

文化財後背斜面の崩壊予知のための 超音波を用いた土中水分状態モニタリング法の開発

Study of the monitoring method for measuring soil moisture state using ultrasonic waves
to predict possibility of slope failure at slopes behind cultural assets

須田剛文¹・平井一弘¹・田中克彦²・酒匂一成³・深川良一⁴

Takefumi Suda, Kazuhiro Hirai, Katsuhiko Tanaka, Kazunari Sako and Ryoichi Fukagawa

¹立命館大学大学院 理工学研究科創造理工学専攻 博士課程前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

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

²立命館大学客員教授 総合理工学研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Research Organization of Science and Engineering, Ritsumeikan University

³立命館大学准教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate professor, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

⁴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, Dept. of Civil Engineering, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

We present a proposed method and corresponding model test to measure soil moisture state using ultrasonic waves. In this method, soil moisture and groundwater level are monitored using one ultrasonic detector, which detects changes of water content and groundwater level from the intensity of wave reflection and time of wave propagation. It is shown that by using the proposed method the number of equipments setting on the slope can be reduced, thereby minimizing the negative environmental effects to the slope behind cultural asses.

Key Words: *ultrasonic wave, slope failure, soil moisture, ground-water level*

1. はじめに

京都盆地周辺の山腹・山麓には、世界文化遺産をはじめ数多くの重要文化財が集積しているため、降雨時の斜面崩壊によって文化財が失われる可能性がある。降雨による斜面崩壊の主な要因は、(1) 雨水の浸透による土塊自重の増加、(2) 地盤内の飽和度の増加による土のせん断強度の低下、(3) 地下水位の上昇による間隙水圧や浸透力の増加であり、斜面崩壊の発生時刻や規模をより精度良く予測するには、雨量だけでなく対象斜面内の含水量や地下水位を直接把握することが望ましい。

我々は、京都市にある重要文化財の後背斜面にテンシオメータ、熱電対、雨量計、地表面変位計 (BOTDR 方式) を設置し、間隙水圧、地中温度、10 分間雨量、地表面変位を長期間計測し続けているが、地下水位は計測していない。これは従来の地下水位計測装置が、設置の際のボーリングによる地盤状態の改変や対象斜面内の地下水汚濁をもたらす懸念があるためであり、地盤への負荷の小さい地下水位測定装置の開発が求められる。

本論文では、新たな土中水分モニタリング法として超音波を利用した非接触測定方式を提案し、基礎的検討のために実施した二次元浸透試験について考察する。この方法は、一つの計測点で土中の含水量と地下水位をモニタリングできることから省スペース化が図れ、計測地点の多点化による地盤への環境負荷を低減できると考えられる。

2. 超音波を用いた土中水分モニタリング法



図1 超音波検出器の概観

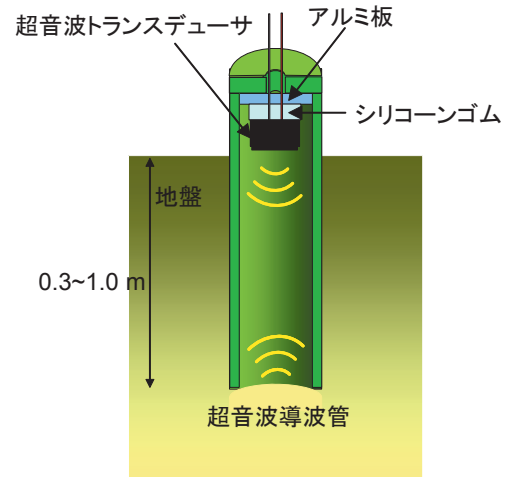


図2 超音波検出器の設置

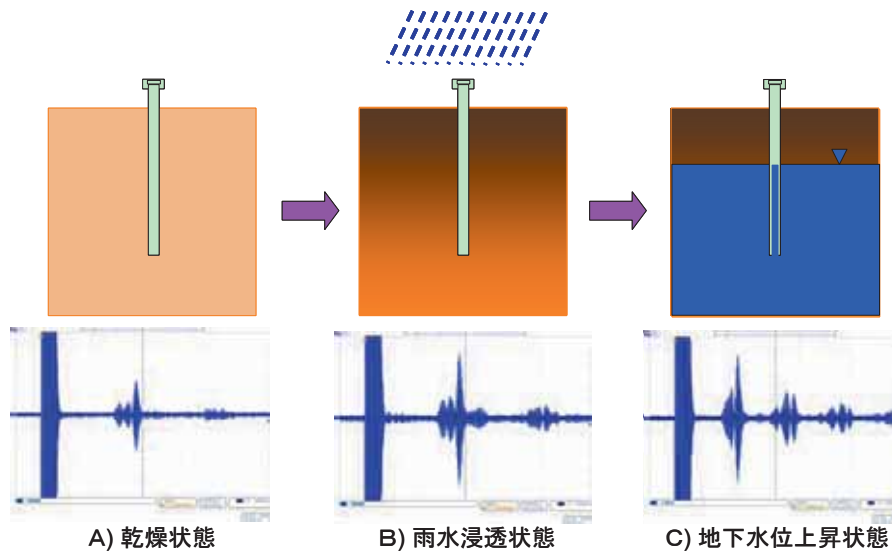


図3 水分状態に応じて観測される波形

この方法に用いる超音波検出器を図1、図2に示す。超音波検出器は超音波送受信兼用トランスデューサと超音波導波管からなる。導波管は中空パイプであり、下端は土表面に接している。トランスデューサは導波管の上端にダンパー材（シリコンゴム）を介して固定している。トランスデューサで発生した超音波は導波管下端へ送信され、下端の土表面で反射した超音波の信号をトランスデューサで計測することにより土中の水分状態を観測する。

図3に土の含水状態に応じた反射波の波形を示す。使用した土試料は滋賀県信楽産の真砂土である。A)からB)のように、土の含水量の増加に伴いピーク強度が大きくなる。これは土の間隙が水で満たされるにつれて、反射面における超音波の散乱が減少するためであると考えられる。また、B)からC)のように、地下水位が導波管内部を上昇すると、反射水面までの距離が短くなるため伝播時間が短くなる。このように、ピーク強度と伝播時間の変化から、それぞれ含水量と地下水位の変動を把握することができる。

3. 検討実験

(1) 試験概要

超音波を用いた計測手法の有用性を検討するため、人工降雨装置を用いて一次元浸透試験を実施した。試験条件を表1に示す。アクリル製土槽（内径37.5 cm、深さ50 cm）に土試料を入れ、超音波検出器と誘電率



図4 土槽の概観

表1 試験条件

試験試料	滋賀県信楽産真砂土	
最大粒径	9.5 mm	
平均粒径	0.85 mm	
土粒子密度	2.6 g/cm ³	
設定乾燥密度	1.5 g/cm ³	
開始時含水比	0%	
降雨浸透過程 境界条件	上面	降雨による注水
	底面	排水
設定降雨強度	15 mm/h	

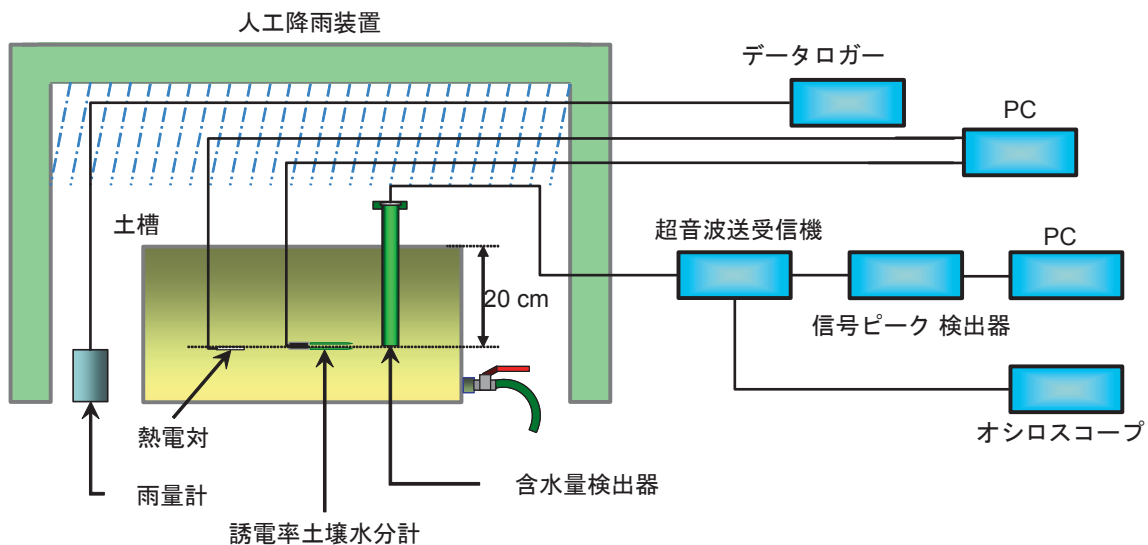


図5 計測システムの概略図

土壌水分計 EC-5（デカゴン社製）を計測地点が同じ深さになるように設置した。図4は試験準備完了後の土槽の様子である。試験前半は人工降雨装置による降雨浸透実験，後半は土槽底面からの地下水供給による地下水位上昇実験を行い，超音波検出器の反射強度・伝播時間と誘電率土壌水分計の体積含水率を比較した。

(2) 計測システム

図5に試験の計測システムを示す。土槽には超音波検出器，誘電率土壌水分計 EC-5，熱電対を設置した。超音波検出器の導波管は真鍮製の中空パイプ（内径 14 mm，長さ 500 mm）で，上端には公称周波数 40 kHz の MA40E8-2 防滴型空中超音波トランスデューサ（村田製作所製）を固定した。超音波検出器により計測された反射波の信号はオシロスコープに送られ，波形を画面に表示させた。誘電率土壌水分計と熱電対の出力は直接パソコンで記録した。また，超音波検出器で計測された反射波の信号はオシロスコープに送られ，画面にリアルタイムの波形を表示し，同時にその信号は信号ピーク検出器（梅田電機製）により反射波形のピーク値を測定し，専用ソフトウェアを用いてパソコンで記録した。

(3) 試験結果

図6に，超音波検出器により計測された反射強度（開始時のピーク強度値に対する相対値）と誘電率土壌水分計により計測された体積含水率の経時変化を示す。図6の結果から，超音波検出器による反射強度の変化と誘電率土壌水分計による体積含水率の変化には良い対応関係が見られる。しかし，反射強度の増加は，誘電率土壌水分計（体積含水率）の増加開始時刻より約 50 分遅れている。これは，超音波検出器が導波管

下端の地表面に雨水が到達して初めて水分量の変化を感知できるため、誘電率土壌水分計に比べて遅れが生じたと考えられる。

図7に反射強度と伝播時間（開始時の伝播時間に対する相対値）の経時変化を示す。降雨は開始475分後に終了し、その後、土槽の下部から水を供給した（地下水位上昇）。図7のように、地下水位の上昇に伴って伝播時間が大きく減少していることから、地下水位の変動を計測しているといえる。

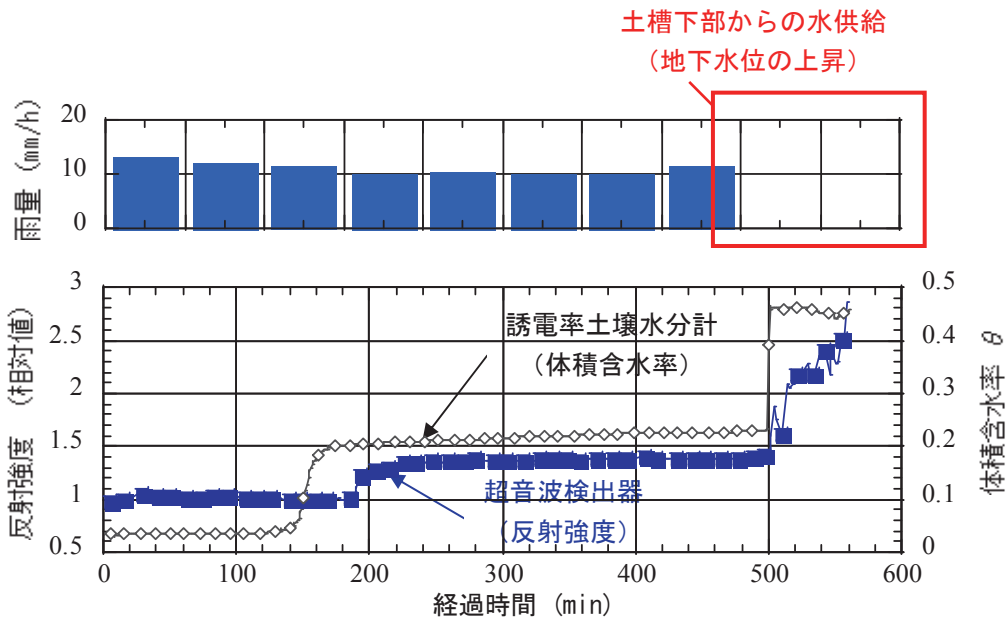


図6 反射強度と体積含水率の経時変化

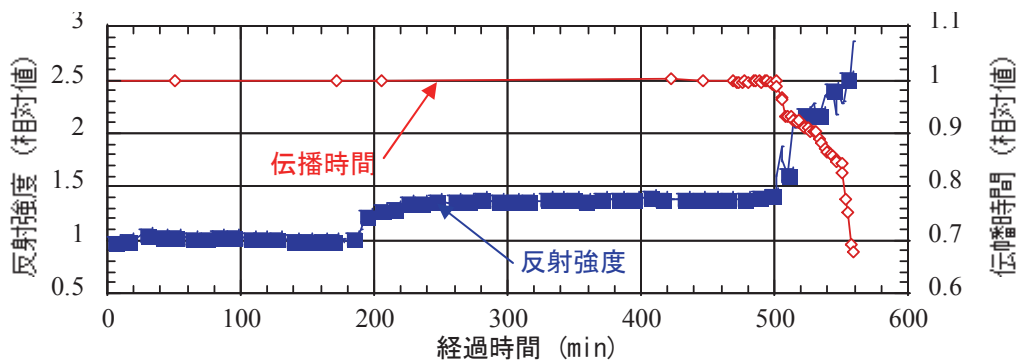


図7 反射強度と伝播時間の経時変化

4. おわりに

超音波を用いた土中水分モニタリング法を提案し、人工降雨装置を用いた一次元浸透試験により基礎的検討を行った。一次元浸透試験では、超音波検出器の反射強度と誘電率土壌水分計の体積含水率、超音波検出器の伝播時間と地下水位の間に良好な対応を得られた。以上より、一組の超音波検出器で土中の含水状態と地下水位の両方のモニタリングが可能であることを示した。この方法により、計測装置の設置数を減らして重要文化財周辺斜面への環境負荷を低減できると考えられる。今後はこのシステムを自然斜面に導入し、長期的なデータの蓄積を実施したい。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（2008～2010年度）の助成を受けて行ったものである。またご支援をいただいた株式会社村田製作所伊藤聡、浅田隆昭両氏に感謝します。

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, pp57-69, 2006