

4. 地盤の透水性と降雨強度の関係に着目した斜面の表層崩壊に関する実験的考察

玉手 聡*, 伊藤直幸**, 遠藤 明**

4. Experimental Analysis on Shallow Failure of Slope in Consideration of Relationship between Ground Permeability and Precipitation Intensity.

by Satoshi TAMATE*, Naoyuki ITOH** and Akira ENDO**

Abstract: Rainstorms frequently induce slope failures that take a lot of lives and destroy many social assets. Recent increases in both the amount of rainfall and the intensity of precipitation cause severe damages in Japan as well as other countries throughout the world. In particular, heavy rain events induce shallow failures in slopes within short durations. Therefore, the risk of failure must be analyzed in particular sites to reduce losses and save peoples lives. However, preliminary evaluations are not conducted well because simple methods of analysis are not well considered.

This study conducts a series of experimental simulations of slope failure caused by precipitation in a centrifuge. 30mm/hr of the intensity of precipitations (r_p) and 300mm of the amount of rainfall (R_p) were decided as the standard conditions for heavy rain in prototype, and then these conditions were simulated in 50g centrifuge model tests. Pneumatic spray nozzles producing fine mist atomization with mean droplet diameter of 10 - 50 μ m were used to simulate the equivalent impact pressure on the ground surface in the prototype. A newly developed rain simulator composes 17 pneumatic spray nozzles that enable to give 1500mm/hr of the model precipitation intensity (r_m). Measurement of slope deformation by installation of conventional displacement transducers is not performed in these tests because these instruments disturb the uniform distribution of precipitation. In addition, serious problem is that spray mist sticking around the instrument accumulates so that enlarged raindrops fall on the model slope with a high impact force. Therefore, shallow strain transducers were also developed to monitor the progress of slope failure caused by these insertions in the surface.

Two kinds of soil materials, which are Toyoura sand and Silical00, are used in the tests to simulate different permeability (k_{sp}) in the model grounds which are 4.0×10^{-2} (cm/sec) and 1.48×10^{-3} (cm/sec), respectively. Index of relative permeation (I_r) is defined as the ratio of k_{sp} to precipitation intensity (r_p), i.e. $I_r = k_{sp}/r_p$. In addition, two kinds of liquid are also used to give different viscosity in precipitation to investigate the relationship between r_m and I_r . Slope inclination was given to be 30 degrees and 45 degrees.

Uniform precipitation was achieved by arranging the jetting angle of the nozzles. Shallow failures were observed in the lower permeable ground conditions where $I_r=1.78$. Precipitation mobilized the saturated layer in shallow section of the slope so that pore pressures increased by occlusion in the ground. Since predominant vertical permeation varies the thickness of the layer of saturation in the slope, the failure thickness decreases as the angle of the slope inclination increases. Meanwhile, water dissipated in the high permeable ground condition where $I_r=50$, and then slope failure did not occur. Consequently, the potential of slope failure in the shallow section basically decreases as the value of I_r increases. The potential of slope failure also increases in certain ground that has a highly permeable surface overlaying on soil with low permeability. Accordingly, it was clarified that the potential risk of slope failure by heavy precipitations must be evaluated by considering both r_p by weather forecasts and k_{sp} by preliminary site investigations.

Keywords: Heavy precipitation, Slope failure, Shallow deformation, Permeability of ground, Centrifuge model test, Pneumatic spray nozzles, Fine mist atomization, Rain simulator in centrifuge

* 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

** 元 科学技術振興事業団 重点研究支援協力員 Research Fellow of JST

1. はじめに

降雨による土砂災害は数多く発生しており、平成10～14年には毎年500～2000件が記録されている。さらに近年は総降雨量1000mmを超えるような集中豪雨も各地で計測されており、いわゆる豪雨が頻発する傾向が見られる。これに伴って崩壊は比較的短時間で発生しており、その形態には表層崩壊が特徴的に見られる。降雨による斜面崩壊は地盤の飽和化に伴う間隙水圧の上昇が一つの原因であると考えられている。一方で不飽和地盤の斜面が崩壊した事例も観察されており¹⁾、このような事例では斜面内部の飽和度上昇によるせん断強度の低下が崩壊の原因と考えられている。従って、降雨による斜面崩壊を予測するためには、降雨時における雨水の地盤浸透や飽和度増加が土のせん断強度と変形特性に与える影響を明らかにする必要がある¹⁾。

本研究では近年発生が多く見られる、豪雨による土砂崩壊に着目し、その発生メカニズムを遠心場降雨実験により調査した。特に本実験では微霧発生ノズルを付設した降雨装置を用いて、雨水の浸潤過程に発生する斜面の不安定化を実験的に調査した。さらに、地盤の透水係数と斜面勾配の違いが崩壊に与える影響ならびに、降雨再現に用いる液体の粘性が遠心場モデルに与える影響についても調査した。

本報告では遠心模型実験による新たな降雨崩壊の再現手法を紹介し、その実験的解析から得られた結果を述べる。次いで施工中における労働災害防止の観点から崩壊危険性と作業中止条件の関係について考察する。

2. 研究の背景

2.1 豪雨災害と地盤条件

まさ土としらすは豪雨による土砂崩壊が発生しやすい土として知られている。例えば、1999年6月に発生した広島豪雨²⁾や1993年6月から9月に頻発した鹿児島豪雨³⁾では甚大な被害をもたらされた。まさ土は花崗岩の風化土であり、西日本に広く分布する。しらすは溶結していない火砕堆積物や軽石質火砕堆積物を総称したもので、南九州に分布する。

大塚らはまさ土地盤としらす地盤における崩壊の共通条件を次のように述べている⁴⁾。

- 1) 降雨が不透水面まで浸透可能なほど両地盤の透水係数は大きく、また、地表面から不透水面までの深さが比較的浅いため、表層が崩壊する。
- 2) 不飽和時にはせん断強度が比較的大きいため、急勾配の斜面が平常時に存在可能である。しかし、豪雨はこれを不安定化させるため崩壊する。

広島災害において崩壊したまさ土の土質工学的特性が調

Table 1 Soil properties of decomposed granite collected in failures of 1999 Hiroshima disaster due to heavy precipitations.

| 広島災害で崩壊したまさ土の土質工学特性 | |
|---------------------|---|
| 粘着力(c') | 0～8.8(kN/m ²) |
| 内部摩擦角(ϕ) | 28.8～38.2(°) |
| 乾燥密度(ρ_d) | 1.37～1.73(g/cm ³) |
| 間隙比(e) | 0.53～0.92 |
| 透水係数(k) | $9.4 \times 10^{-4} \sim 7.2 \times 10^{-2}$ (cm/sec) |

査され、Table 1⁵⁾の通り報告されている。正規圧密状態と考えられる範囲の粘着力(c')は0～8.8kN/m²の範囲に分布したが、 $c' = 0$ が全体の75%を占めた。また内部摩擦角(ϕ)の平均値は32.9度であり、透水係数の値は一般的なまさ土のそれにほぼ一致するものであった。

まさ土の透水係数が比較的大きい理由は含有する鉱物成分とその構造にある⁴⁾。花崗岩の構成鉱物は石英分を50%から70%含む。残りは長石と雲母である。水の作用により石英が細粒化し、長石と雲母は2次鉱物に変化する。その結果、粘土分から砂分までを含む粒度配合の良い土が岩構造を残しながら形成される。まさ土は砂質土に分類されるが、不飽和時には粘着力を有する。この粘着力は2次鉱物である粘土鉱物を含有することによるもので、急勾配斜面を自立させ、降雨時には崩壊を発生する素因となっている。

しかし、風化した土の部分に「みずみち」が形成されると、地下水はこの空隙を選択的に流れ空隙が拡大する。その結果、間隙比や粒度分布に比べて透水係数が高い土となる。また、同一間隙比を有する不攪乱まさ土と締め固めたまさ土の透水係数を比較すると不攪乱まさ土のそれが1オーダー以上大きいことが知られている。

まさ土の崩壊層厚には1m程度のもが多く見られ、この値は透水係数に10時間の降雨を考慮して求められる飽和層厚の解析値にほぼ一致する。この層厚が1m以下では、わずかながら存在する粘着力により崩壊しないようである。

しらすの透水係数はまさ土に比べて1～2オーダー大きく、透水性が高い土である。透水係数が高い理由は粒子が尖った形状をしており、間隙比がかなり大きいことなどによる。しらすは尖った粒子相互のかみ合いにより粘着力成分を有する。従って、しらす地盤はある程度のせん断強度を有する。しかしながら崩壊が頻発する原因は、その堆積状態にある。急勾配のしらす斜面に堆積した新規火山噴出物が境界部で表層崩壊するためである。またパイピング現象や浸食が崩壊を引き起こす場合もある。以上より、まさ土としらすはともに降雨により崩壊しやすい要因を備えている。

崩壊が発生するまでの降雨量の比較をFig. 1に示す⁴⁾。

まさ土地帯に比べるとしらす地帯の方が、崩壊発生までにはより多くの雨量を必要とする。この原因の一つには、しらす地帯では経常的に降雨量が多く、少量の雨で崩壊する斜面の大半は既に崩壊していることが挙げられる。その他の要因には、しらすの間隙比が大きいために、飽和には多量の雨量を必要とすることも考えられる。従って、まさ土地帯としらす地帯における崩壊には降雨の浸透特性や強度特性が大きく影響している。

2.2 崩壊斜面と降雨条件

Photo 1⁶⁾ に示すような切土斜面の崩壊が道路と鉄道を対象に調査され、崩壊タイプと降雨量の関係が示されている⁷⁾。崩壊タイプは崩壊面が比較的浅い表層すべりと円弧すべりを伴う深層すべりに分類されており、降雨量は連続雨量 (R) と時間雨量 (r) で整理されている。

Table 2 に調査の集計結果⁷⁾ を示す。道路における表層崩壊と深層崩壊には、 R と r に明瞭な違いは見られず、ほぼ同じ降雨条件で崩壊の発生していることがわかる。

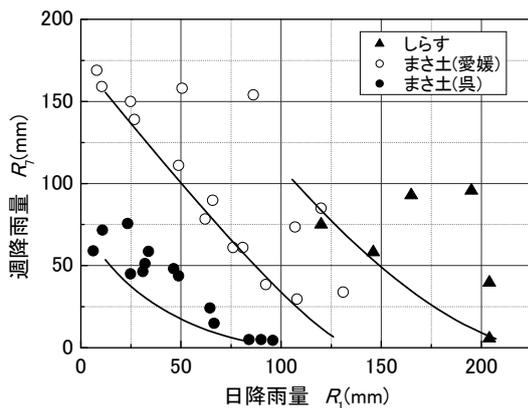


Fig. 1 Relationship between amounts of rainfall in a week and that in a day in regions of decomposed granite and Shirasu. まさ土地域及びしらす地域における崩壊発生までの降雨量



Photo 1 Failure in cut slope. 高速道路の切土斜面の崩壊事例

一方、鉄道の深層崩壊では表層崩壊に比べて、発生時の R と r が大きくなっており、道路との違いが現れている。崩壊タイプと降雨量の関係は発生時期や地域、ならびにその他の条件にも左右される。そのため、切土斜面での崩壊タイプと降雨条件の関係については必ずしも明確でない。

Photo 2⁶⁾ に道路盛土の崩壊事例を示し、Table 3 に崩壊発生時の降雨条件を示す。盛土の崩壊事例は切土に比べて発生数が少ない。 R と r の平均値は前述した切土道路の表層崩壊における2つの平均値と大きな差は見られない。以上より、切土斜面と盛土斜面の崩壊は地域性に大きく左右されるが、崩壊の降雨条件には、おおむね一致が見られ、その平均値はおおよそ $R=200\text{mm/hr}$, $r=30\text{mm/hr}$ であることがわかった。

2.3 既往の研究

降雨に対する斜面の不安定化に関してこれまで様々な研究^{8)~17)} が実施され、崩壊メカニズムが実験的に検証されている。しかしその多くは降雨によって斜面内に形成された浸透流による崩壊、すなわち水位面分布によって生じた流線が法先部を破壊することによる崩壊に焦点が当てられ、法先部の崩壊を契機とする進行性破壊現象の解明がなされた。一方、近年は 30mm/hr を超えるような豪雨も度々見られ、これまでとは異なるタイプの斜面崩壊が発生している。その一つには表層崩壊がある。

表層崩壊はその発生までの時間が一般的に短い。すな

Table 2 Average values and standard deviation values in both amounts of rainfall and intensity of precipitations at failure in cut slopes.

切土における降雨量の平均と標準偏差

| 事例と崩壊タイプ | 連続雨量 R (mm) | | 時間雨量 r (mm/hr) | | |
|----------|---------------|------|------------------|------|------|
| | 平均値 | 標準偏差 | 平均値 | 標準偏差 | |
| 道路 | 表層 | 229 | 155 | 38.2 | 23.7 |
| | 深層 | 216 | 149 | 27.2 | 14.7 |
| 鉄道 | 表層 | 150 | 69 | 22.7 | 10.3 |
| | 深層 | 202 | 106 | 27.9 | 14.4 |

Table 3 Average values and standard deviation values in both amounts of rainfall and intensity of precipitations at failure in embankment slopes.

道路盛土における降雨量の平均と標準偏差

| | 連続雨量 R (mm) | | 時間雨量 r (mm/hr) | |
|------|---------------|------|------------------|------|
| | 平均値 | 標準偏差 | 平均値 | 標準偏差 |
| 盛土崩壊 | 247 | 118 | 37.0 | 17.4 |



Photo 2 Slope failure in embankment of road.
高速道路盛土の崩壊事例

わち、斜面内に形成される浸透流によって引き起こされる崩壊と同様なメカニズムでは必ずしも合理的に説明できない場合が見られ、むしろ雨水が表層から浸潤する過程に崩壊したと考える方が自然な事例も見られた。しかし、豪雨時における表層崩壊については、その発生メカニズムに未解明な点が残されており、その解明には豪雨の作用による浸透状況を実験的に再現し、斜面の不安定化現象を明らかにする必要がある。

3. 遠心場降雨装置の開発と計測手法

3.1 遠心場における相似則の適用

本研究では降雨を異なる2種類の液体で発生させ、崩壊現象の比較を行った。液体の一つは水であり、もう一つはシリコンオイルである。本実験における降雨条件は近年頻発が見られる豪雨をモデルに検討した。

本研究では、モデルとする実大降雨の値を、総降雨量 (R_p) が300mm、降雨強度 (r_p) が30mm/hrに設定した。従って、降雨時間 (t_p) は10hrである。遠心実験におけるモデル降雨条件は液体の違いにより設定値が異なる。次項では2種類の液体を用いる場合の設定値を相似則に基づいて考察する。

3.1.1 降雨に水を用いる場合の相似則

遠心場降雨実験における降雨強度 r (mm/hr) について検討する。遠心模型実験では実物の $1/n$ の幾何学的相似模型が ng の遠力場に設置される。模型地盤は実物と同じ土質構成で作製されることを仮定し、実物と模型の相似則を検討する。なお以下では添え字 p は実物 (Prototype)、添え字 m は $1/n$ の縮尺模型 (Model) を表す。

r は速度の次元を有する。実大の降雨強度 (r_p) と模型

における降雨強度 (r_m) はそれぞれ式 (1) と式 (2) で表される。

$$r_p = R_p / t_p \quad (1)$$

$$r_m = R_m / t_m \quad (2)$$

ここで、 R_p は実大における降雨量 (mm)、 R_m は模型における降雨量 (mm)、 t_p は実物における降雨時間 (hr)、 t_m は模型における降雨時間 (hr) である。

さらに、 R_p と R_m の間には幾何学的相似の関係より式 (3) の関係が成り立つ。

$$R_p = n \cdot R_m \quad (3)$$

ここで、 n は相似比の値であるとともに遠心加速度の値でもある。

次に、地盤内における水の流れをダルシー則に基づいて、 t_p と t_m の関係を検討する。実物における流速 (v_p) と模型における流速 (v_m) はそれぞれ式 (4) と式 (5) で表される。

$$v_p = k_{sp} \cdot i_p \quad (4)$$

$$v_m = k_{sm} \cdot i_m \quad (5)$$

ここで k_{sp} は実物の飽和透水係数、 k_{sm} は模型の飽和透水係数、 i_p は実物における動水勾配、 i_m は模型における動水勾配である。

地盤の材料と液体の粘性が実物と模型で等しい場合は、式 (6) の関係が成り立つ。

$$k_{sp} = k_{sm} \quad (6)$$

次に、実大における動水勾配 (i_p) と模型における動水勾配 (i_m) について検討する。 i_p と i_m は式 (7) と式 (8) の関係が成り立つ。

$$i_p = \frac{\Delta h_p}{\Delta l_p} \quad (7)$$

$$i_m = \frac{\Delta h_m}{\Delta l_m} \quad (8)$$

ここで、 Δh_p は実物におけるヘッド差、 Δh_m は模型におけるヘッド差、 Δl_p は実物における距離、 Δl_m は模型における距離である。

遠心模型実験では模型と実物において対応するヘッドを等しくすることが出来る。すなわち、

$$\Delta h_p = \Delta h_m \quad (9)$$

である。さらに、距離については幾何学的に、

$$\Delta l_p = n \cdot \Delta l_m \quad (10)$$

である。従って、式(11)の関係が得られる。

$$i_m = n \cdot i_p \quad (11)$$

以上より、式(6)と式(11)を式(4)と式(5)に代入すると、式(12)が導かれる。

$$v_m = n \cdot v_p \quad (12)$$

さらに、時間については、式(13)の関係が成り立つ。

$$t_p = n^2 \cdot t_m \quad (13)$$

従って、式(13)を式(1)と式(2)に代入すると、降雨強度(r)には次の関係が成り立つ。

$$r_m = n \cdot r_p \quad (14)$$

3.1.2 降雨に粘性のある液体を用いる場合の相似則

地盤の材料は等しいが、液体の粘性が遠心加速度と同じく n 倍高い場合について、相似則を検討する。式(6)に示した飽和透水係数は、 n 倍の粘性を有する液体の使用により、式(15)の通り改められる。

$$k_{sp} = n \cdot k_{sm} \quad (15)$$

動水勾配は液体の粘性に影響を受けない。従って、式(11)と式(15)を式(4)と式(5)に代入すると、式(16)の関係が得られる。

$$v_p = v_m \quad (16)$$

その結果、時間の関係は、

$$t_p = n \cdot t_m \quad (17)$$

となる。従って、式(3)と式(17)を式(1)と式(2)に代入する。その結果、降雨強度の関係は式(18)の通り導かれる。

$$r_m = r_p \quad (18)$$

以上の通り、降雨に用いる液体が水とシリコンオイルの場合について、遠心実験における相似則を考察した。

ng の遠心場における主な相似係数の比較をTable 4に示し、遠心場降雨実験(50g)における模型降雨の設定値をTable 5に示す。

Table 4 Principle numbers of similarity ratio in using two sets of fluids comprising different viscosity in centrifuge.
遠心力 ng 場における水とシリコンオイル使用時における相似係数

| 使用液体 | 水 | シリコンオイル |
|-----------------------------|-------|---------|
| 水に対する粘性の比 | 1 | n |
| 飽和透水係数の比(k_{sp}/k_{sm}) | 1 | n |
| 降雨量の比 (R_p/R_m) | n | n |
| 降雨強度の比 (r_p/r_m) | $1/n$ | 1 |
| 時間の比 (t_p/t_m) | n^2 | n |

Table 5 Rain conditions at Centrifuge model tests.
遠心場降雨実験(50g)において与えた模型降雨の設定値

| | 実物 | 模型 | |
|--|---------|--------------------------|--------------------------|
| | | 水使用 | シリコンオイル使用 (粘性は水の50倍) |
| 降雨強度 r (mm/hr) | 30 | 1500 | 30 |
| 降雨時間 Δt_e | 10 (hr) | $\Delta t_{ew}=15$ (sec) | $\Delta t_{eL}=12$ (min) |
| 雨粒径 d (mm) | 1 | 0.02 | 0.02 |
| 実験容器(面積1000cm ²)における必要噴霧量 S_r (l/hr) | 3 | 150 (= S_{rm}) | 3 |

3.2 雨滴の落下速度と降雨圧力の検討

遠心力場における降雨の再現では、模擬降雨による載荷圧力が過大となって地表面に働かないように条件を設定する必要がある。その理由は雨滴の落下速度が遠心場において加速されること、ならびに雨滴の重量自体も遠心場では増加するためである。従って、遠心場における降雨再現では雨滴の落下衝撃力による浸食の発生を防止する必要があり、そのためには模型雨滴の粒径を十分に小さくする必要がある。

本節では遠心場における降雨の再現に必要な条件のうち、雨滴の落下速度と降雨圧力の条件について、理論的考察を述べる。

3.2.1 雨滴の落下速度

雨滴は空気抵抗を受けながら落下するため、その速度は一定値に収束する。この速度の収束値を終速と呼ぶ。一般的には雨滴が大きいほど終速も大きくなる。終速は式(19)により近似的に求められることが知られている¹⁸⁾。

$$U = 1767 \cdot D^{0.67} \quad (19)$$

ここで、 U は終速 (cm/sec) であり、 D は水滴の直径 (cm) である。

Table 6¹⁹⁾ は実降雨におけるその激しさと雨滴の粒径の関係を示す。豪雨時における雨滴の平均粒径は1mm以上であることがわかる。 $D=0.1\text{cm}$ を式(19)に代入して実大雨滴の求めた終速の値 U_p は377.8 (cm/sec) である。

Table 6 Precipitation intensity and diameters of raindrops.
降雨の種類と雨滴の大きさ

| もや | 霧雨 | しとしと雨 | 並みの雨から スコール |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 10 μm 以下 | 100~ 300 μm | 300~ 1000 μm | 1000 μm 以上 |

次に遠心力場における終速の値を、雨滴の粒径を考慮して計算する。雨滴の直径が1から20 μm における終速の理論解は式(20)で求めることができる²⁰⁾。

$$U = C_{sc} \cdot \frac{2r^2 g (\rho_w - \rho_a)}{9\eta_a} \quad (20)$$

ここで、 C_{sc} はカニングハム補正係数であり、 r は雨滴の半径、 ρ_w は水滴の密度、 ρ_a は空気密度、 η_a は空気の粘性係数である。

遠心場において再現する模擬降雨において、次の通り条件を仮定して終速計算値 (U_{c50}) を求めた。模型雨滴の半径 (r_m) を実大雨滴の1/50である10 μm とすると、 C_{sc} の値は1.01である。 ρ_w の値は1000kg/m³、 ρ_a の値は1.1kg/m³、 η_a の値は1.818 $\times 10^{-4}$ g/cm/secである。重力加速度は50gとする。計算の結果、 U_{c50} の値は60.6 (cm/sec) となる。実大雨滴と50g場における模型雨滴の落下速度の比は式(21)の通り約6.2と求まる。

$$\frac{U_p}{U_{c50}} \cong 6.2 \quad (21)$$

従って、遠心実験では雨滴の粒径を小さくすることにより衝突の際の速度を十分に小さくできる。

3.2.2 降雨によって地盤表面に働く圧力

降雨時に地表面に働く圧力について考察する。実地盤に働く圧力 (P_p) と模型地盤に働く圧力 (P_m) はそれぞれ式(22)と式(23)により表される。

$$P_p = \rho_p U_p^2 \quad (22)$$

$$P_m = \rho_m U_m^2 \quad (23)$$

ここで、 ρ_p は実大における大気中の降雨密度であり、 ρ_m は模型における降雨密度である。

遠心場実験において P_m と P_p が等しくなるために必要な雨滴の終速 (U_{mr}) を考察する。ここで、単位時間当たりの降雨密度の比と降雨強度の比の値は等しく、式(24)の関係が成り立つと仮定する。

$$\frac{\rho_m}{\rho_p} = \frac{r_m}{r_p} \quad (24)$$

すなわち、50gの遠心場降雨実験において液体に水を用いる場合は式(25)の関係が導かれ、シリコンオイルの場合は式(26)の関係が成り立つ。

$$\frac{\rho_m}{\rho_p} = n \quad < \text{Water} > \quad (25)$$

$$\frac{\rho_m}{\rho_p} = 1 \quad < \text{Silicon oil} > \quad (26)$$

従って、50g場における実験において $P_p=P_m$ とするために必要な U_{mr} の値はそれぞれ式(27)と式(28)で表される。

$$\frac{U_p}{U_{mr}} = \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_p}} \quad < \text{Water} > \quad (27)$$

$$\cong 7$$

$$\frac{U_p}{U_{mr}} = 1 \quad < \text{Silicon oil} > \quad (28)$$

式(21)と式(27)の比較より、50g場における遠心場降雨実験では雨滴の直径を20 μm に設定することによって、ほぼ $P_p=P_m$ が再現可能な落下速度を発生できることがわかった。なお、シリコンオイルの密度は水とほぼ同じ値である。終速がほぼ同じと仮定すると、シリコンオイル使用の場合は模型降雨の圧力が実際よりも小さく再現される。

3.2.3 降雨分布に対するコリオリ力の影響

遠心場において運動する物体には回転方向と逆向きの力が働く。この力は回転座標系をとった時の仮想的な力であり、コリオリ力²¹⁾と呼ばれる。

Fig. 2は遠心装置に搭載した模型地盤に雨滴が落下する様子を概念的に示す。遠心装置が中心Oの周りを実験容器が角速度 ω で回転する場合を仮定する。中心からの距離(x)がaの位置より雨滴が初速 U_0 で、角度 θ の方向に噴射される。この雨滴はコリオリ力の作用により図のような軌跡をたどる。遠心場降雨実験では θ の値を調整して模型地盤の表面に均一な降雨を与える必要がある。

回転座標系における中心からの半径方向をx成分とし、これに直交する方向をy成分とする。両成分に関する雨滴の運動方程式はそれぞれ、式(29)と式(30)で表される。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mx\omega^2 + 2m\omega \frac{dy}{dt} \quad (29)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = my\omega^2 - 2m\omega \frac{dx}{dt} \quad (30)$$

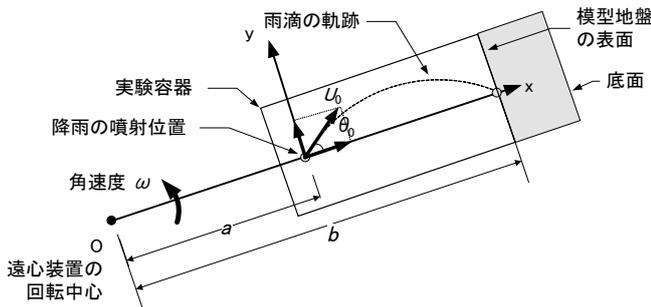


Fig. 2 Schematic Fig. of raindrop falling locus in centrifuge.
遠心力場における雨滴の落下軌跡

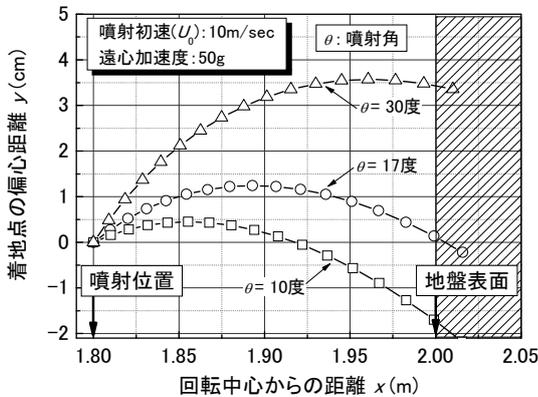


Fig. 3 Analytical locus of a raindrop in 50g of centrifuge.
解析的に求めた50g場における雨滴の落下軌跡

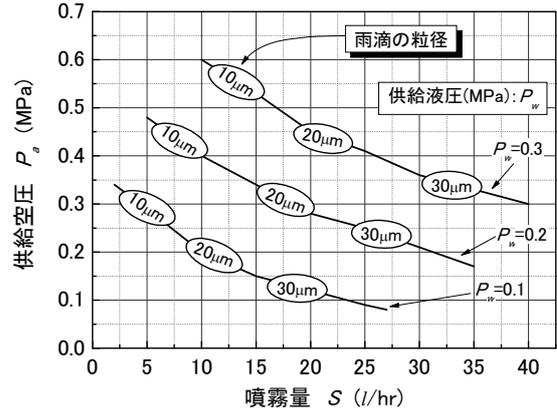


Fig. 4 Influence of air supply pressure (P_a) and liquid supply pressure (P_w) on both capacity and grain size of spray mist.
ミストの噴霧量(S)と雨滴の粒径(d)に与える供給空圧(P_a)と液圧(P_w)の影響

ここで、 m は雨滴の質量であり、 t は任意の時刻である。

Fig.2に示す各変数の値を遠心実験の条件である $a=1.8\text{m}$ 、 $b=2.0\text{m}$ 、 $U_0=10\text{ (m/sec)}$ 、遠心加速度 50g に対応する角速度(ω) $=15.71\text{ (rad/sec)}$ としてミストの落下軌跡を解析した。

Fig. 3は解析的な雨滴の落下軌跡に与える θ の影響を示す。 $x=2\text{m}$ における y の値は雨滴が地盤表面に着地したときの偏心距離を意味する。 $\theta=17$ 度の場合には $x=2\text{m}$ において y の値がほぼ0である。なお、本解析では雨滴が受ける空気抵抗を落下速度に考慮していない。そのため最適な降雨分布の再現条件は後述する確認実験の結果に基づいて最終決定した。

3.3 遠心場降雨装置の開発

3.3.1 噴霧ノズルの性能

ng 遠心場における降雨の再現では、雨滴が地盤に落下した際の載荷圧力を、その衝撃によって破壊させないレベルに低減する必要がある。そのためには、次の条件を満足する必要がある。

- 1) 模型降雨の雨滴粒径が $(1000/n)\text{ }\mu\text{m}$ 程度、すなわち本研究では $20\text{ }\mu\text{m}$ 程度を再現できること。
- 2) 雨滴の発射速度をできる限り小さくすること。

また、水使用の実験では模型の降雨強度(r_m)に $r_p \times n$ の値が要求され、本研究では r_m が 1500mm/hr に達する。従って、大量の微小なミストを実験容器内に再現し、これを可能な限り均一に与える必要がある。

これらの条件を満足する模型降雨を再現するために、本研究では(株)いけうち製の微霧発生ノズル(BIMVシリーズ)を用いた。このノズルは2流体ノズルとも呼ばれ、液体と空気を加圧して供給することによって微霧(ミスト)を発生するものである。

Fig. 4にBIMVノズルの基本的特性を例示する。噴霧量 (S) と雨滴の大きさ (d) が、液圧 (P_w) と空圧 (P_a) の違いにより変化している。 P_w の値が異なる3つの性能曲線を比較すると、 P_w の値が減少するに伴って、同一 S の発生に必要な P_a の値は小さくなっている。一方、 d の値は逆に大きくなっている。

ノズル型式の選定では、既往の研究に見られた斜面の衝撃的な破壊を防ぐために d の減少を重要条件に位置づけた。これと同時に、雨滴の初速を小さくするために、 P_a の値は極力小さく設定する必要があった。その結果、本研究ではBIMVシリーズの小噴量扇形モデルであるBIMV45075を実験に用いることとした。このモデルは噴霧角度が45度であり、空気消費量が平均75ℓ/minのものである。このノズルの噴霧性能をTable 7に示す。BIMV45075に供給する圧力を $P_a=0.3\text{MPa}$ 、 $P_w=0.15\text{MPa}$ に決定し、 $d < 20\mu\text{m}$ の噴霧を可能にした。次にこの条件に基づいてノズルの必要本数を求めた。Table 5に示した水使用の実験における必要噴霧量 (S_{rm}) ならびに、供給する圧力 $P_a=0.3\text{MPa}$ と $P_w=0.15\text{MPa}$ の時の噴霧量 (S_c) の値を用いて、ノズルの必要本数を式 (31) により求めた。その結果、本数は17本に決定した。

$$S_{rm}/S_c = 16.7 < 17 \quad (31)$$

3.3.2 ノズルの配置と水・空気の供給システム

Photo 3は実験容器に取り付けた噴霧ノズルの状況を示す。17個の噴霧ノズルが容器天端の長手方向に対して平行に2列配置されている。遠心装置の回転方向は、Photo 3に向かって左側である。

先の理論的な落下軌跡の検討ではノズルが1列設置を仮定した。しかし、必要噴霧量を供給するためにノズルは2列設置が必要となった。そこで、最適なノズルの設置角を実験により、直接的に調査した。異なる傾斜角の組み合わせを与えて降雨分布の確認実験を実施した結果、2列に異なる傾斜角を与えることによって、ほぼ均一な分布を再現できることがわかった。そして、遠心装置の回転方向に対して上手側、すなわちPhoto 3の左側には鉛直に対して18度を、もう一方の下手側には42度を与えることとした。

Photo 4は遠心装置のプラットフォームに搭載した実験容器と降雨装置の配置を示す。実験容器はプラットフォームのほぼ中央に設置し、斜面の向きは遠心装置の回転方向に対して垂直である。実験容器の上部には風防カウルを取り付けて、模型地盤を密閉した。加圧された空気と液体はそれぞれ独立したチューブを経由してノズルに供給される。チューブの途中にはソレノイドバルブ

を配置し、降雨の開始と停止を遠隔操作することができる。

Fig. 5は降雨装置における供給水圧 (P_w) と供給空圧 (P_a) のフローを示し、式 (32) と (33) に元圧力 P_1 と P_2 との関係式を示す。個別に配置された2系統の圧縮空気がロータリージョイントを介して遠心装置内に導かれている。一方の系統では空気圧 (P_a) を直接、微霧ノズルに供給する。もう一方の系統では空気圧を水タンクに接続して、水圧を発生させる。空圧と水圧の供給経路には

Table 7 Performance of mist nozzle (Model BIMV45075 IKEUCHI co.)
ノズルの噴霧性能(いけうち製BIMV45075)

| | | 供給空圧 P_a (MPa) | | | |
|------------------|------|------------------|-------------|-----|-----|
| | | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| 供給液圧 P_w (MPa) | 0.1 | 9.5 | 4 | | |
| | | 20 | 10 | | |
| | 0.15 | 19 | 9(= S_c) | 4.4 | |
| | | 30 | 15 | 5 | |
| | 0.2 | 30 | 17 | 9 | 4 |
| | | 40 | 20 | 10 | 10 |
| | 0.3 | | 41 | 24 | 17 |
| | | | 40 | 25 | 15 |

上段は、降雨の1本当たりの噴霧量 S_c (mm/hr) を示す。
下段は、雨滴の粒径 d (μm) を示す。

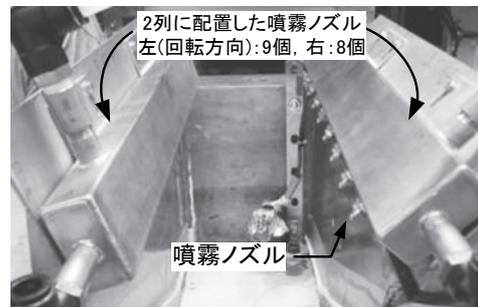


Photo 3 Mist spray nozzles set by two columns.
2列に配置した噴霧ノズル

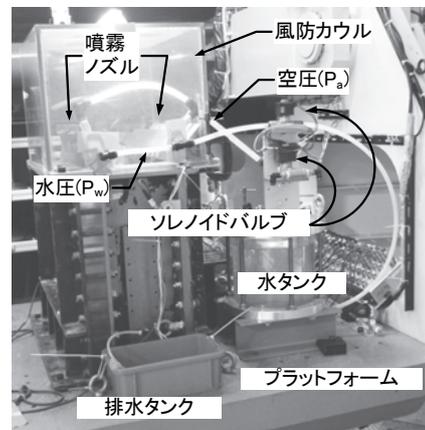


Photo 4 Overview of centrifuge rain simulator.
遠心場降雨装置の配置状況

ソレノイドバルブが独立して備わり、これを開閉することによって噴霧の開始と停止をコントロールすることが可能である。

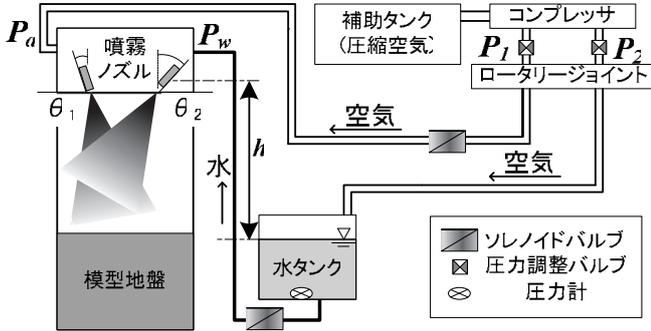


Fig. 5 Air and Water pressure in centrifuge supply system.
遠心場での空圧と水圧供給システム

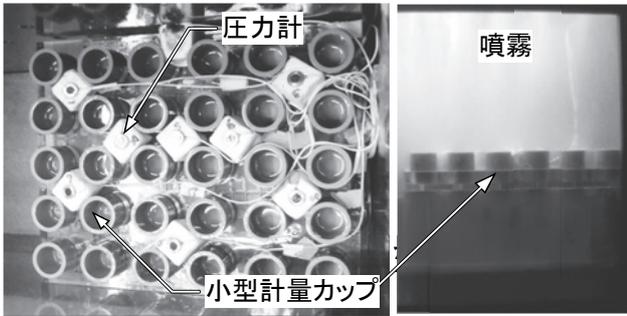


Photo 5 Investigation of distribution of both precipitation intensity and pressure on the plane of testing container.
実験容器内に分布する降雨強度と降雨圧力の調査 (左: 小型計量カップと圧力計の配置, 右: 噴霧の様子)

P_w を発生させるために、水タンク内の水面とノズル位置のヘッド差 (P_3) を考慮して P_2 の値を決定した。 P_3 は式 (34) により求める。さらに、水タンク底面では静水圧を実測することによって P_w の設定精度を向上させた。

$$P_a = P_1 \quad (32)$$

$$P_w = P_2 - P_3 \quad (33)$$

$$P_3 = n \cdot \gamma_w \cdot h \quad (34)$$

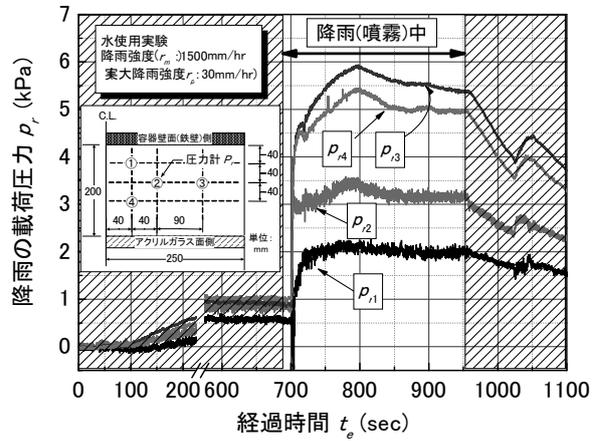
3.3.3 発生降雨分布の確認

実験容器内における降雨分布とその载荷圧力の分布を50g場で計測した。Photo 5は実験に使用した小型計量カップと圧力計の配置状況を示す。小型計量カップは内径22.5mm、深さ31mmを有し、実験容器の半面に5行6列で等間隔に配置した。さらに、これらのカップの間に

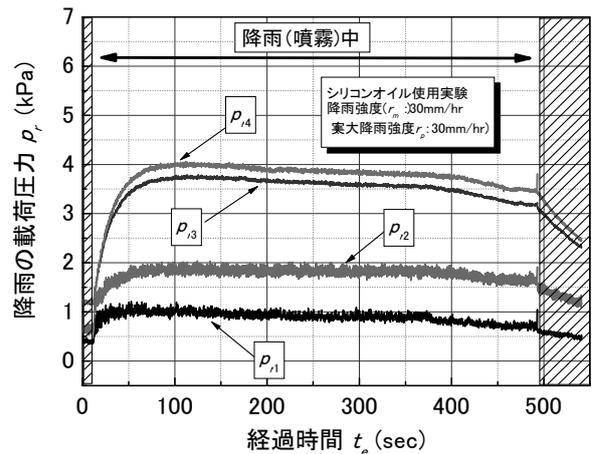
は、受圧面積が小さな圧力計 (共和電業PW-2KASF4, 定格容量200kPa) を9個配置した。

Fig. 6(a)とb)は降雨の载荷圧力 (p_r) の時刻歴応答を水使用とオイルミスト使用の実験について示す。両実験に共通して、各 p_r は降雨の開始前に約1kPaの初期値を示している。これは圧力計の感受部が50g場において自重で変形したための反応と見られる。本実験では先に述べた異なる液体を使用した場合の相似則に基づいて、水使用の実験では1500mm/hr、シリコンオイル使用の実験では30mm/hrの降雨を与えた。

水使用の実験では $t_e = 700\text{sec}$ より降雨を開始した。これに伴って各 p_r の値には明確な応答が見られる。 p_r の値には設置位置の違いにより差が見られ、その値は2から6kPaの間に分布している。各 p_r は降雨中にその値がほぼ一定を維持している。 p_{r3} と p_{r4} の最大値は5から6kPa



a) Water usage.



b) Silicon oil usage.

Fig. 6 Pressure due to 30mm/hr of interpreted precipitation in 50g of centrifuge condition. 50g場において換算降雨強度 (r_p) 30mm/hrを与えた時の载荷圧力 (p_r) の応答

を示し、比較的圧力が高くなっている。一方、 p_{r1} は2kPa程度と小さな値を示し、実験容器の境界付近では圧力が小さくなる傾向を示す。

$t_e=950\text{sec}$ の時に液体側のソレノイドバルブを閉じて降雨の载荷を終了し、その100sec後に空圧のバルブを閉じた。液体のバルブを初めに閉じる理由はノズル内に残留した僅かな液体を空圧で完全にミスト化して吐き出させ、水滴が集中的に落下することを防止するためである。降雨载荷の終了により p_r の値にはゆっくりとした減少が見られる。これは残留液体の吐き出しに伴うミスト濃度の低下と、 P_w の停止に伴う空気消費量の増加によって P_a の供給圧力が低下したためと考えられる。

シリコンオイル使用の実験では $t_e=20\text{sec}$ より降雨を開始した。 p_r の値には水使用の場合と同様に増加が現れ、その後一定となっている。

p_r の値は1から4kPaの間に分布が見られ、水使用の場合に比べて小さくなっている。すなわち模型の降雨強度の違いにより、 p_r には差が現れている。

以上より、本装置が再現する降雨によって地盤表面に働く圧力は、水使用の実験では6kPa以下、シリコンオイル使用では4kPa以下と十分に小さいことがわかった。従って、本装置が発する模擬降雨は、斜面を破壊させるほどに大きな载荷圧力を発しないことが明らかになった。

Fig. 7は小型計量カップの集水量より計算した実大換算降雨強度の分布である。水使用とシリコンオイル使用の両ケースにおいて、分布に類似性が見られる。容器の短辺方向に対して中央付近に値の増加が見られ、アクリルガラス面及び鉄壁面側の近傍では減少している。降雨の落下時に働くコリオリ力はノズルに与えた傾斜により補正され、中央付近に最大値が見られる。なお、水使用における降雨強度の平均値は40.7mm/hr、シリコンオイル使用では47.2mm/hrである。従って、換算降雨強度には若干の差が生じている。

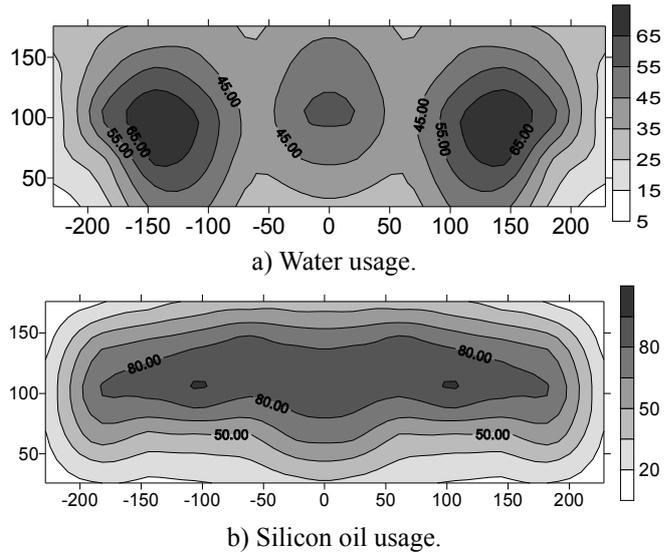


Fig. 7 Distributions of interpreted precipitation intensity (mm/hr) in centrifuge. 遠心場における実大換算降雨の強度分布 (単位: mm/hr)

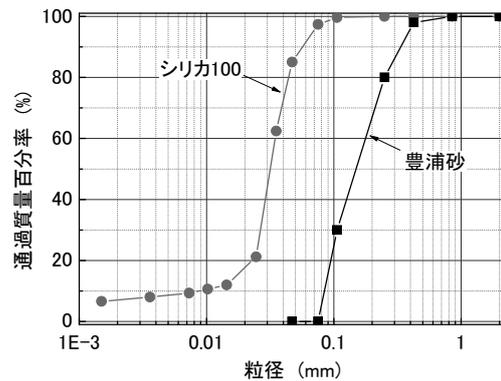


Fig. 8 Grain size accumulation curves of silica 100 and Toyoura sand. シリカ100と豊浦砂の粒径加積曲線

Table 8 Types of model ground and Properties of soils in Centrifuge model tests. 遠心場降雨実験における模型地盤の種類と試料の特性

| 遠心場降雨実験の名称 | 斜面勾配 | 液体の種類 | 飽和透水係数 k_{sm} (cm/sec) | 試料 | 平均粒径 | 目標 D_r (%) | 乾燥密度 (g/cm ³) | | |
|---------------|------|---|---|------------------------|------------------|--------------|---------------------------|---------------|---------------|
| | | | | | | | ρ_d | ρ_{dmax} | ρ_{dmin} |
| Cs1 | 30° | 水 ($k_{sm}=k_{sp}$) | 1.48×10^{-3} | シリカ 100 | 30 (μm) | 50 | 1.35 | 1.61 | 1.17 |
| Cs2 | 45° | | | | | | | | |
| Cs3 (2層地盤) | 30° | | 表層: 4×10^{-2} 下層: 1.48×10^{-3} | 表層: 豊浦砂 下層: シリカ 100 | 豊浦砂 0.15 (mm) | 70 | 1.57 | 1.66 | 1.34 |
| Cs4 | 45° | | 4×10^{-2} | 豊浦砂 | | | | | |
| Cs5 | 30° | シリコンオイル (比重 0.96, 粘度 48.8mm ² /hr) | 2.96×10^{-5} (k_{sp} の 1/50 とした推定値) | シリカ 100 | 30 (μm) | 50 | 1.35 | 1.61 | 1.17 |
| Cs6 | 45° | | | | | | | | |

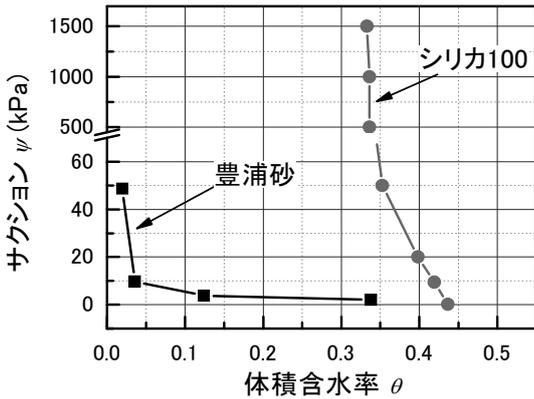


Fig. 9 A water characteristic curve of silica 100 and Toyoura sand.
豊浦砂とシリカ100で作製した模型地盤における水分特性曲線

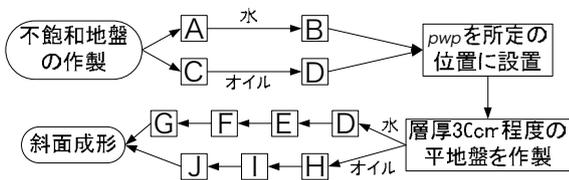


Fig. 10 Process in preparation of model grounds.
模型地盤の作製フロー

Table 9 Explanation of preparations in details.
作業項目と内容

| 記号 | 項目の内容 |
|----|--------------------|
| A | 容器内に水をはる |
| B | 水中落下法により試料を堆積 |
| C | 容器内にシャベルで乾燥試料を投入 |
| D | pwpのイニシャルを実行し計測を開始 |
| E | コックを開いて排水させる |
| F | 容器上部にフタをして密閉 |
| G | 空圧を与えて排水(35kPa) |
| H | 遠心加速度上昇(50g) |
| I | 微弱な降雨を与える |
| J | 湿潤 |

3.4 模型地盤の作製と降雨条件の設定

3.4.1 地盤試料と降雨条件の設定

Table 8に示す2種類の試料を用いて模型地盤を作製した。試料の一つは「シリカ100」であり、細粒土である。もう一つは豊浦砂であり地盤工学の研究に広く用いられている標準試料である。両試料の粒径加積曲線をFig. 8に示し、水分特性曲線をFig. 9に示す。

Table 8から分かるように透水性が異なる地盤に豪雨

が作用した際の崩壊挙動を比較することが可能である。なお、シリカ100と豊浦砂の k_{sm} はまさ土としらすの値にほぼ一致している。本実験における降雨条件は近年頻発が見られる豪雨をモデルとして、総降雨量(R_p)が300mm、降雨強度(r_p)が30mm/hrを設定した。従って、降雨時間(t_p)は10hrである。

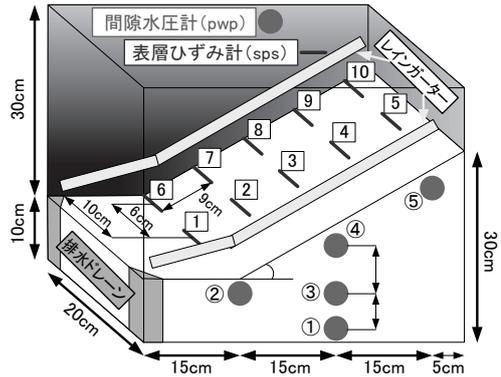


Fig. 11 Model ground with pour water pressure transducers (pwp) and short strain transducers (sps) in Cs1.
間隙水圧計 (pwp) と小型表層ひずみ計 (sps) を配置した模型地盤の概要 (Cs1)

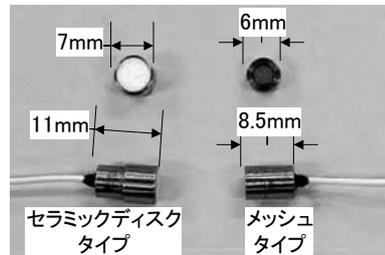


Photo 6 Model of power water pressure.
小型間隙水圧計 (pwp) 外略図

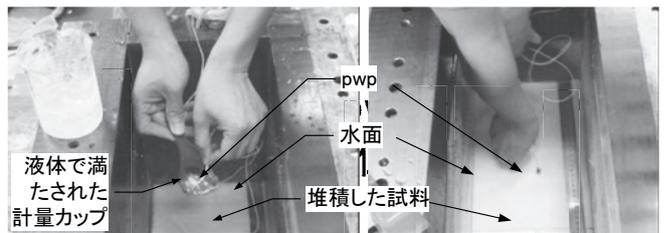


Photo 7 Installation of pwp by using a cup into the model ground without exposure.
計量カップを用いて間隙水圧計 (pwp) を水浸状態で移動設置する様子

3.4.2 模型地盤の作成方法

試料は水中落下法により容器内に堆積させた。この方法を用いた目的は次の2つである。第一は均質な密度の模型地盤を作製するためである。第二は地盤内のサクシオンを測定するためである。サクシオンの測定では後述する間隙水圧計 (*pwp*) を用いた。

乾燥した地盤に間隙水圧計 (*pwp*) を直接設置すると過大なサクシオンが *pwp* に働き、圧力の連続が保たれなくなる。従って、乾燥状態から不飽和化させる方法ではサクシオンの値を計測することが難しい。そのため本研究では、初めに水浸させた飽和状態の地盤に *pwp* を設置し、その後不飽和化させる過程でサクシオンの測定を試みた。模型地盤の作製フローを Fig. 10 に示し、その内容を Table 9 に示す。Fig. 11 は30度の勾配を有する斜面に後述する計測装置を設置した様子を示す。

3.5 斜面崩壊における計測と観察の方法

3.5.1 間隙水圧の測定方法

模型地盤内における間隙水圧及びサクシオンの計測を試みた。計測には Photo 6 に示すSSK製の小型間隙水圧計 (P303AV-5) を用いた。使用した間隙水圧計 (*pwp*) は定格容量が490kPa、出力5000 $\mu\epsilon$ である。

pwp は異なる2つのタイプのフィルターを備わるものを用いた。一つは#100のメッシュタイプであり、もう一つは細孔径が1 μm のセラミックディスクである。メッシュタイプは圧力の変動に対して応答に要する時間が短く反応は敏感であるが、測定可能な負圧のレベルは小さい。一方、セラミックディスクは高い負圧の測定が可能であるが、その応答は鈍い。なお、*pwp* の設置位置とその種類は実験毎に異なるため、後述するそれぞれの結果において個別に条件を記述する。

Fig. 10 に示す実験Cs1では斜面表層にセラミックディスクタイプを配置し、大気圧状態となる地盤底部にはメッシュタイプを配置した。なお、斜面中央の表層1カ所には両タイプの *pwp* を併置して、応答を比較した。すなわち、メッシュタイプは①、④の位置、セラミックタイプは②、③、④、⑤の位置に設置した。なお、*pwp* の設置はフィルター部の飽和状態を維持させつつ行った (Photo 7参照)。

3.5.2 表層ひずみの計測方法

斜面の崩壊計測には通常、接触型ならびに非接触型の変位計が多く用いられる。しかし降雨実験では一般的な変位計はミストの落下等の障害となることから、使用することができない。本研究では斜面の変動計測に表層ひずみ計 (*sps*) を自作して、用いた。なお、この *sps* は斜面工事における崩壊検知を目的として当研究所で開発

した検知装置を模型実験用に小型化したものであり、別報²²⁾ ではこれを実大実験用の表層ひずみ計と区別して (mini *Sps*) と呼んでいる。

本研究では2種類の *sps* を製作した。*sps* の外観を Photo 8 に示す。一つは長さ35mm、幅5mm、厚さ0.3mmの小型薄鉄板の両面にひずみゲージ (KYOWA KFG-20-120-C1-11) を貼り付けたものであり、Photo 8の左側に示す35mmタイプである。この *sps* をR3503タイプと呼ぶ。この *sps* の片端は地盤への貫入を容易にするために、三角形を成している。他端には5mm角の突起が

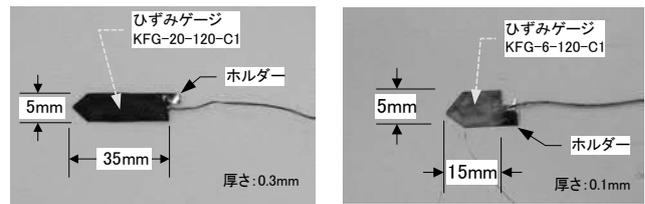


Photo 8 Plane views of two kinds of short strain transducers (*sps*) those are different in both length and thickness.

長さと厚さが異なる2種類の表層ひずみ計 (*sps*)
(左:35mmタイプ、右:15mmタイプ)

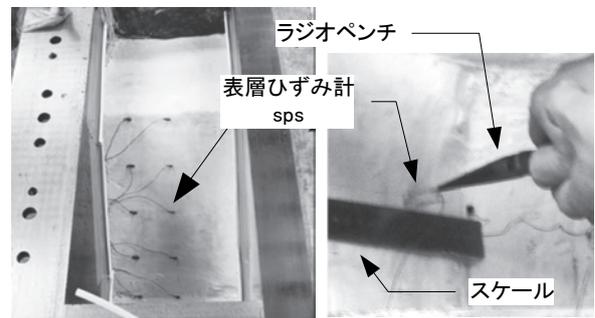


Photo 9 Installing the *sps* in model slope. *sps* の貫入設置と設置後の斜面状態

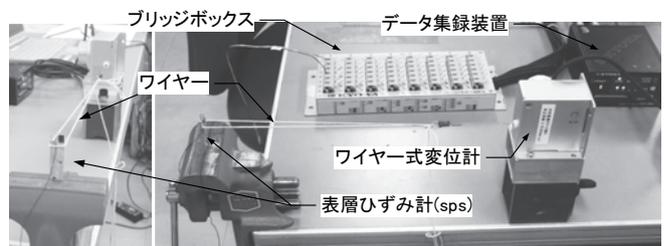


Photo 10 Investigation of the relationship between interpreted rotational angle (θ_{eq}) and response of strain (r_s) of *sps*.

表層ひずみ計 (*sps*) の応答ひずみ (r_s) と換算せん断ひずみ (θ_{eq}) の関係の検定(左:側面図, 右:正面図)

与えられている。これは斜面に挿入する際にラジオペンチで保持するための部分であり、ひずみゲージのリード線を破断しないための工夫が施されている。斜面に挿入されるspsの様子をPhoto 9に示す。なお、spsの表面には防水処理が施されている。

もう一つは長さ15mm、幅5mm、厚さ0.1mmの小型薄鉄板の両面にひずみゲージ(KYOWA KFG-6-120-C1-11)を貼り付けた同様なspsである(Photo 8の右、15mmのもの)。このspsをR1501タイプと呼ぶ。斜面にspsを設置した後の様子をPhoto 8の右側に示す。

ひずみゲージのリード線は2ゲージアクティブ法でブリッジボックスに接続した。斜面表層に発生したせん断変形はspsを曲げ変形させる。実験ではこの変形による応答ひずみ(r_s)を計測した。spsの曲げ変形と r_s の関係を明らかにするために検定実験を行った。その様子をPhoto 10に示す。spsの下端を治具に固定し、上端にワイヤー式変位計を接続した。

spsのホルダー部分を手で水平に前後させ、この時の r_s と水平変位(s_h)の関係を記録した。そして、spsの有効長(l_e)30mmに対する s_h の割合を換算せん断ひずみ(θ_{eq})と定義し、式(35)により求めた。

$$\theta_{eq} = \frac{s_h}{l_e} \times 100(\%) \quad (35)$$

Fig. 12は r_s と θ_{eq} の関係を示す。 r_s と θ_{eq} は直線関係を有することが理想である。しかし、実験結果にはヒステリシスが見られ僅かに非線形性が現れている。この非線形な応答の発生原因は、本実験における水平変位の与え方に問題があったためと考えている。

検定実験ではspsのホルダー部分を指先で押さえ、上端に水平変位を与えた。しかし、この時に僅かながら鉛

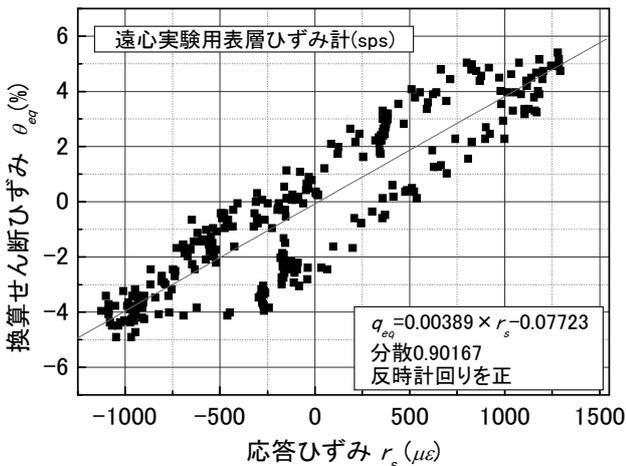


Fig. 12 Relationship between interpreted rotational angle (θ_{eq}) and response of strain (r_s).
応答ひずみ(r_s)と換算せん断ひずみ(θ_{eq})の関係

直力が同時に载荷されたようである。その結果spsには水平力と鉛直力が同時に载荷され、非線形な応答が現れた。従って、実際の崩壊実験では、より直線的な関係における計測が実施されるものと思われる。

解析的に求めた近似直線の傾きは0.00389であり、相関係数は約0.90である。従って35mmタイプのspsは、 $r_s=1000\mu\epsilon$ の時に θ_{eq} が約4%であることを意味する(式(36)参照)。なお、同様の手法により15mmタイプの r_s と θ_{eq} の関係を調査し、近似直線を求めた結果、直線の傾きは約0.00217であり、相関係数は約0.80であった。すなわち15mmタイプのspsは、 $r_s=1000\mu\epsilon$ の時に θ_{eq} が約2%である(式(37)参照)。 r_s 増分に対する θ_{eq} 増分は35mmタイプに比べて約半分であり、相関係数にも減少が見られた。

$$\theta_{eq_R3503}(\%) = 0.004 \times r_s(\mu\epsilon) \quad (36)$$

$$\theta_{eq_R1501}(\%) = 0.002 \times r_s(\mu\epsilon) \quad (37)$$

3.5.3 崩壊挙動の撮影

崩壊挙動の観察では、3台のCCDカメラを用いて動画を撮影するとともに、1台のデジタルカメラを用いて静止画を撮影した。

プラットフォーム上におけるCCDカメラの配置をPhoto 11に示す。CCDカメラ(1)とデジタルカメラをプラットフォームの端部に設置し、実験容器の全体側面を撮影した。すなわち、実験容器のガラス面を通して模型斜面が崩壊する様子を撮影した。なお一般的な崩壊の観察では、模型地盤の側面に格子線を着色する方法²³⁾や色砂を一定間隔で堆積させる方法²⁴⁾が用いられる。しか

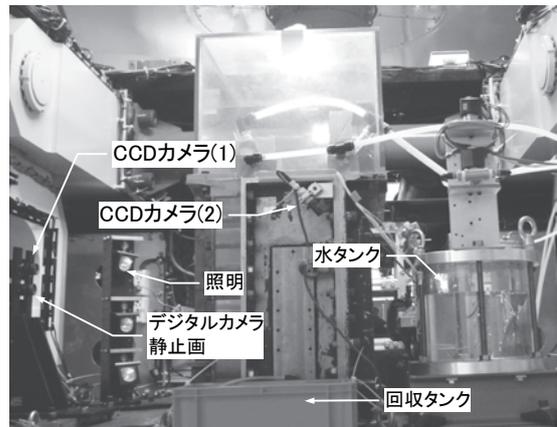


Photo 11 Two CCD cameras for observation of a slope and a reservoir.
斜面と水タンク観察のために設置した2つのCCDカメラ

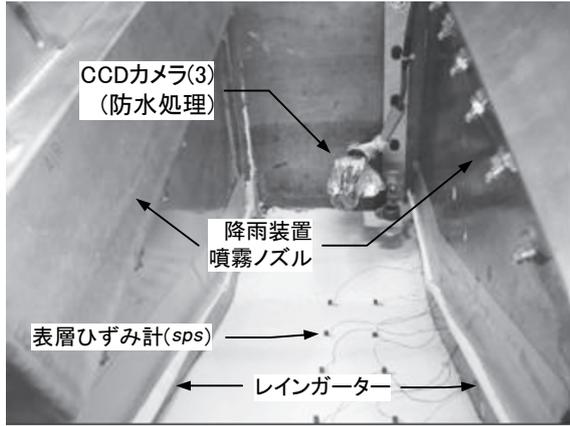


Photo 12 Waterproofed CCD camera mounted in container.
防水処理を施したCCDカメラの設置状況

し、本実験ではいずれの方法も用いなかった。その理由は次の2つである。第一の理由は、降雨による斜面崩壊が必ずしも平面ひずみに発生しないことである。第二の理由は、斜面表層が降雨により流動化する過程で着色材料が混合し、変形を識別することが困難になるためである。

CCDカメラ(2)は降雨用の水タンクと容器から排水された水の回収タンクの撮影に用いた。その目的は水タンクにおける水位低下の量より与えた降雨量を確認すること、回収タンクの水量を確認するためである。

CCDカメラ(3)はPhoto 12に示すように、実験容器の内部に設置した。広角レンズを用いて斜面全体を撮影した。このカメラは斜面の法先側に設置し、容器上端よりつり下げた治具に固定した。降雨装置からの噴霧がCCDカメラに直接作用するため、ラップによる入念な防水対策を施した。

4. 降雨による表層斜面の崩壊再現と観察

4.1 低透水性のシリカ100地盤に水降雨を与えた実験

シリカ100を用いて斜面勾配が30度と45度の模型地盤を作製し、実大換算の強度(r_p)が30mm/hrの降雨を水使用により与える実験を行った。この模型地盤の飽和透水係数(k_{sm})は約 1.48×10^{-3} (cm/sec)である。本研究では実大の k_{sp} に対する r_p の比を降雨浸透指標(I_r)と定義し、崩壊に与える地盤の透水性の影響を調べた。

$$I_r = \frac{k_{sp}}{r_p} \quad (38)$$

I_r の値が大きい場合は $k_{sp} > r_p$ であり、地盤は与えられた降雨に対して透水可能な状態にあることを意味する。一方、 $I_r < 1$ の場合は k_{sp} と r_p の相対的な条件から降雨が地表に湛水又は斜面を流下する状態にあることを意

味する。シリカ100による模型地盤では $I_r = 1.78$ であり、後述する豊浦砂のケース($I_r = 50$)に比べて相対的に透水性が低い条件である。

本節では降雨実験における間隙水圧計(pwp)と表層ひずみ計(sps)の基本的な計測結果を述べる。

4.1.1 間隙圧力の応答

Fig. 13は遠心加速度の増加時における模型地盤内の間隙圧力の計測値を例示する。模型地盤はあらかじめ加圧法により第一段階の不飽和化が施されている。この模型地盤の底面には排水条件を与え、遠心加速度を50gまで段階的に増加させた。図中に示す曲線の番号は先のFig. 11中に示した pwp の番号に一致している。経過時

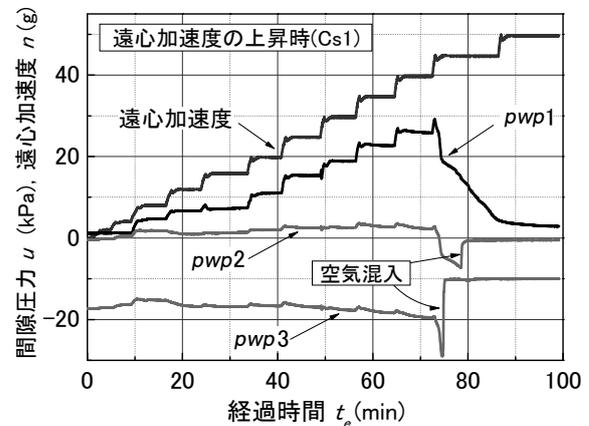


Fig. 13 Pore pressures in model ground while increase of centrifugal acceleration in Cs1. 遠心加速度の増加時における模型地盤内の間隙圧力(Cs1)

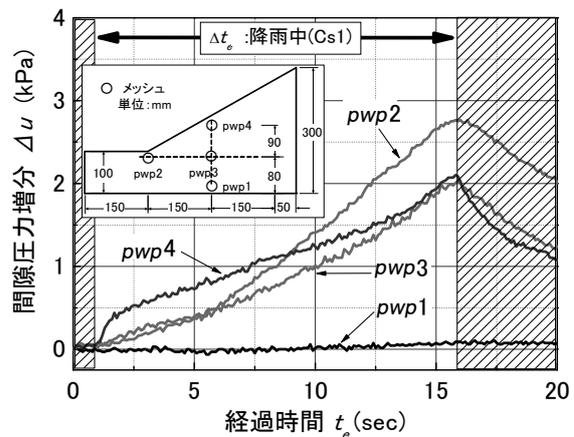


Fig. 14 Pore pressure responses with 30mm/hr of interpreted precipitation intensity at 50g of Cs1. 50g場における換算降雨強度(r_s) 30mm/hrによる間隙圧力増分(θ_u)の応答

間 (t_e) が0の時の各 pwp の値は加圧法により不飽和化した時に計測された最終値である。

地盤底部に設置した $pwp1$ には遠心加速度 (n) の上昇に伴う増加が見られる。しかし、 $pwp1$ の値は $t_e=74\text{min}$ の時、すなわち $n=40g$ の時に減少を示し、その後 $pwp1$ は約 3kPa に収束した。これは遠心加速度の载荷により地盤内の水が下方に移動したために、底面での間隙水圧が上昇したことを表している。しかし、 $n=40g$ の時にその水は容器外に排水されたため、 $pwp1$ の値は減少している。

$pwp2$ と $pwp3$ は $pwp1$ よりも上方位置の間隙圧力を示す。 $t_e=0$ から 74min の間では、 $pwp2$ と $pwp3$ の値に増減がほとんど見られない。しかし、 $t_e=74\text{min}$ からは $pwp1$ と同様な減少が見られる。 $pwp2$ はマイナスの値を示しており、サクシオンが計測されている。しかしながら、その直後に値は急増してゼロに至っており、圧力の連続性が保たれなくなったことを示している。この圧力の不連続化の発生には2つの原因が考えられる。

第一は生じたサクシオンの値がメッシュのAEV値よりも大きかったことが考えられる。値の急増直前はサクシオンが -10kPa 程度であった。AEV値の不足による問題を解決するために、後述する他の実験ではセラミックディスクが備わる pwp を併用することとした。第二は模型地盤の変形に伴う pwp と土の間の接触状態の変化、すなわち土とメッシュの間に空隙が生じて圧力が不連続になったことが考えられる。以下では、間隙圧力の計測に生じる値の不連続要因をともに空気浸入と呼ぶこととする。 $pwp3$ の設置高さは $pwp2$ と同じであるにもかかわらず、計測値には差が見られる。 $pwp3$ の曲線にも同様な空気浸入による値の急増が見られ、その値は約 -10kPa に収束している。従って、 $pwp3$ の計測値には -10kPa のドリフトが生じており、計測値には誤差も見られた。

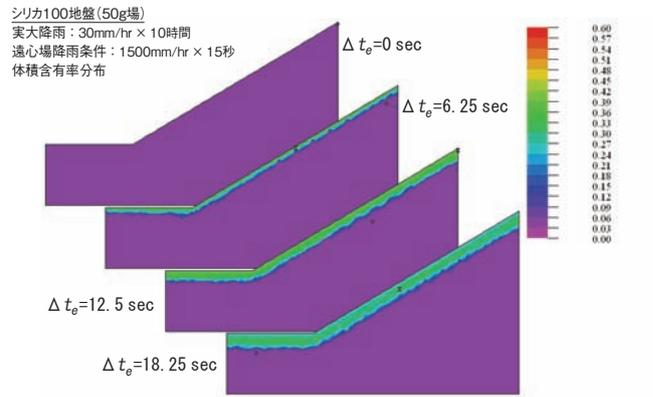
Fig. 14は降雨の作用に伴う地盤内の間隙圧増分 (Δu) の変化を示す。地盤底部での応答 ($pwp1$ の応答) を除く位置においては Δu に明確な増加が見られる。計測深さが上下に 90mm 異なる $pwp3$ (下方) と $pwp4$ (表面) を比較すると、 $pwp4$ では降雨開始直後の Δu に明確な反応が見られ、その後に曲線はほぼ一定勾配を示している。降雨が終了した $t_e=16\text{sec}$ では、 $pwp3$ と $pwp4$ の Δu はともに 2kPa である。これは、降雨による水位ヘッドに遠心力を考慮した値、すなわち式 (39) による計算値にほぼ一致する値であった。

$$\begin{aligned} \Delta u_w &= n \cdot r_m \cdot \Delta t_e \\ &= 50 \times 1500 (\text{mm/hr}) \times \frac{15}{3600} (\text{hr}) \\ &\approx 3 (\text{kPa}) \end{aligned} \quad (39)$$

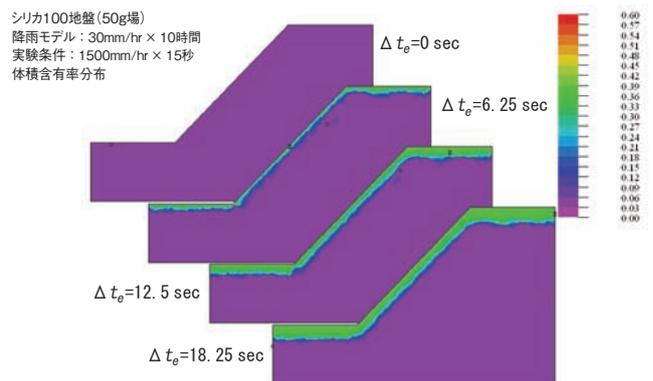
八木らは $1g$ 場において実施した小型砂質土斜面に降

雨強度 100mm/hr を与え、内部の間隙圧力の変化を計測し、同様な Δu の増加現象を記録している。そして、その発生原因は浸潤前線の降下に伴って間隙空気が閉塞されたことによるものであると述べている²⁵⁾。本研究でも同様な閉塞現象の発生が確認された。

$t_e=0 \sim 5\text{sec}$ においては $pwp2$ と $pwp3$ の曲線がほぼ一致している。しかし、 $t_e > 5\text{sec}$ では $pwp2$ の曲線の傾きが $pwp3$ のそれに比べて僅かながら大きく現れ、 $t_e=16\text{sec}$ では Δu が 3kPa を示している。同じく斜面表層に設置した $pwp4$ に比べて $pwp2$ の値が 1kPa 大きい原因は、斜面上方からの水が $pwp2$ 付近に集水したためと考えられる。遠心場における不飽和浸透解析を行って本実験における降雨の浸潤過程を解析的に確認した。本解析ではRichardsが導入した土壌水分容量 C を用いたポテンシャル方程式に、Soga et.al²⁶⁾ が示した遠心場における適用手法を用いた。解析の基本方程式を式 (40) に示す。



a) 30 degree of slope inclination (Cs1).



b) 45 degree of slope inclination (Cs2).

Fig. 15 Result of numerical calculation on time history of volumetric water content distributions in Cs1 and Cs2.

実験Cs1とCs2(シリカ100で作製した透水性の低い模型地盤)における体積含水率分布の時刻歴解析結果



Photo 13 Shallow flow failure observed by CCD camera that mounted in test container(Cs1).
実験容器内に設置したCCDカメラで撮影された斜面表層における流動的な崩壊の様子(Cs1)

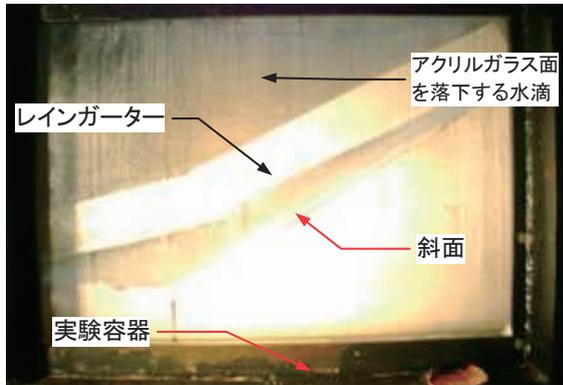


Photo 14 Side view of slope during precipitation in centrifuge(Cs1).
側面から見た遠心場における降雨作用時の斜面(Cs1)

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + n \right) \right\} \quad (40)$$

ここで、 x は実験容器における水平方向であり、 z は鉛直方向である。 ψ は圧力水頭(サクション)、 k は不飽和透水係数、 n は遠心加速度である。

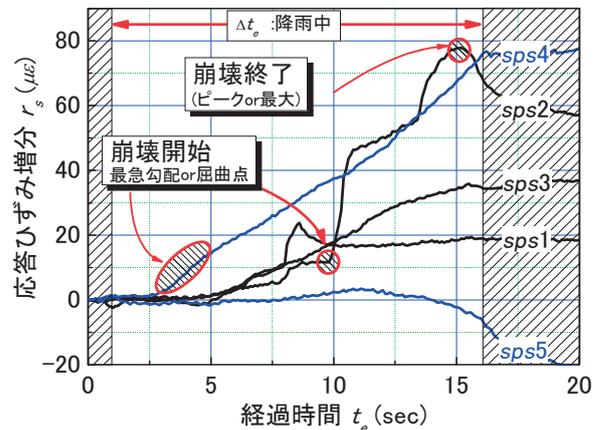
本解析は遠心実験を再現して実施した。すなわち、シリカ100で作成した斜面勾配30度の模型地盤に50gの遠心力を与え、1500mm/hrの降雨を $t_e=0$ から15secを与える実験を解析的に再現した。Fig. 15のa)は得られた体積含水率分布(θ_v)の経時変化を示す。降雨の作用に伴って斜面表層の θ_v には増加が現れている。

同一 θ_v を示す浸潤層厚は平坦な部分に比べて斜面部分の方が薄く見える。これは、浸潤が表面から鉛直下向きに卓越して進行したことを示しており、この傾向はFig. 15のb)に示す斜面勾配45度の事例においても確認する

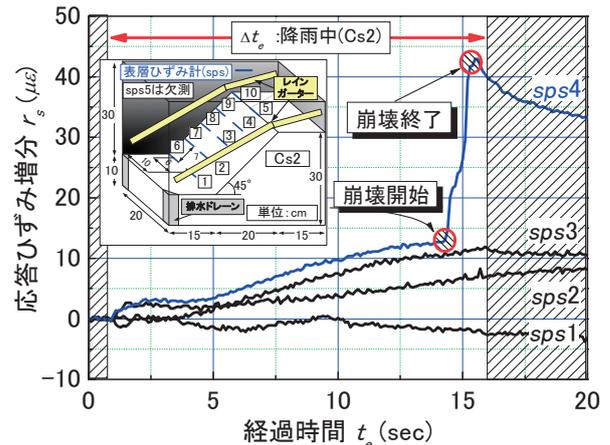
ことができる。

θ_v の最大値はa)とb)の両ケースにおいて39%を示し、浸潤前線付近では θ_v の値に急激な変化が生じている。地表と浸潤前線の間における θ_v は最大値でほぼ一定しており、飽和化していることがわかる。降雨終了前の $\Delta t_e=12.5$ secにおける飽和層の厚さは12mmであり、この値は飽和透水係数(k_{sm})より試算した浸透深さとほぼ同じである。

本実験では遠心力で模型地盤を不飽和化させて降雨前の初期状態を与え、その後に降雨を作用させた。地盤内におけるサクション値の計測については、不飽和化の過程で生じた空気侵入によりその絶対値を計測することはできなかった。しかし、降雨を作用させた時の間隙圧力増分(Δu)は水位ヘッドの計算値にほぼ一致したことから、飽和化した表層が下層の地中間隙を閉塞する現象が応答



a) 30 degree of slope inclination (Cs1).



b) 45 degree of slope inclination (Cs2).

Fig. 16 Monitoring the slope failure due to precipitation using by Short Pipe Strain transducer (sps) in Cs1 and Cs2.
実験Cs1とCs2(シリカ100で作製した透水性の低い模型地盤)における表層ひずみ計を用いた降雨時における斜面崩壊の計測結果

から確認された。また、不飽和浸透解析により降雨の浸透過程を調査した結果、地表面から鉛直下向きに卓越した浸透が発生し、斜面部に形成される飽和層厚は勾配の増加に伴って薄くなるのが解析的に明らかになった。

4.1.2 表層ひずみ

降雨を作用させたことによる斜面の不安定化を表層ひずみ計により計測した。Photo 13は実験容器内に設置したCCDカメラで撮影した崩壊の様子である。この写真は降雨が終了した直後の様子であり、容器内には浮遊するミストが見られる。これより落下には時間を要していることがわかり、粒径を減少させた効果が確認できる。斜面には表層が流動的に崩壊した様子が見られる。Photo 14は実験容器の亚克力ガラス面を通して見た降雨中における斜面側面の様子である。ガラス面を落下する水滴がレインゲーターにより回収され、斜面境界には浸食の発生が見られない。

Fig. 16のa)はCs1における経過時間(t_e)と応答ひずみ増分(r_s)の関係を示す。降雨は $t_e=1$ から16secの間に作用させた。 t_e の増加に伴って sps の応答値(r_s)には増加が見られる。これは、斜面表層のせん断変形が増加したことを意味する。曲線の形状を見ると、途中で屈曲点が見られる。これは局所的な崩壊の発生検知を意味するものである。この屈曲点の発生地点を「崩壊開始」と定義し、それまでの経過時間を Δt_f とする。なお、明確な屈曲点が見られない場合は最急勾配の地点を同様に解釈した。さらに r_s の値は崩壊の終了直前にピークを示す。この地点を「崩壊終了」と定義し、ピークが見られない場合は最大値を同様に解釈した。

Fig. 16のb)は同様なCs2の結果を示す。Cs2の斜面勾配(θ_s)は45度でありCs1のそれよりも大きい。 r_s 増分には θ_s の違いによる明確な差が見られ、Cs2の r_s 増分はCs1のそれに比べて全体的に小さい。これは斜面部に形成される飽和層の厚さが θ_s の増加に伴って減少しており、その影響が r_s にも現れていると考えられる。すなわちCs2ではCs1に比べてより浅い範囲の変形が顕著となったために、 r_s の値は小さく現れたと考えられる。 $t_e=14$ secでは $sps4$ に屈曲点が見られる。これは斜面の上部で局所的な崩壊が発生したことを示している。しかし、その下方における $sps1$ 、 $sps2$ 、 $sps3$ では r_s の増分がCs1のそれに比べて小さい。従って、斜面は全体的に浅い範囲で変形が生じている。なお、Cs2とCs1の $sps4$ の r_s 増分を比較すると急勾配では崩壊の発生がより急激となる特徴が見られる。

4.2 高透水性の豊浦砂地盤に水降雨を与えた実験

シリカ100による地盤に比べて飽和透水係数(k_{sm})が大きな模型地盤を豊浦砂によって作製した。Cs3は斜面

勾配が30度の模型地盤である。その構造は下部の基盤層にシリカ100を配置し、その上部には豊浦砂を層厚が2cmとなるように表層を与えた。Cs4は豊浦砂のみで作製した斜面勾配が45度の模型地盤である。これらの模型地盤は降雨強度(r_p)と表層の k_{sp} の関係に換算すると、液体が容易に地盤に浸潤可能な条件であり、先に定義した降雨透水指標(I_r)の値は50である。本節ではこの実験における pwp と sps の計測結果を述べる。

4.2.1 間隙圧力の応答

Fig. 17はCs3において降雨を与え時に現れた pwp の応答を示す。図示した pwp は斜面表層に3カ所($pwp2,4,6$)と斜面内部($pwp3$)に1カ所配置した。なお $t_e=1$ secより降雨を作用させたが、空圧供給用のソレノイドバルブに動作不良が発生し、その開口に1.5sec程度の遅れが生じた。その結果、 $t_e=1\sim 2.5$ secにおいては加圧した水のみがノズルより噴射された。その結果、シャワー状態の降雨が初期の1.5sec間作用した。しかし、このシャワーは容器壁面付近に落下したために斜面全体の安定には重大な影響を及ぼさなかった。

表層に配置した pwp の応答を見ると、降雨の作用に伴う間隙圧力増分(Δu)の変化が、先の低透水性地盤(シリカ100)に比べて約1/10程度であり、増加は僅かである。 $pwp4$ は $t_e=15$ sec付近において他の pwp に比べて Δu に急激な増加が見られるもののその値自体は小さい。斜面内部に設置した $pwp3$ の Δu には、 $t_e=10$ sec以降に増加傾向が見られる。これは k_{sm} が低い下層のシリカ100内における間隙圧力の増加を意味するものである。

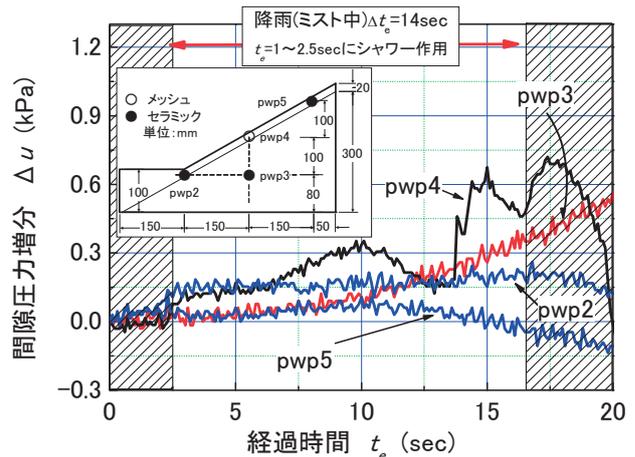


Fig. 17 Pore pressure responses with 30mm/hr of interpreted precipitation intensity in model ground of Toyoura sand overlaying on silica100.(Cs3). シリカ100の表層に豊浦砂を有する模型地盤の換算降雨強度(r_s) 30mm/hrによる間隙圧力増分(θ_u)

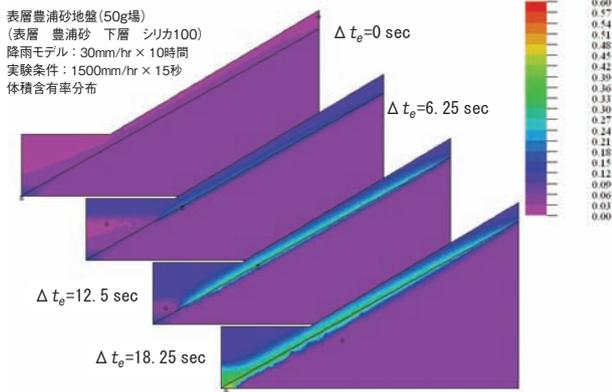


Fig. 18 Result of numerical simulation of volumetric water content distributions in Cs3.
Cs3における体積含水率分布の数値解析結果

Fig. 18に示す同条件における不飽和浸透解析の結果を見ると、 t_e の経過に伴って表層の体積含水率 (θ_v) には増加が見られる。そして θ_v の値は下層との境界付近で大きくなっている。さらに $\Delta t_e=18.25\text{sec}$ では θ_v の値が大きな分布領域が境界の勾配に沿って下流側に推移する様子が見られる。

従って、表面から下向きに浸潤した降雨は下層境界に到達した後に、勾配に沿って流下したと考えられる。 $pwp3$ における Δu の増加はこの過程において発生した。すなわち、下層のシリカ100地盤に対する閉塞効果の発生に連動して $pwp3$ の Δu は増加したと見られ、先のCs1と同様な現象の発生を確認することができる。

Fig. 19はCs4における pwp の応答を示す。この実験においても $t_e=1\sim 6\text{sec}$ において先のCs3と同様なソレノイドバルブの動作不良によりシャワー状態の降雨が作用する問題が生じた。これ以降の実験ではソレノイドバルブ

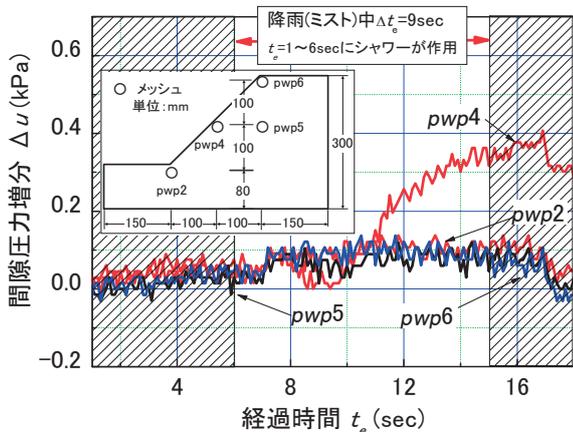
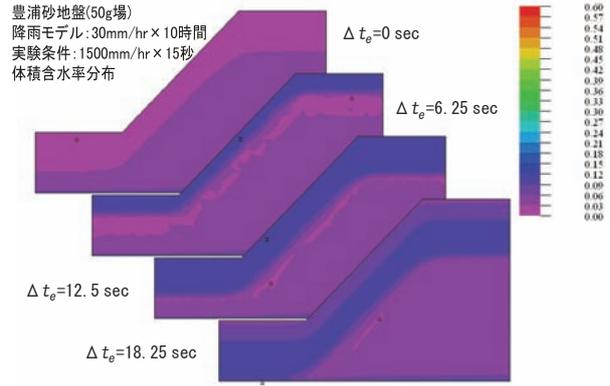
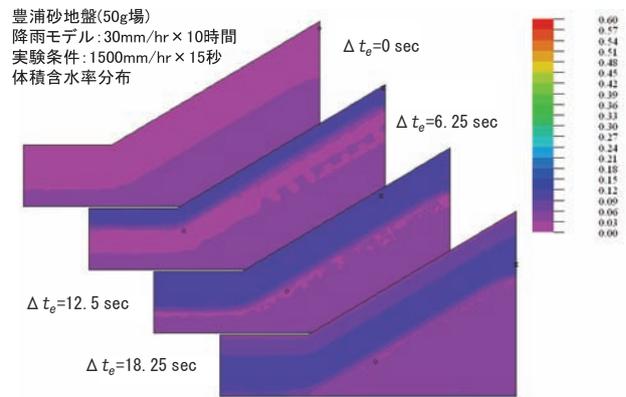


Fig. 19 Pore pressure responses with 30mm/hr of interpreted precipitation intensity in model ground of Toyoura sand (Cs4).
豊浦砂地盤の換算降雨強度 (r_p) 30mm/hrによる間隙圧力増分 (Δu)



a) 45 degree of slope inclination (Cs4).



b) 30 degree of slope inclination (Interpreted Cs3).

Fig. 20 Result of numerical simulation of volumetric water content distributions in model ground by Toyoura sand.
豊浦砂地盤における体積含水率分布の数値解析結果

を交換し、動作不良の問題が解決されている。

Cs4は豊浦砂で作製した模型地盤に勾配が45度の斜面を与えた実験である。斜面中央部に配置した $pwp4$ の Δu には増加が見られ、Cs3と類似が見られる。一方、その他の $pwp2, 5, 6$ については Δu に顕著な反応が見られない。Cs3に見られた間隙の閉塞効果による地盤内部の Δu 増加がCs4のケースには見られない。これは豊浦砂のみで作製した地盤は透気性が高く、閉塞効果が生じにくいことを示している。

Fig. 20のa) は不飽和浸透解析による θ_v の分布を示す。降雨の作用に伴って斜面表面に θ_v の増加が見られる。そして $\Delta t_e=12.5\text{sec}$ では浸潤領域の分布に広がりが見られる。しかし、 θ_v の値に着目すると最大値と最小値の差は約5%程度であり、顕著な差は生じていない。さらに、 $\Delta t_e=18.25\text{sec}$ では斜面表面付近の θ_v の値は減少を示しており、降雨が斜面内部に速やかに消散していることがわかる。Fig. 20のb) は豊浦砂の模型地盤に30度の斜面勾

配を与えた場合を示す。 Δt_e の増加に対する θ_s 分布の変化には、先の45度勾配のケースと類似が見られ、斜面勾配の違いが液体の浸潤に与える影響は少ないことがわかった。

従って、 k_{sm} の値が相対的に大きなCs4では透気性も高いために先のケースで見られた閉塞効果はほとんど生じなかったものと思われる。

4.2.2 表層ひずみ

Fig. 21はCs3における表層ひずみ計 (sps) の応答ひずみ増分 (r_s) を示す。なお、この実験では先にも述べた通り、初期部分にシャワー状の降雨が作用し、 r_s には大きな反応が現れた。しかし本研究ではミスト状に再現した標準降雨による斜面の不安定化を議論の対象とすることから、ミスト開始($t_e=2.5\text{sec}$)後の r_s 増分(Δr_s)についてデータを再整理し、考察する。

t_e の経過に伴って Δr_s には減少が見られる。先にも述べた通り、これはspsが反時計回りの向きに曲げ変形したことを意味する。 Δr_s の減少は降雨の作用中のみ発生している。従って、降雨の終了にともなって Δr_s の減少は収束したことを意味する。sps4は5つのsps中で最も大きな減少を示したが、その曲線には屈曲点が見られず、顕著な変形は発生していない。

Photo 15はCs3の降雨終了直後における斜面の様子であり、容器内には浮遊するミストが見られる。斜面には変形がほとんど見られず、 Δr_s の計測結果とも一致するものである。また、降雨初期のシャワー作用により生じた凹みが写真の左側に2カ所見える。これらは50g場における水滴の落下による衝撃を示している。

Fig. 22はCs4における r_s の応答増分 (Δr_s) を示す。5つのspsではCs3と同様に Δr_s の減少が見られ、この減少は降雨の終了に伴ってほぼ収束している。

Cs1とCs2の変形挙動ならびに、Cs3とCs4の変形挙動にはそれぞれ一致が見られた。すなわち斜面表層の変形は表層地盤の透水性に依存する傾向が確認された。ここで Δr_s 応答値における正負の違いについて考察を述べる。

斜面変形の深さ範囲、すなわち変形範囲がspsの貫入長さに比べて浅い場合は Δr_s が正の値、すなわち凸状に変形する傾向が見られる。一方、その反対に変形範囲がspsの貫入長さよりも深い場合は Δr_s が負の値を示す傾向が見られる。従って、先のシリカ100で作製した模型地盤 (Cs1とCs2) において、 Δr_s が正の値を示した理由は、崩壊が斜面表層から深さ1から2cm程度で発生し、この値はspsの長さ3.5cmよりも小さいために、 Δr_s は正の値を示したものと見られる。一方、豊浦砂による模型地盤 (Cs3とCs4) では、せん断変形が斜面内部で大きく生じたために、表層では相対的に減少傾向となり Δr_s は負の値を示したと考えられる。なお、崩壊の発生深さとsps

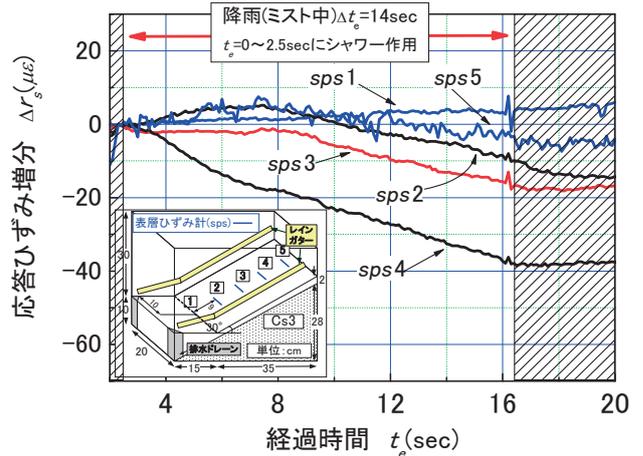


Fig. 21 Reaction of sps by precipitation in model ground of Toyoura sand overlaying on silica100.(Cs3). シリカ100の表層に豊浦砂を有する模型地盤における降雨によるspsの応答(Cs3)

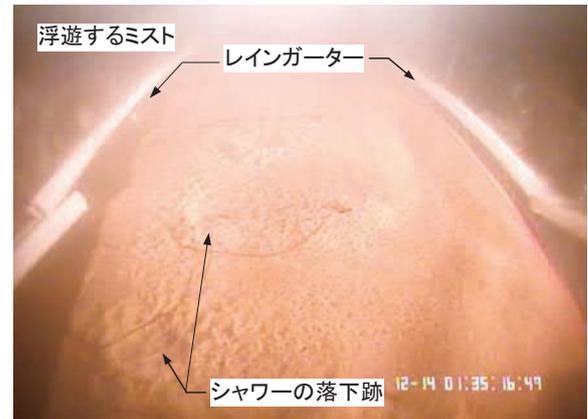


Photo 15 No failure slope by precipitation in Cs3. 降雨により崩壊の見られないCs3の斜面

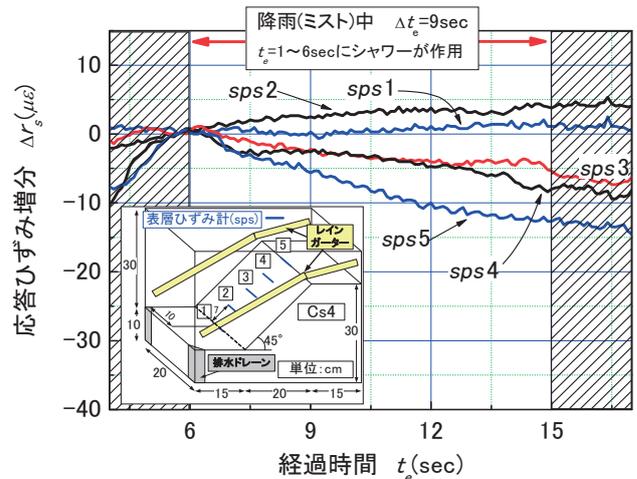


Fig. 22 Reaction of sps by precipitation in model ground of Toyoura sand.(Cs4). 豊浦砂の模型地盤における降雨によるspsの応答(Cs4)

長の相対的な関係により Δr_s の応答が異なる傾向は、別
に実施した法先の掘削による斜面の崩壊実験においても
確認された²²⁾。

4.2 シリカ100の模型地盤にシリコンオイルの降雨 を与えた実験

本実験では模型地盤をシリカ100により作製した。実験
Cs5の模型地盤をFig. 23に示す。斜面は30度の勾配
を有し、地盤の作製条件はCs1と同じである。Fig. 25は
実験Cs6の模型地盤でありCs2と同様に45度の勾配を有
するが、斜面天端部には石膏ブロックを配置し、天端上
面には不透水な境界条件が与えられている。

降雨に用いたシリコンオイルは水の50倍の粘性を
有する。本実験では $r_m=r_p=30\text{mm/hr}$ 条件の降雨を Δ
 $t_e=12\text{min}$ 与えた。なお先に定義した降雨浸透指標 (I_r)
の値は1.78であり、Cs1およびCs2と同じ条件である。
本節ではこの実験における pwp と sps の計測結果を述べる。

Fig. 24のa) とb) は長さが異なる2種類の sps により得
られた降雨時の応答 (r_s) を示す。 $t_e=2\text{min}$ より降雨が作

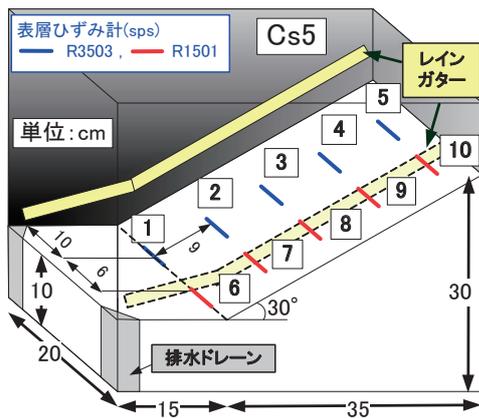


Fig. 23 Allocation of sps and pwp installed in
model ground (Cs5).
模型地盤に設置した sps と pwp (Cs5)



Photo 16 Front view of slope failure by
precipitation of silicon oil mist (Left: Prior
to precipitation, Right: after precipitation).
シリコンオイルの降雨ミストにより発生し
た斜面崩壊を正面から見た様子(左: 降雨
前, 右: 降雨後)

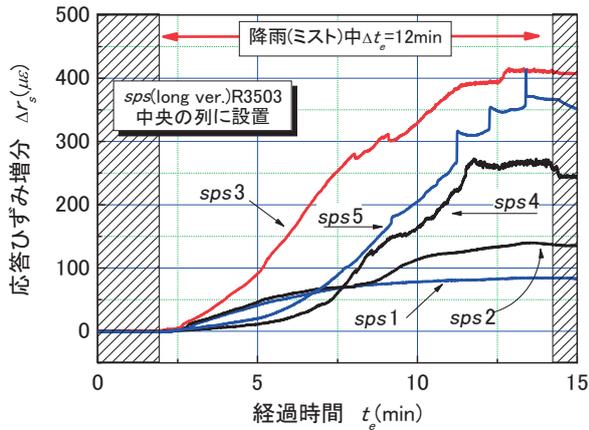
用した。 Δr_s と t_e の間にはなだらかな曲線関係が見られ、
 Δr_s は正の増加を示す。この結果は、降雨に水を用いた
場合の結果、すなわちFig. 15と一致している。しかし、
 Δr_s の最大値は水使用の場合に比べて全体的に大きく現
れている。すなわち、斜面全体には大きな変形が生じた。
Photo 16は降雨を作用させた前後における斜面の様子
を比較して示す。斜面の中腹から上方にかけて深く削ら
れたような崩壊が見られ、下方には崩壊した土砂が堆積
している。

斜面の中央の列に設置した sps の応答をFig. 24のa)
に基づいて考察する。R3503タイプの sps について、同一
 t_e における Δr_s の値を比較すると $sps3$ の応答が最も大き
く現れている。すなわち、これは斜面の中央高さにおい
て sps が最も顕著な反応が現れたことを意味する。そして、
降雨初期の $t_e=5\text{min}$ における Δr_s を比較すると、法
先近傍の $sps1$ と $sps2$ の応答は法肩近傍の $sps4$ と $sps5$ に
比べて大きい。この原因は斜面に浸潤した液体が表層を
流下して法先付近に集中したために、法先近傍の飽和度
が早く上昇し、変形が生じたと考えられる。一方、後半
の $t_e=8\text{min}$ 以降では、法先近傍と法肩近傍における Δr_s
の大小関係が逆転している。降雨後半において法先近傍
の Δr_s の増加勾配が減少した理由は、崩壊土砂が法先近
傍に堆積したために sps が埋没し、変形が抑止された結
果、応答は小さくなったと考えられる。

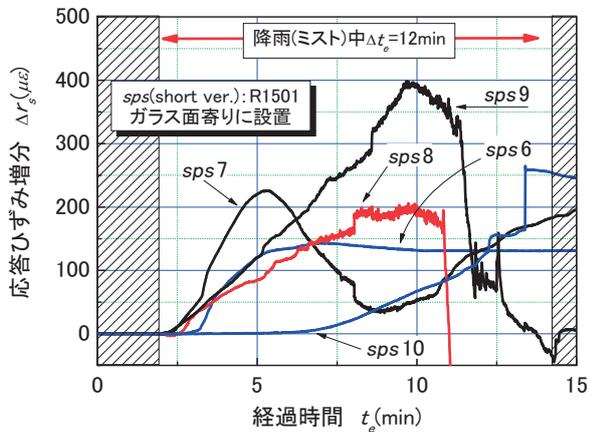
Photo 17は側面から見た模型地盤の様子を示す。降
雨後の状況(右側の写真)より、斜面の上部が削り取ら
れるように崩壊し、試料は法先近傍に堆積する様子を確認
できる。また、斜面表層には液体の浸潤が見られ、崩
壊は浸潤領域の内部で連続的に発生したことがわかる。

次に長さが短い sps により得られた応答について考察
を述べる。中央列から6cmガラス面寄りの列位置に長さ
が15mmの sps 、R1501タイプを5個設置した。Fig. 24
のb)はこの sps の応答を示す。R1501タイプも降雨の
作用により生じた斜面の不安定化に敏感な反応を示して
いる。 Δr_s の応答は正の値を示しており、R3503タイプ
と同様な反応が得られている。ところで、R1501にお
ける応答のピークはR3503に比べてその発生時刻が早
い。すなわち、降雨の作用前半である $t_e=2$ から5minに
おいて、 Δr_s に一樣な増加が見られるが、その後には減
少を示している。 $t_e=5\text{min}$ 付近における $sps7$ の減少は崩
土に覆われたことによる反応である。 $t_e=10\text{min}$ にお
ける $sps8$ と $sps9$ の減少は、斜面の流動的崩壊により sps
が突出し、その後、脱落したことを示している。従って、
降雨による斜面の不安定化を短尺の sps で計測すること
は可能であり、洗掘により sps が脱落すると計測は限界
となることがわかった。

Fig. 26は斜面勾配が45度のCs6における sps の応答を
同様に示す。降雨の作用に伴って Δr_s は正の増加を示し、



a) Long *sps* of R3503 type installed in center of row.



b) Short *sps* of R1501 type at row between center and boundary of transparent.

Fig. 24 Reaction of *sps* by precipitation of silicon oil in model ground of silica 100.(Cs5). シリカ100の模型地盤にシリコンオイルの降雨を与えた時における*sps*の応答(Cs5)



Photo 17 Side view of slope failure by precipitation of silicon oil mist (Left: during precipitation, Right: after precipitation). シリコンオイルの降雨中における斜面崩壊を側面から見た様子(左:降雨中, 右:降雨後)

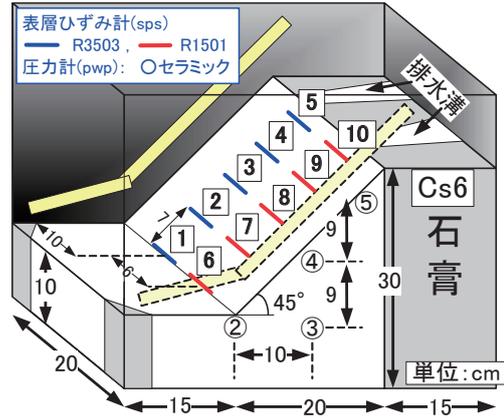


Fig.25 Allocation of two kinds of *sps* installed in two different rows of slope(Cs6). 斜面上の2つの列に設置した2種類の*sps*の配置(Cs5)

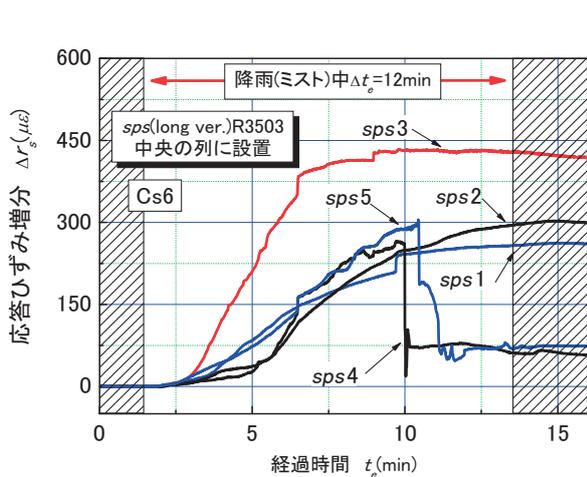
斜面の中央高さに設置した*sps*3が最も顕著な増加を示す。これらの反応はCs5に類似しており、 Δr_s の値もほぼ同じである。Fig. 26の a)とFig. 24の a)を比較すると、Cs6では Δr_s 曲線の傾きがCs5よりも大きく、またピークの時刻も早く現れている。すなわち、シリコンオイル使用の実験においては、勾配(θ_s)が大きいほど斜面の不安定化は早く生じており、水使用の場合には見られない傾向が観察された。

先に示したFig. 15の浸透解析より明らかな通り、鉛直方向に卓越して浸透することにより形成される飽和層の厚さは、 θ_s の増加に伴って薄くなる。

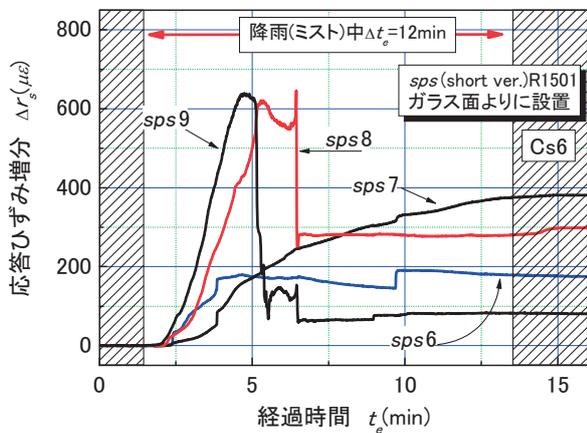
従って θ_s が45度の斜面では30度の場合に比べて定性的に崩壊が早く、薄く発生することが容易に推定できる。Fig. 26の b)はR1501タイプの*sps*による応答を示す。R3503と同様に Δr_s は正の増加を示し、その値は法肩近傍に設置した*sps*8と*sps*9に顕著な増加が見られるが、法先近傍の*sps*6と*sps*7は小さい。また Δr_s の増加勾配は大きく、ピークの発生時刻も早くなっている。従って Δr_s には*sps*の長さの違いによらず応答傾向に一致が見られる。

Photo 18はCs6における崩壊後の*sps*の状況を示す。法肩近傍に設置した*sps*は完全に露出している。これは崩壊に伴って突出化が進み、最終的に流下したことを示している。その様子は Δr_s の応答曲線が途中で無反応となったことから推察できる。

Fig. 27はCs6における間隙圧力増分(Δu)の応答を示す。降雨の作用に伴って各*pwp*には Δu の増加が見られる。しかしながら、曲線は降雨の初期に大きな増加勾配を示すものの、 t_e の増加に伴って減少している。これは、斜面が連続的に崩壊したために、間隙を閉塞する圧力がそれほど高まらなかったことを示している。



a) Long *sps* of R3503 type installed in center of row.



b) Short *sps* of R1501 type at row between center and boundary of transparent.

Fig. 26 Reaction of *sps* by precipitation of silicon oil in model ground of silica 100 (Cs6). シリカ100の模型地盤にシリコンオイルの降雨を与えた時における*sps*の応答(Cs6)

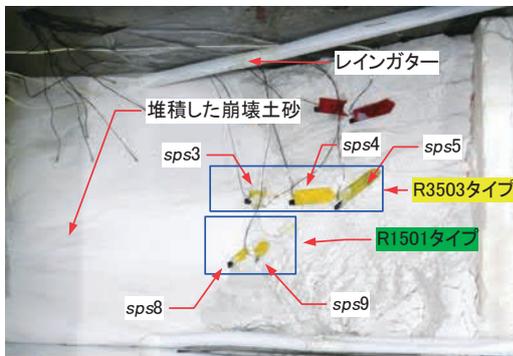


Photo 18 Overview of *sps* in failed slope by precipitation of silicon oil mist (Cs6). シリコンオイルの降雨により崩壊した斜面の様子

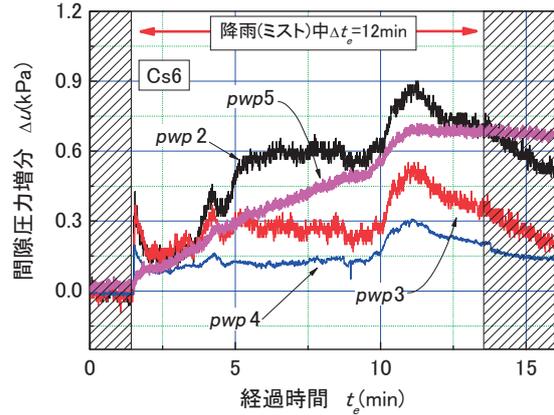


Fig. 27 Pore pressure response by precipitation of silicon oil mist in model ground of silica 100 (Cs6). シリカ100の模型地盤にシリコンオイルの降雨を与えた時の間隙圧力の応答(Cs6)

6. 降雨による斜面の不安定化条件

6.1 降雨液体の違いが崩壊時刻に与える影響

Fig. 28は崩壊開始までの経過時間比 (R_t) と斜面に設置した*sps*と法肩の間の距離 (D_s) の関係を示す。 R_t は降雨の作用時間に対する崩壊開始までの経過時間 (Δt_{ef}) との比であり、降雨時間 (Δt_e) は水使用の場合が15sec、シリコンオイル使用の場合12minである。すなわち、 D_s と R_t の関係は崩壊伝播に関する時間と距離の関係を意味するものである。

降雨に水を使用した実験について、斜面勾配が異なるCs1とCs2を比較する。両実験からプロットした点はそれぞれ直線的に位置しており、その傾きにはほぼ一致が見られる。これは、斜面上方より発生した崩壊が下方へと伝播した様子を示しており、土石流に似た現象が見られる。一方、両実験ではこの伝播速度に顕著な差は見られない。2つの近似直線と R_t 軸の交点を崩壊開始時刻比 (R_{ts}) と定義すると、斜面勾配 (θ_s) が小さいCs1では R_{ts} の値が小さい。

次に、シリコンオイルを使用した実験Cs5とCs6により同様な比較を行う。プロットした点はほぼ垂直に分布しており、崩壊伝播には液体の違いによる差が見られる。すなわち、Cs5とCs6では斜面全体がほぼ同時に崩壊を開始している。

R_{ts} の値を比較すると、 θ_s の違いによる顕著な差は見られないが、水使用の場合と同様に斜 $\theta_s=30$ 度のケースが R_{ts} の値は相対的に小さい。

6.2 透水係数 (k) と降雨強度 (R) が崩壊に与える影響

斜面勾配と k_{sm} がそれぞれ異なる条件の実験について結果を実大換算して整理し、崩壊に与える k_{sp} と r_p の影響を考察する。

Fig. 29は降雨浸透指標 ($I_r=k_{sp}/r_p$) と累計ひずみ (A_s) の関係を示す。ここで、 A_s とは斜面中央に設置したspsのうち、法肩と法先部のものを除いた中央部3点、すなわちsps2からsps4について、その最大応答増分を合計した値 ($\sum (\Delta r_{s,max} - \Delta r_{s,ini})$) であり、崩壊の規模を概略的に示す。 I_r の値が1付近の時は地盤の透水能力と降雨強度が等しい場合であり、例えば、激しい降雨の状態を意味する。豊浦砂で作製した地盤は $I_r=50$ である。すなわち $k_{sp} \gg r_p$ の条件である。この地盤では A_s の値が2つの斜面勾配において約20を示しており、変形の発生が小さかったことを示している。一方、シリカ100で作製した地盤は $I_r=1.78$ である。すなわち、 k_{sp} と r_p の値が近接した条件であり、 A_s の値には大きな増加が見られる。

同一斜面勾配であるが I_r の違いによって A_s の値に差が生じた原因は斜面表層における飽和度分布の違いによって説明することができる。

Fig. 30は不飽和浸透解析により求めた降雨の作用終了時における飽和度 (S_r) の分布を示す。斜面表面からの深さ (D_a) に対する S_r の分布を見ると、シリカ100地盤では D_a が1.0cm付近において S_r の値が70%以上と高くなっている。 I_r の値が小さい条件では斜面の表層付近で地盤が飽和化することを示している。

一方、豊浦砂地盤では I_r の値が大きいため S_r の値は表層全体で小さい。なお、表層の豊浦砂の下層にシリカ100を与えたCs3では、下層との境界に向かって S_r の値には増加が見られる。これは、 I_r の値が大きい一見安全な地盤では、表層下部の透水性が安定性の重要なファクターとなることを示している。すなわち、斜面の内部に

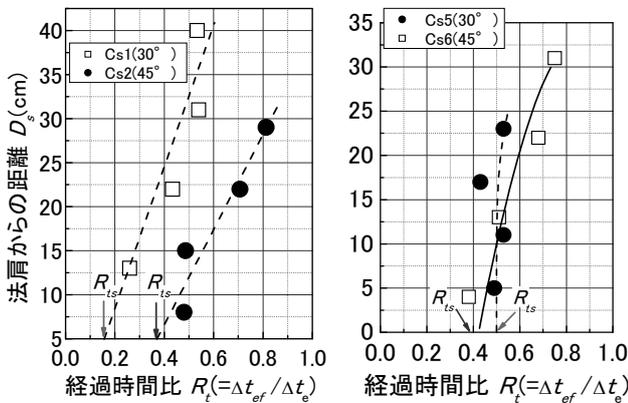


Fig. 28 Relationship between failure allocation on the slope and elapsed time ratio at failure occurrence.
勾配の違いによる崩壊時刻と距離の関係

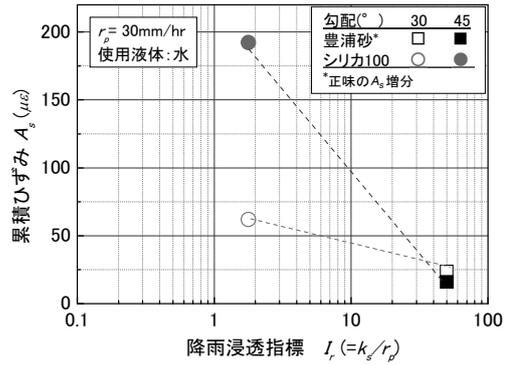


Fig. 29 Relationship between index of precipitation conductivity (I_r) and accumulative shallow strain (A_s) in slopes made of silica 100 and Toyoura sand.
シリカ100と豊浦砂で作製した地盤における $I_r - A_s$ 関係

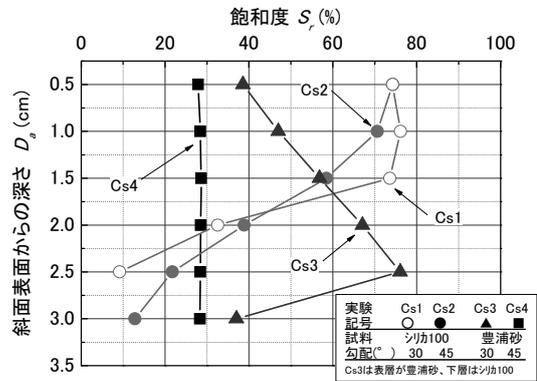


Fig. 30 Numerical calculation results of relationship between degree of saturation (S_r) and distance from slope surface (D_a).
不飽和浸透解析により求めた飽和度 (S_r) と斜面表面からの深さ (D_a) の関係

ある透水性の低い地層の存在が表層との境界付近の S_r を増加させ、斜面を不安定化させることが明らかになった。

以上より、降雨浸透指標 (I_r) は降雨が斜面の不安定化に与える影響を概略的に表せることがわかった。すなわち、 I_r の増加に伴って A_s には減少することがわかった。なお I_r の値が1よりも大きい場合においても下部層の k_{sp} が小さい場合は不安定化する。従って I_r 増分に対する A_s 減少割合は斜面勾配や内部の地層構成にも影響を受けることが明らかになった。

6.3 勾配の違いが崩壊規模に与える影響

粘性が異なる液体を勾配が異なる2つの斜面に噴霧し、発生した A_s の値にの比較に基づいて実験手法に関する考察を述べる。

Fig. 31は累計ひずみ (A_s) と斜面勾配 (θ_s) の関係を示す。水使用とシリコンオイル使用の2つの実験では A_s の

値に大きな差が見られ、崩壊の規模には液体の違いによる差が生じた。前述の通り水使用の実験では、明確な浸潤が観察されず、斜面の表面は薄く流れるように崩壊した。一方、シリコンオイル使用の実験では、液体の明確な浸潤が見られ、崩壊の規模は相対的に大きく再現された。シリコンオイルの潤滑性が内部摩擦角を減少させることによって崩壊規模は増大して再現されたと考えられる。従って、液体の違いにより生じた浸潤と潤滑性の差が崩壊の規模に影響をすることがわかった。

次に、それぞれの液体条件について、 θ_s と A_s の関係を見ると、 θ_s の増加に対する A_s の増加を見ると、水使用の場合は1.5倍、シリコンオイル使用の場合は1.2倍程度であり、顕著な増加は見られない。従って、 θ_s の違いが A_s に与える影響は I_r が A_s に与える影響に比べて小さいと言える。

以上より、飽和条件の相似則に基づいて、粘性が異なる液体で崩壊を再現すると、その崩壊規模と挙動には差が生じることがわかった。

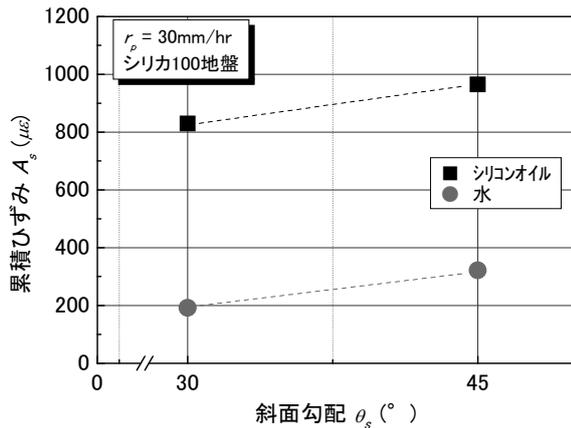


Fig. 31 Relationship between slope angle (θ_s) and A_s caused by precipitations both water mist and silicon oil mist on slope of silica 100.
異なる液体で再現した降雨が斜面勾配と累積ひずみの関係に与えた影響

7. まとめ

本研究で得られた結果を以下に要約する。

7.1 遠心場降雨装置の開発について

- 1) 加圧した液体と空気を噴霧ノズルに与えることによって、雨滴の粒径が $20\mu\text{m}$ の微霧を発生可能な降雨装置を開発した。この装置は水タンクを備え、遠心場における液体の供給圧力の精度を高められているとともに、大量な空気の供給をコンプレッサーと空気ポンペの併用によって可能にした。
- 2) 50g場における降雨実験を行った。雨滴の粒径の減少によって降雨の载荷圧力が5kPa程度以下に低減され、衝撃的な降雨の作用により斜面が崩壊する問題を解決できた。
- 3) ノズルの本数とその角度を最適に設置することにより、コリオリ力の作用による降雨分布の偏りを補正して、ほぼ均一な降雨分布を再現できた。

7.2 豪雨による崩壊メカニズムの実験的観察について

- 1) 地盤の内部に間隙水圧計 (pwp) を設置して、間隙圧力を計測した。 pwp の受感部前面にメッシュとセラミックディスクを与えた2つのことなるタイプを用いた。透水性が相対的に低い地盤では、降雨による閉塞効果が間隙圧力を増加させることを確認した。
- 2) 小型薄鉄片にひずみゲージを貼り付けた表層ひずみ計を用いて斜面の変動を計測した。得られた応答ひずみ (r_s) に基づいて、斜面の崩壊伝播特性と累積ひずみ (A_s) を解析し、降雨による斜面の不安定化メカニズムを考察した。
- 3) 水使用の実験では斜面に明確な浸潤の様子が見られず、崩壊は斜面表面が薄く群発的に崩壊する様子が見られた。一方、シリコンオイル使用の実験では浸潤が確認され、連続的な表層崩壊が発生した。2つの実験を比較すると、崩壊規模はシリコンオイル使用において相対的に大きく再現された。

7.2 豪雨時における斜面の表層崩壊リスクについて

- 1) 実大の降雨強度 (r_p) に対する飽和透水係数 (k_{sp}) の比を降雨浸透指標 (I_r) と定義し、降雨と地盤の透水性の比較による斜面の不安定化性状を考察した結果、 I_r は表層斜面の潜在的な崩壊危険性を評価するうえで有効な指標となりうることがわかった。
- 2) I_r の増加に伴って A_s は減少することがわかった。すなわち、 I_r の値が小さい条件において、斜面表層に生じる不安定化は大きくなることがわかった。
- 3) 一方、 I_r の値が大きい地盤と降雨の条件では表層崩壊が発生する可能性は小さい。しかし、表層下部に k_{sp}

の小さい地層が存在すると、地層境界付近に飽和度の上昇が生じる。従って、 I_r の値が大きい条件では、下層の地層構成とその k_{sp} を考慮して危険性を評価する必要がある。

- 4) 斜面勾配 (θ_s) の増加に伴って A_s には増加が見られるものの、その割合は小さい。従って、 θ_s が斜面の不安定化に与える影響は I_r に比べて顕著ではなかった。

7.4 降雨時における斜面工事のリスクについて

- 1) 中小規模の斜面工事では必ずしも地中内の土質分布が明らかでない場合も多く、地中内部における浸透水の分布や移動の解析は容易でない。しかし、このような施工現場においても斜面災害に対する防止措置が必要であり、少なくとも降雨時における表層の短期的安定性については検討の必要があると考える。
- 2) 例えば、降雨と作業実施の判断については次のような検討方法が考えられる。施工斜面の表層土質を目視により大まかに判別し、その飽和透水係数 (k_{sp}) は対応表などに基づいて概略を推定する。次に降雨強度 (r_p) を天気予報により情報収集する。そして $I_r (=k_{sp}/r_p)$ が設定された閾値以下の場合には作業を中止する。検討方法が容易であり適用が簡易である。なおこの閾値については I_r の不確実性と設定する安全レベルによって変動し、今後検討が必要である。
- 以上の通り、本研究では斜面表層の飽和度上昇による不安定化に着目し、遠心場降雨実験による崩壊メカニズムの調査を行った。なお本実験では土の粘着力成分が安定性に与える効果は考慮されておらず、またサクシオンに伴う水平方向の水移動が鉛直方向に比べて小さく現れている。従って、実大スケールにおける評価では補正が必要であり、今後引き続き検討したいと考えている。

謝辞

本研究の実施において武蔵工業大学大学院 片田敏行教授ならびに末政直晃 教授よりご指導とご協力を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。また武蔵工業大学元学生の齊藤雅英氏と手島昂一郎氏には本研究の中心に位置づけられる遠心場降雨実験の実施とデータの解析において多大なるご協力を頂いた。ここに深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 杉井俊夫, 加藤正司: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測 3. 豪雨時に発生する斜面崩壊のメカニズム (その2), 土と基礎, 地盤工学会, Vol.51 No.8, pp.29-34, 2003.
- 2) 梅村順, 森脇武夫, 杉井俊夫: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測, 2. 近年における豪雨斜面災害の特長 (その2), 土と基礎, 地盤工学会, Vol.51 No.6, pp.17-58, 2003.
- 3) 北村良介: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測, 2. 近年における豪雨斜面災害の特長 (その1), 土と基礎, 地盤工学会, Vol.51 No.5, pp.59-62, 2003.
- 4) 大塚悟, 沖村孝志, 矢田部龍一, 毛利栄征: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測, 3. 豪雨時に発生する斜面崩壊のメカニズム (その3), 土と基礎, 地盤工学会, Vol.51 No.9, pp.46-51, 2003.
- 5) 広島県: 6.29広島県土砂災害対策検討委員会討議資料, 第1回~第4回, 1999.
- 6) 森脇武夫, 寺田秀樹, 谷 茂, 天野浄行: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測, 5. 豪雨時における斜面崩壊危険度予測 (その1), 土と基礎, 地盤工学会, Vol.51 No.12, pp.92-97, 2003.
- 7) 災害復旧工法研究会編: 災害復旧法面対策工法事例集, 社団法人全国防災協会, 1994.
- 8) 久楽勝行, 齊藤義章, 石塚広史: 大型盛土による新島模型実験, 土質工学会, 土と基礎, Vol.28 No.5, pp.33-38, 1980.
- 9) 森野亮宏, 草野国重: 切り取り法面崩壊の早期検知手法に関する模型実験, 土と基礎, 土質工学会, Vol.33 No.12, pp.9-14, 1985.
- 10) 八木則男, 矢田部龍一, 山本浩治: 雨水浸透による現地斜面崩壊実験, 第19回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.1279-1280, 1984.
- 11) 八木則男, 矢田部龍一, 山本浩治: 雨水浸透による斜面崩壊について, 土木学会論文報告集, 第330号, pp.107-114, 1983.
- 12) 林英輝, 奥村康弘, 日下部治, 中瀬明男: 浸透時の斜面の崩壊機構に関する研究, 第19回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.1283-1286, 1984.
- 13) 奥村康宏: 降雨及び浸透による斜面崩壊に関する研究, 東京工業大学修士論文, 1986.
- 14) 鹿子木清: 盛土の降雨時安定性に関する研究, 東京工業大学修士論文, 1987.
- 15) 神品英夫: 豪雨時の斜面の崩壊機構に関する基礎的研究, 東京工業大学修士論文, 1990.

- 16) Goodnigw,D.J: “Relationships for Centrifugal Modelling of Seepage and Surface Flow Effective on Embankment Dams” , Geotechnique, Vol.32, pp.149-152, 1982.
- 17) Tan, T.S. and Scott, R.F: “Centrifuge Scalling Considerations for Fluid-particle systems” , Geotechnique, Vol.35, pp.461-470, 1985.
- 18) Atlas,D. and C.W. Ulbrich : “Path-and Aera-Integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3cm band” , J. Appl. Meteor., Vol.16, pp.1322-1331, 1977.
- 19) 株式会社いけうち, <http://www.kirinoikeuchi.co.jp/technical01.html>
- 20) 水野 量：雲と雨の気象学, 朝倉書店, PP.58-69, 2003.
- 21) 市村宗武：力学, 朝倉書店, pp.104~117, 1994.
- 22) 玉手 聡, 遠藤 明：斜面工事における簡易な安全監視のためのスクリー貫入型表層ひずみ計の開発とその適用性に関する実験的研究, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, JNIOSSH-SRR-No.35 (2007), pp.107-128, 2008.
- 23) 堀井宣幸, 玉手 聡, 豊澤康男：遠心載荷試験装置を用いた飽和粘性土模型地盤の崩壊時の変形挙動, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-92, pp.63-74, 1993.
- 24) 谷 和夫, 龍岡文夫, 山口 順：砂地盤上の帯基礎の模型支持力実験(第2報), 第21回土質工学研究発表会, pp.1165-1168, 1986.
- 25) 八木則男, 矢田部龍一, 山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊, 土木学会論文報告集, 第330号, pp.107-114, 1983.
- 26) K. Soga, J. Kawabata, C. Kechavarzi, H. Coumoulos, and W. A. P. Waduge : Centrifuge Modeling of Nonaqueous Phase Liquid Movement and Entrapment in Unsaturated Layered Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 2, pp. 173-182, 2003.

(平成19年7月30日受理)