

## 広島大学構内のまさ土斜面における土壌水分及び サクシヨンの現地観測

Field Measurement of Moisture Content and Suction in Masa Slope  
at Hiroshima University Campus

Thi Ha (広島大学大学院工学研究科)  
森脇 武夫 Takeo MORIWAKI (広島大学大学院工学研究科)  
佐々木 康 Yasushi SASAKI (広島大学大学院工学研究科)  
加納 誠二 Seiji KANO (広島大学大学院工学研究科)  
Dissanayake A. Kamalnath (広島大学大学院工学研究科)

集中豪雨に伴いまさ土斜面で崩壊や土石流が発生し、毎年のように甚大な被害をもたらしている。本研究では、まさ土斜面において崩壊を引き起こす雨水の集中・浸透メカニズム、および降雨に伴うまさ土斜面の強度低下特性を明らかにすることを目的として平成 11 年 6 月 29 日の豪雨によって崩壊した広島大学東広島キャンパス内の斜面近傍において現地観測を実施した。計測システムはテンシオメータ、TDR(土壌水分計)、地下水水位計、雨量計から構成されており、本論文では計測器の概要や設置方法および計測結果の代表的な例を報告する。

キーワード：現地観測，サクシヨン，テンシオメータ，TDR(土壌水分計)，水位計，雨量  
(IGC: C07)

### 1. はじめに

日本の代表的な風化残積土の一つであるまさ土は、花崗岩の風化したもので、全国各地に分布しているが、中でも中国地方や近畿地方の瀬戸内海沿岸部を中心とする西日本には広く分布している<sup>1)</sup>。

まさ土は、他の土と比べて状態変化が激しく特異な性質を示すため特殊土とされている。その理由は、まさ土が岩石の風化の産物であり、風化の程度によって岩石に近いものからシルト、粘土のような細粒土までの広い範囲のものを含む上に、母岩の性質を反映して鉱物組成のうえでもかなりの差異があるためである。

集中豪雨に伴いまさ土斜面で崩壊や土石流が発生し、毎年のように甚大な被害をもたらしている。最近では平成 11 年 6 月 29 日の集中豪雨で広島県内を中心に斜面崩壊が多発し、32 名の犠牲者を出す災害となった<sup>2)</sup>。降雨による斜面崩壊は、降雨量の増加とともに増大する土塊の重力及び浸透力によって生じる土塊の滑動力が、降雨の浸透によって低下する斜面のせん断抵抗力より大きくなったときに崩壊すると考えられている。しかし、このメカニズムで実際の現象を説明するためには解決すべき問題も残されている。例えば、降雨条件と地盤工学的条件がほぼ同様な斜面においても、崩壊した斜面と崩壊しない斜面があり、これが何によって支配されるか今後明らかにする必要がある。

また、斜面の危険度評価において、特に避難警告に適用できるような評価指標としては、降雨量に基づくものが現実的な選択になると思われるが、一律な評価を行なうには問題が残る。一方、実際の斜面崩壊の直接的な要因(誘因)は、降雨そのものよりも、それによって上昇

した間隙水圧(あるいは間隙圧)が有効応力を低下させて斜面の安定性を低下させたことにあると考えられる。そのため、降雨量による危険度評価の精度をより高めるためには、このようなメカニズムに立脚した評価が必要となる。

### 2. 研究目的

降雨による斜面の崩壊が、いつ、どこで、どの程度の降雨量で発生するのかを予測することは非常に困難であり、道路の通行規制や避難警告等を発動する基準雨量設定の際には、近隣区域における過去の降雨履歴と被害履歴との関係などを参考に経験的、大局的に基準雨量を設定しているのが現状である<sup>3)</sup>。

まさ土斜面における雨水の集中・浸透メカニズム、および降雨に伴うまさ土斜面の強度低下特性を明らかにできると、まさ土斜面表層の地盤特性や降雨パターンに応じて斜面の崩壊危険度を定量的に評価することが可能となり、まさ土地帯における斜面災害に対して地盤特性や降雨・浸透流出特性を考慮した避難警告システムを確立することができる。

これまでに盛土やのり面および自然斜面内の降雨によるサクシヨンの変動を計測し浸透特性や崩壊の予測を行なう研究が三木ほか<sup>4)</sup>、北村ほか<sup>5)</sup>、川上ほか<sup>6)</sup>、矢田部ほか<sup>7)</sup>、加藤ほか<sup>8)</sup>、村石ほか<sup>9)</sup>、島ほか<sup>10)</sup>により行なわれてきた。本研究ではまさ土地盤内の降雨浸透特性をより明らかにするためサクシヨンのほかに土壌水分量の計測も同時に行なうことにした。

本研究の全体的な流れを図.1 に示す。現地調査は安

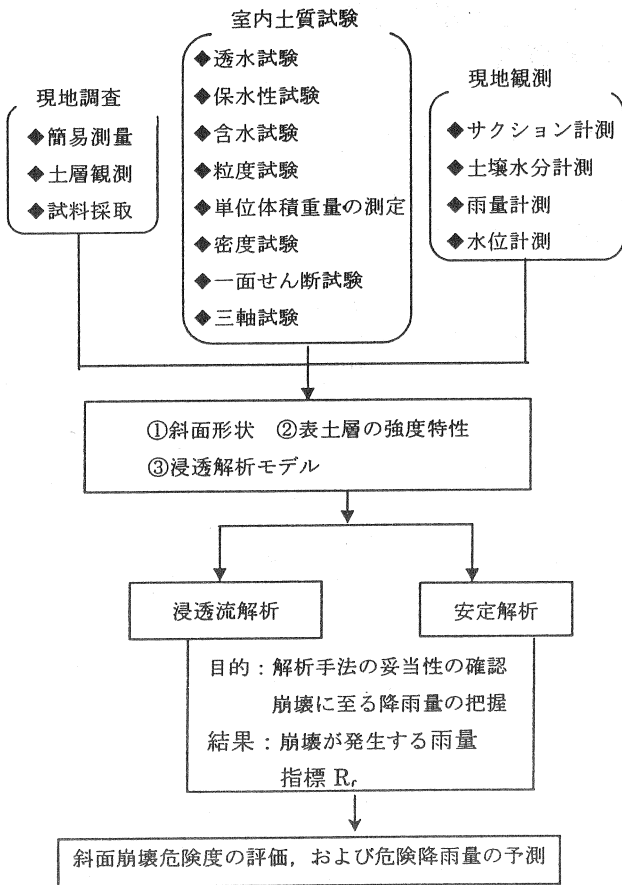


図.1 研究の全体的な流れ

定解析を行なうための解析モデルや基本的なパラメータを得るために実施する。そのために、現地で採取したサンプリング試料を用いて室内土質試験を行なう。現地観測は現地斜面への降雨の浸透特性を把握し、浸透モデルやそのパラメータを得るために実施する。また、安定解析と浸透流解析を並行して行なうことによって斜面の危険度の評価と危険降雨量の予測が可能となる。

そこで、著者らは平成 11 年 6 月 29 日の豪雨によって実際に崩壊した広島大学東広島キャンパス内の斜面近傍においてサクション、土壌水分量、地下水位及び雨量の現地計測を開始した。

本論文では研究の全体的な流れの一部分である現地観測システムについて報告する。ここでは計測システムや各計器、キャリブレーション方法や設置方法、また、現在までに得られた計測結果の代表的なものを紹介する。

### 3. 観測位置

平成 11 年 6 月 29 日の集中豪雨により広島大学キャンパス内では陣が平山とががら山の 2 ヶ所で斜面崩壊が発生した。本研究ではそのうちの 1 ヶ所であるががら山の斜面近傍で現地観測を行なった(図.2, 図.3)。崩壊現場はががら山(標高約 330m)の北側の斜面にあり、源頭部は標高約 300m のところにある。

崩壊形状は幅 6~21m、崩壊深さは最大で 3.0m であ

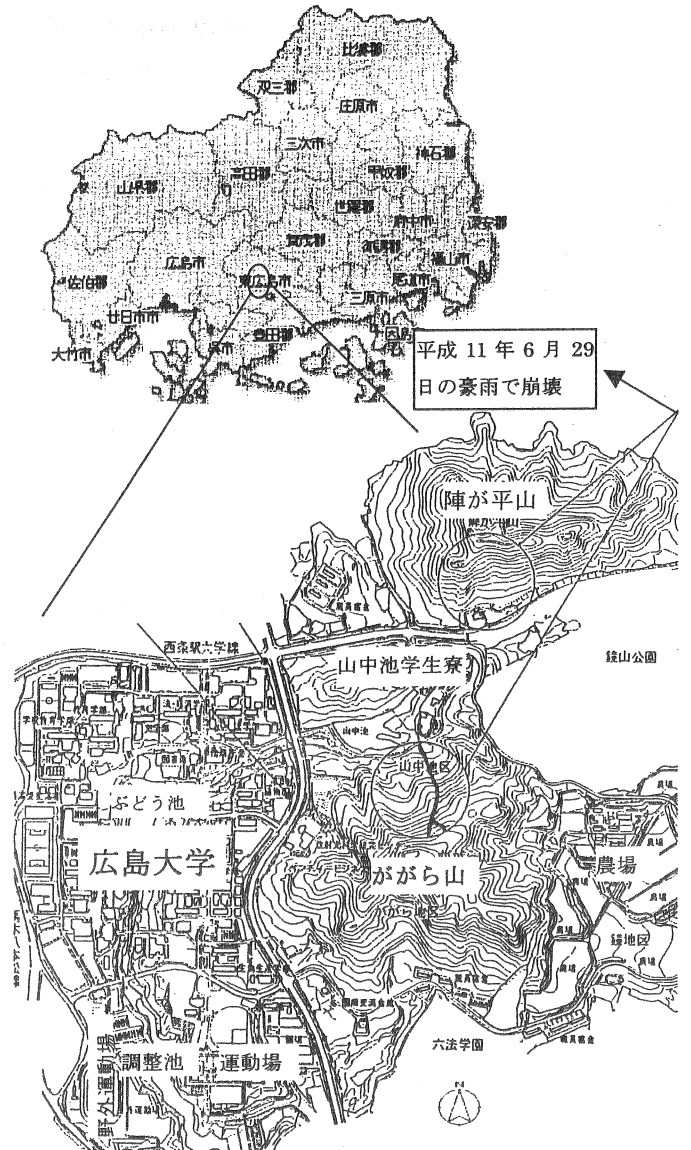


図.2 観測位置図

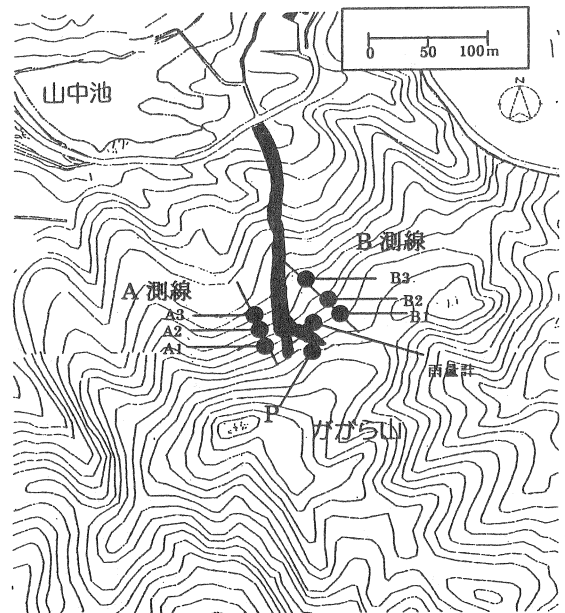


図.3 観測場所の地形図

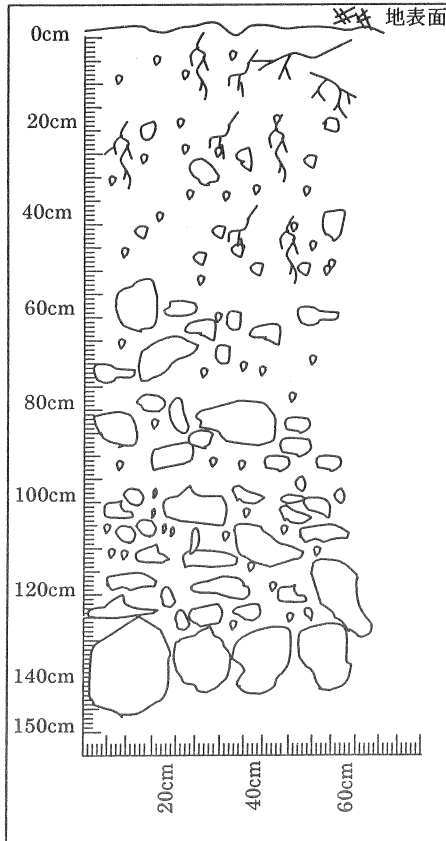


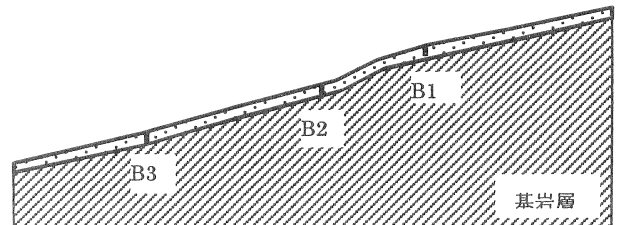
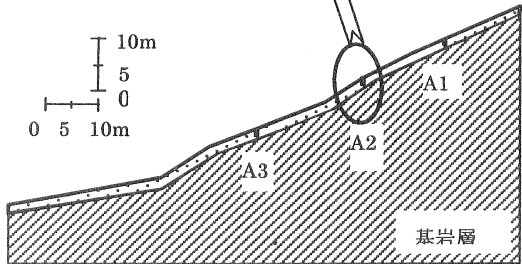
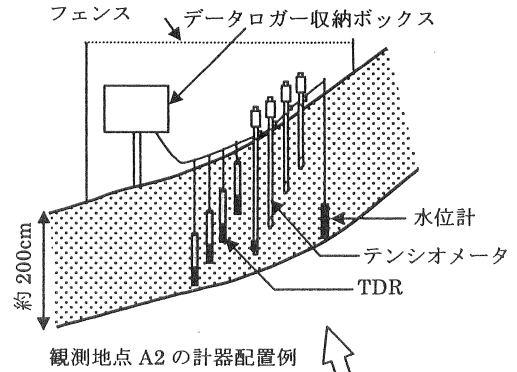
図.4 地盤断面図

り、崩壊面の勾配は源頭部付近で 25~44° 程度とやや急峻であるが山地裾部では 10~18° 程度と比較的ならかであった。流下域は山中池沿いの道路まで水平距離約 200m であった。崩壊直後には道路上に駐車していた車が半分土砂に埋まっており、土砂によって押し流された樹木も確認された。流出土砂量は目測で 1200~1600m<sup>3</sup> 程度であった<sup>10)</sup>。

現場の地質は、表層 2~3m までまさ土(風化花崗岩)である。地表面から約 50cm まではシルト混り状態で、赤色をおびていた。50cm から 2~3m まではレキも混ざっている状態で灰色であった。基岩は花崗岩である<sup>11)</sup>。図.4 に源頭部付近の地盤構成の断面図を示す。その位置は図.3 中の地点 P である。

現場の植生は、シダ類やツバキ等の低木や、ブナ類等の落葉高木である。観測地点を中心に 10×10m 領域内の樹木の本数を測定した結果、観測地点 B1 を除き、高さ 2m 以下の低木が 90~100 本、高さ 2m 以上の高木が 25~30 本程度であった。観測地点 B1 では高木がやや少なく 10×10m 領域内に約 20 本程度であった。

本現地観測は(図.3)に示す崩壊渓流 A および B の 2 測線上に 3ヶ所ずつ(急勾配の上部、急勾配の下部、緩勾配の 1ヶ所ずつ)計 6ヶ所で行なっている。渓流の左岸側の上流から下流の順で A1, A2, A3, 右岸側は同様に B1, B2, B3 と観測地点名を付けた。また、雨量を 2つの測線のほぼ中間地点で観測している。



設置地点	テンシオメータ 深さ(cm)	TDR 深さ(cm)
A1	58, 96, 114, 185	100, 150
A2	56, 93, 122, 193	50, 90, 145, 200
A3	44, 98, 115, 174	45, 155
B1	37, 97, 135	50, 150
B2	59, 88, 136, 176	50, 140
B3	60, 97, 159, 172	50, 100, 155, 195

地下水位計は地点 A2 に設置

図.5 各地点での計器設置状況

#### 4. 計測システム

##### 4-1 システム概要

計測システムは図.5 に示すように土中サクシオンを計測するテンシオメータ、土中水分量を計測する TDR (Time Domain Reflectometry)、雨量計、水位計により構成されている。図.4 中の表に示す設置深度はテンシオメータの場合に地表面からボラスカップの中央まで、TDR の場合は地表面からロッドの根元までを示す。計測データは観測地点ごとのデータロガーに保存される。本システムでは計測時刻を一致させ、データ回収を容易にするためテンシオメータと TDR は一つのデータロガーで計測できるように工夫されている。各ロガーは 6 万個のデータを保存することができ、測定間隔は 1 秒

から 1 時間まで任意に設定することが出来る。本研究においては全ての計測器に対し 10 分間隔で計測を行っている。データ回収はノートパソコンを現地に持参し、パソコンにより回収する。1 回に回収されたデータ (1 バッチ) はデータロガーに過去のデータとして最大で 6 バッチまでバックアップ保存されている。

#### 4.2 テンシオメータ

##### 4.2.1 基本概念

テンシオメータは原位置でのサクシオン測定方法として古くから用いられている。基本原理は図.6 に示すように土中に埋設したポーラスカップ内を充填している脱気水と土壌内の水を連動させ、土壌内の水圧とテンシオメータ内の水圧を平衡させ、その水圧を圧力センサーで測定するものである。よって、テンシオメータの設置に関してはポーラスカップと周辺の土壌を密着させておくことが大切である<sup>12)</sup>。

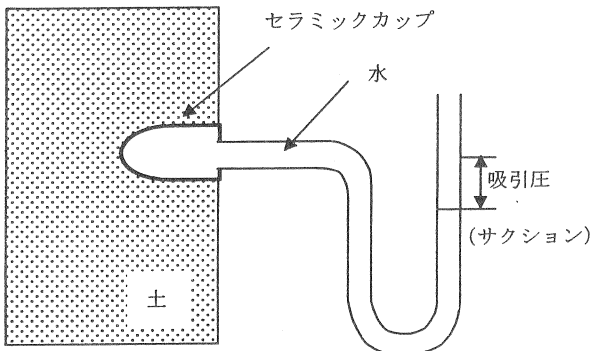


図.6 テンシオメータの原理

テンシオメータの利点は現場で土を乱さずに、経済的にサクシオンを測定できることにある。しかし、計測時にはテンシオメータの内部は脱気水で満たされており、この水位が常に圧力センサーの受圧部より上に位置しておかなければならないため、脱気水の補給を定期的に行う必要がある<sup>4)</sup>。

テンシオメータは図.7 に示すように、セラミック製

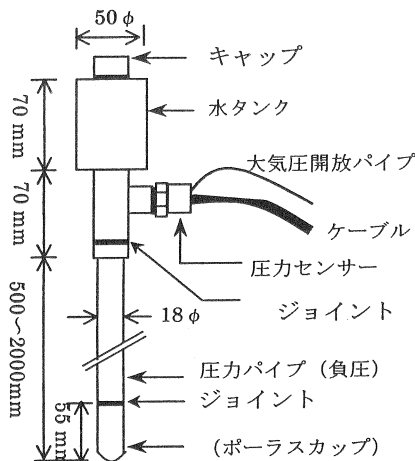


図.7 テンシオメータの概略図

のポーラスカップ、アクリル製の円筒、上部の圧力センサーから成る。圧力センサーは土壌が水分を吸収する圧力を測定するもので、大気圧と圧力センサー受感部との圧力差を電圧で出力する。

本研究で用いた圧力センサーの定格圧力は 2~1.0 kgf/cm<sup>2</sup>、過大圧力は定格圧力の 1.5 倍、電源電圧 12~32VDC (8mA MAX)、使用温度範囲・10~+80°C、出力電圧 1~2V (負荷抵抗 330Ω 以上) である。

##### 4.2.2 キャリブレーション

テンシオメータの圧力センサーの特性が個々で異なるため、現地に設置する前にキャリブレーションを行わなければならない。

方法は図.8 に示すように圧力センサー部分のついてある水タンクを固定させ、もう一つの水タンクを 10cm 下げる。それによって水頭差が生じ、圧力センサーには負圧が働く。その時の電圧を記録する。このように水頭差を 0~100cm まで 10cm 単位で変化させ、圧力センサーの示す電圧を記録する。

得られた出力値(voltage)と負の水頭値を図.9 のように図表化し、キャリブレーション式を得る。

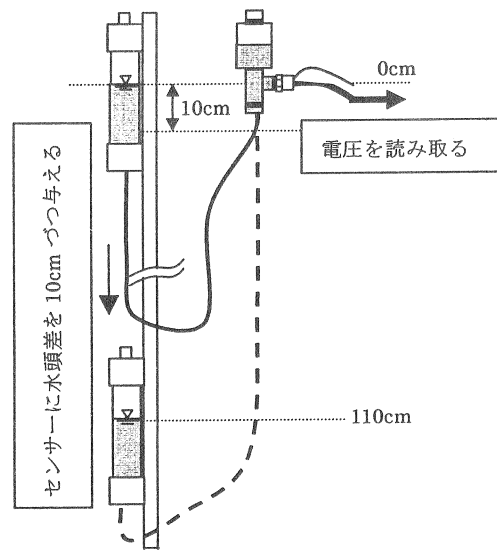


図.8 センサーのキャリブレーション

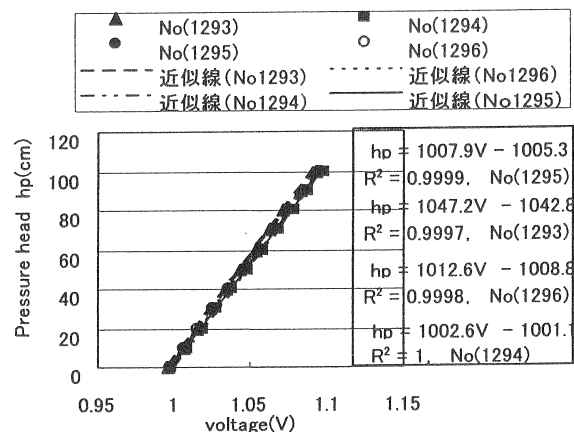


図.9 テンシオメータのキャリブレーション結果

4-3 TDR

4-3-1 基本概念

土壌を構成している物質の中での水の（比）誘電率は約 80 と、土壌固相物質の約 4、空気の 1 の値と比べて著しく大きな値を示す。したがって、土壌中の見かけの誘電率は土壌中の水分量の値によって大きく変動する。TDR 法による土壌水分量の測定とは、この土壌の見かけの誘電率と土壌水分量の関係を利用して土壌水分量を測定する方法である。この方法では電圧ではなく TDR パルスの通過時間を測定する。

この方法の長所は①土壌水分量を乾燥から湿潤の幅広い領域を非破壊で連続自動測定が可能であり、基本的にメンテナンスが不要であること②現場で迅速にデータが得られることから移動観測も容易に行なえること③キャリブレーションが比較的容易に行なえることである<sup>13)</sup>。

本研究で用いた TDR プローブの概略図は図.10 に示

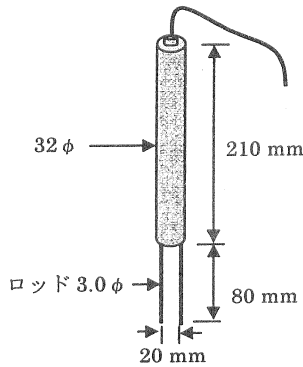


図.10 TDR プローブの概略図

す。この TDR の測定範囲は体積含水率 0~95%、測定精度 0~40%は±1%、40~70%は±3%、電源電圧 7~15VDC、消費電流は測定時 250mA、待機時 8mA、測定環境温度-15~50℃である。測定メカニズムは TDR パルスの通過時間を計測することによってその計測地点の誘電率を得る。また、式(1)に示す誘電率と体積含水率の関係を用いて本体の中で体積含水率を算出し、その値を 0~1V で出力させる。0.0V の時、体積含水率は 0.0% で、1V の時に 100.0%となる。

$$\theta = 1 \times 10^{-5} \varepsilon^3 - 8 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 0.0331 \varepsilon - 0.0294 \quad (1)$$

ここで、 $\theta$  は体積含水率、 $\varepsilon$  は誘電率である。

式(1)は Stacheder et al.<sup>14)</sup>が砂、ローム、カオリンなど数種類の試料を用いて行なった実験結果から求めたもので Topp et al.<sup>15, 16)</sup>や竹下ら<sup>17)</sup>も同様の結果を得ている。しかし、誘電率と体積含水率の関係は土の種類により変わることも予測される。その問題に対しては設置する前に現地から採取したまさ土試料を使ってキャリブレーションを行なった。その結果を次に示す。

4-3-2 キャリブレーション

方法は TDR による出力値と含水比の実測値（炉乾燥法で測定）でキャリブレーションカーブを作成するという方法である。キャリブレーションには現地観測を行な

う現場付近から採取したまさ土で 2mm のふるい通過分を用いた。

目標含水比および目標間隙比になるように試料を締め固める。締め固め後は TDR プローブを埋設し、データロガーにより計測を行なう。計測時間は 10 分で計測間隔 1 分であり、出力は電圧である。計測が終了したら TDR センサー周辺の試料の含水比を測定する。次に、目標含水比を変えながら、上記同様の作業を繰り返す行なう。計測結果を図.11 に示す。

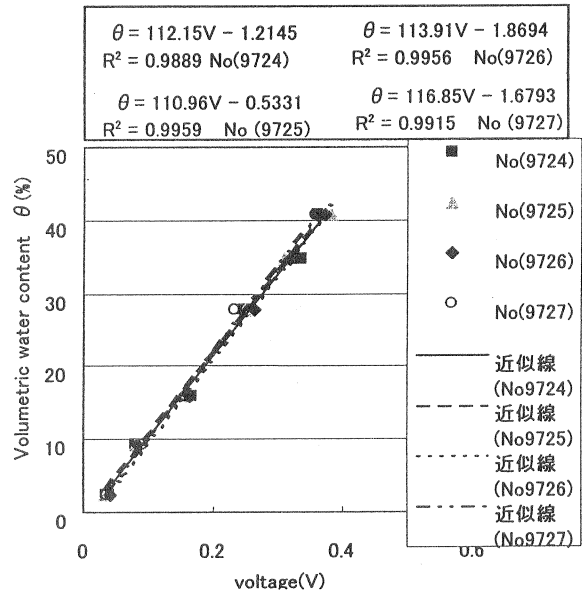


図.11 TDR のキャリブレーション結果

4-4 水位計

4-4-1 基本概念

この水位計は水圧式圧力センサーを利用した水位データ記録装置であり（図.12）、内蔵リチウム電池で長時間の計測が可能である。センサーには大気圧変動による誤差をキャンセルする目的で大気開放パイプがつけてある。

圧力センサーの各種仕様は、定格圧力 0.2kgf/cm<sup>2</sup>、過大圧力 1.0kgf/cm<sup>2</sup>、仕様温度-10~50℃、電源 1mA（定電流）、出力電圧 40~60mV、精度±0.3%である。

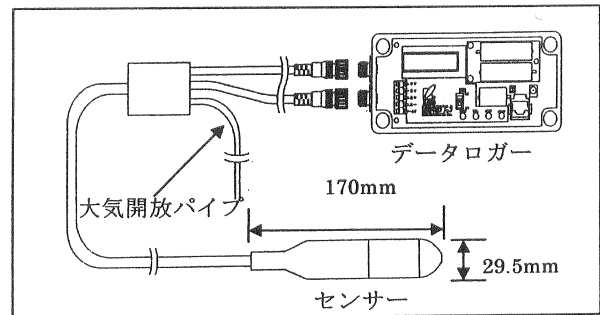


図.12 地下水位計

4-4-2 キャリブレーション

長さ 2m のアクリルパイプの中に、水位計のセンサー一部分が鉛直になるように設置し、ホースで水を入れ、

水面が静止した後、アクリルパイプ内に設置したメジャーによる目視とセンサーによる計測を行なう。目視は1回のみで水位計による計測は10秒間隔で2分間継続して行ない、データロガーに記録させる。

次に、アクリルパイプの下板についている排水孔から排水し、水位を10cmずつ下げ、0cmまで同様の測定を行なう。計測結果を図.13に示す。

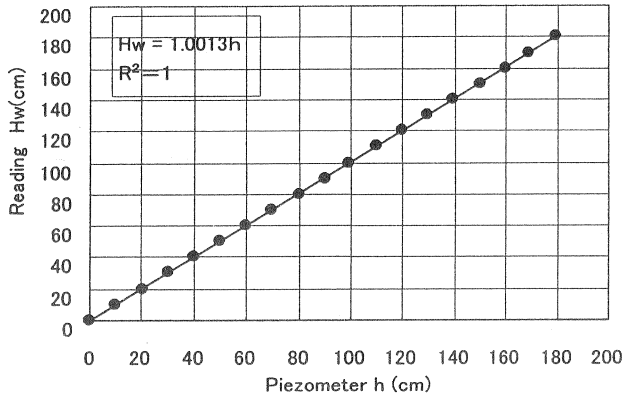


図.13 水位計のキャリブレーション結果

#### 4-5 雨量計

本研究では雨量の計測に転倒ます式雨量計を使用している。受水口径は20cmで、雨量0.5mm毎にますが転倒し、パルス信号を送るようになっている。転倒した回数（パルス信号の回数）をデータロガーに記録させ、パソコンによりデータ回収を行なう。

電源は専用リチウム電池パック（または外部電源7.5V）、消費電流は測定時30mA、待機時0.08mA、使用環境温度 $-35\sim 80^{\circ}\text{C}$ である。

### 5. 設置方法

#### 5-1 テンシオメータの設置方法

まずは観測地点を選定する。急勾配のところは設置作業や維持作業が困難であり、また、大きな木が多い場所は環境保全上の問題で木を切ることができないため計器の設置ができない。それらを考慮し、本研究では崩壊溪流の左右2測線上にそれぞれ3ヶ所ずつ（急勾配の上部、急勾配の下部、緩勾配の1ヶ所ずつ）設置と維持作業が可能な場所を選定した。

設置深度が50と100cmの場合、 $\phi 2.1\text{cm}\times 100\text{cm}$ のハンドオーガで地表面から直接設置孔を掘削する。一方、設置深度が150と200cmの場合はハンドオーガでの掘削が不可能であるため、まずはスコップとバール等で $1\times 1\times 1\text{m}$ の孔を掘り、その中からハンドオーガで設置孔を削孔する。

設置孔が完成した後、計器の設置を行なう。先端にポーラスカップの付いた（テンシオメータの）パイプを設置孔に軽く押し込むようにして設置する。その後、テンシオメータと孔壁の間隙に土を埋め戻し、締め固めを行なう。

次に、パイプに脱気水を注入する。ここで、ポーラスカップが設置段階で割れていないかをチェックする必要がある。この段階ではパイプの上端にはセンサー部分が付いていないため、パイプが開放状態になっている。そのため、ビニールテープを用いて上端を密閉する。その後1時間ぐらい放置し、水位をチェックし、極端な速さで水が抜けていけばポーラスカップが割れている可能性が大きいので再設置を行なう。

また、ポーラスカップが周辺の地盤と密着せずに地盤内の水とポーラスカップ内の水が連動しない恐れもある。しかし、これは設置段階では確認ができないため、できるだけポーラスカップと地盤の間で隙間が生じないように注意する。設置する際、目標深さより5cm程度（ポーラスカップ分）、浅く削孔し、テンシオメータを押し込むという方法もあるが、本現場ではレキが多いためポーラスカップが割れる可能性が非常に大きい。そこで、この問題については測定開始後、データを解釈し、ポーラスカップと地盤が密着しているかどうかを判断することにした。

次に、埋設したパイプにセンサーを取り付ける。今回の設置ではレキが多いため、所定の深さにポーラスカップを設置できるとは限らない。したがって、パイプ長は現場で設置した長さに切り、その後センサーを取り付けるという手段を取った。

テンシオメータの水タンク内の空気は直射日光によって膨張するためセンサーの出力値に影響を与える。そのため、センサー部を覆うカバーを取り付ける。カバーは $\phi 15\text{cm}$ 、高さ17cmの空き缶の中にセンサーが入る穴を掘った発泡スチロール（断熱材として利用）を詰める。このカバーは気温の変動を少なくするほかにセンサーの防水の役割も果たす。

設置上の問題点として、今回の設置場所はレキが多いため当初計画した深さ通りに設置することはできなかった。また、ポーラスカップと周辺の土壌を密着させることが困難であり、設置孔に少量の土を埋め戻してから押し込んで設置したところもあった。それにもかかわらず、計測結果の出力値（圧力）が0付近でほとんど反応しないものが数箇所あった。TDRの結果からその地点の地盤は不飽和であることが確認できたため、サクシオン（負圧）が作用していると予想されるにもかかわらず、センサーが負圧を示していないのは、ポーラスカップと周りの土が密着していないことが原因だと思われる。そのため、新しい設置孔を掘削し、設置し直した。

#### 5-2 TDRの設置方法

TDRの設置は、テンシオメータと同様に50と100cmの場合は $\phi 3.6\text{cm}$ のバールを用いて地表より直接掘削して設置するが、150と200cmの場合はテンシオメータの設置の際に掘った $1\times 1\times 1\text{m}$ の穴よりバールを用いてさらに掘削する。設置孔が完成したらそれぞれの設置孔にTDRプローブのロッドを刺した状態で設置し、締

め固めを行なう。

### 5-3 雨量計の設置方法

雨量計はテンシオメータ等の設置場所のすぐ近くに設置することが望ましいが、設置場所は山の中であり、樹木が障害となるため、設置場所の近傍で周りに障害物がないような場所を選定した。

図.3 に示すように、2つの測線のほぼ中間に位置する地点において、39×19×12cmの市販のコンクリートブロックを地盤内に埋め、そのブロックに雨量計を取り付けた。

### 5-4 地下水位計の設置方法

地下水位計はA2観測地点の1ヶ所だけに設置している。事前に市販のφ4cm塩化ビニールパイプに地下水が出入りできるようにハンドドリルを用いてφ2.9mmの孔を約30度のらせん状に削孔する。次に、パイプの中に土粒子が入らないように75μmの網でパイプの外周を覆い、外れないようにワイヤーで固定する。

テンシオメータとTDRの150と200cm用の設置孔を作成する際に掘った1×1×1mの穴の中にパール等を用いてさらにφ4cm深さ1mの孔を掘る。その後、用意したパイプを設置孔に設置し、埋め戻す。水位計のセンサー部分をパイプの中に入れ、パイプの上先端に雨水が直接入らないように蓋をする。

### 5-5 維持管理

山の中に設置していることから蟻等の昆虫やネズミ等の動物による被害も予想されるため、いくつかの対策を行なった。まず、ケーブルハーネスの集束とネズミ等の動物による被害を防ぐために、センサーとロガーをつなぐケーブルにはコイルチューブをまく。次に、収納ボックスにはセンサーからのケーブルを通す口が存在する。そこから、蟻等の昆虫が入らないように油粘土で密閉し、中にも蟻除け粉末剤を撒いた。また、テンシオメータの周辺にも大気圧開放パイプからセンサー内に蟻等が入らないようにするため蟻除け剤を撒いている。最後に周辺にフェンスを設置し、動物の侵入を防いだ。

テンシオメータは不飽和状態にある土中のサクシジョンをアクリルパイプ内に封入した脱気水を介して測定している。そのため、脱気水が土中へ徐々に流出するため、脱気水を定期的に(3~6週間に1回程度)補給することが必要である。

本観測の電源は、12vバッテリー(容量80AH)を使用しているため、バッテリーの交換が必要である。テンシオメータ4本、TDR4本、計8本の計測の場合には、6~8週間に1回程度の交換が必要である。

## 6. 計測結果とその考察

図.14は2001年6月10日から7月20日まで地点B3で得られた計測結果を示している。上から順にテンシオ

メータ、TDR、雨量計の結果となっている。含水率は設置深度100cmで一番大きく、50cmで一番小さい値を示し、サクシジョンは水分量に対応し、設置深度97cmで一番小さく、60cmで一番大きい値を示している。6月10~12日の間は無降雨であるため、設置深度50,100,155cm周辺のまさ土は少しずつではあるが乾燥している。

また、13~14日の2日間で約40mm(最大時間雨量7.5mm)の雨が降っている。TDRの結果を見ると、この雨によって深度50cmの位置では13日の深夜から、また100cmは14日、155cmと195cmは15日にそれぞれ水分量が上昇し始めている。また、それに対応してテンシオメータの結果でもサクシジョンが小さくなる傾向を示している。降雨により水分量が上昇するとサクシジョンが低下するという当然の結果ではあるが三木ら<sup>3)</sup>や北村ら<sup>4)</sup>などの計測結果にも同様な結果が得られている。

18日の夜から未明にかけて33.5mm(最大時間雨量22.5mm)、19日には最大時間雨量33.5mmで、日雨量130mmの強い雨が降った。この雨に着目し地点B3の19~22日のサクシジョンと水分の深さ方向分布の経時変化を示したものが図.15(a)および図.15(b)である。前述したように比較的小きな降雨では深さ方向で時間的遅れをもちながら各計器が反応を示しているが、比較強い雨の場合は違う反応を示す。まず、図.15のb-1図の水分量変化を見ると、18日の夜に降った雨によって19日の12時に深度50cmの位置でわずかではあるが反応し始め、16時には深度100cmの位置でも水分量が上昇している。さらに、この時に深度195cmの位置でも水分量が大きく上昇している。これは深度50,100cmの位置は地表からの雨水の浸透によって水分量が増加しているが、深度195cmの位置は上流からの浸透流によって地下水位が発生したためと思われる。地点B3は斜面勾配がややゆるくなった地点で動水勾配が小さくなっていることと地形的にも集水地形で横流入があったためこのような結果になったと思われる。図(a-1)のテンシオメータの結果を見てもサクシジョンは水分量に対応した変化を示している(12時の深度97cmの位置での反応はセンサーの故障によるものである)。16時には深度172cmの位置で正圧が発生しており、前述したように地下水位が形成されたことを裏付けている。20日の0時には図(b-2)で見られるように50cmをはじめ、全ての所で水分量が大きく上昇し、図(a-2)のテンシオメータも正圧を示している。21日には水位が低下しているために図(a-3)のテンシオメータの分布は平行移動するように正圧が低下し深度50cmの位置では12時から負圧に回復している。また、図(b-3)のTDRの結果でも水位は20時に深度50cmの位置の下方までに低下したと思われ、深度50cmの位置の水分量も大幅に減少している。22日の0時から24時にかけて全ての所でサクシジョンが回復し19日の0時に近い状態まで回復している(図(a-4))。水分量も同様に乾燥の方向へ

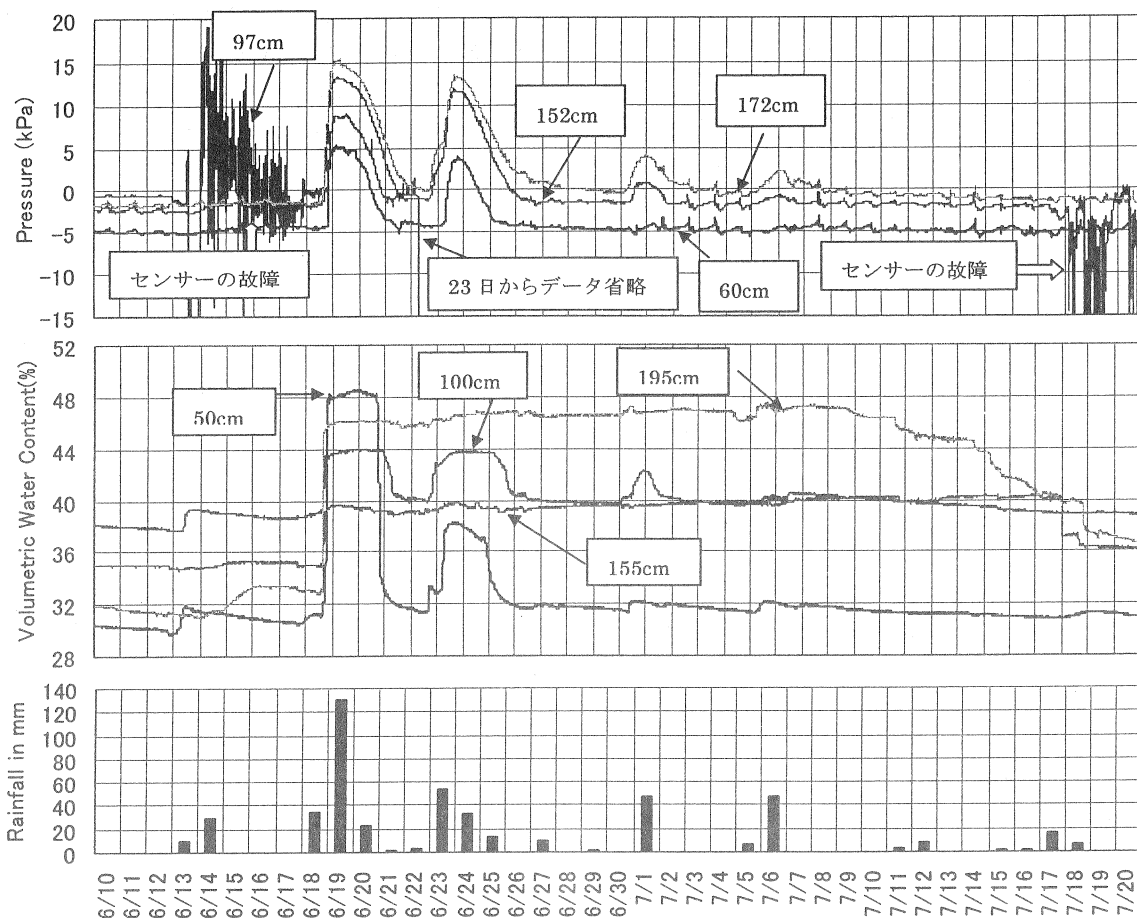


図.14 地点 B3 での 6 月 10 日～7 月 20 日の計測結果

向かっている (図(b-4)). 図 (a-4) の 20 時の時点ではサクシオンは深度 60, 97cm の位置で負圧に回復している. 深度 159cm の位置も負圧に回復したが, まだ正圧に近く, 飽和に近い状態である. 深度 172cm の位置では地下水位が低下してきているためにテンシオメータの正圧値も減少している. 図 (b-4) の水分量も 20 時の時点では深度 100cm の位置までは乾いていく (正確に言えば地下水位が低下していく) ことが明確に見られる. 深度 155cm の位置はわずかな量ではあるが水分量は減少している. しかし, 深度 200cm の位置は地下水位が形成されたままであると思われ, 水分量に変化が見られず, 依然として高い状態である.

北村ら<sup>4)</sup>が国分市薄木のしらす斜面で計測した結果では降雨により地盤の浅いところから深さ方向に飽和領域が進行していくが, 本研究のまさ土斜面の場合, 雨水の浸透により地表付近ではサクシオンが少量の低下が見られるものの, 飽和領域は地盤の深いところから地表面への方向へ進行していくことを裏付ける結果となっている (図.15(a-1)). すなわち, 地下水が形成され, それが増加していくものと考えられる. 降雨が停止した後のサクシオンが回復する過程ではサクシオンの分布が平行移動するという傾向は北村ら<sup>4)</sup>と同じである.

図.14 に戻ってみると, 6 月 20 日以降は 6 月 21, 22

日にわずかな雨が降っているが無降雨に近い状態で, その間サクシオンは増加し, 水分量は減少しているが, 23～25 日の雨により水分量が再び上昇し, サクシオンも正圧になっている (ここで, 深度 97cm の位置位置のテンシオメータが故障したために 23 日からの結果を省略した). 25 日以降はサクシオンが回復し深度 60 と 159cm の位置では負圧までに回復し, 深度 172cm の位置はまだ正圧に近い状態である. 水分量も深度 50 と 100cm の位置は大幅に減少しているが, 深度 155 と 195cm の位置ではまだ高い水分量のままである. 7 月 1 日に再び雨が降り, TDR の結果を見ると全ての位置で水分量が少しずつ上昇し, サクシオンも深度 159 と 172cm の位置では再び正圧になっている. 7 月 6 日の雨によっても同様の傾向が見られた. 7 月 7 日以降は深度 159 と 172cm の位置のサクシオンが増加し, TDR の結果を見ても 7 日以降は深度 50 と 100cm の位置で水分量は減少している. 9 日からは深度 195cm の位置で水分量が減少し, 14 日からは大幅に減少している. 深度 155cm の位置の水分量は 17 日に減少している. 深度 50cm の位置は 17 日の雨により水分量が 18 日から再び上昇しているが 19 日から減少している. 図.14 のテンシオメータの結果を見ると (特に 7 月に入ってから), ほぼ 1 日の周期をもって出力値が変動している. また, その変



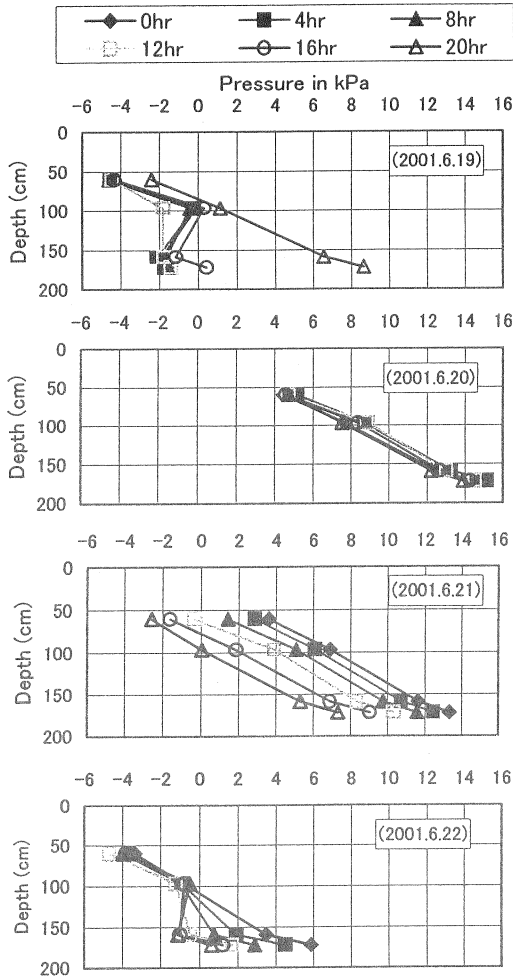


図.15(a) 深さ方向のサクシヨンの経時変化

動幅が晴天の時に大きく、雨や曇りの日には小さい。したがって、このように出力値が変動するのは気温の日変化によりタンク内の空気が膨張収縮して出力値に影響を与えているためと思われる。同様の現象について北村ら<sup>4)</sup>も報告している。

図.16 (a), (b)は 19 日の降雨によって A3 の深度 115cm と B3 の深度 60cm 地点で得られた水分特性曲線を示す。両地点とも体積含水率が約 45%まで上昇してもサクシヨンの低下はそれほど起こらないが、体積含水率が 45~50%(間隙比が  $e=0.9$  の場合に飽和度 85~95% に相当する) 付近から急激にサクシオンが低下し正圧になった。一方、降雨が停止した後は、水分量の減少とともにサクシオンは急激に回復するものの、体積含水率が 45%より小さくなると体積含水比が減少してもサクシオンはほぼ一定値を保ち、サクシオンが完全に回復しない状態が続く。このことは、雨が停止した後でもしばらくサクシオンが低い状態にあり、不安定な状況が続くことを示している。

図.17 は 6 月 10 日~7 月 20 日の測線 A と B での同じ深さにおける土壌水分量の経時変化を比較したものである。図.17 (a) と (b) は測線 B の設置深度 50cm と 150cm, 図.17 (c) と (d) は測線 A の設置深度約 50cm

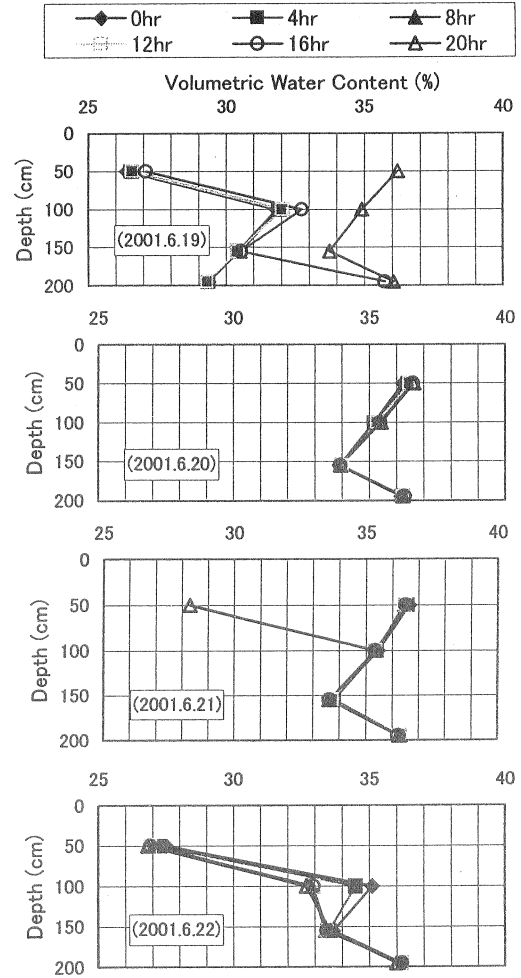


図.15(b) 深さ方向の体積含水率の経時変化

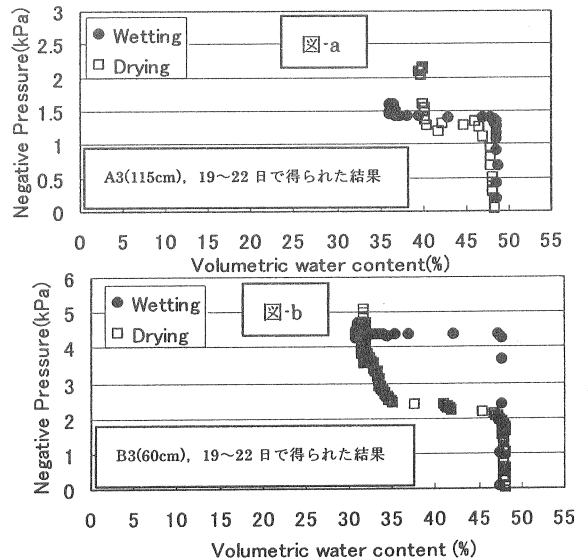


図.16 現地で得られた水分特性曲線

と約 150cm で得られた結果である。図.17(e)は雨量データである。この図.17 より同じ斜面でも設置地点によって水分量の変動が異なることがわかる。まず、図.17 (a) の設置深度 50cm の場合の反応を見ると、13 日と 14 日の場合、この二日間で約 30mm の雨が降っており

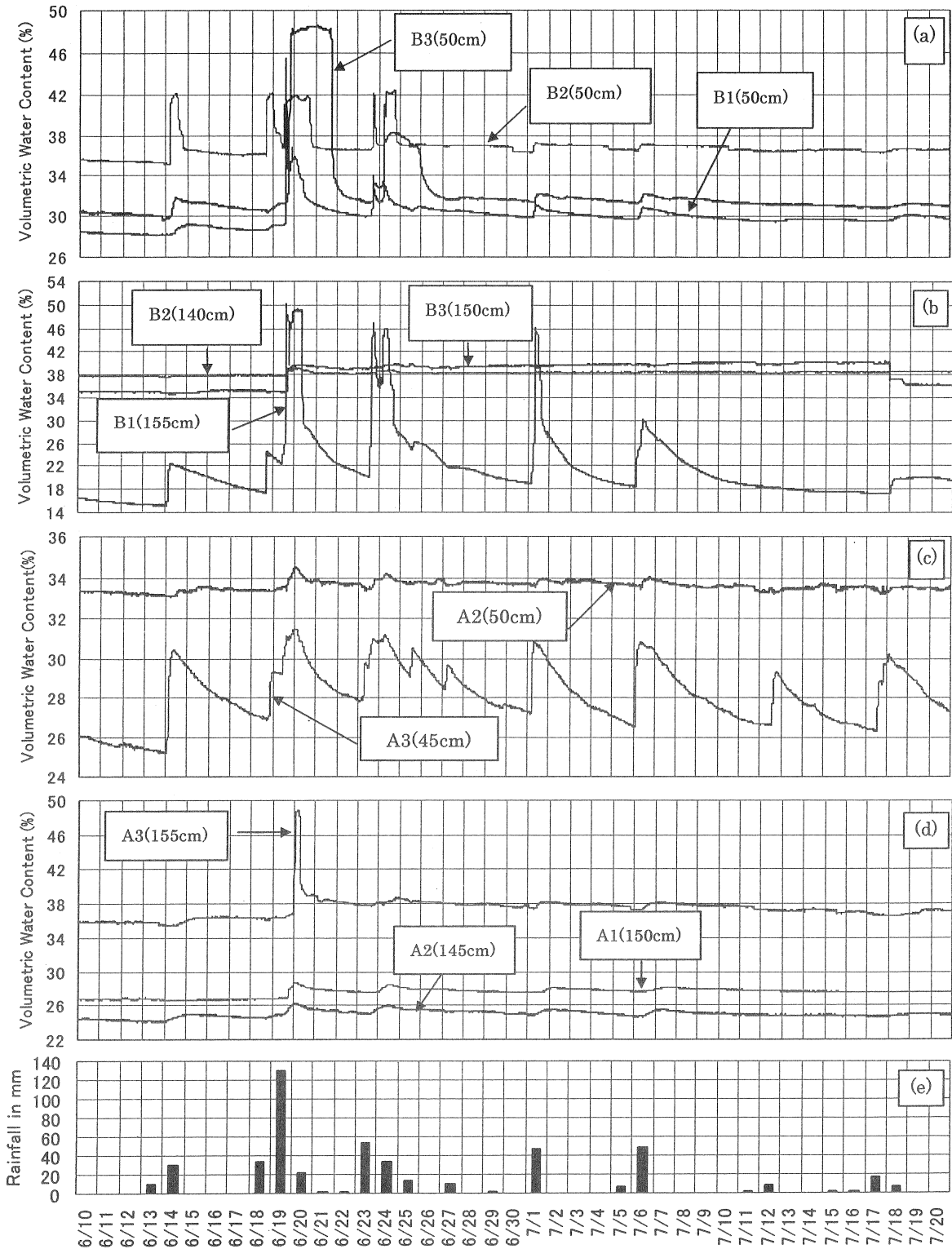


図.17 観測地点 A と B の同じ深さにおける土壌水分量の経時変化の比較 (6月10日~7月20日)

最大時間雨量は 7.5mm であり、この雨によって一番早く反応を示したのは B3 で、少しずつ遅れながら B2 と B1 で水分量が上昇している。水分量の減少については B2 で 37% 近くまで急に減少し、その後はゆっくり減少している。他の個所ではわずかの時間差で B3 と B1 の順で水分量の減少が見られた。

一方、19日の雨の場合、わずかの時間差ではあるが B2, B1, B3 の順で水分量が上昇している。図.15 (a) で述べたように B3 の 50cm の深さまで地下水位が形成されており、B1 と B2 も同様に地下水位が形成されている。雨が停止した後の水分量の減少については設置位置および設置地点周辺の縦断方向の平均勾配による影響

が認められた。斜面上部に位置する B1 では 19 日に水分量が減少し、その下方にある B2 では約一日遅れで減少した。また、斜面下部にあり最も勾配の小さい B3 ではさらに約一日遅れで水分量が減少している。23 日の雨でも 19 日同様の傾向が見られた。

図.17(b)の設置深度 150cm の場合を見ると、19 日の降雨により B1 と B3 はほぼ同時に、また B2 では少し遅れて水分量が上昇している。しかし、B2 の反応が鈍く、これがこの地点の水分量が高く飽和状態に近いのか計測器の不良によるものか、今後原因を解明する必要がある。次に、水分量の減少について見ると、B1 は図.17(a)同様に一番早く減少している。しかし、B3 は 6 月 19 日以降の雨の影響もあるが、7 月 17 日までに明確な水分量の減少が見られなかった。B1 の個所では 6 月 19 日以降もこれまで同様に雨が降ると水分量が急上昇し、その後すぐに減少していることが見られた。これは、この地点で浸透雨水が流入流出しやすいことを示している。

図.17(a)と(b)で 19 日のように比較的強い雨が降った後に水分量の減少のパターンが異なるのは設置位置および縦断方向の平均勾配の違いによるものと思われる。斜面上部に位置する B1 が一番早く、その下方の B2 が少し遅れ、斜面下部で緩勾配の B3 は一番遅く水分量が減少していることが確認された。

図.17(c)の観測地点 A の設置深度約 50cm の場合、全体的に見ると A3 は雨が降ると水分量が急上昇しその後すぐに減少していることが見られ、この地点で浸透雨水が流入流出しやすいことを示す。一方、A2 は飽和状態に近いための A3 ほどは水分量の上昇幅が見られない。また、A2 は A3 より少し遅れて反応を示している。

図.17(d)の観測地点 A の設置深度約 150cm の場合、全体的に見ると雨が降ると各個所で水分量が微小に反応している。しかし、A1 は約 40mm 以上、A2 は約 30mm 以上、A3 は約 20mm 以上降った時に反応が見られ、一番早く反応しているのは A2 である。6 月 19 日の雨により A3 の個所で水分量が大きく上昇している。A1 と A2 は地表からの浸透によって水分量が増加しているが、A3 では地表からの浸透流だけではなく、上流からの浸透流によって地下水位が発生したためと思われる。この地点でのテンシオメータの結果は省略したが、19 日の降雨により A3 地点の設置深度 115 と 174cm で正圧が発生している。

図.17 を見ると同じ斜面でも雨水が浸透しやすい地点とそうではない地点がある。また、測線 A と B を比較してみても雨水による水分量の変動が異なる。これらは各個所の植生、勾配や集水域、谷や尾根からの距離といった地形、また地盤内構造の違いが原因であると考えられるが現時点ではこれらの要因がどのように影響しているか不明である。今後、データを集積すると共にこれらの関連性と浸透特性を明らかにしていく必要がある。

## 7. あとがき

まさ土斜面において崩壊を引き起こす雨水の浸透メカニズムおよび降雨に伴うまさ土斜面の強度低下特性を明らかにすることを目的として、平成 11 年 6 月 29 日の豪雨によって広島大学東広島キャンパス内で崩壊した斜面の近傍で、サクシジョン、土壌水分、地下水位および雨量の現地計測を開始した。

現在までの計測結果より、以下のようなことが明らかになった。

(1)比較的小さな降雨では、約 24 時間以内で設置深度約 150cm まで、35~40 時間以内で約 200cm の個所で水分量の変化が見られた。また、水分量の減少の場合、雨が停止した 24 時間以内で約設置深度 200cm までの全ての個所で水分量が減少し始めた。しかし、1 日~3 日遅れて減少する地点もあり、設置地点によって異なる。サクシジョンの場合も水分量と同様の傾向が見られ、水分量に対応した変化が見られた。

(2)比較的強い降雨では、地表からの雨水の浸透流だけではなく、上流からの浸透流で A3, B2, B3 で地下水位が発生した。この地下水位は雨が降って 24 時間以内に形成された。降雨強度によって水分量の上昇特性と減少特性は異なる。水分量の減少の過程では設置深度 50cm の場合約 1~3 日で水分量が減少し始めたが、150cm と 200cm の場合、数日間回復が見られないなど斜面の上部と下部、また、設置地点周辺の縦断方向の平均勾配によって違った挙動を示す。サクシジョンも水分量と同様の傾向が見られた。

(3)まさ土斜面の場合、浸透雨水が不浸透層（基盤面）まで浸透し、基盤面のところで地下水位が形成され、上昇していくものと考えられる。

(4)水分量とサクシジョンの関係では飽和度が 85~95% 付近から急激にサクシジョンが低下し正圧になった。降雨が停止した後、水分量の減少に伴いサクシジョンが急激に回復するが、飽和度 85%より小さくなると水分量が減少してもサクシジョンが完全に回復しない状態が続いた。

(5)同じ山でも斜面が異なるとサクシジョンや水分量の変化パターンが異なる。また、同じ斜面でも斜面の上部と下部でサクシジョンや水分量の反応の仕方が異なることが明らかとなった。今後これらの浸透特性について明らかにすることが必要である。

今後、データの集積に努めるとともに降雨パターンと土中への浸透特性の関係を考慮した斜面の安定性を定量的に評価する方法について探って行きたい。

謝辞:本研究は大学院重点特別経費の援助を受けました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 西田 一彦：風化残積土の工学的性質，鹿島出版，pp.1-5, 1986.

- 2) 地盤工学会緊急調査団：平成 11 年 6 月 29 日豪雨による広島県の斜面災害に関する緊急調査報告，土と基礎，Vol47, No.10, pp.40-45, 1999.
- 3) 三木 博史，藤井 厚企，古田 光弘：特定のり面・斜面の危険雨量の設定手法の検討，土木技術資料 41-2, pp.50-55, 1999.
- 4) 北村 良介，川井 田実，阿部 寛史，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) 川上 浩，阿部 寛史：現地斜面におけるサクシヨンの変動と掘削が与える影響，第 18 回土質工学研究発表会発表概要集，pp.1287-1288, 1983.
- 6) 矢田部 龍一，八木 則男，榎 明潔，渡邊 晃史：斜面崩壊予測のための斜面内間隙圧の測定，第 23 回土質工学研究発表会発表概要集，pp.1749-1750, 1988.
- 7) 加藤 正司，平林 英明，軽部 大蔵：サイクロメータと埋込型テンシオメータによるサクシヨンの現場測定，土木学会第 44 回年次学術講演会，pp.18～19, 1988.
- 8) 村石 尚，杉山 友康，佐溝 昌彦，岩崎 公俊，成瀬 文宏：降雨時の盛土の水圧変動と安定性の検討，第 26 回土質工学研究発表会発表概要集，pp.1615-1616, 1991.
- 9) 田邊 雅之，島 重徳，吉國 洋：人口衛星データおよび斜面監視システムを用いた斜面の危険度予測，第 33 回地盤工学研究発表会発表概要集，pp.281-282, 1998.
- 10) 佐々木 康，Dissanayake.A.K., Thi Ha：平成 11 年の豪雨による広島大学構内の斜面崩壊，土木学会中国支部第 52 回研究発表会発表概要集，pp.439-440, 2000.
- 11) (株) シマダ技術コンサルタント：広島大学（東広島）山中地区等地盤調査報告書，pp.7-26, 1999.
- 12) 坂元 竜太：遠隔操作によるサクシヨンと雨量の現地計測について，鹿児島大学工学部社会システム工学講座卒業論文，pp.6-10, 1999.
- 13) 広田 知良：地中温度・土壌水分，身近な気象・気候調査の基礎（牛山 素行，編著），古今書院，pp.31-34, 2000.
- 14) Stacheder, M., Kohler, K., Fundinger, R. and Biime, P. : Measurement of Material Moisture with Time-Domain Reflectometry, Technisches Messen, Vol.64, 11, pp.453-457, 1997.
- 15) Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. : Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, Water Resources Research, Vol.16, No.3, pp.574-582, 1980.
- 16) Topp, G.C., Yanuka, M., Zebchuk, W.D. and Zegelin, S. : Determination of Electrical Conductivity Using Time Domain Reflectometry : Soil and Water Experiments in Coaxial Lines, Water Resources Research, Vol.24, No.7, pp.945-952, 1988.
- 17) 竹下 祐二，小林 弘明，八木 一雄，開發 一郎：TDR 法による土壌水分計と地下レーダーを用いた不飽和地盤の水分動態測定，土木学会中国支部第 52 回研究発表会概要集，pp.359-360, 2000.