

降雨によるまさ土斜面の浸透・崩壊に関する 室内土槽試験

SOIL TANK TESTS ON SEEPAGE AND FAILURE BEHAVIOR OF MASA SLOPE
DUE TO RAINFALL

酒匂 一成¹・須田 剛文²・里見 知昭³・深川 良一⁴・北村 良介⁵

Kazunari SAKO, Takefumi SUDA, Tomoaki SATOMI, Ryoichi FUKAGAWA and Ryosuke KITAMURA

¹立命館大学総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: kaz-sako@fc.ritsumei.ac.jp

²立命館大学大学院理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: rd003049@se.ritsumei.ac.jp

³立命館大学大学院理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: rd005010@se.ritsumei.ac.jp

⁴立命館大学工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: fukagawa@se.ritsumei.ac.jp

⁵鹿児島大学工学部 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: kitamura@oce.kagoshima-u.ac.jp

Key words: Slope failure, Rainfall, Pore-water pressure, Soil tank test

1. はじめに

近年、わが国では、梅雨期や台風襲来期の大雨による斜面崩壊が多発している。降雨時の斜面崩壊のほとんどは、すべり厚さが数十 cm から数 m 程度である表層すべり型崩壊であり、主な原因は、1) 雨水の浸透による土塊自重の増加、2) サクシヨンの低下 (負の間隙水圧の増加) に伴う見掛けの粘着成分の減少、3) 地下水位上昇に伴う浸透力の増加であると定性的に言われている。

これらの現象を考慮して、松尾ら¹⁾は、降雨により時々刻々と変化する斜面の力学特性を考慮した斜面崩壊予知システムを提案している。図-1 は、斜面崩壊予知システムを確立するためのフローチャートである。本システムは、1) 数値力学モデル^{2),3)}、2) 室内土質試験、3) 現地計測^{4),5)}、4) 室内浸透・崩壊土槽試験⁶⁾、5) 地盤調査・原位置試験から構成されている。本論文で報告する内容は、図-1 に示された予知システムを確立するために行われている一連の研究の中で主に“4) 室内浸透・崩壊土槽試験” (図-1 の(8), (15)に相当) と位置づけられる。そ

こで本論文では、境界条件が明らかな土槽を用いて浸透試験と崩壊試験を行うことにより、降雨時のまさ土斜面の浸透・崩壊挙動について考察を行う。また、本試験結果は、図-1 に示された間隙モデル、浸透モデルを用いた数値シミュレーション結果との比較・検討によるモデルの妥当性の検討に用いられる。崩壊試験結果も同様に土槽試験での崩壊パターン、崩壊時間と粘着モデル、斜面安定解析モデルを用いた数値シミュレーション結果を比較・検討することによるモデルの妥当性の検討に用いられる。なお、土槽試験結果と数値シミュレーション結果の比較、粘着力の変化、崩壊挙動や安全性に関する考察は、別途報告を行う⁷⁾。

2. 室内浸透・崩壊土槽試験

(1) 試験土槽および計測装置の概要

写真-1 に試験土槽、写真-2 に降雨装置を示す。試験土槽の大きさは、幅 100cm×奥行き 150cm×高さ 100cm である。土槽の底面と背面には、合成樹脂製硬質多孔体を

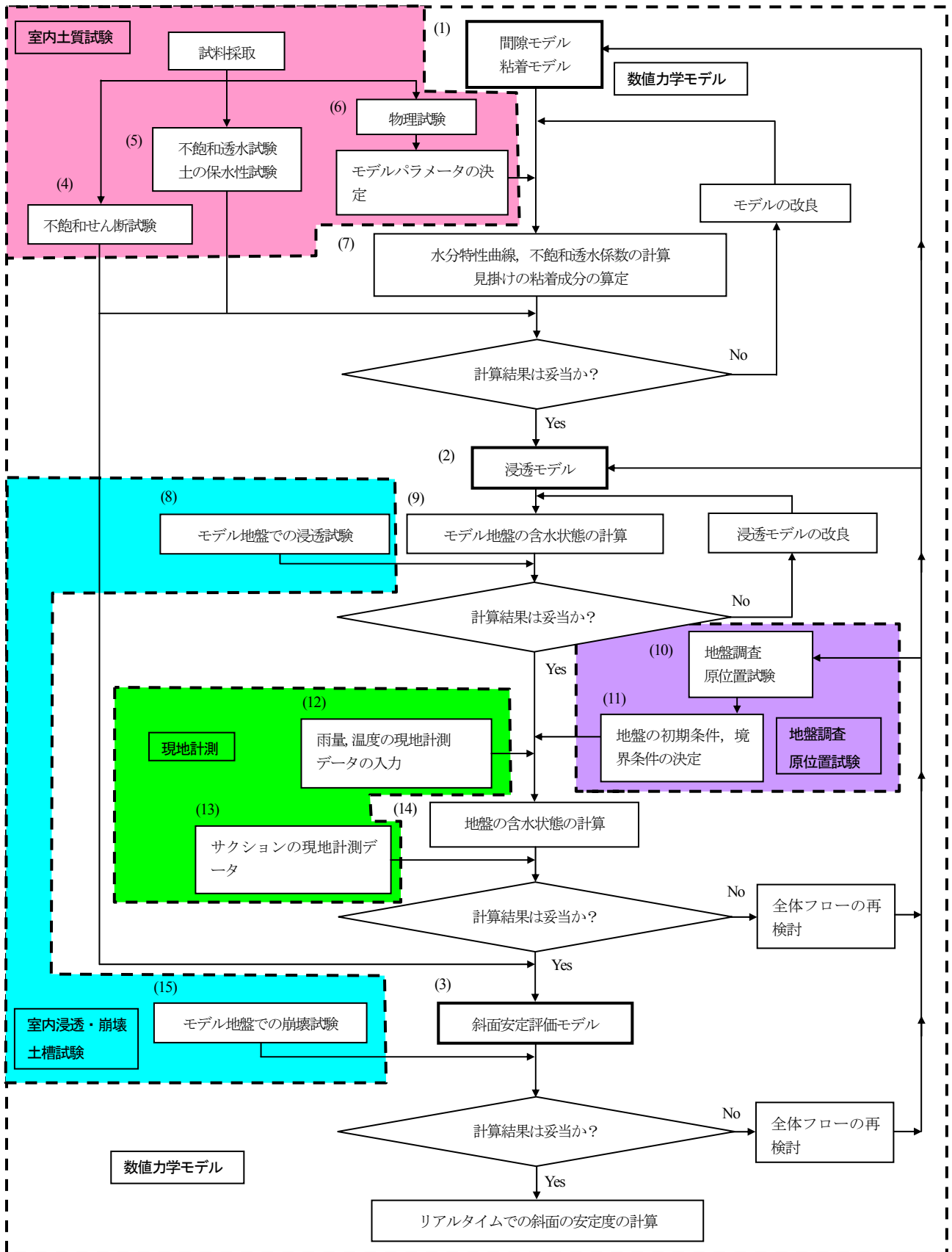


図-1 研究段階における斜面崩壊予知システム¹⁾

素材とする高透水性板と注水・排水のためのタンクがある。また、土槽側面は、強化ガラスおよびステンレス板で構成されており、試験を実施するにあたり、盛土の崩

壊挙動に与える影響を最小限にするため、テフロンシートを敷設した。一方、降雨装置は、水タンク内の流量計を変化させることで降雨強度(mm/hour)を制御すること

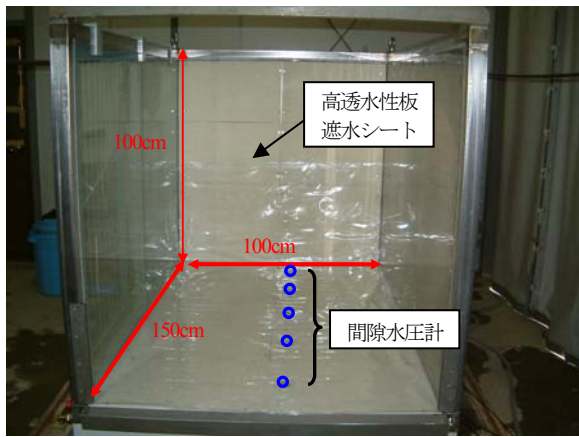


写真-1 試験土槽

表-1 試験条件

試験条件		CASE1	CASE2		
試料条件	試料	信楽産まき土			
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.617			
	自然含水比 w (%)	4.7			
盛土条件	盛土の層構成	一層	二層		
	層	-	A層	B層	
	含水比 (%)	5.0	5.0	5.0	
	湿潤密度 (g/cm ³)	1.6	1.6	1.8	
	斜面勾配 (deg.)	45.0	60.0	45.0	
	透水係数 (cm/sec.)	7.02×10^{-3} (飽和度:75.3%)	7.02×10^{-3} (飽和度:75.3%)	-	
	見掛けの粘着成分 (kPa)	5.63 (飽和度:10.5%)	5.63 (飽和度:10.5%)	-	
	内部摩擦角 (deg.)	18.9 (飽和度:10.5%)	18.9 (飽和度:10.5%)	-	
境界条件	上面	注水			
	法面	注水			
	底面	非排水			
	背面	非排水			
降雨条件	50 mm/hour				

ができる装置である。

本試験に用いる計測機器は、テンシオメータ、誘電率土壌水分計、間隙水圧計であり、盛土内の負の間隙水圧、体積含水率、地下水位の計測を行った。テンシオメータは、セラミック製のポーラスカップを土中に埋設し、パイプやチューブを介して圧力計をつなぎ、内部を脱気水で満たしたものである^{8),9)}。セラミック製ポーラスカップ部分で、土中の間隙水圧とテンシオメータ内の脱気水の圧力が平衡することにより、圧力センサによって土中の間隙水圧を計測することができる。本試験では、テンシオメータ用の圧力計として、測定範囲が0~100kPa、精度が±0.3%FS以下のものを使用した。誘電率土壌水分計は、誘電率から土中の体積含水率を計測するもので、本試験では、計測部位のサイズが長さ5cm×横幅1.8cm×厚さ0.7cm、精度が±3%（キャリブレーション実施時：±1~2%）のものを使用した。テンシオメータおよび誘電率土壌水分計の設置位置については、「(2) 試験条件」で述べる。また、間隙水圧計として、ひずみゲージ式の低容量圧力変換器を用いており、20kPaの定格容量、±0.5%RO以内の総合精度を有し、大気圧補正の必要がない圧力変換器である。間隙水圧計は、写真-1に示すように高透水性板素面部に設置している。今回の試験では、



写真-2 降雨装置

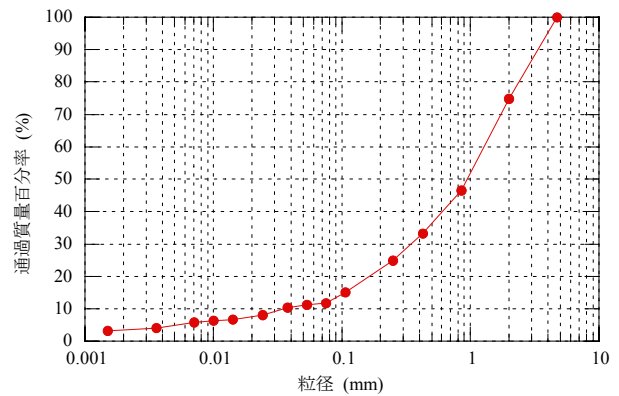


図-2 粒径加積曲線

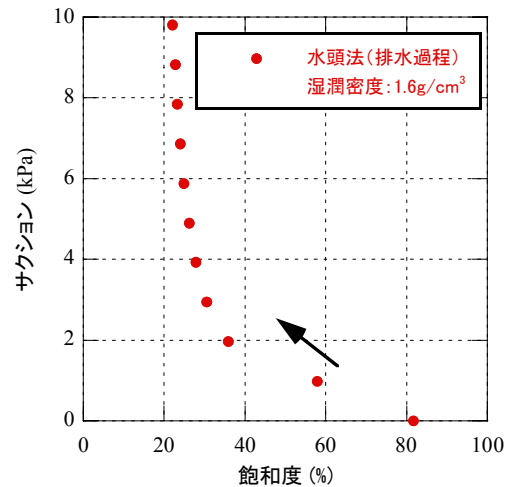


図-3 水分特性曲線 (水頭法, 排水過程)

背面と底面を非排水条件とするために遮水シートを敷設した。なお、間隙水圧計部分は遮水シートを切り取り、高透水性板下にある貯水タンクには水を満たしている。

(2) 試験条件

表-1に試験条件を示す。本試験では、試料として信楽産まき土を5mmふるいで粒度調整したものを使用した。図-2に粒度分布を示す。また、図-3には湿潤密度1.6g/cm³の供試体の水分特性曲線を示している。本論文で報告する試験ケースは、2種類であり、CASE1は含水比5%の

試料を湿潤密度 1.6g/cm^3 で締固めた傾斜角 45° の盛土斜面、CASE2 は A 層、B 層の湿潤密度をそれぞれ 1.6g/cm^3 と 1.8g/cm^3 として、密度差により潜在すべり面を形成した傾斜角 60° の盛土斜面を用いた。降雨条件は、近年の集中豪雨の増加および降雨装置のキャリブレーション結果を考慮して時間雨量 50mm に設定し、それぞれのケースにおける雨水浸透による不飽和地盤内の浸透現象および崩壊現象について観察した。盛土は、木製ランマーを用いて、厚さ 5cm ずつ所定の湿潤密度になるように締固めて作成した⁵⁾。

図-4、図-5 に CASE1 および CASE2 における盛土形状と計測機器設置位置を示す。それぞれ 7 本のテンシオメータが使用され、深さ $20\sim 60\text{cm}$ に設置されている。CASE2 においては、A 層と B 層の境界に誘電率土壌水分計を設置した。

3. 室内浸透・崩壊試験の結果と考察

(1) 一層モデルの結果と考察 (CASE1)

図-6 に 7 本のテンシオメータから計測された間隙水圧の時系列変化を示す。なお、CASE1 においては、底面に設置した間隙水圧計の設定不具合のため地下水位の計測データが得られなかった。図-6 より、浅い部分のテンシオメータから順に間隙水圧が増加し、約 1.0kPa 付近で一定となっている。北村らによるしらすを用いた土槽試験⁶⁾においては、約 3.0kPa で一定となっており、土質によって一定となる値は異なるものと考えられる。また、Orense らによると表層すべり直前には、飽和度が $80\sim 90\%$ まで上昇すると報告されている¹⁰⁾。

崩壊挙動については、深さ 20cm 部分の間隙水圧が増加したあと、法肩部分において亀裂が発生した（注水約 84 分後）。その後、法肩が僅かに沈下していった。注水約 225 分後には、斜面前方から見て右側の法先において小規模な崩壊が発生した。その後、法先崩壊が進行して行き、注水約 242 後に法肩からの大規模崩壊が発生した（写真-3）。図-6 において、注水約 225 分以後は、全ての間隙水圧が $-1.0\sim 1.0\text{kPa}$ の範囲の値を示し、一定の圧力で保持されており、盛土内はほぼ飽和状態で間隙水が土槽底面に溜まっていたものと考えられる。そして、間隙水が法先から流出する際の浸透力の増加により法先部分の崩壊が生じ、法先が崩壊したことにより盛土全体の釣り合いが崩れ、進行性崩壊が発生したと考えられる。

(2) 二層モデルの結果と考察 (CASE2)

図-7 に 7 本のテンシオメータから計測された間隙水圧（図-7(a), (b)）、3 個の誘電率土壌水分計から得られた体積含水率（図-7(c)）および 4 個の間隙水圧計で観測さ

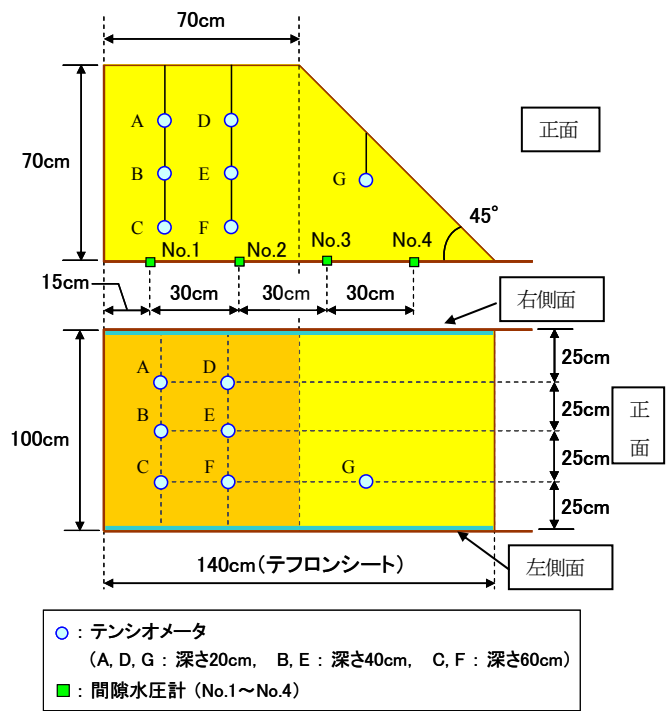


図-4 盛土形状・計測機器設置位置 (CASE1)

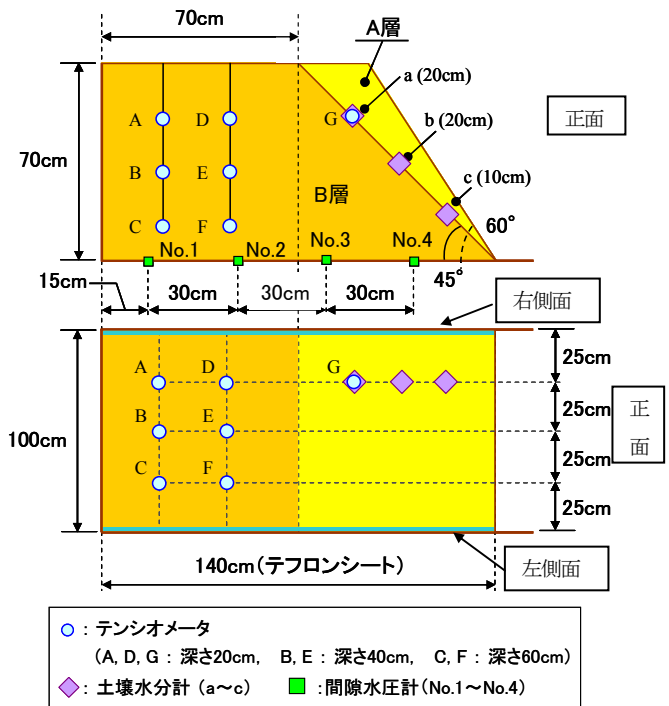


図-5 盛土形状・計測機器設置位置 (CASE2)

れた地下水水位（図-7(d)）の時系列変化を示す。ここで、テンシオメータによる間隙水圧データについては、データ通信として無線を用いた際のノイズが含まれている。

図-7(a), (b)より、ノイズと見られる部分を除くと、盛土法肩部に設置したテンシオメータ（G：深さ 20cm ）のみが、注水約 27 分後から間隙水圧の増加を示している。図-7(c)の誘電率土壌水分計では、注水開始約 4 分後から法先に設置された土壌水分計（c：深さ 10cm ）の体積含

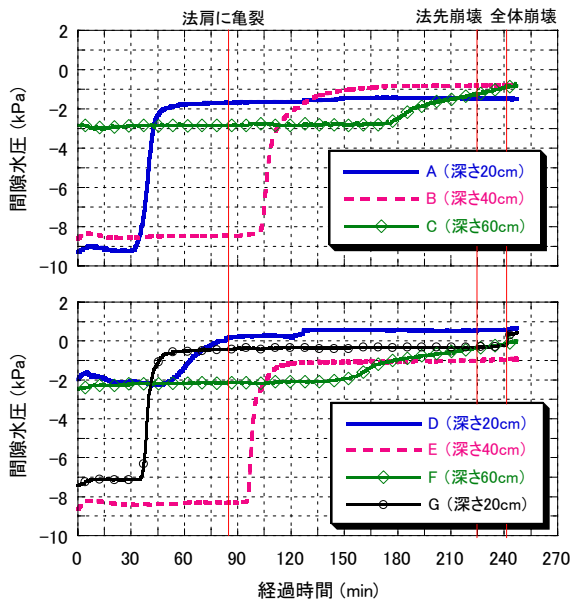


図-6 テンシオメータ計測結果 (CASE1)



写真-3 斜面崩壊発生状況 (注水約 242 分後)

水率が増加し始め、注水約 24 分後に法肩付近の体積含水率 (a: 深さ 20cm) が増加していることが分かる。図-7(d) に示す地下水位は、法先部分に設置されている間隙水圧計 (No.4) において約 1cm の上昇が観測されている。

崩壊挙動については、注水開始約 18 分後に斜面前方から見て左側の法肩付近に亀裂が生じた。注水 21 分後には、法肩からの崩壊が発生した(写真-4)。注水 27 分後には、土壌水分計の設置されている右側の斜面が法肩から崩壊した。図-7 から、注水 27 分後では、潜在すべり面に設置された土壌水分計 (特に、a: 深さ 20cm) の体積含水率が增加し、地下水位の上昇は僅かであるため、CASE2 の崩壊は、雨水の浸透に伴うすべり土塊自重の増加およびせん断強度の低下により発生したものと考えられる。

ここで、図-7(c) の体積含水率の時系列変化を図-8 に示すカラム試験結果により、間隙水圧の時系列変化に変換して考察を行う。カラム試験では、CASE2 の盛土における A 層と同条件で供試体作成を行った。上面より霧吹きにより注水を行い、土壌水分計で体積含水率、テンシ

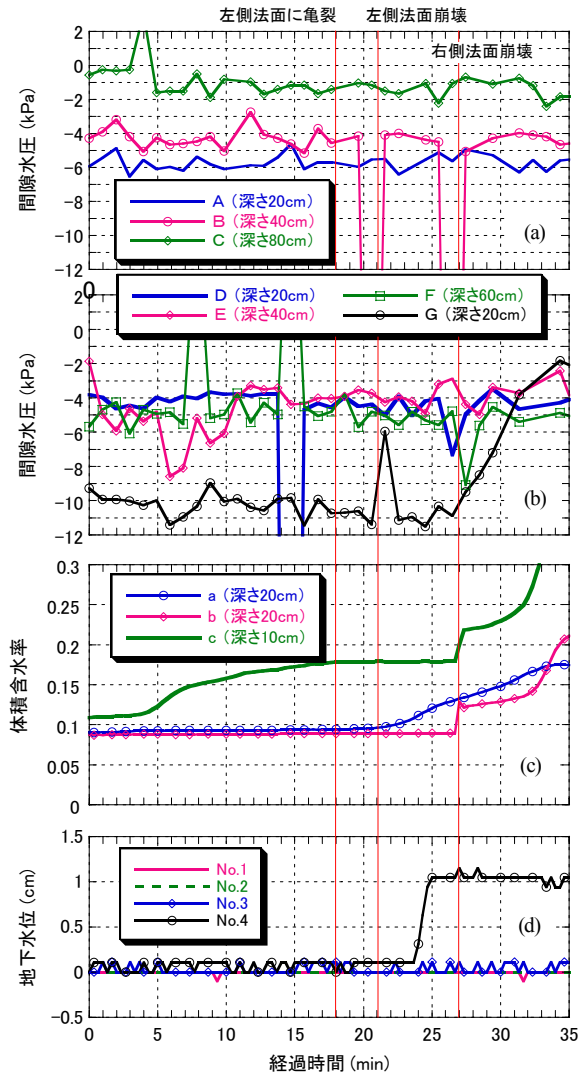


図-7 テンシオメータ、誘電率土壌水分計、間隙水圧計の計測結果 (CASE2)



写真-4 斜面崩壊発生状況 (注水 21 分後)

オメータで負の間隙水圧の計測を行い、これらのデータを用いて水分特性曲線 (図-9) を得た。図-9 を用いて、図-7(c) を間隙水圧の時系列変化に変換したものが、図-10 である。図-10 より、浅い位置から間隙水圧が上昇し、約-1.0kPa 付近で一定になっていることが分かる。崩壊挙動と間隙水圧との関係については、計測器が埋設されて

いた箇所の崩壊は注水後 27 分に発生しており、法肩付近の間隙水圧が増加（雨水が設置位置まで浸透）し始めたときに崩壊が生じたといえる。これは、CASE1 での現象とは異なり、CASE2 のように斜面表面の地盤が風化などにより密度や強度が低下している場合は、雨水浸透による崩壊が生じやすくなると考えられる。

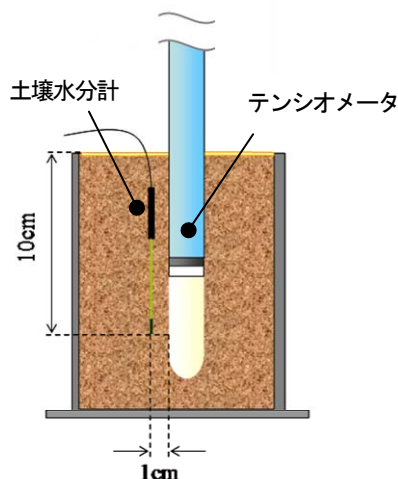


図-8 カラム試験概要図

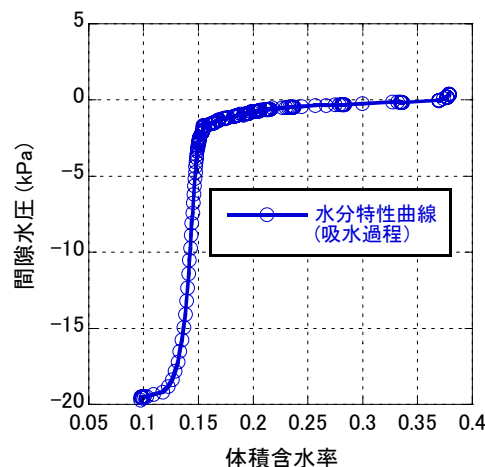


図-9 水分特性曲線（吸水過程）

4. おわりに

本研究では、まさ土を用いた室内浸透・崩壊試験を実施し、降雨時の斜面の浸透・崩壊挙動について考察を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 単一に締固められた盛土では、雨水の浸透後、土槽底面に地下水位が生じ、間隙水が法先から流出する際の浸透力の増加により法先部分の崩壊が生じ、盛土全体の釣り合いが崩れ、進行性崩壊が発生したと考えられる。
- 2) 密度の異なる 2 層の盛土では、雨水がすべり面（層境）まで浸透することにより、すべり土塊の自重およびせん断強度の低下により法肩からの崩壊が生じたものと考えられる。
- 3) いずれのケースにおいても崩壊発生前に間隙水圧および体積含水率の値が増加および一定の値を示すことがわかった。

以上のことから、降雨時の表層すべり型崩壊を予知・予測するための計測対象として、斜面内の負の間隙水圧および含水量が有効なパラメータの一つであることが分かった。今後、土槽試験結果を用いて、2 次元不飽和浸透解析および安定解析の妥当性の検討や雨量・負の間隙水圧・地表面変位の関係に関する検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) 松尾和昌, 酒匂一成, 北村良介: 斜面崩壊予知戦略-南九州シラス地帯を例として-, 自然災害科学(日本自然災害学会誌), Vol.21, No.1, pp.25-33, 2002.
- 2) Sako, K. and Kitamura, R., "A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil", Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 3) K. Sako, R. Kitamura, M. Yamada, "A consideration on effective cohesion of unsaturated sandy soil", Proc. of The fourth International Conference on Micromechanics of Granular Media, POWDERS AND GRAINS 2001, pp.39-42, 2001.

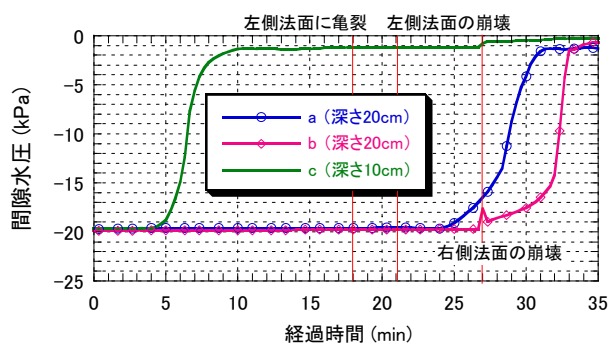


図-10 間隙水圧の時系列変化

- 4) 北村良介, 川井田実, 阿部廣史, 城本一義, 寺地卓也: 砂質土地盤でのサクシヨンの現地計測システムの開発, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.287-292, 2000.
- 5) 酒匂一成, 深川良一, 岩崎賢一, 里見知昭, 安川郁夫: 降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.3, pp.57-69, 2006.
- 6) 北村良介, 酒匂一成, 加藤俊二, 水島俊基, 今西肇: 降雨時シラス斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.149-168, 2007.
- 7) K.Sako, R.Kitamura and R. Fukagawa: Study of slope failure due to rainfall: A comparison between experiment and simulation, Proc. of the fourth international conference on unsaturated soils, Vol.2, pp.2324-2335, 2006.
- 8) 社団法人地盤工学会 不飽和地盤の挙動と評価編集委員会 編: 不飽和地盤の挙動と評価, p.14-17, 2004.
- 9) 北村良介, 川井田実, 阿部廣史, 城本一義, 寺地卓也: 砂質土地盤でのサクシヨンの現地計測システムの開発, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.287-292, 2000.
- 10) Orense RP, Farroq K, Towhata I: Deformation behavior of sandy slopes during rainwater infiltration, Soils and Foundations, 44(2):15-30, 2004.

(2008. 5. 16 受付)