

## 超音波土中水分量測定における反射強度と 体積含水率の相関性に関する研究

Study on Correlation between Reflective Intensity and Volumetric Water Content in Measuring Soil Moisture Using Ultrasonic Waves

平岡伸隆<sup>1</sup>・中野峻也<sup>2</sup>・田中克彦<sup>3</sup>・藤本将光<sup>4</sup>・深川良一<sup>5</sup>・外狩麻子<sup>6</sup>・岩佐直人<sup>7</sup>

Nobutaka Hiraoka, Shunya Nakano, Katsuhiko Tanaka, Masamitsu Fujimoto, Ryoichi Fukagawa,  
Asako Togari and Naoto Iwasa

<sup>1</sup>立命館大学大学院博士後期課程 理工学研究科 環境都市専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Doctoral program student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

<sup>2</sup>立命館大学大学院博士前期課程 理工学研究科 環境都市専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Master's program student, Ritsumeikan University, Graduate School of Science and Engineering

<sup>3</sup>立命館大学教授 総合科学技術研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Research Organization of Science and Technology

<sup>4</sup>立命館大学助教 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>5</sup>立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>6</sup>東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター 防災研究所 (〒331-8513さいたま市北区日進町2-479)

Chief Researcher, East Japan Railway Company, Disaster Prevention Research Lab.

<sup>7</sup>日鐵住金建材株式会社 土木商品事業部門 (〒135-0042江東区木場2-17-12)

Nippon Steel & Sumikin Metal Products Co., Ltd., Fabricated Construction Materials Sales Dept.

Monitoring of soil moisture and groundwater level is important for predicting slope failure caused by heavy rainfall. We have been developing a new device using ultrasonic waves for monitoring soil moisture and groundwater level. In this paper, multi cyclic experiment which has wetting process and drying process in laboratory is carried out to validate availability of measuremental soil moisture using the ultrasonic monitoring system. In addition, the soil moisture obtained by ultrasonic detector is validated to calibrate the reflective intensity into the volumetric water content. The results suggest possible beneficial effect of the calibration.

**Keywords :** *Slope failure, Soil moisture, Groundwater level, Ultrasonic wave*

### 1. はじめに

日本における土砂災害発生件数は年平均1000件以上にのぼり、人的・経済的に甚大な被害が出ている(国土交通省公表)。文化遺産もこの例外ではなく、特に山麓に建立された寺院等は斜面崩壊の被害を受けやすい。斜面崩壊の対策として、モルタル吹付け工を始めとした法面保護工が挙げられるが、文化財周辺の斜面では景観を損なう大規模な対策が行えない場合がある。そこで、斜面崩壊を予測し、危険時には警報を発令し避難するソフト対策が有効となる。この方法だけでは土砂災害から建造物を直接守ることはできないが、

周辺住民や寺院の職員、観光客等に対する人的被害だけでも最小限に抑えることが可能であり、また予測の過程で得られるデータは今後の斜面崩壊対策にも役立つものと考えられる。

土砂災害のなかでも降雨による表層崩壊は発生件数が最も多く、その発生メカニズムは1) 雨水浸透による土塊自重の増加、2) 斜面内の含水量の増加による地盤の強度低下、3) 地下水位の上昇による浮力の増加と考えられている<sup>1)</sup>。したがって、降雨時の表層崩壊を予測するには、土中水分状態や地下水位を把握することが重要であるといえる。また近年、局地的な集中豪雨が増加しており、気象庁の設ける降雨観測所だけでは個別の斜面における実際の降雨量を把握しきれない。精度よく斜面崩壊を予測するには、対象斜面に雨量、土中水分、地下水位のリアルタイムモニタリングシステムを構築する必要があり、予測に応じて危険時には警報を発令・またそれを解除するシステムが必要である。

これまで、現地モニタリングによる土中水分量の把握によって降雨による斜面崩壊を予測した研究が報告されている<sup>2)3)</sup>。斜面内の地質構造は複雑であるため、より精度の高い水分測定には、対象斜面においてなるべく多くの計測点を設ける必要があるが、既存のモニタリングシステムは計測機器が高価である点や、設置作業の困難さ、およびメンテナンスの頻度に課題を抱えている。そこで上記の課題を解決し、広域または多地点でのモニタリングシステムに適した土中水分・水位測定器の開発が望まれる。また文化財を管理する個人や法人、地方自治体等が自ら運用できるように、安価でかつシステムのパッケージ化を行えば有用性が高まるものと思われる。そこで著者らは多地点での運用を想定し、超音波を用いた土中の水分・地下水位モニタリングシステムの開発をすすめてきた<sup>4)5)</sup>。本論文では超音波測定土中水分・水位測定システムの水分測定のための反射強度と体積含水率の相関性の把握を目的とし、検証実験を実施した。

## 2. 超音波による土中水分・水位測定方法

物質を伝搬している超音波は異なる密度を持つ物質に当たると反射する。反射率は伝搬してきた物質と反射する物質の音響インピーダンス（密度×音速）の差に依存し、前者が空気（気体）、後者が土（個体）である場合には、ほぼ全反射を起こす。このとき、反射面となる土の凹凸により音波が散乱し、その程度によって反射波の強弱が決定する。本測定システムではこの性質を利用して土中の水分状態を計測する。

測定対象となる土に空気を伝搬させて超音波を送信させる検出器、検出器を駆動させデータの送受信を行う超音波測定器、さらに計測で得た超音波波形を解析するPCソフトウェアを試作した（図1参照）。検出器は超音波を送受信する超音波トランスデューサ（MA40MF14-0B、村田製作所製）、超音波を測定面まで誘導する導波管、上記2つを固定する台座、測定面の表面を固定し計測値を安定させるための金網から構成される（図2参照）。超音波トランスデューサは、周波数40 kHz、許容電圧160 Vp-p、直径14 mm、高さ8 mmの円柱形のものを使用した。この超音波トランスデューサは自動車のバックソナーに使用されている部品であり、これを流用することで大幅なコスト削減となった。導波管はトランスデューサ径より一回り大きな内径18 mm、外径22 mmの真鍮製またはステンレス製パイプを用い、上部には水位が上昇した際に導波管内に水が侵入できるよう空気穴を設けている。導波管の長さは30 cmから100 cmまで変えることができ、測定深

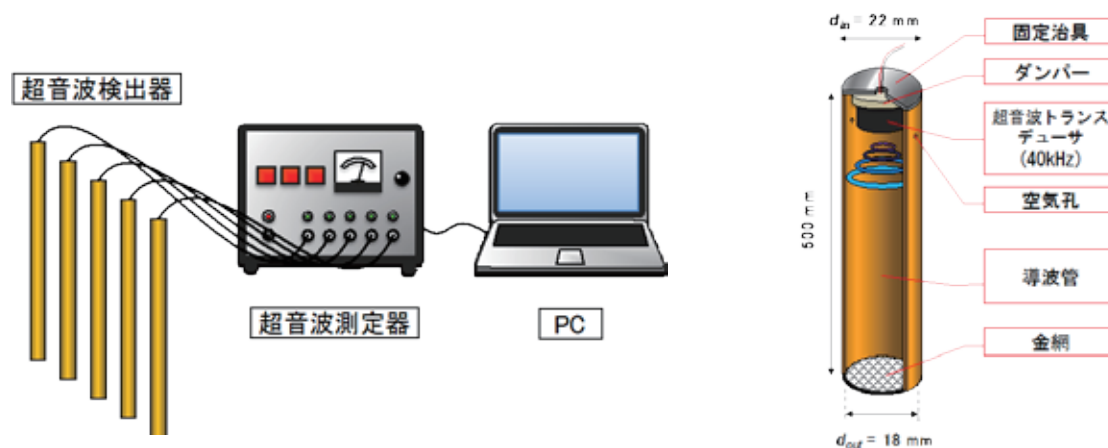


図1 超音波測定システム

図2 超音波検出器

度に応じて選択する。本研究では超音波測定器から超音波トランスデューサに60 Vp-pの電力を送り、16波のバースト信号を発信させた。超音波トランスデューサから発信された超音波は導波管内の空気を伝搬し、測定面の土で反射し、再びトランスデューサで受信され、超音波測定器に送られる。この超音波波形データをPCに転送し、解析をすることで、測定面上の水分量もしくは導波管内の水位を計測する。

超音波測定で得られる波形を図3に示す。波形には送信波と反射波が現れ、反射波のピーク値を反射強度、送信波を発信してからピーク値が検出されるまでの時間を伝搬時間とする。図4に3つの異なる水分状態の地盤から得られる超音波波形データと概略図を示す。測定対象である土が乾燥状態のとき、測定面の土は土粒子によって乱れ、ここに当たった超音波は散乱を起こし反射強度は小さくなる。この土が湿潤状態となると土粒子表面および土粒子間に水膜を形成し、測定面の凹凸が減少する。このため散乱が減少し、反射強度は強くなる。また、さらに飽和度が上昇し続け、地下水位を形成すると導波管内に水位が生じ、超音波の反射強度は最大となり、超音波の到達距離が短くなるため反射するまでの伝搬時間が短くなる。つまり超音波の反射強度により土中の水分状態を、伝搬時間により地下水位を計測し、一つの検出器で土中水分・水位の2つの事象を連続的に計測することが可能である。

超音波検出器の設置方法としては、検出器ヘッドを地表に出し導波管長さを変える部分埋設法と、導波管長さを固定し、測定深度まで検出器を埋設する完全埋設法の2つを提案する(図5参照)。

部分埋設法は比較的設置が容易であり、オーガ等により直径22 mm程度の孔をあけ、深度ごとの長さの検出器を挿入する。検出器ヘッドが地表に出ているので、超音波トランスデューサの取り外しや、測定面の状態を導波管内から観察することが可能である。一方、完全埋設法は超音波検出器の導波管径より一回り大きいケーシングパイプを必要深度まで挿入し、ケーシングパイプ内に超音波検出器を落としこむ。超音波検出器には回収用の紐をつける必要があり、部分埋設型と比較すると設置作業に手間がかかるが、導波管長さを揃えることができ、導波管長さの違いによる反射強度減衰を考慮する必要がなく、反射強度の解釈が容易である。

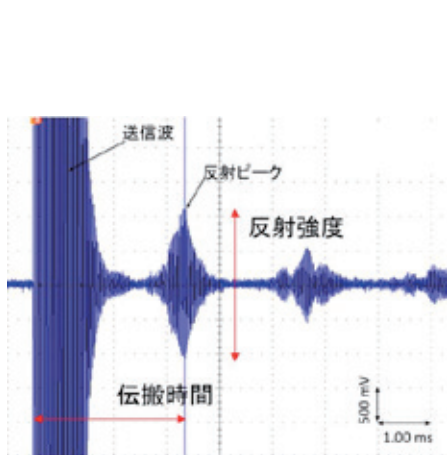


図3 超音波波形

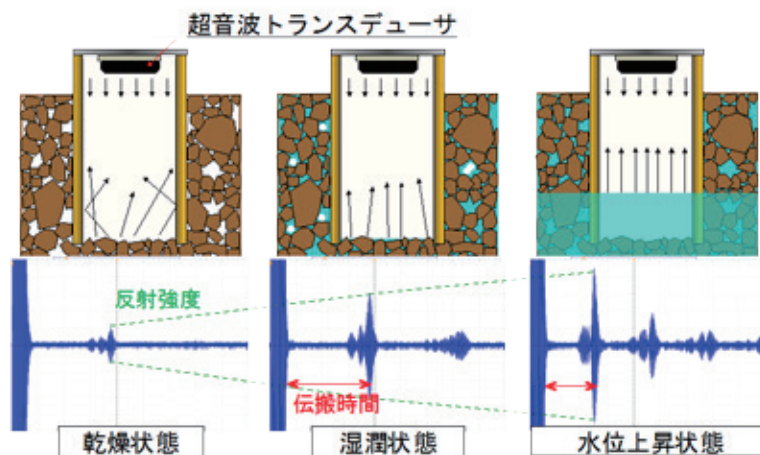
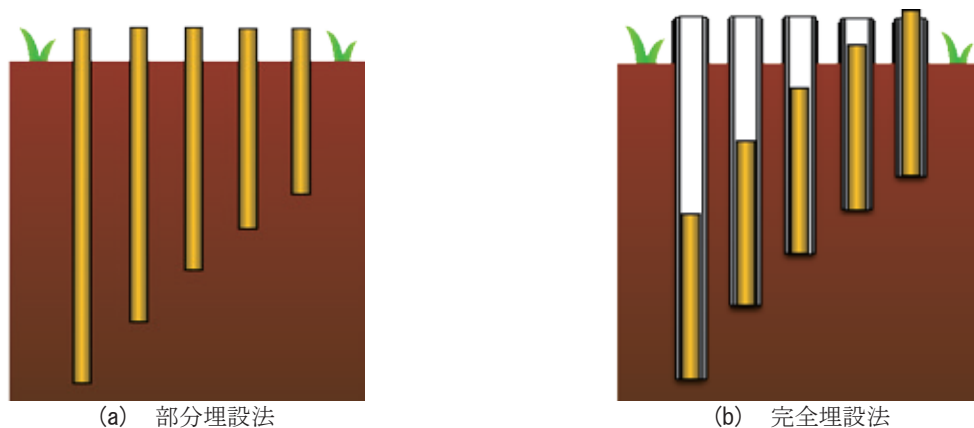


図4 異なる湿潤状態での反射波形と概略図



(a) 部分埋設法

(b) 完全埋設法

図5 超音波検出器の設置方法

以上より、超音波測定システムは、安価、設置作業が簡便、メンテナンスを必要としないというコスト面および作業面での利点を有し、また1つの検出器で不飽和から飽和、さらに地下水水位の上昇と地盤内で発生する水分変化を1つの検出器で連続的に測定が可能である。この特徴を活かし、現地モニタリングを実施する際に、広域や多地点での運用が期待できる。

### 3. 土中水分測定実験

#### (1) 豊浦砂を用いたサイクル実験

前述のように、超音波による土中水分測定は測定面（反射面）の土粒子とその間隙に形成される水膜による音波の散乱減少の変化を利用し、反射強度から水分量を測定している。反射強度の変化と測定面付近の体積含水率を比較し、その相関関係を明らかにすることで、反射強度から土中水分量に換算することが可能か、検証するため実験を行った。また、土槽内の水分が注水により湿潤し、その後乾燥していく過程と、この繰り返しを再現することで実際の地盤に近い水分変動を再現し、測定再現性を確認した。

図9に実験の概略図、表1に実験条件を示す。試料は豊浦砂を使用し、初期含水比5%、乾燥密度 $1.60 \text{ g/cm}^3$ で締め、乾燥過程を再現しやすくするため土槽厚は4 cmに設定し、底部を排水条件とした。土槽上面にはガーゼを引き、そこに水を少しずつ注水することで、ガーゼと土槽表面の間にキャピラリーバリアを発生させ、なるべく土槽全体均一に水を浸透させた。計測機器は超音波検出器2基、誘電率土壌水分計1基、熱電対1基を設置し、それぞれの超音波検出器をNo.1、No.2とした。超音波検出器は50 cmの導波管を用い、ケーシングパイプを設置後、その中に挿入した。各計測器の計測間隔は5分間とした。水分変動の繰り返しは3サイクル行い、1サイクル目は3回に分けて注水し、注水終了後、土槽が初期水分状態に乾燥するまで放置した。その後停電の影響で10日間ほどあけて2サイクル目を開始した。2サイクル目は最初に1度注水しその後放置した。3サイクル目は注水後、初期水分状態まで乾燥する前にさらに注水を行い湿潤状態からのさらなる水分増加の検知について検証した。

実験結果を図10に示す。反射強度はノイズが確認されたため10点の移動平均値を用いた。図10(a)より、室温が一定であり実験室内が恒温状態であったことが確認できる。誘電率土壌水分計から得た体積含水率と超音波測定から得られた反射強度の時系列推移を比較すると非常によく似た傾向を示しており、超音波測定が湿潤状態の水分検知や乾燥過程を捉えていることがわかる（図10(b)参照）。ただし、2サイクル目558時間以降、体積含水率20%以下（含水比12.5%以下）において、反射強度が体積含水率の減少に比べ、応答性が悪くなる。これは試験開始直後の6時間までにおいても同様であり、体積含水率が20%を下回る水分量に対しての分解能が若干低いことが分かった。この原因として、1)超音波測定の原理から、低い体積含水率では土粒子間の水膜形成が不十分であり、検知がしづらい、2)誘電率土壌水分計は測定端子周辺に広がる空間の水分状態を計測するため、超音波検出器下端における水分状態と誤差が生まれる、といったことが挙げられ、特に前者の影響が大きいものと考えられる。

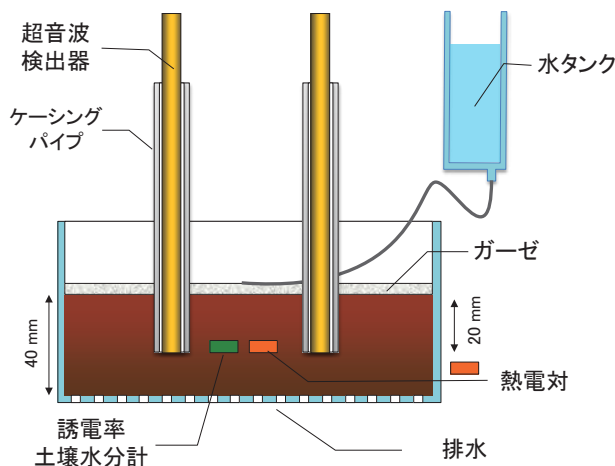


図9 実験概略図

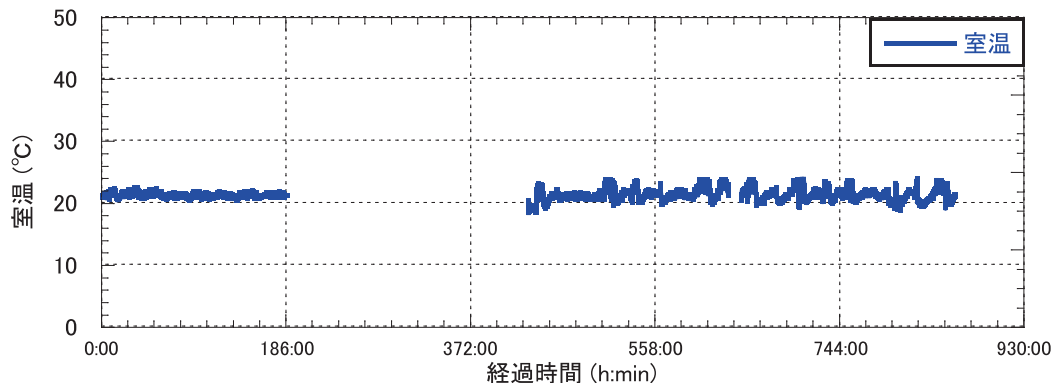
表1 実験条件

試料		豊浦砂	
土粒子密度		$2.65 \text{ g/cm}^3$	
初期含水比		5%	
設定乾燥密度		$1.60 \text{ g/cm}^3$	
注水時経過時間	1サイクル目	at 00:00	70 ml
		at 18:49	50 ml
		at 46:27	120 ml
		at 187:51	測定停止
	2サイクル目	at 430:10	120 ml
		at 632:20	測定停止
	3サイクル目	at 645:07	120 ml
		at 667:04	140 ml
		at 785:06	120 ml
at 861:36		測定停止	

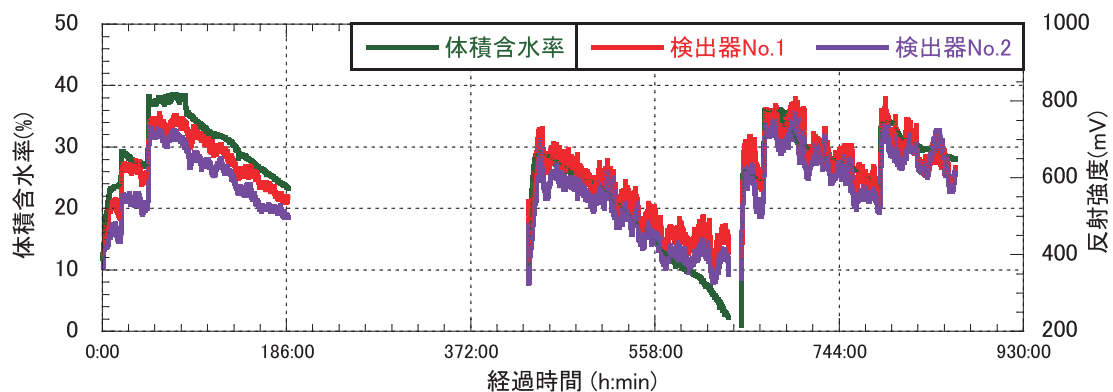


3サイクルすべての反射強度と体積含水率の相関図を図11に示す。前述の通り、乾燥状態において若干の応答性の低さが認められたため、2次関数による非線形回帰分析によって、それぞれの検出器ごとに相関係数を求めた。相関係数は検出器No.1で相関係数 $R=0.898$ 、検出器No.2で相関係数 $R=0.910$ となり、2つを合算させても相関係数 $R=0.884$ と非常に高い相関性を示した。これより、豊浦砂においては検出器ごとの校正を必要とせず、反射強度から体積含水率の算定が可能であることがわかった。

また、2サイクル目以降の反射強度および室温データのノイズが増加している（図10(b)参照）。この時、超音波波形ノイズも増加しており、測定器もしくは測定器と検出器をつなぐ同軸ケーブルに起因するノイズ、もしくは供給電圧に起因するノイズであると考えられ、この対策については今後の課題となる。

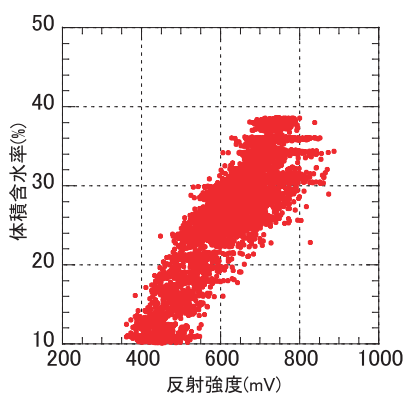


(a) 室温の時系列変化

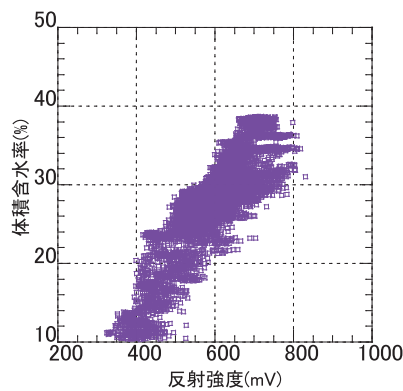


(b) 体積含水率と反射強度の時系列変化

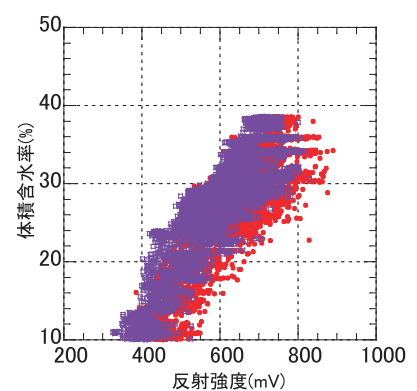
図10 豊浦砂におけるサイクル実験結果



(a) 検出器No.1における相関性  
 $R=0.898$   
 $y=-0.000118x^2+0.210x-57.695$



(b) 検出器No.2における相関性  
 $R=0.910$   
 $y=-0.000123x^2+0.205x-50.037$



(c) No.1およびNo.2の相関性  
 $R=0.884$   
 $y=-0.000111x^2+0.194x-48.964$

図11 豊浦砂における反射強度と体積含水率の相関性

## (2) 試料の違いによる相関性検証実験

(1)の実験により、豊浦砂での反射強度と体積含水率の相関性について考察した。土試料による水分検知精度の違いについて検証するため、斜面を構成する土に近い試料を用いて(1)と同様の実験を実施した。試料は滋賀県信楽産まさ土を使用し、大きな粒子を除くため4.75 mm通過試料を用いた。表2に実験条件を示す。豊浦砂と同様に初期含水比5%、乾燥密度1.60 g/cm<sup>3</sup>で締め固めた。まさ土に設置した検出器をNo.3、No.4とする。まさ土の注水は表2に示すように2度にわけて行い、注水量を豊浦砂での実験に合わせた。

図12(a)に(1)豊浦砂における実験での1サイクル目、図12(b)にまさ土の反射強度の変化と体積含水率の変化を時系列でまとめる。まさ土においても体積含水率の推移と反射強度の推移の変化時間が概ね一致しており、水分を検知していることがわかる。またその後の乾燥過程においても反射強度と体積含水率は同様な変化を示しており、水分の乾燥を捉えていることがわかる。豊浦砂に設置した検出器No.1とNo.2の反射強度の初期値にほとんど差が見られないのに対し、まさ土に設置した2つの検出器から得られた反射強度の初期値の差は約200 mVある。これは試料の粒度に起因するものと考えられる。豊浦砂の均等係数は $U_c=1.5$ であり、このような粒径のそろった試料では、検出器設置地点による測定面の差が少なく、反射強度の初期値のばらつきも少ないものと考えられる。一方、まさ土のように均等係数 $U_c=25.6$ と、ある程度粒径にばらつきを持った試料では、超音波検出器を複数設置したときに測定面を形成する土粒子にもばらつきが生じやすくなる。このため、同じ水分状態の試料内でも測定面を構成する粒子の形状や大きさによって初期値がばらつきやすくなるものと考えられる。

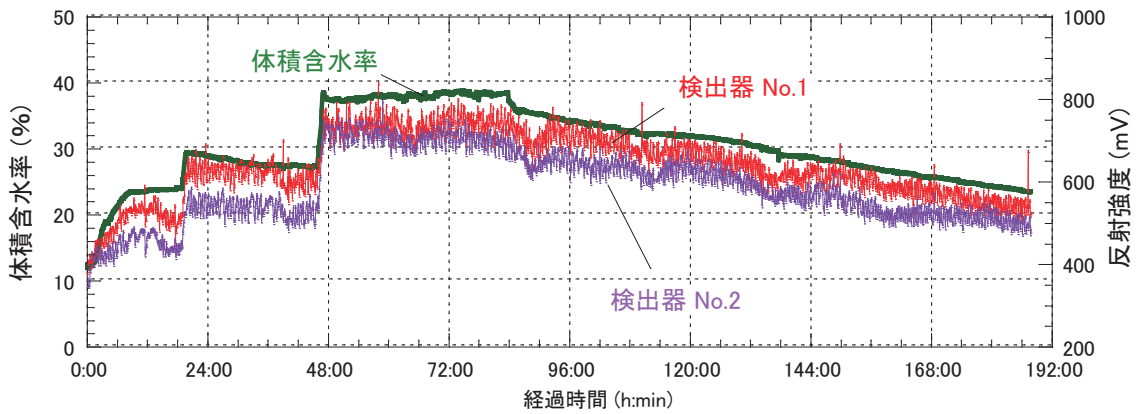
図13にそれぞれの試料ごとに、横軸に反射強度、縦軸に体積含水率をプロットしたグラフを示す。豊浦砂での1サイクル目の結果を図13(a)に示す。検出器No.1の相関係数は $R=0.955$ 、検出器No.2の相関係数は $R=0.959$ となり、高い相関性があることがわかった。また2つの検出器の結果を統合して相関係数を算出すると $R=0.914$ となり、高い相関性がみられた。

まさ土に設置した検出器No.3とNo.4それぞれの相関係数を算出すると検出器No.3では $R=0.900$ 、No.4では $R=0.836$ となり、検出器ごとの校正ではあるが強い相関がみられる(図13(b)参照)。しかし初期値に違いがあるため、同じ反射強度であっても検出器ごとにその値の持つ意味が異なる。例えばまさ土に設置した検出器の反射強度が600であった場合、検出器No.3では体積含水率30%付近を表すが、検出器No.4では体積含水率約15%を表す。各検出器における反射強度の初期値の差を無くすため、反射強度の初期値と各値の差をとり、初期補正したプロットを図13(c)に示す。この時の2つのプロット群より求めた相関係数は $R=0.838$ となり、強い相関性を示すとともに、検出器ごとの測定値の差を無くすることができる。このことから初期値補正を行えば、反射強度からある程度の体積含水率の予測が可能であると考えられる。なお本実験では初期補正に初期値との差をとってまとめたが、厳密な補正方法については検討の余地がある。

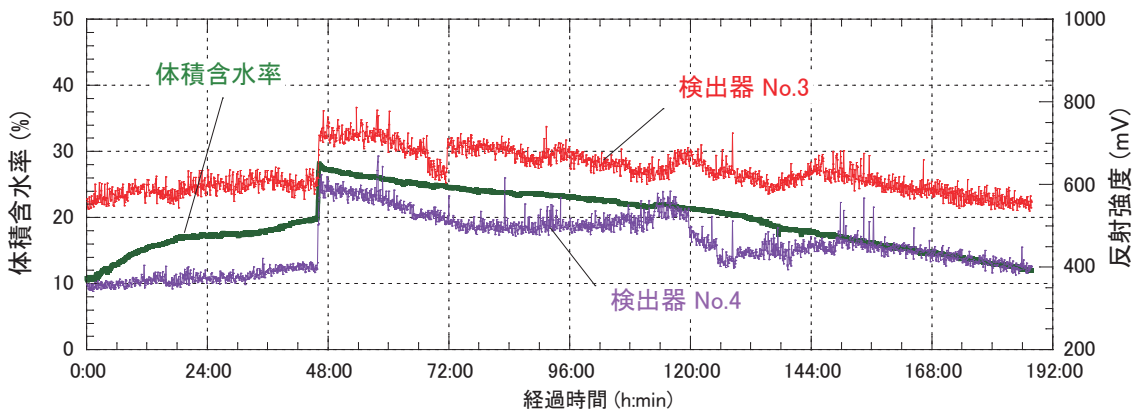
これらの結果より、豊浦砂のような粒径のそろった試料では補正の必要なく予測が可能であり、まさ土のような粒径にばらつきのある試料の場合、初期補正をすることで反射強度から体積含水率の予測が可能になったことがわかった。また、まさ土と豊浦砂で共に体積含水率10%から15%の水分状態が低い場合の反射強度の増加がやや鈍く、この範囲での超音波土中水分測定は分解能が高くないことがわかった。本測定器は斜面崩壊予測のための水分モニタリングを対象としており、水分が高い状態の検知が重要であるため、体積含水率が低い部分についての精度はそれほど必要としないが、分解能が低くなる原因と対策について検討が必要である。

表2 実験条件

試料	まさ土	豊浦砂
土粒子密度	2.61 g/cm <sup>3</sup>	2.65 g/cm <sup>3</sup>
均等係数	25.6	1.5
初期含水比	5%	5%
設定乾燥密度	1.60 g/cm <sup>3</sup>	1.60 g/cm <sup>3</sup>
注水		
at 00:00	120 ml	70 ml
at 18:50	-	50 ml
at 46:30	120 ml	120 ml

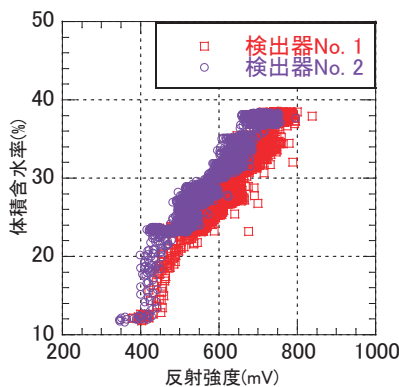


(a) 豊浦砂における反射強度と体積含水率の時系列変化



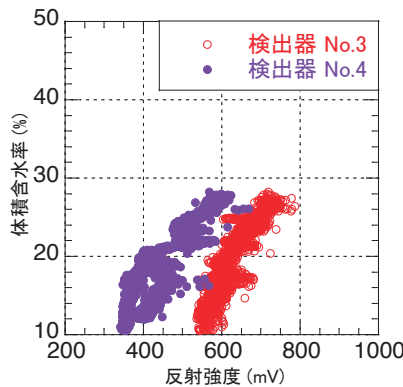
(b) まさ土における反射強度と体積含水率の時系列変化

図 12 2つの試料を用いた水分変化実験結果



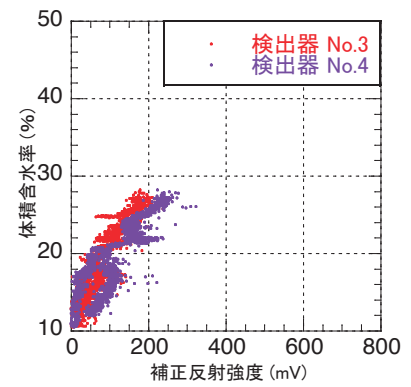
(a) 豊浦砂における相関性

No.1:  $R=0.955, y=-1.70e-6x^2+0.0672x-12.079$   
 No.2:  $R=0.959, y=-2.41e-5x^2+0.0891x-13.725$   
 合算:  $R=0.914, y=-1.09e-6x^2+0.0586x-5.4248$



(b) 補正前のまさ土における相関性

No.1:  $R=0.900, y=-1.70e-4x^2+0.298x-99.71$   
 No.2:  $R=0.836, y=5.03e-5x^2+0.00768x+5.251$



(c) 補正後のまさ土における相関性

$R=0.838, y=-8.70e-5x^2+0.0805x+12.605$

図 13 反射強度と体積含水率の相関性

#### 4. まとめ

斜面崩壊予測のための土中水分・地下水位モニタリング測定器として超音波測定システムを提案しその基礎研究を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 超音波土中水分・水位測定システムの概略と測定原理、設置方法について述べた。超音波土中水分・

水位測定システムは検出器のコスト、設置の簡便性、メンテナンス性に利点があり、広域や多地点での現地モニタリングに適している。

- 2) 豊浦砂を用いて超音波土中水分測定的水分サイクル実験を行った。湿潤過程と乾燥過程の繰返しを再現よく検知しており、超音波による土中水分検知を実証した。また、超音波測定で得られる反射強度と体積含水率の関係は強い相関を示し、校正が可能であることが確認された。
- 3) 超音波土中水分測定で試料の違いによる特性を明らかにするため、2つの試料に対して検証実験を実施した。その結果、試料の粒度によっては計測初期値での補正が必要であるという結果が得られた。また、低含水率帯での分解能は高くないが、反射強度と体積含水率の間に高い相関性が確認できた。

本実験では超音波測定によって得られる反射強度と体積含水率を比較した。サクシオンや間隙水圧といった他のパラメータとも比較し、反射強度の変化が既存の土パラメータの何と強い相関をもっているか検討する必要がある。また2種類の試料を用いて試料の違いによる相関関係の差を検証したが、他の試料においても追加実験を行い、初期値補正が必要となる均等係数の閾値の明確化や、粘土地盤に対して有効であるのか検証が必要である。今後、これら課題を精査しつつ、文化遺産周辺斜面でのモニタリング実験を行い実用化に向け、課題抽出や危険度予測システムを構築していく。

**謝辞：**本研究の一部は科学研究費補助金（基盤(C)、20510180）（2008～2010年度）および（基盤(C)、23510230）（2011～2013年度）の助成を受けて行ったものである。

#### 参考文献

- 1) 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.57-59，2006.
- 2) 北村良介：降雨時の斜面モニタリングと崩壊予測技術の現状，土と基礎，Vol.55，No.9，pp.1-3，2007.
- 3) 深川良一，酒匂一成，里見知昭，石田優子，仲矢順子，安川郁夫：降雨時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多点モニタリング，歴史都市防災論文集，Vol.2，pp.99-104，2008.
- 4) Katsuhiko Tanaka, Takefumi Suda, Kazuhiro Hirai, Kazunari Sako, and Ryoichi Fukagawa : “Monitoring of Soil Moisture and Groundwater Level Using Ultrasonic Waves to Predict Slope Failures”, Japanese Journal of Applied Physics 48, 09KD12, 2009.
- 5) Nobutaka Hiraoka, Takefumi Suda, Kazuhiro Hirai, Katsuhiko Tanaka, Kazunari Sako, and Ryoichi Fukagawa : “Improved Measurement of Soil Moisture and Groundwater Level Using Ultrasonic Waves”, Japanese Journal of Applied Physics 50, 07HC19, 2011.