な崩壊を起こすのか明らかではない。今後、この点について更なる検討を重ね、発生メカニズムを明らかにしたい。

参考文献

- Ishihara, K. & Nagao, A. (1983): Analysis of landslides during the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 1, 19-37. Chigira, M., (2014): Geological and geomorphological features of deep-seated catastrophic landslides in tectonically active regions of Asia and implications for hazard mapping. Episodes, 37, 284-294. Sugimoto, H., Takeshi, T., Uto, T., Honma, H., (2012): Geomorphologic and geologic features of landslides induced by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, in Shirakawa hills, Fukushima prefecture. In: K. Ugai, H. Yagi, A. Wakai (Eds.), Earthquake induced landslides. Springer-Verlag, Tokyo, pp. 189-201. Wang, G., Suemine, A., Zhang, F., Hata, Y., Fukuoka, H., and Kamai, T. (2014): Some fluidized landslides triggered by the 2011 Tohoku Earthquake (Mw9.0), Japan, Geomorphology, 208, 11-21. 吉田昌弘, 千木良雅弘(2012): 1968 年十勝沖地震によって降下火砕物層に発生した崩壊と風化の関係について, 応用地質, Vol. 52, No. 6, 213-221.

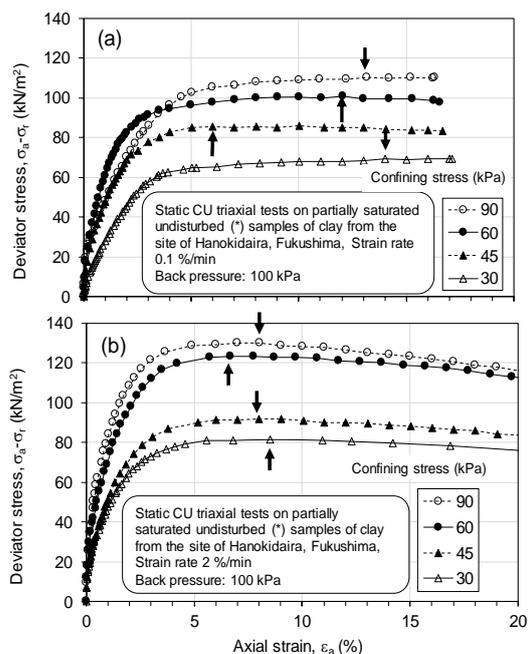


Figure 2 Stress – axial strain curves in the CU triaxial shear tests of the clay: strain rate (a) 0.1 mm/min, and (b) 2.0 mm/min

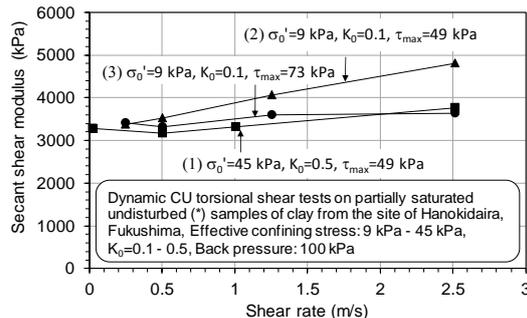


Figure 3 Shear rate dependency of the shear modulus of the clay.