

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月12日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21686043

研究課題名（和文）土壌水分量と傾斜変位に着目した豪雨時の低コストで簡便な
斜面監視システムの実用化研究課題名（英文）Practical use of low-cost and simple monitoring system for slope
failures due to heavy rainfall based on water contents and tilting angles

研究代表者

内村 太郎（UCHIMURA TARO）

東京大学・大学院工学系研究科・准教授）

研究者番号：60292885

研究成果の概要（和文）：

斜面崩壊事例の大部分を占める小規模な表層崩壊を対象を絞り、安価で簡便な無線モニタリング装置を開発し、斜面災害の前兆を監視して警報を発する実用的なシステムを構築した。これまでに開発してきた、土壌水分量と斜面地表面および内部の傾斜変位に基づく斜面の無線センサーネットワーク機器の機能、信頼性を向上し、国内および中国四川省の地すべり、崖崩れ、堀削工事の斜面に適用し、実証を行った。実測データの分析から、傾斜変位に基づく警報基準を検討した。また、斜面の土壌水分量の増加や、不安定化を検知するための指標として、弾性波速度の低下を利用する手法について基礎実験を行った。また、室内実験に基づき、斜面の降雨と土壌水分量の推移を関係づける水理特性のモデル化、土壌水分量と変位・崩壊危険度を関係づける変形特性のモデル化を行った。

研究成果の概要（英文）：

A practical, low-cost and simple monitoring and early warning system for slope disasters due to heavy rainfall was developed. It consists of volumetric water content sensors and tilt sensors connected to a sensor networks. The developed equipments were modified for its functions and reliability, and verified by pilot deployment into unstable slopes in Japan and China. Some criteria for issuing warning based on real time data from the tilt sensors were proposed by analyzing the results of field measurements. Some laboratory tests were conducted to investigate wave velocity as index of water contents and instability of slopes consisting of unsaturated soils. Laboratory tests were also conducted to theoretical modeling of hydraulic properties and deformation properties of slopes.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2009年度 | 6,600,000 | 1,980,000 | 8,580,000 |
| 2010年度 | 6,300,000 | 0 | 6,300,000 |
| 2011年度 | 5,800,000 | 0 | 5,800,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 18,700,000 | 1,980,000 | 20,680,000 |

研究分野：地盤工学

科研費の分科・細目：なし

キーワード：斜面災害、モニタリング、センサーネットワーク、変位、傾斜、土壌水分

1. 研究開始当初の背景

我が国では、都市への人口集中に伴って、都市域では急斜面上やその近辺が開発される一方で、地方では多くの急傾斜地域の住居や施設が取り残されてきた。加えて、近年は、都市部の集中豪雨や強大な台風も増加し、豪雨による斜面災害が毎年発生している。我が国で発生する斜面災害の大多数は、小規模かつ多発的な表層すべりである。このような小規模斜面全てに、擁壁やアンカーなどのハード対策を行うことは、費用対効果の点から困難である。より安価に防災効果を得る方法として、斜面をモニタリングして崩壊の予兆をとらえ、適切に警報を発することが考えられるが、既存の斜面監視・警報システムは高価で複雑である。現在使われている、斜面の変位や土壌水分などを計測しデータを電送する装置は、高価である上、斜面防災や現地計測の専門家が設置し運用しなければ使えない。

2. 研究の目的

本研究課題では、斜面崩壊事例の大部分を占める小規模な表層崩壊に対象を絞り、安価で簡便な無線モニタリング装置を開発し、斜面災害の前兆を監視して警報を発する実用的なシステムを構築する。さらに、その運用、特に斜面崩壊の危険度の判定と警報の基準を定めるために、現地の実測値や実験に基づく検討を行う。

3. 研究の方法

これまでに開発した、土壌水分量と斜面地表面および内部の傾斜変位に基づく無線センサーユニットをベースに、これを改良し、また他の研究成果と融合することで、実用的で、高い汎用性をもつ斜面災害の警報システムを開発した。機器の機能、信頼性を向上し、国内および中国四川省の地すべり、崖崩れ、堀削工事の斜面に適用し、実証を行った。実測データの分析から、傾斜変位に基づく警報基準を検討した。また、斜面の土壌水分量の増加や、不安定化を検知するための指標として、弾性波速度の低下を利用する手法について基礎実験を行った。また、室内実験に基づき、斜面の降雨と土壌水分量の推移を関係づける水理特性のモデル化、土壌水分量と変位・崩壊危険度を関係づける変形特性のモデル化を行った。

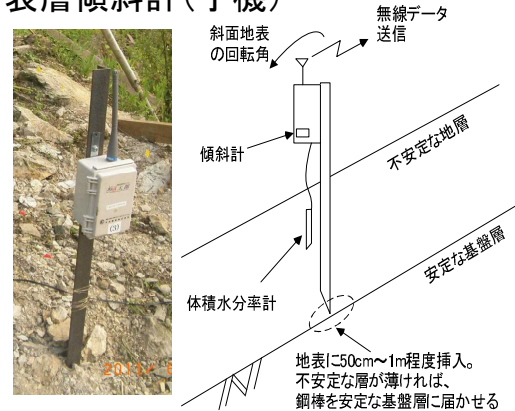
4. 研究成果

●斜面の無線センサーネットワーク機器の機能、信頼性の向上

屋外の実斜面で長期間の試験モニタリングを行い、高温、低温、風雨の中での長期耐久性、計測の信頼性を検証した。試験サイトとしては、中央開発(株)、(独)土木研究所、中国科学院の協力を得て、六甲の砂防工事斜面、愛媛の道路法面、高知の砂防工事における堀削斜面、中国四川省都江堰市塔子坪の大規模地すべり地域での試験計測を行い、その機能を検証した。

センサー回路の改良によるデータのふらつきや低減、省電力化、各センサーユニットへのマイクロSDメモリ搭載によるデータ消失防止などの改良を行った。また、太陽電池から効率的に2次電池に充電する電圧コンバーター基板、および、ひずみゲージ式の各種のセンサーを接続できるようにするためのひずみアンプ基板を開発した。中国など海外での利用を可能とするために、海外の電波法規に適合する無線モジュールの選定と技術的検討を行い、機器を改造した。

表層傾斜計(子機)



小型孔内傾斜計(子機) パイプ外径25mm ボーリング孔でもよいし、 短時間でハンマーでも打込める

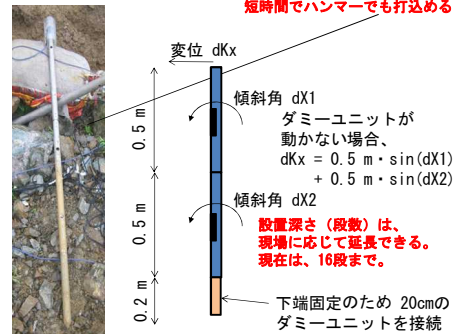


図1 開発した斜面計測ユニット

● 斜面内の弾性波速度の変化を利用した土壌水分量の増加、不安定化の検知

不飽和土の三軸供試体で、様々な飽和土と拘束圧のもとでP波、S波の弾性波速度を測定し、飽和土が通常時から豪雨時のレベルに増加すると、弾性波速度が半分近くに低下することを確かめた。また、一定の軸応力下で拘束圧を低下させる実験では、供試体の降伏に伴って、やはり弾性波速度が低下することが分かった。これらはともに、斜面の不安定化を検知する指標として弾性波速度を利用できることを示唆している。(独)土木研究所の協力で、河川堤防模型で、飽和土の上昇に伴う法面崩壊時の堤体内部の変位と弾性波速度の変化を測定し、上記の傾向を再確認した。弾性波速度は、斜面地盤の内部応力のゆるみに敏感に反応し、変位計測よりも早く、変化を検知できる可能性がある。

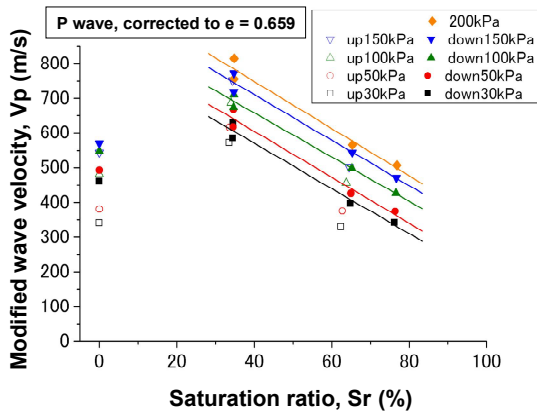


図2 細粒分混じり砂の等方拘束圧下での飽和土増加に伴う弾性波速度の低下(P波)

● 土壌水分量の常時モニタリングによる斜面の水利特性のモデル化

本研究で開発した機器を用いて、降雨時に、その前後における土壌水分量の増減を測定し、斜面の集水性、水はけの良さなどの水利特性を定量的に評価してモデル化する方法を開発した。特に、排水時の水はけの良さについて、簡便なモデル化ができた。通常の比較的弱い雨が降ったときの土壌水分の推移から、斜面のモデル化を行い、豪雨時に、リアルタイムの土壌水分量データと組み合わせ、土壌水分のその後の推移を予測する方法を提案した。この成果は、降雨終了後の防災警報の解除の判断や、斜面災害リスクの高い斜面の抽出への適用が期待できる。

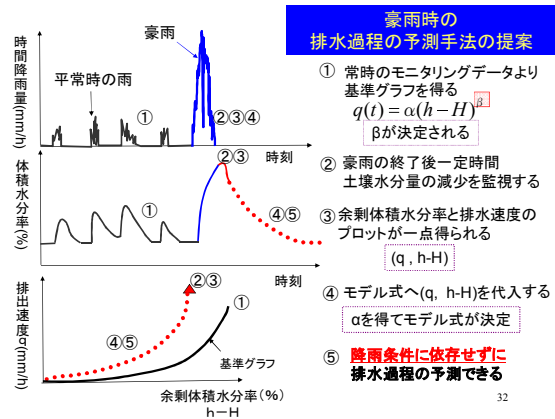


図3 常時の弱い雨での観測データから豪雨後の水分挙動を予測するモデルの概念図

● 斜面変位と土壌水分量の組み合わせモニタリングによる豪雨時の斜面崩壊の危険度評価法の提案

本研究で開発した機器を用いて、降雨時に、斜面の変位と土壌水分量を測定し、両者のデータを組み合わせることで、リアルタイムで斜面崩壊の危険度を評価する手法について検討した。斜面上のすべり層を模擬した模型実験で、降雨と排水が繰り返される場合の斜面変位の生じ方を観察し、両者の関係を考察した。土壌水分量と変位の間には、降雨の履歴にかかわらず、地盤材料の力学試験における応力とひずみの関係によく似たユニークな法則が見いだされた。この考えに基づいて、斜面の土壌水分量と斜面の変位のモニタリングデータを組み合わせることで、斜面の状態をよりの確に把握し、危険度を評価示すことを示した。実際には、すべり面の位置を特定してセンサーを設置することは困難なので、上記の斜面の水利特性モデルを利用して、降雨履歴に基づく土壌水分量の指標を開発し、危険度評価に用いる事が考えられる。

さらに、実験室内で、不飽和山砂の単純せん断試験を行い、一定の圧縮、せん断応力下で、時間あたり一定量の水を注入したときの、せん断変形の進み方を詳しく分析した。雨水の浸透が一定速度で起こっても、それに伴うせん断ひずみの進行は一定速度ではなく、条件によって一度減速してから崩壊に至る場合もあることが分かった。これは、斜面の変位や傾斜角を監視しているときに、その辺加速度が緩んだからといって、必ずしも安全な状態になったわけではないことを示している。

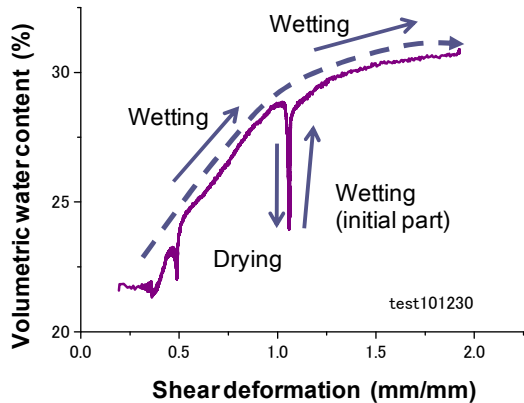
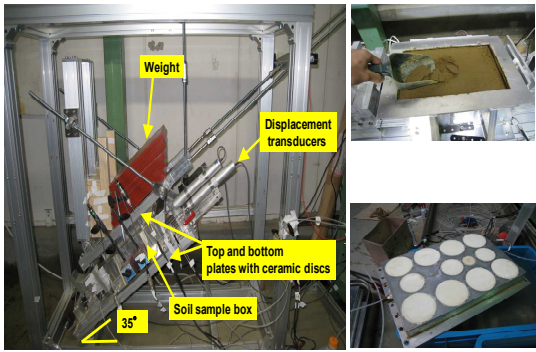


図4 すべり面の水分量の増減とせん断変形量の関係(模型写真と典型的な実験結果)

● 実現場と模型実験での実測データに基づいた、傾斜センサーによる斜面の危険度判定基準の検討

日本国内、及び中国で斜面にセンサーを設置した実現場のうち、豪雨や堀削による変状や斜面崩壊が見られた場所で、センサーから得られたデータを分析し、どのような挙動が見られたときに、斜面が危険な状態にあると判断すべきか、早期警報の基準を検討した。斜面が豪雨などにより短時間で崩壊に至る場合と、地すべりや掘削工事などで長期間かけて変状を起こす場合とに分けて、それぞれ異常時に、斜面表層に立てたロッドの傾斜角が示す傾斜角速度の範囲を、経験的に特定することができた。

斜面が、長期間のクリープ性の変形を伴って不安定化する場合は、0.01~0.1 度/日、豪雨などによって短時間で不安定化する場合には、0.1~1 度/日 程度の傾斜速度が見られる。

2011年6月には、四川省の自然斜面で、人工降雨による崩壊実験を行って、斜面崩壊前に測定されるデータと、それに基づく早期警報基準の決め方について考察した。ここでも、実現場での結果と同じく、斜面崩壊前には同じ範囲の傾斜速度が観察された。また、この実験では、斜面の変位と斜面内部の土壌

水分量の推移の間に、上記の室内模型実験と同じく、地盤材料の力学試験における応力とひずみの関係によく似たユニークな法則が見いだされた。

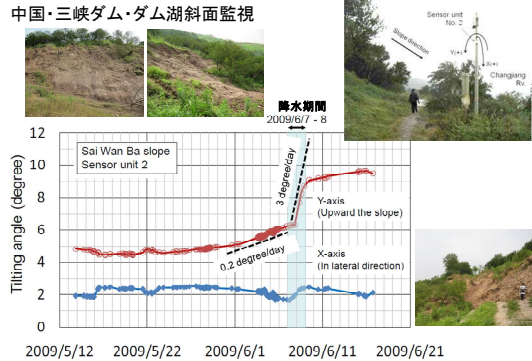


図5 斜面不安定時の傾斜データの例

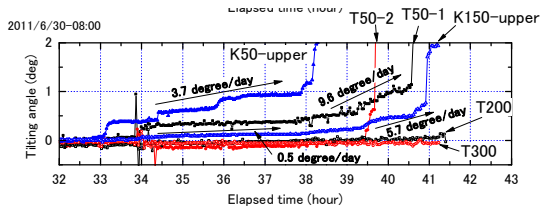


図6 斜面の人工崩壊実験での傾斜データ

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

Uchimura, T., Towhata, I., Trinh, T. L. A., Fukuda, J., Bautista, C. J. B., Wang, L., Seko, I., Uchida, T., Matsu-oka, A., Ito, Y., Onda, Y., Iwagami, S., Kim, M. S., and Sakai, N. (2010): Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface, Landslides, Vol. 7, No. 3, pp. 351-358. (Published online: 17 October 2009) (<http://www.springerlink.com/conte>)

nt/p414142472814685/?p=56953433fb2d45a2
b094992a1c61b26d&pi=0)

〔学会発表〕(計 2 2 件)

①瀬古一郎・王林・内村太郎・田村圭司・内田太郎・伊藤洋輔(2009): リアルタイム斜面監視システム構築のための斜面崩壊検知センサー開発, 平成 21 年度砂防学会研究発表会, 2009/5/27-29, 広島.

②王 林・瀬古一郎・福田 穰・Carlos Jose・内村太郎・内田太郎・伊藤洋輔(2009): 斜面変動のリアルタイムモニタリングシステムの開発と実証 その1, 第 44 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1717-1718, 2009/08/18-21, 横浜.

③福田 穰・内村太郎・王 林・瀬古一郎・内田太郎・伊藤洋輔・恩田裕一・岩上翔・Kim Min-seok・酒井直樹(2009): 斜面変動のリアルタイムモニタリングシステムの開発と実証 その2, 第 44 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1719-1720, 2009/08/18-21, 横浜.

④香川沙絵・内村太郎(2009): 弾性波速度を使った斜面の不飽和地盤の水分量と安定度の監視, 第 44 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 341-342, 2009/08/18-21, 横浜.

⑤田中良平・内村太郎・山田卓(2010): 降雨時のモニタリングデータを用いた斜面の排水特性評価, 第 45 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1747-1748, 2010/08/18-21, 松山.

⑥竹下一輝・内村太郎・山田卓・西江俊作・王 林・内田太郎(2010): 貫入ロッドに組み込まれた迅速に設置できる小型孔内傾斜計の開発, 第 45 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 135-136, 2010/08/18-21, 松山.

⑦王 林・西江俊作・内村太郎・山田卓・内田太郎・秋山浩一(2010): 土砂災害の2次被害防止のための迅速に設置可能な監視装置の開発, 平成 22 年度砂防学会研究発表会(長野大会), 発表番号 02-13, 2010/5/27, 長野.

⑧Uchimura, T., Tanaka, R., Suzuki, D., and Yamada, S. (2010): Evaluation of hydraulic properties of slope ground based on monitoring data of moisture contents, Proc. of the 4th Japan-Taiwan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls, Sendai, Japan, pp. 85-90, 2010/10/25-28,

仙台.

⑨鈴木大健・内村太郎・田中良平・山田卓(2010): 現地計測を利用した斜面崩壊時期リアルタイム予測手法設計の試み, 第 7 回地盤工学会関東支部発表会(Geo-Kanto2010), pp. 163-164, 2010/11/4-5, 大宮.

⑩Uchimura, T., Wang, L., Qiao, J.-P., and Towhata, I. (2011): Miniature ground inclinometer for slope monitoring, Proc. of The 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ATC3 session, 2011/5/23-26, 香港.

⑪Uchimura, T. (2011): Wave velocity in unsaturated slopes in relation to moisture and stability, Proc. of The 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, CD-ROM P194-217, 2011/5/23-26, 香港.

⑫内村太郎・東畑郁生・王 林・西江俊作・瀬古一郎・齋建平(2011): 中国塔子坪の地すべりを対象とした小型孔内傾斜計によるモニタリング, 第 46 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1841-1842, 2011/7/5-7, 神戸.

⑬王 林・西江俊作・瀬古一郎・内村太郎・東畑郁生・齋建平(2011): 中国三峡ダム貯水池地すべりを対象としたモニタリングシステムとその危険予測について, 第 46 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1843-1844, 2011/7/5-7, 神戸.

⑭鈴木大健・内村太郎・可児健(2011): 斜面の水分量と変位の計測を併用した崩壊危険性のリアルタイム判定手法, 第 46 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1999-2000, 2011/7/5-7, 神戸.

⑮可児健・鈴木大健・内村太郎・森啓年・斎藤由紀子(2011): 堤防が崩壊する過程の法面内部の変位と弾性波速度, 第 46 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1937-1938, 2011/7/5-7, 神戸.

⑯Uchimura, T., Suzuki, D., and Seo, H.-K. (2011): Combined monitoring of water content and displacement for slope instability, Proc. of 4th Japan-Korea Geotechnical Workshop, pp. 67-72, 2011/7/5-7, 神戸.

⑰Uchimura, T., Towhata, I., Wang, L. and

Qiao, J. (2011). Validation and interpretation of monitored behavior of slope vulnerable to failure, Proc. 2nd World Landslide Forum, 1(1), Rome, Oct 3-7, 16, 2011. 10. 3-7, ローマ.

⑱ Uchimura, T., Towhata, I., Wang, L., and Qiao, J.-P. (2011): Interpretation of monitored behavior of slopes for early warning of failure, Geotechnics for Sustainable Development, Geotech Hanoi 2011, pp.807-814, 2011. 10. 6-7, ハノイ.

⑲ Gizachew, G. ・内村太郎 (2012): 一定せん断応力下での浸水による不飽和土のせん断変形と破壊の単純せん断試験, 第 47 回地盤工学研究発表会発表講演集, (印刷中), 2012/7/14-16, 八戸.

⑳ 岡田直人・Gizachew, G. ・Seo, H.-K. ・内村太郎・東畑郁生・王林・西江俊作・Qiao J.-P. (2012): 自然斜面の人工降雨による崩壊実験における崩壊前の傾斜変位, 第 47 回地盤工学研究発表会発表講演集, (印刷中), 2012/7/14-16, 八戸.

21 王林・西江俊作・瀬古一郎・内村太郎・東畑郁生・Qiao J.-P. (2012): 斜面表層変動監視を対象とした警報システムとその現場実証実験について, 第 47 回地盤工学研究発表会発表講演集, (印刷中), 2012/7/14-16, 八戸.

22 L. Wang, I. Seko, S. Nishie, T. Uchimura, I. Towhata, and J.-P. Qiao (2012): Case histories of using a low-cost warning system for preventing slope failure and landslide disasters, Proc. of the International Workshop on ICT in Geo-Engineering, pp. 267-276, 2012. 5. 17-18, 京都.

[図書] (計 3 件)

① 内村太郎, ワンリン, チャオ ジャンピン (2011): 斜面モニタリング装置を利用した斜面防災, 「地質と調査」2011 年 3 月号, pp. 12-15.

② 内村太郎・瀬古一郎 (2011): 斜面災害のモニタリング, 特集 豪雨による地盤災害と対策, 基礎工 2011. 7 月号 (VOL. 39, NO. 7, 通巻 456 号), pp. 50-53.

③ 王林・内村太郎・西江俊作・瀬古一郎・薮建平 (2012): MEMS 技術と特定省電力無線技

術を利用した斜面災害早期警報システム, 特集 基礎工における情報通信技術(ICT)の活用, 基礎工 2012. 5 月号 (VOL. 40, NO. 5, 通巻 466 号), pp. 52-55.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 傾斜計装置
発明者: 王林、西江俊作、内村太郎、山田卓
権利者: 中央開発株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2010-033031
出願年月日: 平成 22 年 2 月 18 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内村 太郎 (東京大学・大学院工学系研究科・准教授)

研究者番号: 6 0 2 9 2 8 8 5

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号: