

GPSによる岩の変位計測に関するISRM Suggested Methodと斜面変位計測への適用事例

古山 陽太^{1*}・中島 伸一郎¹・清水 則一¹

¹山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

*E-mail: t031vf@yamaguchi-u.ac.jp

ISRM (国際岩の力学学会) は, GPSによる岩の変位計測に関する推奨法¹⁾を公表し, 3冊目のISRM各種推奨法の集約本 (通称: オレンジブック)²⁾に掲載された. これは, GPSによる変位計測法が岩盤力学の分野でも普及し多くの適用事例が見られるようになり, 現時点で, 国際学会として標準的な利用方法を制定しておこうという趣旨のもので, 筆者らはその内容を取りまとめた.

本報告は, 推奨法, および, そこに記載した誤差要因とその補正方法の概要を述べるとともに, これまで適用が困難とされてきた急傾斜の長大斜面にそれらの補正方法を適用して実際に変位計測を行い, 高精度に三次元変位を連続計測した事例を示すものである.

Key Words: GPS, displacement monitoring, slope stability, ISRM, suggested method

1. はじめに

GPS (Global Positioning System) による変位計測は, 1980 年代後半から始まり, 現在では, 地すべり斜面, 切土法面, 鉱山残壁, トンネル坑口斜面, フィルダムおよび重力ダム堤体, 盛土, 開削土留め壁, 地盤沈下, 土砂災害, 高架橋, 軌道, 鉄塔, 建築物, 災害復旧などの安全監視, 建設施工あるいは維持管理等の実務に数多く利用されている. 特に, 長期間安定して三次元的に変位を自動連続計測できるため, 異常変位の兆候の早期検出, 豪雨時の挙動監視, 地震後の緊急点検などに効果があると考えられている.

ISRM (International Society for Rock Mechanics; 国際岩の力学学会) では, このような背景のもと, 国際学会として現時点における標準的な GPS による変位計測法を制定することになり, 筆者らはその要請を受け ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS)¹⁾ を取りまとめた. この推奨法では, 誰もが様々な環境下で GPS によって高精度に変位計測ができるように誤差要因とその補正方法を明記している.

本報告では, 推奨法に記載した誤差要因とその補正方法の概要を述べるとともに, これまで適用が困難とされてきた急傾斜の長大斜面にそれらの補正方法を適用して, 高精度に三次元変位を連続計測した事例を示す.

2. 岩の変位計測に関するISRM Suggested Methodについて

ISRMでは, 岩の力学に関わる調査法, 試験法, 計測法などをCommission on Testing Methods (試験法委員会) を中心に, 将来の標準化を目標としてSuggested Methodを取りまとめ, 随時, 国際論文誌 Rock Mechanics and Rock Engineering (Springer) 上に公表している. そして, それらの方法は, 一般に周知するために集約して製本され, 最近では, 3冊目のISRM各種推奨法の集約本 (通称: オレンジブック)²⁾が出版された.

筆者らは, Commission on Testing Methods の依頼を受けて, ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS)¹⁾ を執筆した. その構成は次のようである.

1. Introduction
2. Scope
3. Background
 - 3.1 Outline of GPS
 - 3.2 Sources of error
4. Devices
 - 4.1 General
 - 4.2 Antenna and receivers
 - 4.3 Software and computer
 - 4.4 Automatic monitoring system

5. Procedure

5.1 General

5.2 Installation of antennas and receivers

5.3 Observation

5.4 Analysis

5.5 Error corrections

6. Report

6.1 General

6.2 Installation reports

6.3 Monitoring reports

Appendices

Terminology

References

記載されている方法に基づいて計測を実施すれば、誰もが一定の質（精度）でGPSによる変位計測ができることを目的にとりまとめた。適用に際し、特に、誤差要因の理解とその補正方法が重要であり、本研究では、実際の斜面変位計測に適用しその効果を検証する。

3. 誤差要因と補正法

GPS 変位計測の高精度化には誤差要因に応じた対応が必要となる。特に、変位計測上、重要な誤差要因は、

(a) 上空障害物；障害物を通過する際に電波の乱れが生じる、(b) 対流圏遅延；大気を通過する際、大気の密度によって生じる電波の遅延。気象の影響を受ける、(c) マルチパス；障害物によって反射した電波が複数の経路を経てアンテナに入射する、である。これらはバイアス誤差となって正確な変位計測の障害となる。そこで、以下のような考え方によって真の変位値を高精度に推定する¹⁾³⁾。

まず、上空障害物の影響に起因する周期的な飛び値の誤差を ε_p 、対流圏遅延誤差を ε_T 、受信機ノイズなどのランダム誤差を ε_R とおくと、GPS による変位の計測値（観測式）は次のようにあらわされる。

$$y = u_0 + \varepsilon_p + \varepsilon_T + \varepsilon_R \quad (1)$$

ただし、 y は計測値、 u_0 は変位の真の値である。各種誤差に対して、上空障害物の影響を低減する方法（マスク処理）⁴⁾、対流圏遅延の補正方法⁵⁾⁷⁾、および、ランダム誤差を低減する方法（トレンドモデル）⁸⁾を適用することで、誤差 ε_p 、 ε_T 、および、 ε_R の低減が可能である。

以上の補正を効果的に適用するための実用的な手順⁹⁾を図-1に示す。

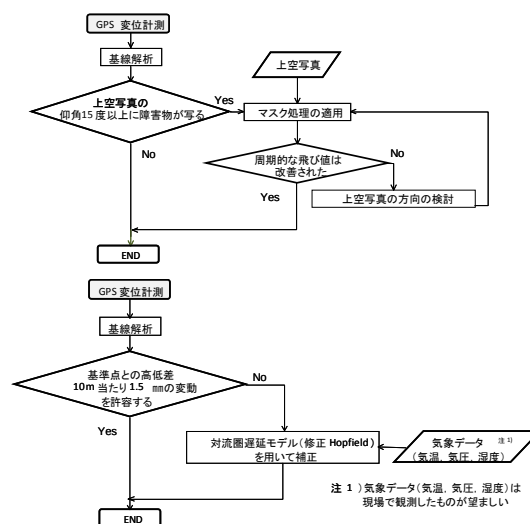


図-1 高精度変位計測の実用的手順

4. 急峻な長大斜面の変位計測への適用

ここでは、GPS 変位計測の適用現場としては計測環境が厳しく、これまでは高精度に計測することが困難であった上空視界が悪く、高低差の大きい急傾斜斜面¹⁰⁾に対して、前節に述べた誤差補正法を適用しその効果を検証する。

(1) 現場概要とセンサー配置

図-2 に本研究で用いる GPS 変位計測システム¹¹⁾を示す。このシステムは、人工衛星からの電波受信、基線解析、各種補正、変位導出まですべて自動的に行うものである。なお、電波の受信エポックは 30 秒、基線解析は 1 時間の受信データを用いたスタティック方式によって実施した。したがって、変位は 1 時間毎に計測される。

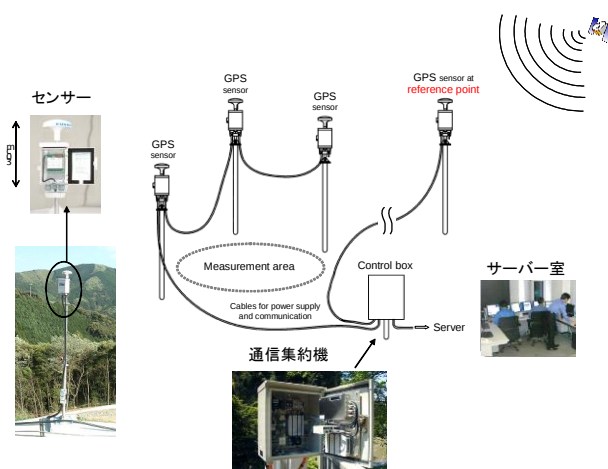


図-2 GPS変位計測システム

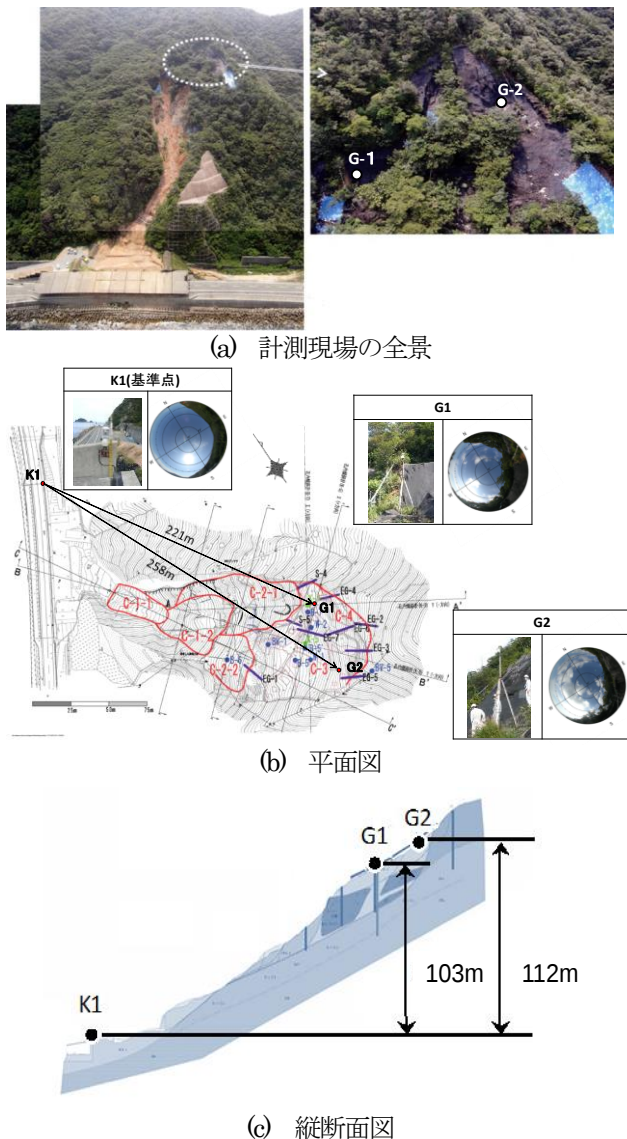


図-3 計測斜面と計測点および基準点

図-3に計測現場の全景、平面図に計測点と基準点の上空写真、縦断面図を示す。斜面の上部の2か所に計測点 G-1、および、G-2 を、道路のロックシェットの上面に基準点 K-1 を設置した。基準点と G-1、および、G-2 の基線長は、それぞれ、221 m、および、258 m、また、高低差はそれぞれ、103 m、および、112 m である。

(2) 高精度化技術の適用と補正効果の検証

図-3 より、センサー上空は植生により上空視界が遮られており、基準点と計測点の高低差が 100 m 以上あることが分かる。これらのことから、上空障害物による電波の乱れが発生する可能性があり、基準点と計測点間の大きな高低差より、気象条件による電波遅延の影響を受け、計測に誤差が生じることが考えられる。

まず、本格的な計測に先立ち、各種補正方法の妥当性を検証するため、予備的な計測を行った。予備計測期間は 2012 年 10 月 6 日から同年 11 月 30 日であり、図-4 に

計測点 G-1 の計測結果を示す。黒丸は基線解析による結果である。図には、緯度、経度、高さ方向の変位成分を示している。いずれの成分にも連続的な周期変動と、周期的な飛び値を含みばらついているのがみられる。このとき、変位の各成分の標準偏差は、緯度、経度方向に対しそれぞれ、2.4 mm、および、4.6 mm、また、高さ方向は 8.0 mm である。

そこでまず、上空障害物による電波の乱れを低減するためにマスク処理⁴⁾を適用した。マスク処理とは、障害物の背後にある衛星からの電波を使わないで解析する方法である。詳細は文献 4) を参照されたい。その結果を図-5 に示す。図-4 と比較すると、周期的な飛び値が大幅に減少し、計測の標準偏差は、緯度方向は 1.9 mm に、経度方向は 2.0 mm に、また、高さ方向は 3.5 mm へと、元の標準偏差のほぼ 1/2 に改善された。しかし、高さ方向変位には、なお、連続的な周期変動がみられる。

次に、対流圏遅延補正⁵⁾を行った。対流圏遅延は、電波が対流圏を通過する際に大気の影響を受けて屈折し計測点への到達が遅れる現象であり、本研究では、修正 Hopfield モデルとよばれる対流圏遅延モデルと地表気象（気温、湿度、気圧）を用いてこの誤差を補正する。その結果を図-6 に示す。図-5 にみられた連続的な周期的な変動が低減されたことがわかる。最後に、図-6 の結果にトレンドモデル適用⁶⁾した結果が図-7 である。トレンドモデルは、ランダム誤差を有する計測データから真の値を推定する方法である。補正前の一般的な基線解析のみによる計測結果を示す図-4 と比較すると、劇的に計測結果が改善されていることがわかる。本現場のように、これまで GPS を適用するには不利と考えられてきた計測環境であっても、マスク処理、対流圏補正、トレンドモデルの適用によって、計測条件が良好な場合とほぼ同じ精度で変位計測が実施できることが実証された。

5. 連続変位計測結果¹²⁾

本格運用を始めて以降、顕著な変位を示した計測点 G-1 の 3 次元変位の連続計測結果を 1 時間降雨量とともに図-8 に示す（計測期間は 2013 年 3 月から 2014 年 1 月、計測間隔は 1 時間）。計測点 G-1 における、緯度、経度、および、高さ方向の変位の標準偏差は、それぞれ、1.6 mm、2.0 mm、および、4.5 mm であり、従来の GPS 測量の標準偏差、水平方向 5 mm、高さ方向 10 mm と比べると、GPS 計測として高い精度で得られている。

これらの計測結果を用いて、図-9 に平面内の変位ベクトルを、また、図-10 に縦断面における変位ベクトルを示す。まず、平面上の変位ベクトルは、おおむね地形の等高線に直交する方向（最急こう配）を向いているこ

とが分かる。断面内の変位ベクトルは、当初は、すべり線に平行であるが、10月23日以降は、斜面前方に向かっている。すなわち、斜面表面のトップリング的な挙動

とすべりの挙動が交互にあらわれているものと思われる。GPS変位計測ではこのように3次元変位の経時的な動きが詳細に把握できる。

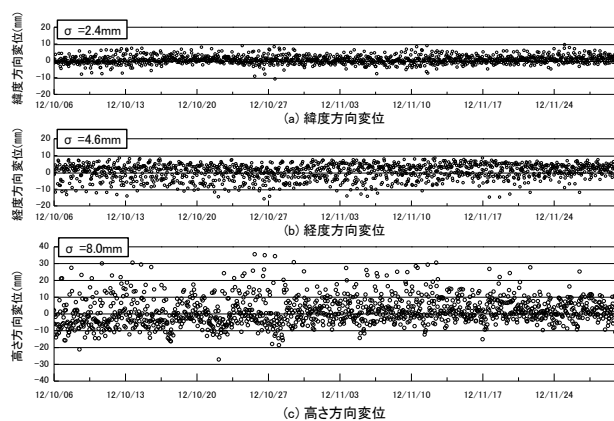


図-4 通常解析結果

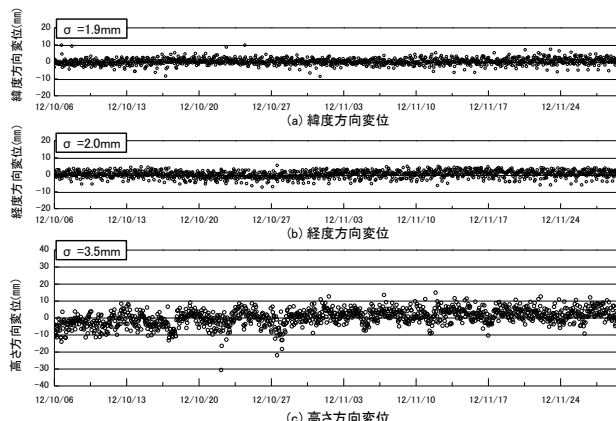


図-5 マスク処理

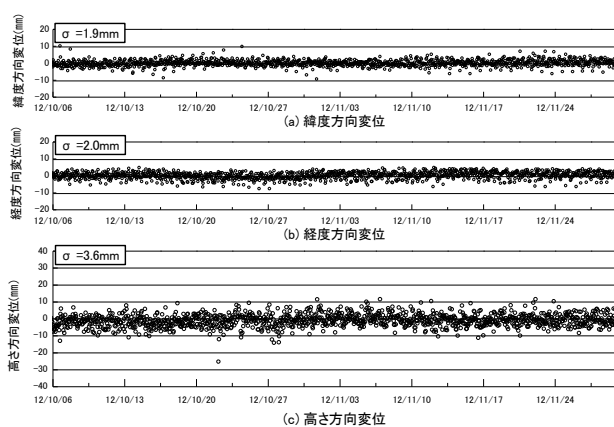


図-6 マスク処理および対流圏遅延補正

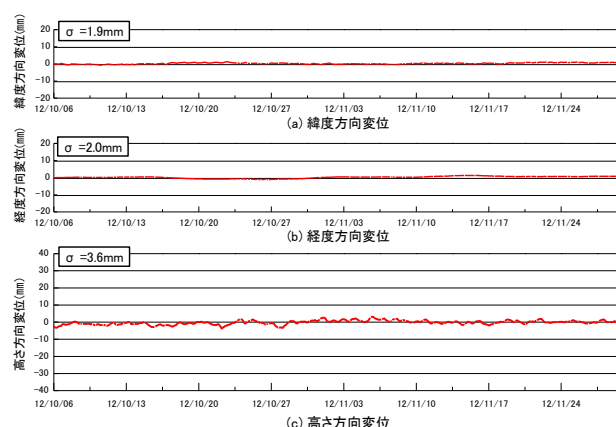


図-7 平滑化結果

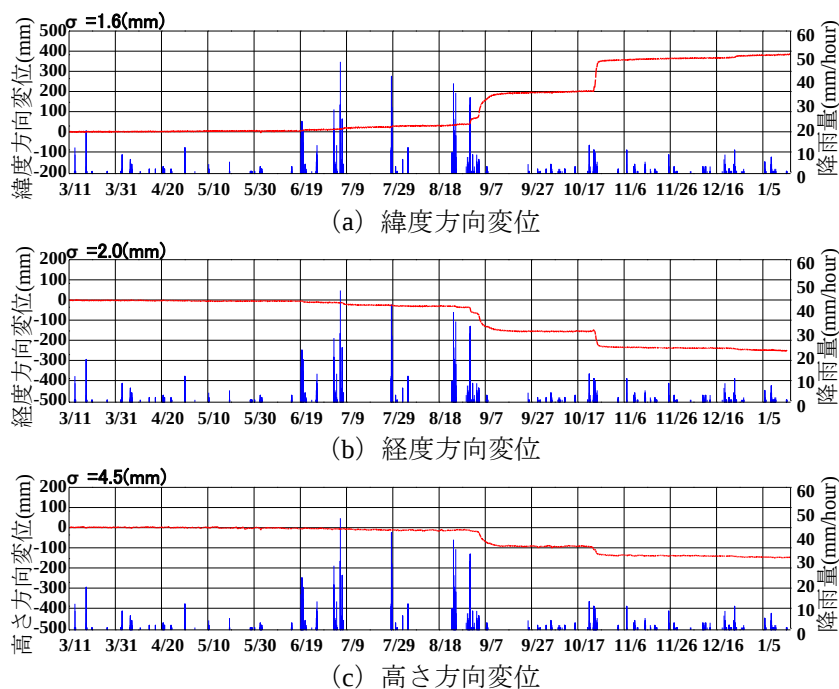


図-8 GPSによる三次元変位計測結果

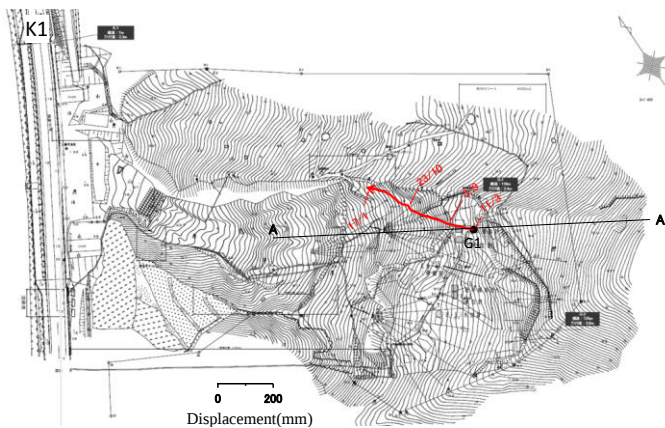


図-9 平面ベクトル図

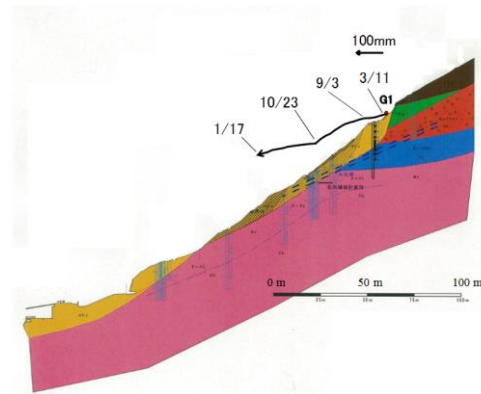


図-10 断面ベクトル図

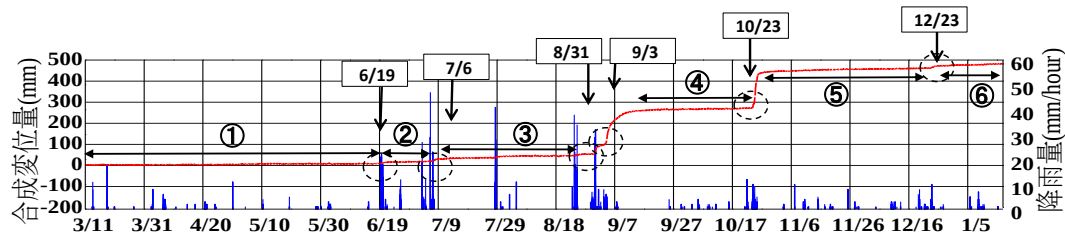


図-11 G1 の計測変位と降雨量 (2013 年 3 月 11 日～2014 年 1 月 17 日)

次に、図-11 に図-8 の 3 次元計測変位に対するベクトルの合成変位の大きさ（トレンドモデル適用結果）と 1 時間降雨量を示す。6 月中旬の降雨の影響によって変位の増加が始まり、その後の降雨を経て 8 月末から 9 月にかけて、数度の時間 30 mm 以上の降雨によって、9 月 3 日には約 40 mm、および、約 150 mm、さらに、10 月 23 日にも約 160 mm を超える変位増分がみられた。その他の降雨時にも数 mm 程度の変位増分が検出された。また、図-11 に示す各期間 1～6（図-11 のなかで、○で囲った数字に対応）の変位速度（1 日前の同じ時間帯からの増分量）はそれぞれ、0.1 mm/日、0.3 mm/日、0.5 mm/日、0.4 mm/日、0.3 mm/日、0.4 mm/日となっている。このように、0.1 mm/日程度の変位速度も確実に計測され、小さな速度の変化も捉えることができることが分かる。

図-12 に特に大きな変位増加が計測された 8 月 23 日～11 月 15 日までの変位、および、日変位速度を示す。一般に、道路安全管理に変位速度を用いることが多く、本現場においても、10 mm/日、および、20 mm/日を管理の目安としている。GPS 変位計測によって得られる変位速度は、このような管理基準値と比較できるだけの精度で計測できることが示された。

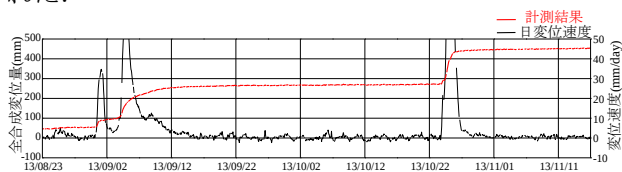


図-12 G1 の変位と変位速度
(2013 年 8 月 23 日～11 月 15 日)

6. むすび

筆者らの研究成果を中心に取りまとめられた ISRM の GPS 変位計測に関する推奨法に示された誤差補正法を適用すると、急峻で高低差の大きい GPS 変位計測にとって不利な環境であっても、高精度に安定した連続三次元変位を計測ができることが示された。

その結果、微小な変位速度の変化を含む三次元変位挙動をリアルタイムで得ることができ、斜面安全監視の実務に適用できるだけの精度を確保できることが検証された。

謝辞：現場計測にご協力いただいた国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所の関係各位に感謝する。また、本研究は、文部科学省科学研究費助成（課題番号 25350506）、および、中国建設弘済会技術開発支援助成を得て実施した。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Shimizu, N., Nakashima, S. & Masunari T: ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS), Rock Mech. Rock Eng., 47:313-328, 2014. DOI 10.1007/s00603-013-0521-5.
- 2) Ulusay, R. (editor): ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014, Springer, 2004.

- 3) 清水則一：GPS による地盤／構造物の高精度変位計測の現状と今後，電力土木，総説，No.366，pp.3-9, 2013.
- 4) 増成友宏，武地美明，田村尚之，船津貴弘，清水則一：GPS 変位計測における上空障害物の影響とその低減法，土木学会論文集 F，vol.64，No.4，pp.394-402，2008.
- 5) 増成友宏，清水則一：GPS による地盤変位計測における気象の影響の補正方法の検討，土木学会論文集 F，vol.63，No.4，pp.437-447，2007.
- 6) 増成友宏，武地美明，船津貴弘，清水則一：現場気象データを用いた GPS 変位計測の補正について，土木学会論文集 F，Vol.65，No.3，pp.356-363，2009.
- 7) 中島伸一郎，平林 憲，清水則一，増成友宏，岩崎智治，小野雅和：長大斜面における GPS 変位計測の大気遅延補正とその効果，Journal of MMIJ，Vol.128，No.6，pp.255-264，2012.6.
- 8) 松田浩朗，足立寛，西村好恵，清水則一：GPS による斜面変位計測結果の平滑化処理と変位挙動予測手法の実用性の実証，土木学会論文集，No.715/III-60，pp.333-343，2002.
- 9) 古山陽太，板垣壮真，中島伸一郎，清水則一：GPS による高精度斜面変位計測の実用的手順の検討，平成 25 年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集，III-3，2013.5.
- 10) 古山陽太，大山直輝，中島伸一郎，山田晋吾，清水則一：急傾斜斜面に対する GPS 変位計測システムの適用事例，土木学会第 69 回年次学術講演会，III-293，pp.585-586，2014.9.
- 11) 岩崎智治，原口勝利，佐藤渉，増成友宏，内田純二，清水則一：GPS を用いた自動変位監視のための Web システムの開発，日本地すべり学会誌，第.49 巻，第 4 号，pp. 174-185，2012.
- 12) Shimizu, N., Nakashima, S. and Furuyama, Y.: Real-time displacement monitoring using GPS for assessing slope stability, Proceedings of EUROCK2014- Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, Vigo, pp.947-951., 2014.

ISRM SUGGESTED METHOD FOR MONITORING ROCK DISPLACEMENTS USING THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM AND ITS APPLICATION FOR DISPLACEMENT MEASUREMENTS OF A STEEP SLOPE

Yota FURUYAMA, Shinichiro NAKASHIMA and Norikazu SHIMIZU

GPS is now being widely used for monitoring rock displacements, and it has been a useful tool for various rock engineering projects. International Society for Rock Mechanics has published the "ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System". It was proposed by the authors as technology which can be used by anyone. In this research, the suggested method is applied displacement measurements of an unstable steep slope to verify the practical applicability.