表層すべり型斜面崩壊に対するモニタリングシステムの 現状と新たな試み*

深 川 良 一¹ 酒 匂 一 成² 里 見 知 昭³

Current Status and Proposals on the Field Monitoring System in a Slope Surface Failure

by Ryoichi FUKAGAWA^{a*}, Kazunari SAKO^a and Tomoaki SATOMI^a

a. Ritsumeikan University, 1-1-1, Noji higashi, Kusatsu, Shiga, Japan 525-8577

(*Corresponding author E-mail: fukagawa@se.ritsumei.ac.jp)

In Japan, slope disaster frequently occurs during rainy season, thus it is very important to construct a warning system to predict possibility of slope failure due to rainfall. The purpose of this research is to construct such the system using real time field measured data, in-situ tests, laboratory tests, and numerical models. We have established a field monitoring system to measure rainfall intensity, pore-water pressure, temperature, etc., on a slope behind an important cultural asset in Kyoto City since July 2004. Ground displacement has also been measured since May 2006 using optical fiber sensors (B-OTDR), and additional measuring points were implemented in order to investigate more details of water behavior in the study slope. In this paper, outline of the above warning system and the field monitoring system are explained, and the in-situ seepage behavior is considered based on the field measurement data. Monitoring results of ground displacement during rainfall in March 2008 are also presented, and the influences of rainfall on the ground displacement are also discussed. Finally, the indoor and outdoor test results of the wireless sensor network system, which employed multipoint monitoring, is examined through this paper.

KEY WORDS: Rainfall, Slope Failure, Monitoring, Pore-Water Pressure, Ground Displacement, Wireless Sensor Network System

1. は じ め に

わが国の国土のおよそ7割は山地であり、多くの家屋が斜面崩壊や土石流などの土砂災害の危険にさらされている。一方、地球温暖化との関係が取りざたされているが、近年、日本各地で異常気象が頻発し、集中豪雨についても激化、広域化の傾向が顕著である。土砂災害の危険性は益々高まってきている。土砂災害に対する防災対策は、抑止工や抑制工などの対策工によって主に担われてきたが、全国約52万箇所にも及ぶ土砂災害警戒区域に対してハード中心で対応することはかなり困難なことである。これらの状況の中で、斜面崩壊の危険度を精度よく評価しうのようなシステムがあれば、台風時や集中豪雨時の斜面崩壊から人命を守ることができる。即ち、ハード対策の不備がある程度補うことができる。

斜面崩壊の危険度をリアルタイムに評価する手法は、雨量のみから評価する方法と、雨量に加えて斜面内の含水量や地表面の変位などを考慮して評価する方法に大別される。前者は広域をカバーできる反面、崩壊危険度の評価精度に若干の問題のある場合

が多い。後者は設置斜面については詳細な情報を与える反面、コストに問題のある場合が多い。対象領域の大きさや重要性によって適切な評価システムが選択されるべきであろう。

本総説は、表層すべり型斜面崩壊現象に対する斜面防災モニタリングシステムについて述べている。まず降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの現状について述べる。長期観測を実施中である京都市東山山麓の重要文化財(清水寺)後背斜面における現地斜面モニタリングについて具体的な実施例を示すとともに、対象斜面の安定性に関する評価例を述べる。ここでの適用例は、ある程度限定された領域を対象としたものである。最後に観測の広域化・多点化を念頭に置いた無線センサーネットワークシステムを紹介する。

2. 斜面モニタリングの計測技術の現状

本章では、降雨時の斜面崩壊予測、降雨時の斜面崩壊予測、斜面の管理を行うために必要とされるモニタリング技術の現状についてまとめる。降雨時の表層崩壊の主な原因は、1) 雨水の浸透によるすべり土塊自重の増加、2) 斜面内の含水量の増加による地盤の強度低下および3) 地下水位の上昇による浸透力の増加である。そこで、降雨時の斜面モニタリングにおける計測事象を「含水量」、「変位量」とし、それらの測定技術を述べる。なお、本報告の内容は、「地盤工学会：降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究委員会(委員長：北村良介)」の第2ワーキンググループ(斜面のモニタリング技術・データ処

*2009年6月27日受付 2009年12月3日受理

1. 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科
2. 工博 立命館大学准教授 グローバル・イノベーション研究機構
3. 工修 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻
[著者連絡先] FAX: 077-561-2667 (立命館大学環境都市学系)

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

キーワード: 降雨, 斜面崩壊, モニタリング, 間隙水圧, 地表面変位, 無線センサーネットワークシステム

Table 1 Soil moisture measurement technique and principle.

測定事象		測定手法	測定原理など
サクシ ョン	①	① デンシオメータ法	・セラミック製ボラスカップを介し、土中水の圧力と平衡したデンシオメータ内の脱気水の圧力を計測。 測定範囲: 大気圧と間隙水圧の差を測定しているため、測定限界は約-100kPa。
	②	② サイクロメータ法	・熱電対の特性を用い、相対湿度を測定し、土の水ポテンシャルを直接計測。 ・ケルビン式から全ポテンシャル(kPa)と水蒸気の相対湿度(%)の関係式を得る。 ・測定範囲: 約-100kPa～-100MPaのトータルサクシジョン
	③	③ 熱散逸法	・熱伝導率と土中水のマトリックポテンシャルが-10kPaよりも乾燥した範囲で線形関係であることを利用。 ・熱源と温度センサーを多孔質セラミックブロック内に組み込み、熱ハルス発生前後の温度差を計測。測定範囲: 約-0.01MPa～-100MPaのマトリックサクシジョン。
含 水 量	①	① 電気抵抗法	土の電気抵抗を測定し、水分量を計測。
		2極法	・電極付き多孔質ブロックを埋設し、ブロックの吸湿水分と土中水分の平衡時における電極間の電気抵抗を測定。校正式として、電気抵抗、温度、体積含水率の関係式が必要。
		4極法	・電極を土中に直接挿入し、電極間の電位差を測定することにより土中の比抵抗を求め、水分量を測定。塩分濃度が変化しないことが前提条件。
		② 誘電率を用いた手法	比誘電率と体積含水率の関係に基づく計測手法
	②	静電容量法	・電圧を測定し、水分量を求める。予め、土の水分保持状態に対応した比誘電率から静電容量、周波数を求める。周波数を電圧に変換する電子回路を用いて、測定電圧と含水量の関係を得る。
		時間領域反射率測定法 (TDR法)	・一定周波数 (30MHz～3GHzの高周波) の電磁波が土中に埋設したロッドを往復する速度を時間領域で測定し、比誘電率を求める方法。校正式として、比誘電率と体積含水率の関係が必要。
		周波数領域反射率測定法 (FDR法)	・連続的な種々の周波数 (100MHz～1.7GHz) の電磁波が土中のロッド部分での往復時に発生する合成干渉波を周波数領域で測定し、そのピーク特性から、比誘電率を求める方法。校正式が必要。
		振幅領域反射率測定法 (ADR法)	・一定周波数の電磁波 (100MHz) が土中のロッド部分を往復するときに発生する電圧差を振幅領域で測定し、比誘電率を求める方法。校正式として、比誘電率と体積含水率の関係が必要。
	③	③ 中性子散乱法	・中性子の水素原子による減速効果を利用して、土中の水分量を測定。校正式として、対象土に対する中性子の係数比率と体積含水率の関係が必要。
	④	④ ガンマ線を用いた方法	・ガンマ線の土を透過する際に測定領域の密度が高いほど透過率が減少する性質を用いた方法。校正式として、相対透過率と湿潤密度の校正式が必要。
	⑤	⑤ 地中レーダ法	・送信アンテナから地盤内に発射した電磁波が反射して受信アンテナに戻るまでの伝播時間を計測。 ・地盤内の比誘電率が異なる境界面 (地下水面など) を推定評価する方法。電磁波伝播速度と比誘電率の関係式から体積含水率も求まる。
	⑥	⑥ 熱伝導率を用いた方法	・気相の熱伝導率が、液相や固相の熱伝導率よりもはるかに小さいという性質を用いた方法。 ・校正式として、含水量と熱伝導率の関係が必要。同一の土で、土中温度変化が小さい場合に適用。

Table 2 Ground displacement measurement technique and principle.

計測機器名		計測方式	計測原理	特性
傾斜計	地表面傾斜計	気泡式	電解溶液中の気泡の移動による液面変化を静電容量変化として捉える。	・作動範囲: 2軸±20°, 分解能: 0.01° ・高精度で安定性が良い。
		振り子型	振り子の原理を用いて、地表面に変動に伴う振り子の傾斜角を測定。	・作動範囲: ±15〜300分, 精度: ±1%FS ・温度特性: -10〜+40℃
	地中傾斜計	挿入型	ボーリング孔内に設置したケーシングの傾きを深度方向に欠乏なく等間隔で傾斜測定し、水平変位量を求める。	・ひずみゲージ式などで、分解能は0.1%FS。 ・サーボアクセロメータ式の分解能は0.001%FS。
		設置型	ボーリング孔に埋設固定するタイプ。 電解液式、加速度式、磁気抵抗式がある。	・雷による破壊を注意。 ・温度の影響が大。
光ファイバセンサ	OTDR方式	レーザ後方散乱光強度を測定し、変位・変状や発生位置を計測。	・分解能: 0.2dB, 計測範囲: 36dB, ・計測時間: 約5分, 温度範囲: -10〜40℃	
	BOTDR方式	ブリルアン後方散乱光の周波数変化により、変位・歪みの測定。	・分解能: 0.1mm/m, 測定範囲: 2%, ・計測時間: 5〜10分, 温度範囲: -10〜50℃	
	FBG方式	センサ部での反射光(Bragg波長)の波長変化から歪みを測定。	・分解能: ±0.004mm/m, 測定範囲: 300mm, ・計測時間: 最小2秒, 温度範囲 5〜50℃	
	MDM方式	光ファイバの変状(曲げ)による漏光に伴う透過光の強度低下の特性から、透過光強度を測定し、変位測定を行う。	・分解能: 0.2mm/2〜10m, 測定範囲: 0〜100mm, ・計測時間: 秒単位の変化に対応, 温度範囲: -10〜50℃	
GPS	相対測位	単独測位		・約24個の人工衛星から発信される搬送波による測位システム(カーナビなど)。 ・測位精度: 数m〜数十m, 観測時間: リアルタイム〜
		干渉測位	DGPS	・複数の観測局で同時観測を行うことで相対位置を算出。 ・測位精度: 約1m, 観測時間: リアルタイム〜
			スタティック法・短縮スタティック法	・搬送配送を用いる干渉測位で、未知点が観測中静止している方法。 ・測位精度: 数mm〜数cm, 観測時間: 数十分〜1日
			キネマティック法	・搬送配送を用いる干渉測位で、未知点が観測中移動している方法。 ・測位精度: 数cm〜数十cm, 観測時間: リアルタイム〜
			RTK法	・搬送配送を用いる干渉測位で、移動観測と同時に位置を決定する方法。 ・測位精度: 数cm〜数十cm, 観測時間: リアルタイム〜
・観測センサとプラットフォーム(Landsatなど)から構成される人工衛星による地表面観測手法				
リモートセンシング		受動型センサ	・太陽光の反射光や放射線を観測する。大半が、このセンサを使用。 ・衛星の周期性から、同じ地表面をある一定の周期で計測可能。	・一度の計測で広範囲の測定が可能(Landsat: 185km)。
		能動型センサ	・センサ自らがマイクロ波などを照射し、その反射波を受信する。 ・広域の測定を数秒間で行える。	
Acoustic Emission		・固体材料内部の微小な破壊あるいは同様のエネルギー開放過程によって発生する弾性波現象(AE)を計測する手法 ・斜面モニタリングに用いるため、AE信号を改良b値, 正規偏差, 波形記録・判読により評価する手法が提案されている。		

理技術の現状把握、主査：小橋秀俊）で実施した文献調査成果をまとめたものである¹⁾。

2・1 含水量の計測技術の現状

Table 1 に含水量を評価するための手法および計測原理を示す。土中の含水量を評価する機器は、サクシジョンを計測するものと土壌水分量（体積含水率、含水比など）を計測するものに大別される。より詳細な計測手法、構成機器、特徴などについては、文献 2) を参照されたい。

含水量計測技術は、自然斜面および道路路面、鉄道盛土、河川堤防などの人工斜面において用いられている。サクシジョンおよび土壌水分量の長期現地計測が行われてきており、雨量計、水位計や地表面変位計などの計測結果と合わせて、降雨時の斜面の安定性との関係について考察がなされている³⁻⁶⁾。課題としては、測

定精度の向上のために、機器のキャリブレーションや定期的なメンテナンスが必要であることが挙げられる。特に、土壌水分量を計測する機器類においては、原位置の土に対する校正式を得る必要がある。また、テンシオメータは設置時に先端部のセラミック製ボラスカップが割れないようにすることや、降雨量が少なく地盤が非常に乾燥した場合、テンシオメータ内の脱気水が抜けてしまうため、脱気水の補充および圧力計の初期値の再計測が必要である。

2・2 変位量の計測技術の現状

変位量の測定技術として、傾斜計、光ファイバセンサー、GPS 測位技術、リモートセンシング、Acoustic Emission (AE) が挙げられる。それぞれの測定原理や特徴を Table 2 に示す。より詳細な計測手法、構成機器、特徴などについては、文献 7) を参照さ

Fig.4 Outline of the field monitoring system.

Fig.5 View of experimental site and setting condition of measurement apparatus at point M.

Fig.6 Structure of the field monitoring system.

行った簡易貫入試験の結果をもとに基盤面を推定して作成されたものであり、斜面全体の表層（崖錐堆積物）厚さは約 100 ～ 200cm であった。M 地点の土は、日本統一土質分類法によると、地表面～深さ 40cm：細粒分質砂質礫、深さ 50cm 付近：礫まじり砂質細粒土、深さ 80 ～ 110cm：砂質細粒土となり、深さ 50, 80, 110cm の土は、集中豪雨などによって法面崩壊や侵食が生じやすい傾向にあることが分かっている⁶⁾。

Fig. 4 に現地斜面モニタリングシステムの概略図、Fig. 5 に設置状況を示す。M 地点では Fig. 5 のように、間隙水圧を計測するためのテンシオメータ（深さ 20, 40, 60, 80, 100cm の計 5 本）と地中温度を計測するための熱電対（深さ 20, 40, 60cm）、気象観測計（10 分間雨量、気温、湿度、風速など）を設置している。2006 年より新たに増設した A, B, C, D 地点では、テンシオメータ（深さ 40, 80, 100cm：各地点 3 本の計 6 本）を使用しており、Fig. 3 の番号①～⑤は、光ファイバセンサー（B-OTDR 方式）の設置位置である。テンシオメータ上部の水タンク部は、テンシオメータの圧力センサーが防水加工されていないことと水タンク部に直射日光が当たることによる日周期の変動を抑えることから断熱カップで覆っている。

Fig. 6 にモニタリングシステムの構成を示す。A, B, C, D 地点のセンサーは M 地点の測定 BOX に有線で接続されており、一旦 M 地点で収集した計測データは A 地点に送られ、無線 LAN を経

Fig.7 Measurement results of pore-water pressure, ground temperature and rainfall in March 2008.

由して寺務所のパソコンに送信されている。一方、光ファイバセンサーの計測システムは、機械室からの電源により計測データを機械室のパソコンに取り込み、無線 LAN を経由して寺務所のパソコンに送信されている。計測データは寺務所のパソコン内で処理され、web 上にデータを表示させている。現地モニタリングシステムにより得られたデータは、不飽和・飽和浸透解析の初期条件、境界条件として用いられる。特に 10 分間雨量は降雨時、地中温度は降雨後の浸透挙動を評価するために使用される。本論文では、間隙水圧、10 分間雨量、地表面変位のデータに着目して考察する。

3・3 長期モニタリングによる評価例

はじめに、間隙水圧と雨量強度の関係について検討する。次に、降雨時における対象斜面の地表面変動について考察する。

Fig. 7 に 2008 年 3 月の計測結果（間隙水圧、地中温度、10 分間雨量）を示す。対象斜面の縦断方向に対する浸透過程に注目するため、B, M, C 地点の間隙水圧の時系列変化に注目する。ただし、B 地点の深さ 40cm の間隙水圧は、テンシオメータの脱気水が抜けやすく計測できなかったことが多かったため、結果は示していない。Fig. 7 より、間隙水圧は降雨によって増加し降雨後は減少する様子が見られ、間隙水圧の変動は地中温度の日変化の影響を受けていることも確認できる。さらに、各地点の同じ深さに対する間隙水圧の変化に注目すると、全地点の間隙水圧が増加する場合や M 地点のみが増加する場合など変化傾向に違いが生じている。Fig. 8 は、降雨パターンの違いによる間隙水圧の変化の傾向を示しており、Fig. 8 (a) は 2004 年 11 月 18 日、Fig. 8 (b) は 2004 年 11 月 11 日における降り始めから降り終わりまでの間隙水圧、10 分間雨量、連続雨量を表している。降雨開始から無降雨状態 3 時間継続するまでを一連の降雨と定義し、データを整理している。Fig. 8 (a) のように 10 分間雨量が 0.5mm 程度で降り続くような場

Fig.8 Tendency change of pore-water pressure with respect to rainfall intensity.

Fig.9 Relationship between rainfall intensity and pore-water pressure.

合(連続雨量の変化が緩やかな場合)は、浅い部分から順に間隙水圧の増加が生じる一般的な傾向を示す。一方、Fig. 8 (b) のように 10 分間雨量が 1mm を超えるような雨を数回記録する場合(連続雨量が急激に変化する場合)は、深さ 60, 80cm 地点の間隙水圧が変化する前に深さ 100cm 地点の間隙水圧が増加する。この現象は、Fig. 3 の地質断面図において計測地点より上部の崖堆積物の厚さが薄くなっていることや簡易貫入試験を実施した K2-1 地点が上部に形成される谷筋の延長上に位置することを考慮すると、計測位置よりも上部で浸透した雨水が崖堆積物と基盤層の境(仮想基盤面)を流れることが原因であると考えられる。

次に、降雨パターンと間隙水圧の変化の傾向の関連性について検討を行う。M 地点を対象に 2004 年 8 月から 2006 年 11 月の間で降雨があった日時を全て抽出し、降雨時の間隙水圧の変化の傾向を以下の 6 パターンに分類した⁶⁾。

- 1) × : 間隙水圧の増加なし。
- 2) △ : 深さ 20, 40cm 地点の間隙水圧のみ増加。
- 3) □ : 地表面から順に全ての間隙水圧が増加するが、深い部分の間隙水圧の増加は小。
- 4) ■ : 地表面から順に全ての間隙水圧が大きく増加。
- 5) ○ : 深さ 100cm 地点の間隙水圧の急激な増加が見られるが、深さ 60, 80cm 地点の間隙水圧の増加は小。
- 6) ● : 深さ 100cm 地点の間隙水圧の急激な上昇が見られ、全ての深さの間隙水圧も急激に増加。

Fig. 9 は、旧日本道路公団が異常降雨時における道路通行規制

Table 3 Relationship between annual rainfall intensity and pore-water pressure change.

間隙水圧の変化傾向	連続雨量 (mm)			
	2004年	2005年	2006年	3年間の平均
全ての深さの間隙水圧が増加なし(×)	1.5mm 以下	3.0mm 以下	4.0mm 以下	2.8mm 以下
深さ100cmの間隙水圧が増加(○, ●)	7.0mm 以上	8.0mm 以上	11.5mm 以上	8.8mm 以上
全ての深さの間隙水圧が急増する傾向(■, ●)	18.0mm 以上	23.0mm 以上	21.0mm 以上	20.7mm 以上

基準値を設定する際の連続時間雨量法で用いられている降雨履歴図¹²⁾に間隙水圧の変化傾向を加えたものである。参考データとして、Fig. 9 に過去に計測地点付近で斜面崩壊が発生したときの気象庁観測データ(1999 年 6 月 27 日、午前 9 時: 連続雨量が 123.5mm、時間雨量が 47mm/hour)¹³⁾を表示している。このデータをもとに 2004 年 10 月 20 日に発生した台風 23 号のときの現地計測データと比較すると、斜面崩壊が発生する危険度が大きい状況にあったと推測される。Table 3 に各年の間隙水圧の変化傾向を連続雨量でまとめると、約 3 年間の傾向は比較的似ており、連続雨量 2.8mm 以下の場合には、間隙水圧の増加は見られないという結果が得られた。また、連続雨量 8.8mm 以上の場合には、深さ 100cm 地点の間隙水圧が増加し、特に時間雨量が大きくなると深さ 100cm 地点の間隙水圧が急激に増加するという傾向である。そして、連続雨量が 20.7 mm 以上になると、全ての深さの間隙水圧は急激に増加した。一方、間隙水圧の変化に対して 2005, 2006 年の連続雨量が 2004 年と比べて増加したのは、集中豪雨の記録回数と 1 年間通しての降雨回数が少なく、地盤内が乾燥傾向

Fig.10 Measurement results of strain rate, temperature and rainfall in March 2008.

Fig.11 Outline of wireless sensor network system.

であったためであると考えられる。

Fig. 10 に 2008 年 3 月の計測結果（ひずみ速度，気温，10 分間雨量）を示す。ひずみ速度は，光ファイバセンサーで計測した累積変位をセンサー長さ（5m）で除し，1 時間ごとのひずみ量に算出した値である。なお，累積変位は 2007 年 5 月 26 日 15 時を基準としている。そのひずみ速度に関して，光ファイバセンサーのブリルアン散乱のシフト量は，温度変化や地盤の乾湿や植物（草木根）の影響を受けるため¹⁴⁾，その影響を減らして日常の計測管理を行う必要があることから，ひずみ速度の出力間隔を 1 時間に設定してデータを整理している。Fig. 10 より，ひずみ速度は $\pm 0.01\%/hour$ の範囲で変動しており，光ファイバセンサーの精度が $0.1mm/m$ (0.01%) であることを考慮すると，2008 年 3 月に記録した降雨ではほとんど変位しなかったと判断できる。しかし，Fig. 10 の計測地点③の結果に示す矢印 (↓) のように，晴れた日の最高気温付近の時間帯では，ひずみ速度は極端に大きくなっている。これは気温や日照などの影響を受けたのではないかと考えられ，ひずみ速度の出力間隔を 1 時間に設定した場合でも，温度補

(a) Sensor node:
MPR2600J (Wireless node) and MTS400
(Sensor substrate)

(b) Sensor node:
MPR2600J (Wireless node) and MDA320
(External sensor substrate)

Fig.12 View of wireless sensor and sensor substrate.

Fig.13 An example of transmission mode in the wireless sensor network.

正の処理方法を検討する必要があると思われる。このように、降雨時では温度変化があまりないため、日常の降雨時の顕著な変位量が見られないときのひずみ速度を算定することで、管理基準値を設定できる可能性がある。

4. 次世代型斜面モニタリングシステム

本章では、まず、無線センサーネットワークを利用した計測システムの概要を示す。次に、小規模な無線センサーネットワークシステムを用いた室内土槽実験の計測結果について考察する。そして、屋外斜面における無線センサーネットワークシステムの現地適用性に関して検討する。

4・1 無線センサーネットワークシステム

近年、無線センサーネットワークシステムを建設現場へ利用することが検討されてきている。高田ら¹⁵⁾は、建設分野への利用と課題についてまとめ、道路、河川、トンネルや斜面などの管理において高い適用性および実現可能性があることを述べている。これまで実施してきた有線システムを用いた現地モニタリングシ

Table 4 Experimental setting conditions.

境界条件	上面	注水
	底面	非排水
	背面	非排水
	法面	注水
初期条件	含水比	5%
	設定湿潤密度	1.60(g/cm ³)
	斜面勾配	45°
降雨条件	時間降雨量	50(mm/hour)

Fig. 14 Geometry of slope model test and setting locations of measurement devices.

システムに代わり、より効率的・効果的な斜面モニタリングを行うために、無線化されたセンサーネットワークシステムを利用した現地斜面モニタリングシステムの確立が目指されている。

Fig. 11 に無線センサーネットワークシステムの概要図を示す。センサーネットワークは、センシング機能および無線通信機能を有する複数のセンサーノードから構成されるネットワークである。センサーノードは、演算処理装置、データおよびプログラムの記憶領域、バッテリーを持つ自律的に動作可能な超小型コンピュータシステムであり、効率的なデータ収集・配送を実現する。Fig. 11 においては、テンシオメータや温度計などのセンサーと無線ノードで構成されるセンサーノードが示されている。Fig. 12 は用いたセンサーノードを示しており、(a) は温度、湿度、光度、加速度などが計測できるセンサー基板（型式：MTS400）、(b) はテンシオメータなどの外部センサーを接続できる外部センサー用基板（型式：MDA320）が無線ノード（型式：MPR2600J）に装着されている状況を示している。なお、外部センサー用基板（Fig. 12 (b)）には、最大 8 個の外部センサーが接続可能である。

Fig. 13 に Fig. 12 のセンサーノードを組み合わせた無線センサーネットワークの一例を示す。これは、Fig. 11 における無線センサーネットワークとローガーの部分に対応する。また、ローガーに接続されたセンサーノードを基地局とする。使用したネットワークはアドホック無線ネットワークであり、無線通信とネットワークの双方の機能を持ち合わせた端末の集まりである。アドホックとは「様々な形態を取り得る」ということを意味し最も通信状態の良いセンサーノードを自動的に選んで通信する機能（自己編成機能）を持ち、適応性を備えているため、形成されていたネットワークが管理者なしで勝手に違った形態のネットワークを形成できる。つまり通信の障害となる要素が新たに生じても

Fig. 15 Measurement results of pore-water pressure and volumetric water content in model test.

データの通信経路を自動的に変更してデータを転送してくれるという長所があり、また固定のネットワークを必要としないため、中継基地局や電話線・固定ルーターも不要なインフラレスのネットワークである。さらに、センサーノードからローガーの距離が離れていて直接通信できない場合でも他のセンサーノードを中継ノードとしてデータを取得することができる。センサーノード間は ZigBee による近距離無線通信（数 m ～数十 m）であり、1 つのネットワークに最大 255 台の機器を接続できるという仕様である。これらは、有線接続の場合に比べ、配線に伴う制約やコストが生じないため、より自由度の高いセンサーノードの配置が可能となる。

ローガーは、一つの無線センサーネットワークに対し一台設置され、対応する無線センサーネットワークが収集したデータを保管、分析することができる小型コンピュータシステムである。また、無線センサーネットワークを制御する機能や複数のローガー間でのデータ転送および共有を可能とする無線 LAN（規格：IEEE802.11、通信距離：最大 100 ～ 500m）による通信機能を持っている。サーバは、現地（斜面）と事務所にそれぞれ分かれており、現地に集約用サーバが設置され、事務所には現地から得られたセンサー・データを分析するためのサーバが設置される。集約用サーバは、センサーネットワークから得られるデータを未加工のまま一時保管する機能を持つ。一方、分析用サーバでは、計測データの加工および蓄積を行い、また、変化傾向などの分析を行うことができる。現地から事務所へは、光ファイバーや携帯電話などの通信手段を用いてデータの転送を行う。本節で述べた無線センサーネットワークシステムを上記した斜面防災システムに組み合わせることにより、より効果的・効率的な防災システムを構築することができる。

Fig.16 Allocation of sensors in the experimental site.

Fig.17 An example of transmission route in the sensor network.

4・2 小規模な無線センサーネットワークシステムを用いた室内土槽実験

まさ土を用いて作成した斜面勾配 45° の盛土に時間降雨量 50mm/hour 相当の注水を 8 時間 30 分間行った。Table 4 に、境界条件、初期条件および降雨条件を示しており、背面と底面では非排水条件、法面では排水条件となっている。盛土は、初期含水比 5%、湿潤密度 1.60g/cm^3 として形成した。Fig. 14 に斜面形状と計測機器の設置位置を示す。7 個のテンシオメータを深さ 20 ～ 60cm に設置し、盛土内の負の間隙水圧を計測している。また、土壌水分センサー：ADR (型式：ML2X) を深さ 40cm に設置し、体積含水率を計測している。実験土槽の側面には摩擦を最小限にとどめるため、テフロンシートを貼り付けた。底面には透水性の多孔質板が設置されているが、盛土底部を非排水条件にするためにビニルシートを敷き、盛土法先前方は水溜りを防ぐためにシートを取り除いて排水条件とした。

計測システムとして、Fig. 12 (b) のセンサーノードを 2 台使用し、テンシオメータ (7 個)、ADR (1 個) をそれぞれのノードに接続し、小規模な無線センサーネットワークを構築した。データ取得間隔は 2 秒で、データは Fig. 13 に示すように PC に接続された無線ノード (基地局) を介して PC に取り込まれる。

Fig. 15 にテンシオメータ (D, E, F, G) および土壌水分センサーにより計測された結果を示す。Fig. 15 より、浅い部分に設置されたセンサーから順に間隙水圧の増加が見られる。このことから、盛土表面から注水された水の浸透挙動を把握できているものと考えられる。また、間隙水圧が約 0kPa 程度に達するとそのまま一定に保たれ、盛土内がほぼ飽和していることが分かる。体積含水率の時系列変化は、注水開始直後は、約 0.1 程度で一定となっているが、約 144 分を過ぎたあたりから体積含水率は増加し、約 360 分以降は約 0.25 ～ 0.3 程度で一定の値を示した。

Fig. 15 に示す計測データは、大きなノイズを含んでいることが分かる。この現象はほぼ同じ条件で行った有線接続システムにおいては見られなかった。ノイズと考えられる部分以外のデータはこれまでの有線による実験結果から正常な範囲の値を示しているといえる。したがって、ノイズが混在する無線接続の結果は全体

Fig.18 View of experimental site and setting condition of the sensor network system.

Fig.19 Measurement results of the pore-water pressure using the sensor network system.

の傾向を捉えるという点に関しては有用であるが、無線センサーネットワークを用いた斜面防災システムにおいて警報を出す場合、センサーノードへのノイズを除去する必要がある。なお、ほとんどの計測値が正常な範囲にあること、テンシオメータおよび土壌水分計のどちらの結果にもノイズが含まれていることから、ノイズの発生には周辺環境が大きく関わっていると考えられる。

4・3 屋外斜面における無線センサーネットワークシステムの現地適用性に関する検討

本節では、無線センサーネットワークシステムの実斜面への適用性 (通信距離、植生の影響、通信の安定性) を検討するため、屋外環境下で実験を行う。そして、室内実験で確認されたノイズ発生の一因が電磁波によるものと想定し、高周波成分を除去する回路を計測システムに追加した場合の計測結果に関して考察する。

用いたセンサーノードは、Fig. 12 に示す気温、気圧、湿度、照度、加速度 (X 方向、Y 方向) を計測するためのセンサー基板 (MTS400) とテンシオメータ等の外部センサーを接続することができる外部センサー用基板 (MDA320) の 2 種類であり、これらに無線ノード (MPR2600J) を接続して無線センサーネットワークを構築した。無線ノードの通信距離は、仕様書によると $30 \sim 40\text{m}$ である。なお、本実験ではテンシオメータなどの外部センサーは接続しなかった。Fig. 16 に実験状況を示す。各センサーノードは、Fig. 16 に示すように防水加工されたボックス内に入れ、地面に直接設置した。計測データは、道路法面沿いの建物にロガー (マイクロサーバ) を設置して収集した。ロガーに接続された無線ノード (基地局) と最も近い場所にあるセンサーノード間の距離は約 15m である。

2 種類以上のセンサー基板が混在するネットワークの問題に関して実験を行ったが、今回の実験では大きな問題点は生じなかった。外部センサー用基板 (MDA320) のデータが気象データ計測用基板 (MTS400) を経由して転送される状態が多数確認されたが、

大きな問題は生じなかった。逆に気象データ計測用基板 (MTS400) の計測データが外部センサー用基板 (MDA320) を経由する例は全データ中 1 データのみ (Fig. 17 の破線で囲まれた部分) しかなかったが、通信が確認された。この結果は異種の基板を持つセンサーノード同士の通信は同種の基板を持つセンサーノード同士の通信に比べれば通信状態が劣る、あるいはセンサーノード同士ができるだけ同一のセンサー基板を持つもの同士で通信しようとするのではないかと考えられる。その場合でも通信できる同種の基板を持つセンサーノードが無い場合や最もよい通信をするセンサーノードが異種の基板を持つセンサーノードである場合には問題なく異種のセンサーノードを通して通信できることが今回の実験で分かった。また、3 分間隔で 24 時間計測を実施したが、問題なくデータ取得することができた。

以上の検討をもとに、無線センサーネットワークシステムを実斜面で長期間モニタリングした場合におけるシステム全体の妥当性について考察する。Fig. 18 にシステムの設置状況を示す。Fig. 18 のように斜面を左右に二分割し、二つのネットワークを構築した。各ネットワークには斜面の上部・中部・下部の 3 箇所に計測地点を設け、各計測地点には MTS400 と深さ 20, 40, 60, 80, 100cm の 5 基のテンシオメータを MDA300 に 3 本、2 本に分けて接続し設置した。これらのセンサーノードは防水 BOX に入れ、乾燥剤を封入した状態でテンシオメータの断熱キャップの上部に固定して植生などの影響を極力少なくした。また、右側のネットワークには気象ユニット (Davis 社製 Vantage Pro2, 計測項目: 降雨量, 気温, 湿度等) を設置している。基地局は基地局の電源確保が困難な状況を想定して、斜面上部のラックに設置し、太陽光発電 (太陽光パネル・蓄電池) によってエネルギーを得ている。また、センサーノードとテンシオメータのエネルギー源はリチウム電池をそれぞれ 2 本、4 本利用した。ここで、無線ノードと気象ユニットのデータ取得間隔は 10 分に設定して計測した。

Fig. 19 にセンサーネットワークを通じて得られたデータの 1 測点 (Fig. 19 の○印の地点) の間隙水圧と 10 分間雨量を示す。Fig. 19 より、システム設置後に基地局の電力不足によって計測できない期間があったものの、太陽光発電パネルの増設後にはデータ取得状況は改善されている。すなわち、太陽光発電によって電力供給ができていない期間は問題なくシステムからデータが取得できていることが確認される。したがって、無線センサーネットワークシステムは有用であると結論付けられる。一方、Fig. 19 の間隙水圧の計測結果より、前節の室内実験で見られたデータのノイズは確認されなかった。この結果より、室内実験で発生したノイズは実験特有のものか、新たな回路の追加が有効であったと解釈することができる。

5. お わ り に

表層すべり型斜面崩壊現象に対する斜面防災モニタリングシステムについて述べた。まず、降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの現状について述べ、次に長期観測を実施中である京都市東山山麓の重要文化財後背斜面における現地斜面モニタリング結果

について考察した。最後に観測の広域化・多点下を念頭に置いたワイヤレス斜面防災システムを紹介した。

清水寺における現地モニタリング結果から、連続雨量 8.8mm 以上の場合には、深さ 100cm 地点の間隙水圧が増加し、特に時間雨量が大きくなると深さ 100cm 地点の間隙水圧が急激に増加するという傾向が得られた。そして、連続雨量が 20.7mm 以上になると、地表面から潜在すべり面付近まですべての深さで間隙水圧が急激に増加するという傾向が見られた。これらの現地モニタリングシステム結果に基づいて、避難警報を出すことが可能であると考えられる。一方、光ファイバセンサーを用いて斜面を管理する場合は、日常の降雨時の顕著な変位量が見られないときのひずみ速度の値を計測することで、管理基準値を設定できる可能性がある。その結果、顕著な変位を引き起こす異常なひずみ速度を検知できる可能性がある。

観測対象領域の拡大や対象ポイント数の拡大に対応しうる無線センサーネットワークを利用した計測システムの有効性を示した。まず、小規模な無線センサーネットワークシステムを用いた室内土槽実験の計測結果からその基本的妥当性、実現可能性を示した。次に、屋外斜面において無線センサーネットワークシステムを実際に運用し、その現地適用性を明らかにした。

今後は、より多くのデータを蓄積し、数値シミュレーション (不飽和・飽和浸透解析, 斜面安定解析) を有機的に用いることで、降雨時の斜面の安定性を定量的に評価し、現地モニタリングシステムと組み合わせることで、より精度の高い崩壊予知システムの構築を行いたいと考えている。また、データの蓄積によって斜面の安定性を管理することができ、住民の避難や斜面对策工の実施における資料として役に立つと期待でき、減災や防災、重要文化財の保全等に貢献できるものと考えられる。

References

- 1) The Japanese Geotechnical Society: Research report on monitoring techniques of slope stability in the rain (2006), pp. 85-127.
- 2) M. Inoue: *Fuhouwa Jiban No Kyodou To Hyouka*, (The Japanese Geotechnical Society, 2004), pp. 14-25.
- 3) T. Sugiyama, H. Muraishi, K. Iwasaki and F. Naruse: *Tsuchi-to-Kiso*, **41** (1993), 28-32.
- 4) Ministry of Construction, Public Works Research Institute: Technical Note of PWRI, **3646** (1999), 31-132.
- 5) R. Kitamura, M. Kawaida, H. Abe, K. Jomoto and T. Terachi: *Proceedings of JSCE*, **652** (2000), 287-292.
- 6) K. Sako, R. Fukagawa, K. Iwasaki, T. Satomi and I. Yasukawa: *Japanese Geotechnical Journal*, **1** (2006), 57-69.
- 7) The Japanese Geotechnical Society: Research report on Monitoring Techniques of Slope Stability in the Rain (2006), pp. 26-45.
- 8) S. Kato, H. Miki, N. Tsuneoka, M. Tanaka and T. Ogawa: *Civil Engineering Journal*, **44** (2002), 44-49.
- 9) S. Kato, H. Kohashi and A. Furuya: *The Second Symposium on Sediment-Related Disasters* (2004), pp. 1-6.
- 10) R. Kitamura, K. Sako and K. Matsuo: *Proc. of 12th Asian Regional Conference* (2003), pp. 1535-1538.
- 11) K. Matsuo, K. Sako and R. Kitamura: *Journal of Natural Disaster Science*, **21** (2002), 25-33.
- 12) The Japanese Geotechnical Society: Research report on slope failure mechanism and risk prediction during heavy rain (2003), pp. 1-7.
- 13) Japan Meteorological Agency: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2010/01/21)
- 14) S. Kato, H. Kohashi and A. Furuya: *Symposium on monitoring techniques of slope stability in the rain* (2006), pp. 45-50.
- 15) T. Takada and K. Ishima: *60th JSCE Annual Meeting* (2005), pp. 423-424.