

降雨下における砂質土模型斜面のせん断挙動について

(独)防災科学技術研究所 ○石澤友浩, 酒井直樹, 福岡輝旗, 諸星敏一

1. はじめに

斜面の崩壊予測手法^{1,2)}は斜面変位の速度を用いた手法が実務で用いられているが、種々の条件により速度が異なることや、速度のゆらぎ現象³⁾などにより危険度判断が困難な場合がある。そこで、著者らは3次クリープになる判断基準を検討するため、斜面崩壊におけるせん断挙動の変化に着目した。

本稿では大規模模型斜面を使用した降雨時の斜面崩壊実験を行い、地表面変位にゆらぎ現象を確認した。また、崩壊土塊の多地点に設置した変位計測結果より、3次クリープになる累乗的な増加に移行する斜面の地表面変位の速度パターンの変化点について検討した。

2. 実験概要

図-1に模型斜面の概要図を示す。斜面表面と基盤面が平行で、斜面土層の底面の基盤面は不透水層の条件を想定し、模型斜面を作成した。模型斜面の形状は、傾斜部が斜面長10m、幅3.9m、深さ1.15m、斜面傾斜角30°、天端が長さ0.8m、幅3.9m、深さ1mである。土槽の底面は突起のあるモルタル製、側面は鋼製である。また、この土槽底面の下流(地点A)には、すべり面が形成されやすいように高さ30cmの土留め壁を設置し、また、斜面末端部の下層には斜面表面への湧水を防ぐため、採石による排水層である。さらに、土槽底面に一定量の水を給水できる装置を斜面天端に設置した。

試験試料はマサ土(茨城県笠間産)を用いており、物理特性を表-1に示す。模型斜面の作成方法は、平均乾燥密度 $\rho_d \div 1.6\text{g/cm}^3$ となるように層厚20cm毎に湿潤密度 ρ_{sat} 、含水比 ω を確認しながら、人力による締め固めで作成した。また、計測機器の設置は、上記作業と同時にこなった。

本実験の計測は、表-2に示す計測機器を図-1に示す位置に設置した。本実験では、表-2に示す種々物理量の変化を測定しているが、本稿では特に地表面変位 δ_{SD} (インバー線式伸縮計)の計測結果に着目する。

この模型斜面への降雨実験の実験条件は、斜面上部より50ml/secの給水を24時間行い、約20cmの定水位が確認できた後に、時間雨量40mm/hの散水で斜面崩壊が生じるまで実験を行った。なお、この本実験は、防災科学技術研究所の移動式大型降雨実験施設を利用した。

3. 実験結果

本実験では24時間の通水後に時間雨量40mm/hの散水を開始し、降雨開始から7853秒後から7秒間に土塊が一体となり分離、流動が目視で確認できた。本稿では、土砂の分離、流動が生じた時点をも崩壊と定義し、崩壊直前の7850秒までの計測データを分析した。

図-2に24時間の通水後に行った時間雨量40mm/hの散水開始から斜面崩壊が生じるまでの地下水位 H_w (WL01~WL07)の経時変化を示し、図-3に任意の時間における地下水位線を示す。事前の24時間の通水により約20~30cmの地下水位が存在し、その後、散水開始から約4000秒後には斜面全体の水位の上昇が始まった。また、約7000秒からの水位の上昇は明瞭である。また図-3に崩壊直前の有効飽和度の分布を示しているが、崩壊直前(7850秒後)は、斜面全体の飽和度が高い状態で崩壊が生じたことがわかる。

図-4にインバー線式伸縮計により計測した地表面変位 δ_{SD} の経時変化を示す。同図より約7000秒後には設置地点の異なる5箇所(SD01~

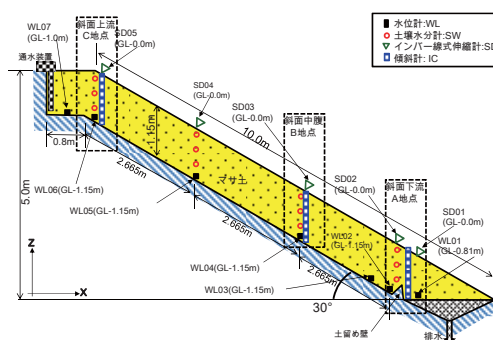


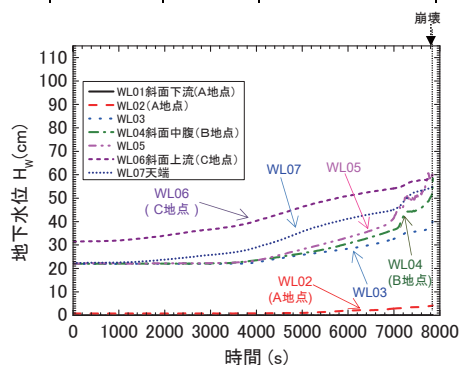
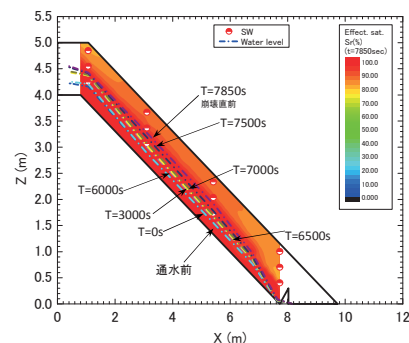
図-1 模型実験の概要図

表-1 模型斜面の初期物性値

粒度	土粒子密度	透水係数	含水比	湿潤密度	乾燥密度
D ₁₀ =0.3 D ₃₀ =0.4 D ₆₀ =1.8	ρ_s [g/cm ³] 2.643	k_{15} [cm/s] 5.0×10^{-3} ($\rho_w = 1.600\text{g/cm}^3$)	ω_{ave} [%] 8.6	ρ_{sat} [g/cm ³] ($\rho_{sat, ave} = 1.740$)	ρ_d [g/cm ³] ($\rho_d, ave = 1.602$)

表-2 設置した計測機器

計測機器	記号	斜面内の計測位置(m)	設置箇所
水位計	WL01-07	WL01 (GL-0.81), WL02-06 (GL-1.155), WL07 (GL-1.0)	7箇所
土壌水分計 (FDR式)	SW01-12	GL-0.75 (SW01, SW04, SW07, SW10), GL-0.45 (SW02, SW05, SW08, SW11), GL-0.15 (SW03, SW06, SW09, SW12)	12箇所
伸縮計 (インバー線式伸縮計)	SD01-05	GL-0.0	5箇所
傾斜計 (傾斜式)	IC01-09	GL-0.85, 0.75, 0.65, 0.55, 0.45, 0.35, 0.25, 0.15, 0.05	9箇所
傾斜計 (傾斜式)	IC10-14	GL-0.90, 0.70, 0.50, 0.30, 0.10	5箇所
傾斜計 (傾斜式)	IC15-19	GL-0.90, 0.70, 0.50, 0.30, 0.10	5箇所

図-2 地下水位 H_w の経時変化図-3 水位線の変化と有効飽和度 S_r の分布図

SD05)の地表面変位 δ_{SD} が始まった。その変位量は、斜面下流(A 地点)よりも地点 B,C (SD03~05)の方が大きく、また変化が見られ始めた時間も斜面上流の方が早い。

4. 地表面変位の速度変化

既往の研究²⁾では地表面変位の速度が四段階評価で分別できることを指摘している。そこで、本実験の斜面の変位速度 V_{SD} について整理を行った。結果の一例として、図-5 に斜面中腹(地点 B)の地表面変位 δ_{SD03} と変位速度 V_{SD03} について崩壊が生じる 30 分前からの経時変化および速度の変化点を示す。同図の速度の経時変化は、①微動変化(Lv.1)、②等加速度的増加(Lv.2)、③速度の減少、④累乗的急増(Lv.4)が見られた。既往の研究²⁾とは斜面材料の物性の違いはあるが、砂斜面での速度変化(速度のゆらぎ現象)が見られ、崩壊直前の変位速度に累乗的急増が見られる点は同じある。そこで、本論では変位速度が累乗的増加するまでの速度の変化点(i, ii, iii)に着目する。

図-6 に地表面の変位速度の変化点における地表面変位ひずみ ε_{SD} の経時変化を示す。この地表面変位ひずみ ε_{SD} は、地表面変位 δ_{SD} を崩壊直前の限界地表面変位 $\delta_{L(SD)}$ で正規化した値($\varepsilon_{SD} = \delta_{SD} / \delta_{L(SD)}$)である。つまり、この変位ひずみ ε_{SD} は、各地点での地表面変位の崩壊に至るまでの変化率を意味する。同図より変位速度の変化点に着目すると、微動から等加速度への変化点 i では、斜面上流(C 地点)の計測点 SD05 から変化が始まり、最も遅いのは斜面下流(A 地点)の計測点 SD01,02 である。また、変化点が生じる時間は地点毎に異なっているが、速度変化が進むことに計測点毎の時間差は徐々に縮まり、累乗的増加が見られる前の変化点 iii では各計測値の変化点の時間がほぼ一致していることがわかる。

図-7 は図-6 に示す各地点の変位速度の変化点における地下水位比 R_{WL} と地表面変位ひずみ ε_{SD} の関係を示している。ここで、同図に示す地下水位比 R_W は地下水位 H_w を土層厚 D で正規化した値である。同図より、地点 A(斜面下流)は底部に排水層があるため、水位の上昇は見られないが、地点 B(斜面中腹)、C(斜面上流)では、水位比の増加に伴い、変位ひずみ ε_{SD} も増加する。また、降雨開始から変化点 i までの水位比 R_W の変化よりも、変化点 i 以降の水位比の変化は小さいが、変位ひずみ ε_{SD} の変化は逆に増大することがわかる。

5. まとめ

マサ土を用いた模型斜面による降雨実験により、以下の知見を得た。

- ・本実験では変位速度のゆらぎ現象が見られた。
- ・この速度のゆらぎの傾向は多地点で同じであるが、速度の変化が生じる時間は地点毎に異なることがわかった。
- ・変位速度の変化が生じる時間は、地点毎に時間差が見られるが、崩壊に近づく程、地点毎の時間差が縮まることが明らかになった。
- ・崩壊直前の変位は急激に増加し、この変位の速度は累乗的な増加となる。この累乗的な増加に移行する変位速度の変化点は崩壊土塊内の何れの地点でも同時刻に生じることが明らかとなった。
- ・降雨によって水位が上昇するが、変化点 i 以降では地下水位の上昇は小さくなる。しかし、地下水位の上昇が少なくなってきたにも関わらず、斜面の変位は進展し、最終的に変位が増大して崩壊に至ることがわかった。

以上より、滑動する土塊が一体となって崩壊する実験において、滑動土塊上での多点計測による変位速度の変化点に着目した結果を示したが、速度の変化傾向や速度のゆらぎ傾向は異なる場合があるため、今後も更なる事例の集積を進めて、分析して行く予定である。

参考文献：1) 斎藤迪孝, 上沢弘, 斜面崩壊時期の予知, 地すべり, vol.2, No.2, pp.7-15, 1966.

2) 福岡輝旗, 表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり, Vol.22, No.2, pp.8-13, 1985.

3) 福岡輝旗, 酒井直樹, 第 27 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.53-54, 2008.

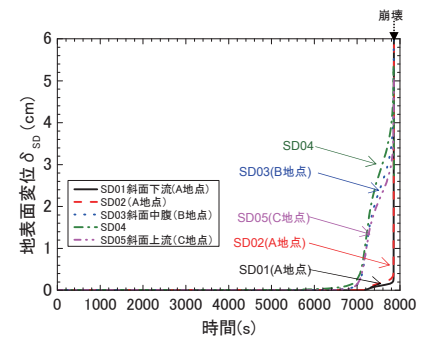


図-4 地表面変位 δ_{SD} の経時変化

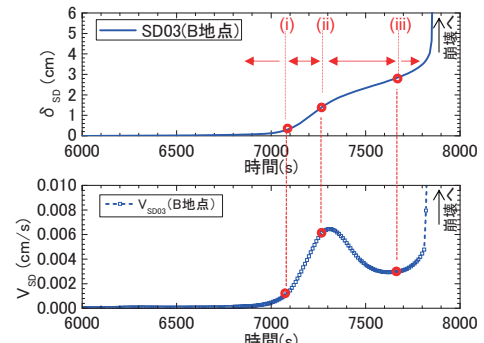


図-5 地表面の変位 δ_{SD} と変位速度 V_{SD} の経時変化

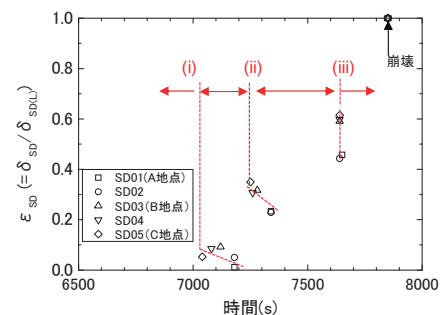


図-6 地表面の変位ひずみ ε_{SD} の速度変化点

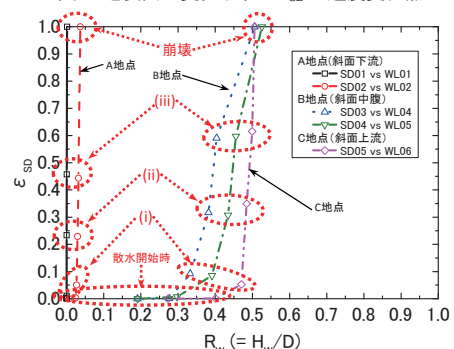


図-7 地表面変位ひずみ ε_{SD} と水位比 R_W の関係