

1. はじめに

斜面崩壊時刻の直前予測法は多くの研究者により提案され既に実用化されているが、より早い段階で崩壊時刻を正確に予測できる早期予測法は未だ確立されていない。ここでは、大規模な模型斜面を用いて降雨による斜面崩壊実験を行い、特に崩壊時の斜面内部歪の変化に着目して計測し、その性状とそれを用いた早期予測の可能性を検討したので報告する。

2. 実験模型と崩壊実験の概要

実験に使用した模型斜面の状況を図1に示す。模型斜面用の土槽底面は不透水の平面であり、表面は凹凸のついたモルタル処理を施してある。また、両側と上端は高さ1.1mの鉄枠、最下端は斜面表面からの浸透水の湧出を防ぐために砂利による水抜き処理が施されている。その中に供試土として茨城県つくば市産の川砂を詰め、高さ5m、幅4m、土層厚1m、斜面角度30度の斜面模型を作成した。転圧は足踏みで行い、乾燥密度 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ 程度に均一に締め固めた。なお、土槽内の末端部付近に高さ35cmの土留めが設けてあり、土留めの上端部に最終すべり面が生成され易い構造となっている。これは、すべり面の位置を固定することにより、その周辺での種々物理量の観測を行い易くするためである。

3. 計測項目

崩壊時刻の予測は地表面変位量の観測データを基に行うのが一般的である。これは、変化量が多いことと、センサー類が設置し易いので、結果的に観測が容易であることによる。しかしながら、地表面に露出しているために外乱も受けやすいという欠点もある。より早い段階で正確な予測を行うためにはノイズの少ない質の良いデータが必要である。本実験研究では、内部歪量に着目し、特に最終すべり面が生成される付近での計測を試みた(図1)。使用した内部歪センサーの形状を図2に示す。傾斜計が内蔵された外形3cm、長さ10cmの円筒を1単位とし、その上端・下端は折れ曲がること出来るようにボルト・ナットにて連結する構造になっている。これらを任意個数連結し、鉛直方向に埋設することにより、深さ方向に10cm毎の歪量(傾斜角の正接)を任意深さまで計測することが可能である。本実験では11連結したものを使用した。また、任意深さまでの歪量を積算することにより、深さ毎の移動量を連続的に計測することが出来る。なお、内部歪量の他に、比較検討用の表面変位量(速度)、ならびに地下水位、内部応力(土圧)も合わせて測定した。

4. 降雨入力

降雨入力は、 $15\text{mm}/\text{h}$ 、 $30\text{mm}/\text{h}$ 、 $45\text{mm}/\text{h}$ の3段階の強度を設定し、それぞれ8時間の矩形波入力と16時間以上の無降雨状態(地下水位がほぼ消滅した状態)を3回ずつ繰り返して、降雨浸透、地下水発生・上昇・減少に伴う斜面内部応力状態の変化と表面・内部変形との関係を調べた。その後、降雨量換算 $15\text{mm}/\text{h}$ の強度で斜面上部から24時間の給水を行い、平衡状態(給水量と流出量が同じで、かつ地下水位が変化しない状態)を作った後、 $50\text{mm}/\text{h}$ の強度で散水を開始した。最終崩壊は散水開始から約3時間4分後に発生した。

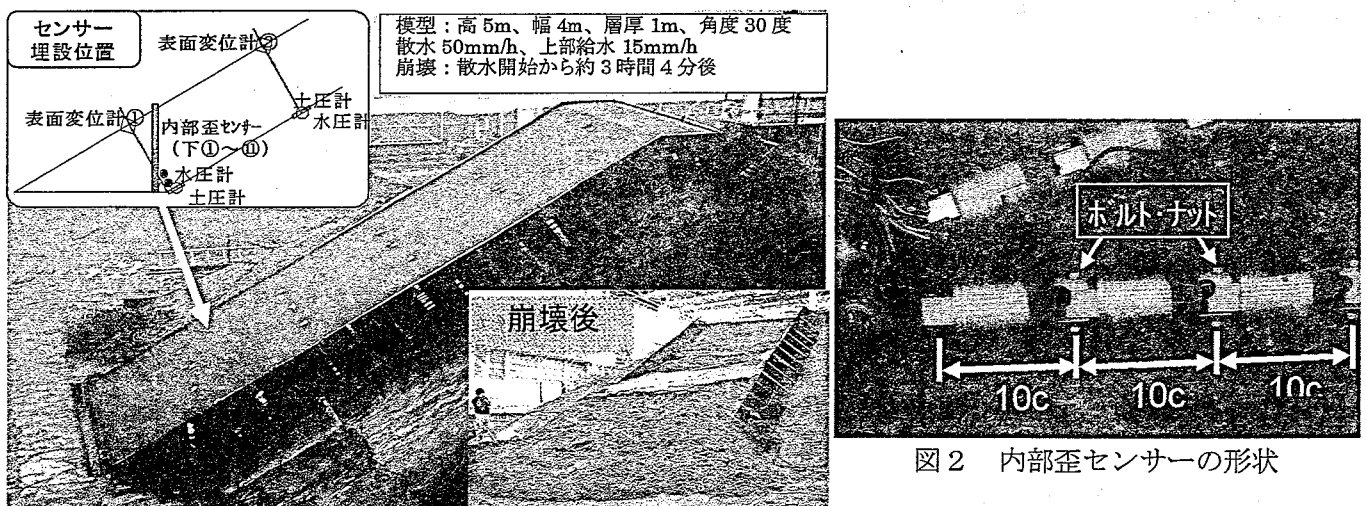


図1 実験模型状況・内部歪センサー埋設位置

図2 内部歪センサーの形状

5. 実験結果と考察

5. 1 内部ならびに表面変位量の変化

図3に内部歪センサーで観測された10cm深さ毎の移動量、ならびに表面変位量の測定結果を示す(ともに、斜面表面と平行な方向)。内部歪センサーの最上端の地表面に現れた場所は表面変位計①と②の間で、①に近い場所にある。したがって、内部歪センサーで観測した値は表面変位計①より大きく②より小さくて、①に近い値であることが推測される。図3に示す結果はその推測を裏付けており、内部歪センサーの有用性を示すものである。

5. 2 内部歪速度とその逆数の変化

図4にそれぞれの深さにおける内部歪速度の逆数の経時変化を示す。この図から分かることは、まず、全ての測点における歪速度の逆数曲線が、値は異なるものの、約5分前からはほぼ直線的に崩壊時刻へ向かって減少していることである。このことは、最終崩壊面近くでの歪量のみではなく、任意深さにおける歪量の測定値から、崩壊時刻の予測が可能であることを示唆するものである。次に、崩壊の最終段階(崩壊前10数分間)における歪速度の逆数曲線は放物線的な変化を示している(測点7を除く)。このような現象は、他の実験でも数多く観測されており、次節で述べる放物線型の速度の逆数曲線を用いた崩壊時期予測法の適用可能性を示すものである。

5. 3 崩壊時期の早期予測のためのモデル

筆者は関東ロームによる三軸圧縮クリープ試験を行い、载荷開始から一次、二次、三次クリープを経て破壊する場合のクリープ変形全体を表現するモデルとして、

$$dx/dt = (2/C) / \{t_0^2 - (t-t_0)^2\}, \quad C = a \cdot \exp(-b \cdot (p/q)), \quad p = \sigma_1 - \sigma_2, \quad q = (\sigma_1 + \sigma_2)/2, \quad \text{を提案している}^{1)}.$$

(x ; 変形量、 t ; 時間、 dx/dt ; 変形速度、 a, b ; 定数 ($a > 0, b > 0$), σ_1, σ_2 ; 主応力)

$$dx/dt = V, \quad 2/C = K, \quad t_0 = t_r - t_c \quad \text{と置いて変形すると、} \quad 1/V = K \cdot \{(t_r - t_c)^2 - (t - t_c)^2\} \quad \text{が得られる。}$$

この式は、速度の逆数曲線が上向きに凸型で $t = t_c$ において最大値をとり、 $t = t_r$ ならびに $t = t_r - 2t_c$ においてゼロとなる(すなわち、時間軸と交わる)性質をもつ放物線で表されることを示している。したがって、この式における t_r を崩壊時刻と見なすことにより、早い段階で崩壊時刻の予測が可能となる。前述のように、図4に示す内部歪速度の逆数の変化曲線は、最終段階において放物線的な変化を示しており上記の式が適用可能ではないかと考えられる。試みに適用した結果では、崩壊10分前からの変化を精度良く模擬出来ることが明らかとなっている。ただし、上記の式(予測モデル)は粘性土によるクリープ試験結果を基に導出した式であり、砂質土のクリープ的な微小変形とは力学的に異なることも考えられ、厳密な適用には今後の検討を要する。

6. おわりに

ここで使用した内部歪センサーは、地表面ではなく地中に埋設して使用するのでノイズの少ない安定した測定が可能である。また、剪断歪を直接測定できるので、クリープ理論を矛盾少なく適用することが可能である。さらに、表層崩壊などでよく見られる、円弧すべりではなく直線的な移動を示す層すべりの場合には、単体の傾斜計ではその変形量を捉えることは困難であるが、ここで使用した歪センサーは傾斜計を連結した構造であるので、その一端が基盤の不動点まで届くように埋設することにより、斜面土層の深さ毎の変形量を連続して捉えることが可能である。このような特長は、より早い段階で斜面崩壊時刻の予測を行う際には、大きな利点であると考えられる。今後、異なった土質(関東ローム)などによる検証を進める予定である。

参考文献

1) Teruki FUKUZONO(1997): Creep model of Kanto loam and its application to time prediction of landslide, Landslides (Proc. of the 8th ICFL), 221-233.

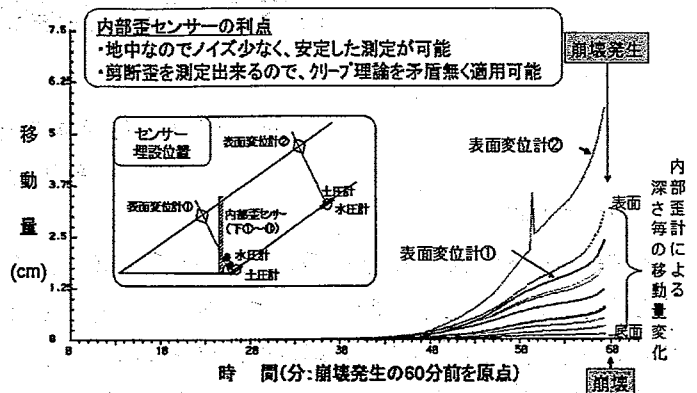


図3 内部変位と表面変位の経時変化

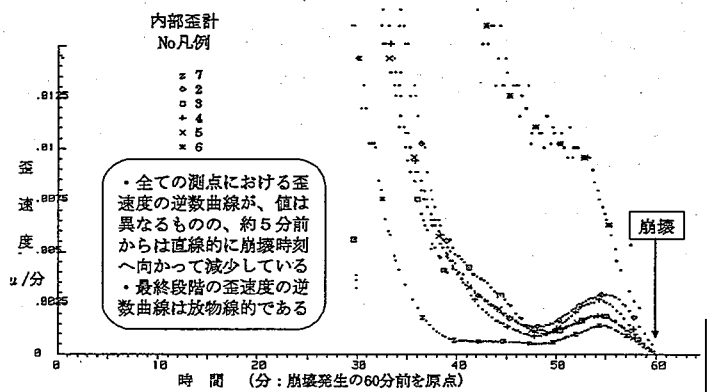


図4 内部歪速度の逆数の変化