

# 降雨浸透に伴う砂質模型斜面内の間隙水圧 上昇とせん断変形

PORE PRESSURE INCREASE AND SHEAR DEFORMATION IN SANDY MODEL

SLOPE DUE TO RAINFALL INFILTRATION

笹原 克夫<sup>1</sup>・酒井 直樹<sup>2</sup>

Katsuo SASAHARA and Naoki SAKAI

<sup>1</sup>高知大学教育研究部自然科学系 (〒783-8502 高知県南国市物部乙 200)

E-mail: sasahara@kochi-u.ac.jp

<sup>2</sup>文部科学省研究開発局 (〒100-8959 東京都千代田区霞が関 3-3-2)

E-mail: sakai@mext.go.jp

**Key Words:** *shear strain, pore pressure, sandy soil, model slope, rainfall infiltration*

## 1. はじめに

地表面変位や地中の傾斜を計測することにより、斜面崩壊の発生時刻を予測する方法については数多くの研究がある。この中で、地表面変位速度が定常である第2次クリープ段階や、崩壊が迫ってきて変位速度が増加する第3次クリープ段階において、地表面変位速度からクリープ理論に基づき崩壊発生時刻を予測する方法が、齊藤<sup>1)</sup>や福園<sup>2)</sup>により提案され、実務でも用いられるようになってきている。また最近では、MEMS(Microelectro-mechanical system)のような小型で安価な加速度センサーを用いることにより、伊藤・豊澤<sup>3)</sup>、玉手ら<sup>4)</sup>、Uchimuraら<sup>5)</sup>のように、地表面に設置した傾斜計の傾斜変化を測定し、崩壊発生時刻を推定しようとする試みがなされている。ただし齊藤や福園の方法は、粘性土の非排水軸対称条件下でのクリープ試験での最終段階の軸ひずみや、実斜面および模型斜面の崩壊発生前の地表面変位の経時変化を実験式として表したものであるため、降雨強度の変化などにより、崩壊の誘因としての外力が変化した場合の斜面の挙動を追跡できないと考えられる。また伊藤・豊澤、玉手ら、Uchimuraらの研究は、模型斜面の崩壊発生前の挙動を詳細に記述しているという点では価値があるものの、斜面変形機

構までは検討が進んでいない。地表面の変位や斜面内の傾斜変化より斜面崩壊発生時刻を予測する方法を確立するためには、降雨のような崩壊の誘因となる外力による斜面の変形を力学的に説明するモデルの構築が必要である。

そのための方法として、現地斜面における降雨浸透とそれに伴う斜面の変形の観測が考えられるが、斜面が大変形に至るような豪雨を経験する頻度は数十年に一度程度と非常に小さく、十分なデータを得られない。これに対して模型斜面への人工降雨実験では斜面内の土層構造が自然斜面のように不均一にはならないという欠点があるが、逆に均質に近い土層なので、降雨浸透や変形などの現象の解釈も比較的容易であるということが利点である。

本稿では降雨浸透に伴う斜面内の応力～ひずみ関係をモデル化するための第一歩として、人工降雨下の砂質模型斜面内の、湿潤過程における変形・破壊過程と体積含水率や正・負の間隙水圧の関係を検討する。

## 2. 研究方法

### (1) 実験装置

図-1に模型斜面の側面図を、そして写真-1に模型

- 地下水位計
- 土壌水分センサー (10, 20, 30, 40, 50cm)
- テンシオメーター (5, 15, 25, 35, 45cm)
- ▽ 伸縮計の移動杭
- 内部歪計の傾斜計 (4.6, 13.8, 23, 32.2, 41.4, 50.6cm)
- 鉛直変位計 (0, 10, 20, 30, 40, 50cm)

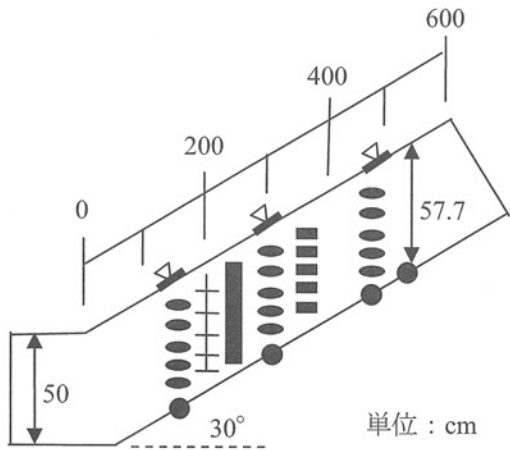


図-1 模型斜面と計測装置の配置

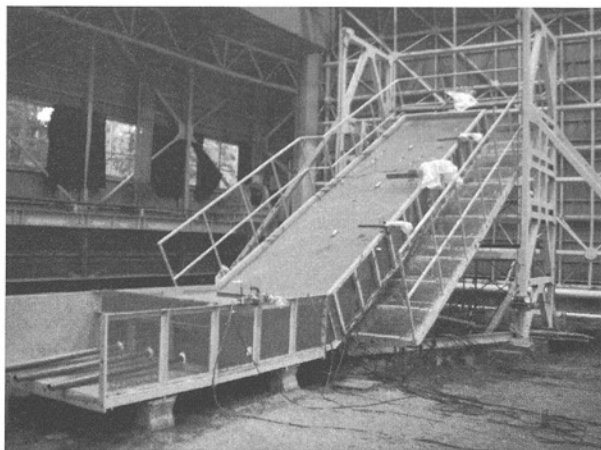


写真-1 模型斜面全景

斜面の全景を示す。模型斜面は、地表面および底面の傾斜を  $30^\circ$  とし、筑波山まさ土を用いて作製した。筑波山まさ土の粒度分布を図-2 に示す。模型斜面の大きさは水平部の長さ 300cm、幅 150cm、深さ 50cm、そして斜面部の長さ 600cm、幅 150cm、深さ 57.7cm とし、実験用土槽内に作製した。土槽底面には横断方向に、高さ 1cm の鉄板を 50cm 毎に設置し、土層と底面とのすべりを防いでいる。また土槽側面はガラス張りであり斜面内部が観察できるようになっている。模型斜面内に水平に敷きならした土を人力で踏み固め、一層の厚さ 20cm 毎に水平な土層を作製した。土層の間隙比がほぼ均一であることを確かめるため、斜面下端（傾斜変換点）から 80cm 毎の、

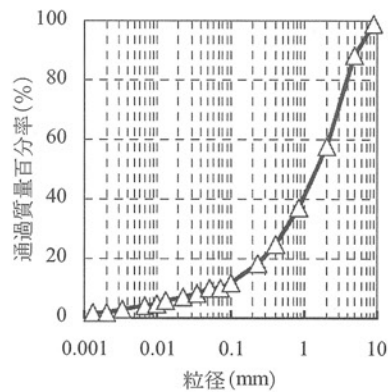
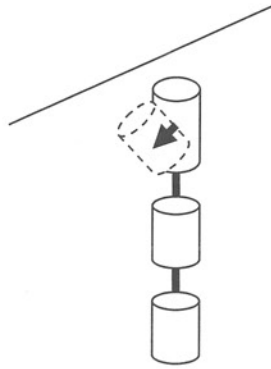


図-2 筑波山まさ土の粒度分布

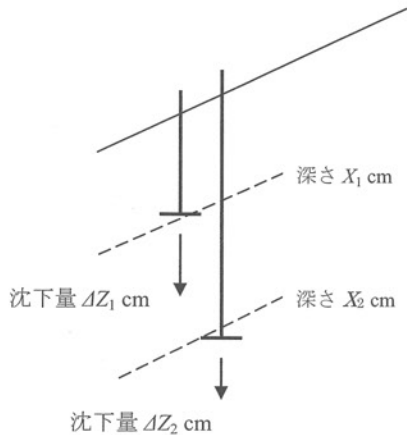
右側面から 30cm 離れた位置の表面から不攪乱供試体を採取し、間隙比と含水比を測定した。その結果各々 0.65~0.68 と 3.7~4.4% の範囲であることを確認した。土槽の底面および上端は非排水、下端は排水条件である。また深さ方向の土壌水分やひずみの分布を計測するために、種々の計測装置を図-1 に示すように鉛直方向に異なる深さに埋設した。また斜面下端から 100cm 毎に側面に接する部分に鉛直方向に細かい珪砂の土柱（幅及び奥行き 5cm）を入れて土層の変形を可視化した。体積含水率の計測は斜面下端から 150cm、300cm、450cm の位置における深さ 10, 20, 30, 40, 50cm の土壌水分計により行った。サクシオンは斜面下端から 350cm の位置における深さ 5, 15, 25, 35, 45cm におけるテンシオメーターで計測した。地中のせん断ひずみは斜面下端からの位置 250cm における内部歪計（図-3）の計測値より求めた。圧縮ひずみについては、斜面下端から 150cm の位置での地表面鉛直変位計による地表面沈下量と、200cm の位置における深さ 10, 20, 30, 40, 50cm の鉛直変位計の沈下量を用いて求めた（図-4）。地表面変位は、土槽上端（不動点）と斜面下端から 150cm、300cm、450cm の位置の移動杭の間の斜面方向の距離の変化と定義し、伸縮計により計測した。地表面沈下量は、斜面下端から 150cm、300cm、450cm の位置の地表面に設置した鉛直変位計で計測した。底面での間隙水圧は斜面下端から 0cm、150cm、300cm、450cm、525cm の土槽底面における地下水位を計測した。

斜面内のせん断ひずみを計測する内部歪計は直径 3cm、高さ 9.2cm のプローブ内に傾斜計を固定し、せん断変形によるプローブの傾斜の変化を計測した。この円筒を深さ方向に 6 本繋げ、円筒の間はボルト・ナットで結合し前後方向にのみ可動としている（図-3）。これにより各プローブの中心の深さ 4.6, 13.8, 23, 32.2, 41.4, 50.6cm でのせん断による傾斜



傾斜変化  $\Delta\theta$  とすると  
せん断ひずみ =  $\tan(\Delta\theta)$

図-3 せん断ひずみの計測



$$\text{圧縮ひずみ} = (\Delta Z_1 - \Delta Z_2) / (X_2 - X_1)$$

図-4 圧縮ひずみの計測

の変化を計測した。各プローブの傾斜は静電容量式の傾斜計で計測し、その分解能は  $0.1^\circ$  である。圧縮ひずみを求めるための地表面鉛直変位計、鉛直変位計 (図-4) は 5cm 四方程度の大きさを持つ沈下板の鉛直方向の変位を変位計で計測するもので、その測定精度は 0.2mm である。地表面変位を求める伸縮計に用いた回転角センサーの精度は 0.1mm である。土壌水分計は長さ 10cm の FDR 式であり、分解能は  $0.02\text{m}^3/\text{m}^3$  である。テンシオメーターの測定精度は 0.5kPa である。底面での地下水位は計測精度  $1\text{cmH}_2\text{O}$  を有する水位計で計測した。

## (2) 実験方法

自然斜面は多くの降雨履歴を有することを考慮して、上記の模型斜面に 4 回の降雨を与えた。はじめ

の 3 回の降雨イベントは降雨履歴を与えるためのものであり、降雨強度  $30\text{mm/h}$  で継続時間 2~3 時間とした。これらの降雨期間中にも斜面のせん断・圧縮変形は発生したが、対象とする最後の降雨イベントに比べて非常に小さかった。その後斜面内の変形が収束するまで放置し、次の降雨を与えたが、放置期間は各々 3 日程度であった。そして今回の検討の対象である 4 回目の降雨イベントも降雨強度は  $30\text{mm/h}$  であるが、斜面の崩壊が発生するまで降雨を与え、降雨継続時間は 4 時間であった。降雨中断期間も含めて間隙水圧、体積含水率、サクシオン、地表面変位、地表面沈下量、そして内部歪計の傾斜変化を 10 秒間隔で計測した。また斜面の変形過程を把握するために、降雨中は側面からビデオ撮影を行った。降雨は降雨量を  $15\sim 200\text{mm/h}$  まで調節可能な (独)防災科学技術研究所所有の大型降雨実験装置で与えた。今回は対象降雨である最後の降雨イベントにおける計測データをもとに、崩壊直前の斜面の挙動を検討する。

## (3) ひずみの定義

本研究における圧縮ひずみと地中のせん断ひずみの定義を説明する。

地中のせん断ひずみは図-3 のように、内部歪計の各プローブの傾斜変化より算出するが、各プローブの実験開始時の傾斜と、時々刻々の傾斜との差  $\Delta\theta$  を求め、プローブの中間の深さ  $z(\text{cm})$  のせん断ひずみ  $\gamma(z) = \tan(\Delta\theta)$  として求めた。プローブ上部が斜面下方に回転する方向が正である。内部歪計に用いた傾斜計の分解能が  $0.1^\circ$  であるため、せん断ひずみの計測精度は 0.0002 である。

図-4 のように、圧縮ひずみは地表面から鉛直に 10cm 毎の土層の鉛直方向の圧縮を示す。例えば 0~10cm の土層の圧縮ひずみは、地表面の沈下板により計測された地表面の沈下量を土塊上部の沈下量と見なし、深さ 10cm の沈下板の沈下量を土塊下部の沈下量と見なす。これらよりこの土層の圧縮量を求め、それを圧縮前の土層厚で除して圧縮ひずみとした。そして深さ 0-10cm の土層の圧縮はその中間の深さ 5cm における圧縮と見なした。

## 3. 実験結果

図-5 に対象降雨期間中の斜面内の体積含水率、サクシオン、そしてせん断ひずみの経時変化を示す。体積含水率は斜面下端から 300cm の位置で計測され、斜面内の深さ 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm の値で

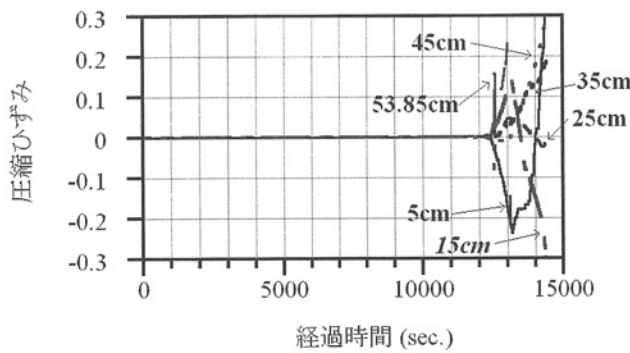
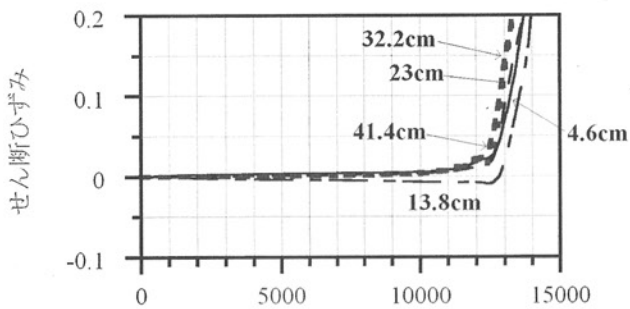
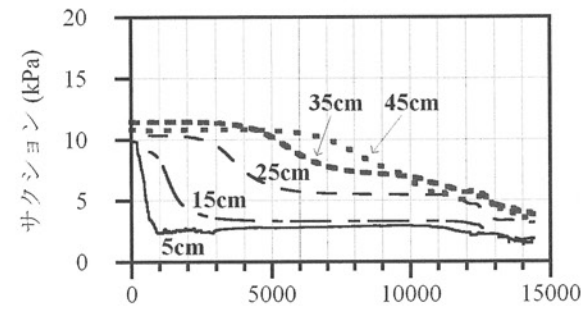
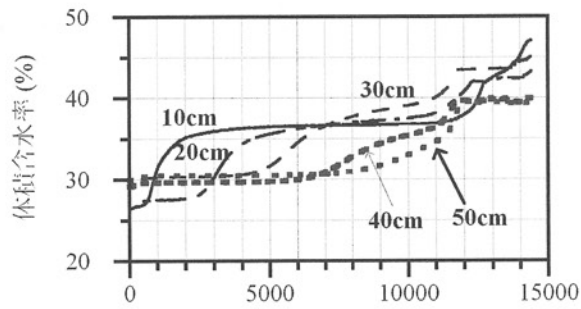


図-5 斜面内の体積含水率、サクシオン、せん断ひずみと圧縮ひずみの経時変化

ある。サクシオンは斜面下端から 350cm の位置の深さ 5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 45cm で計測される。せん断ひずみは斜面下端から 250cm の位置に設置した内部歪計の深さ方向に設置した傾斜計の中心の深さ (4.6cm, 13.8cm, 23cm, 32.2cm, 41.4cm, 50.6cm) で計測するが、深さ 50.6cm ではせん断ひずみが傾斜計の

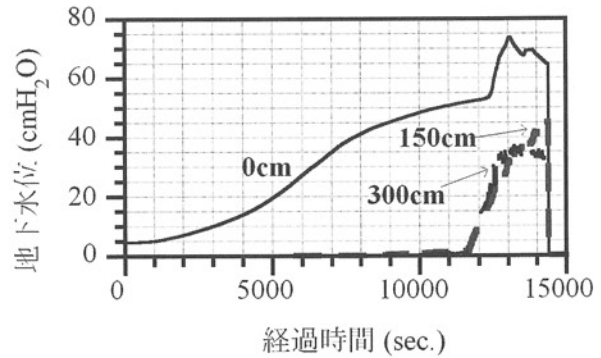


図-6 斜面内の地下水位 (斜面下端から 0cm, 150cm, 300cm)

限界を超えたため検討対象から外した。

まず体積含水率については、降雨開始後地表面に近いほど早く増加を開始する。深さ 30cm より浅い個所の体積含水率は、約 4,000~7,000 秒において増加を止め、35~40%の一定値となるが、約 11,000 秒から再び増加を開始する。そして深さ 20cm, 30cm の体積含水率は 43%程度で再び一定となるが、深さ 10cm では増加傾向のまま実験終了となる。対して深さ 40cm 以深の個所の体積含水率は降雨開始後直後にはまだ変化せず、約 7,000 秒以降に増加を開始する。そして約 12,000 秒から 40%程度の一定値となる。

サクシオンについてはやはり地表面に近い浅い個所ほど降雨開始後早くから減少を開始する。深さ 25cm より浅い個所では降雨開始 1,000~5,000 秒と早い時期にサクシオンが急減し、その後一定値となるのに対して、それより深い個所では 5,000 秒以降に緩やかにサクシオンが減少し、実験終了まで単調に減少する。深さ 25cm より浅い個所のサクシオンは約 12,000 秒後に再び減少を開始すると共に、それより深い個所のサクシオンも同時期には減少がやや大きくなる。そして実験終了時にはいずれの深さのサクシオンも 3~5kPa と飽和に近い値を示す。

せん断ひずみについては、深さ 4.6cm, 23cm, 32.2cm, そして 41.4cm では正の方向に進行するのに対して、深さ 13.8cm では 12,600 秒まではせん断ひずみが小さいながらも負の方向に進行し、その後反転して正の方向に急増する。せん断ひずみが負の方向に向かうのは、当該深さに対応する傾斜計の上下のいずれかの傾斜計が正の方向に大きく傾いたため、その反作用で起こったことと考えられる。いずれの深さでもせん断ひずみの急増が 12,600 秒に開始するが、これは浅い個所のサクシオンの 2 回目の減少及び深い個所のサクシオンの減少が大きくなり、疑似飽和状態になる時期に相当する。図-6 よりこの時期

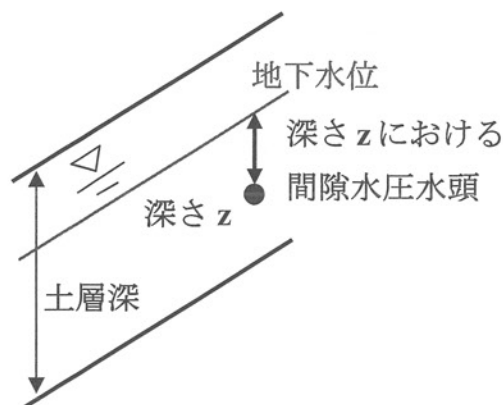


図-7 斜面内の間隙水圧水頭の定義

は斜面下端から 150cm 及び 300cm の地下水位が急上昇する時期であることがわかる。圧縮ひずみもせん断ひずみと同様に、12,600 秒過ぎから顕著に増加する。よってこれも当該深さが疑似飽和状態になってから増加すると考えられる。その後 5cm では一旦負の方向に進行してから今度は正の方向に増加、15cm 及び 25cm では負の方向に圧縮ひずみが進行するのに対して、深さ 35cm より深い位置では圧縮ひずみが正の方向のみに進行する。

以上より斜面内の降雨浸透と共に、当該深さが擬似的に飽和して、正の間隙水圧が増加するに連れて、斜面内のせん断・圧縮変形が進行することが示唆される。

#### 4. 考察

##### (1) 斜面内のせん断ひずみと間隙水圧

対象降雨の期間中における降雨浸透に伴う斜面のせん断変形機構を明らかにするために、斜面内のサクシオン及び間隙水圧とせん断ひずみの関係を検討する。ここで各深さにおける間隙水圧とは、地下水位と、該当する深さと土層底面の鉛直距離の差として、水頭表示で定義する(図-7)。つまり地下水位が該当の深さより大きくなると、該当する深さにおける間隙水圧が発生すると考える。

斜面内の各深さの間隙水圧とせん断ひずみの関係を図-8 に示す。ただし間隙水圧の小さな変動が激しく、その変動を表すことを避けるために、図では 10 秒間隔に計測したデータを 200 秒間隔で示した。ただし深さ 4.6cm および 13.8cm では間隙水圧が発生せずにせん断ひずみが増加したので、図には示していない。深さ 13.8cm より深い箇所でのせん断ひずみは、間隙水圧の発生しない不飽和状態で 0.03~0.09 程度

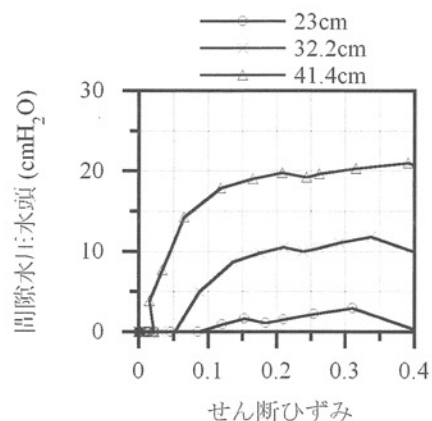


図-8 斜面内のせん断ひずみと間隙水圧の関係

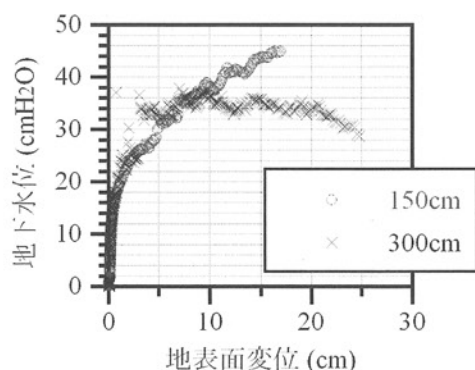
まで増加し、その後間隙水圧増加と共に顕著に増加する。不飽和状態でのせん断ひずみはサクシオン減少に伴うものであることが判明しているが、高々 0.03~0.09 程度までしか増加しない。それに対して間隙水圧発生後は 0.4 程度まで増加するため、間隙水圧に伴うせん断ひずみ増加が大きいことがわかる。飽和状態での間隙水圧上昇に伴うせん断ひずみの増加は、間隙水圧増加量に対するせん断ひずみ増加量が当初は小さく、徐々に大きくなるため、間隙水圧とせん断ひずみの関係は、応力~ひずみ関係でよく見られるような双曲線関係を示す。また浅い箇所の方が間隙水圧の発生しない不飽和状態でのせん断ひずみが大きいことがわかる。つまり浅い箇所ほど不飽和状態でのせん断変形が大きく、深い箇所ほど間隙水圧に依存するせん断変形が大きいことがわかる。

なお斜面内の各深さにおける圧縮ひずみと間隙水圧の関係について、図示はしないが、せん断ひずみと間隙水圧の関係と同様に、深さ 23cm より浅い箇所では間隙水圧の発生しない状態で圧縮ひずみが進行すること、それより深い箇所では降雨開始直後は間隙水圧増加に対する圧縮ひずみ増加量は小さいが、徐々に間隙水圧増加に対する圧縮ひずみ増加量が大きくなる。ただし 23cm より深い箇所における不飽和状態での圧縮ひずみ増加は非常に小さいことがせん断ひずみの場合と異なる。

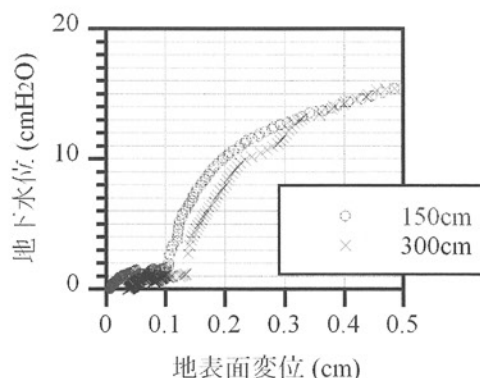
##### (2) 地表面変位と地下水位の関係

斜面内のせん断ひずみを深さ方向に積分したものが地表面変位であると考え、地表面変位と地下水位の間にも、斜面内のせん断ひずみと間隙水圧と同様な関係が見られることが予想される。

これを検討するために斜面下端から 150cm 及び 300cm の位置における地下水位と地表面変位の関係



(a) 降雨期間全体



(b) 変形の小さい期間

図-9 斜面上の異なる位置における地表面変位と地下水位の関係

を図-9に表す。図-9(a)は降雨開始から終了までの全期間の両者の関係を示す。150cm及び300cmの位置における両者の関係は、地表面変位の大きさが10cm程度までは位置が異なってもほぼ等しい。地下水位発生直後は地下水位の増加に伴う地表面変位の増加量が小さいが、地表面変位の進行に伴って地下水位増分に対する地表面変位増分が徐々に大きくなる。地表面変位が10cmを超えると300cmの位置における地表面変位はほぼ定常値をとるが、150cmにおける地表面変位は未だ増加する。しかしながら地表面変位が10cmまでは、地下水位と地表面変位の関係は、土の応力～ひずみ関係に見られるような双曲線形となる。図-9(b)は変位の小さい領域での地下水位と地表面変位の関係を見るために、地表面変位が0.5cmまでの範囲の両者の関係を示す。地表面変位が0.1cmまでの範囲では150cm及び300cmの位置における地表面変位は、地下水位が2cmH<sub>2</sub>Oという小さな値で進行する。地下水位の計測精度が1cmH<sub>2</sub>Oであることを考えると、この範囲では地表面変位は地下水位が発生しない不飽和状態で進行すると考えられる。その後地表面変位は地下水位の上昇と共に増加する。最終的な地表面変位は10~20cmまで達することを考えると、不飽和状態での地表面変位の増加は、地下水位上昇に伴う地表面変位の増加に比べて小さいことがわかる。

## 5. おわりに

以上の検討から判明した事項を以下にまとめる。

- (1) 模型斜面のせん断及び圧縮ひずみは底面での地下水位の発生と増加により顕著に増加する。
- (2) 深さ23cmより浅い箇所では、その深さにおける間隙水圧が発生しなくてもせん断ひずみが増加する。

しかしそれより深い箇所では間隙水圧発生前の不飽和状態ではせん断ひずみの増加はわずかであり、その後間隙水圧が発生すると間隙水圧増加と共にせん断ひずみが顕著に増加する。間隙水圧とせん断ひずみの関係は土の応力～ひずみ関係と同様な双曲線関係で表すことが可能であるが、間隙水圧の最大値は深い箇所ほど大きくなる。

(3) 地表面変位は降雨開始後に地下水位が発生しない不飽和状態でも0.1cm程度までは増加する。それに対してその後の地下水位の増加に伴い地表面変位は顕著に増加する。地下水位増加量に対する地表面変位増加量は、地表面変位増加に伴って大きくなる。このような地下水位と地表面変位の関係は、土の応力～ひずみ関係と同様な双曲線関係で表すことが可能である。

## 参考文献

- 1) 齊藤迪孝(1981): 土質工学におけるレオロジー-7.2斜面崩壊予測, 土と基礎, Vol.29, No.5, pp.77-82.
- 2) 福園輝旗(1985): 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.
- 3) 伊藤和也, 豊澤康男(2009): 斜面下部の掘削切り取りによる斜面不安定性に関する実物大斜面崩壊実験, 土木学会論文集C, Vol.65, No.1, pp.254-265.
- 4) 玉手聡, 伊藤和也, SURENDARA B. Tamrakar(2009): 表層ひずみ計測による施工時斜面の崩壊監視に関する実験的研究, 土木学会論文集C, Vol.65, No.1, p.1-18.
- 5) Uchimura, T. et. al. (2009): Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface, Landslides, DOI10.1007/s10346-009-0178-z.

(2012. 5. 9 受付)