

## MEMS 型三軸傾斜計による法面崩壊の計測事例

## Case Study of Slope Disaster Monitoring using MEMS Inclinometer

中村公一 Koichi NAKAMURA (鳥取大学大学院工学研究科)  
 島内哲哉 Tetsuya SHIMAUCHI (オフィス im3)  
 小野和行 Kazuyuki ONO (日本総合建設(株))  
 西山哲 Satoshi NISHIYAMA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

近年, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれる機械要素部品と電子回路を集積化した小型デバイスを用いて, 地盤の挙動を計測するシステムの構築が進められている. しかし, 実際の斜面に適用し, 崩壊に繋がる挙動を捉えた報告はまだ少ない. ここでは, MEMS 加速度センサを用いた傾斜計により, 法面が崩壊した実現場に適用して得た結果と, その解釈方法について検討した結果を報告する.

キーワード: 傾斜計, MEMS, 法面

(IGC: C07, T03)

## 1. はじめに

近年, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) と呼ばれる機械要素部品と電子回路を集積化した小型デバイスの開発・利用が進められている. なかでも加速度センサを用いた MEMS 型傾斜計は, 小型・軽量, 省電力性に優れており, 設置の自由度も高いことから, 法面や岩盤斜面などの厳しい条件下での活用が期待されている<sup>1)</sup>.

傾斜計による計測そのものは, これまでも地すべり監視に用いられてきた. しかし, 当初は水管式の傾斜計が用いられていたため, 測定レンジの狭さが設置条件の制約(水平の確保)となり, 高感度ゆえの日変動や季節変動に対する煩雑な補正もあって, 使用例は伸縮計に比べると少ない. 一方, 近年普及しつつある MEMS 型傾斜センサは, 測定レンジが拡大したことで設置条件が大きく緩和され, センサ自体も低価格で IT 技術との親和性が高いことから, 斜面崩壊を対象とした事例も増えつつある<sup>2),3)</sup>. しかしながら, 岩盤斜面や吹付け法面のような急崖となると, 設置するセンサや解釈の難しさもあって, 開発や適用は進められているものの計測事例はまだ多くない<sup>4),5),6),7)</sup>. 本論文では, 切土施工現場協の老朽モルタル吹付け法面で発生した, 変状から崩壊に至るまでの過程を三軸加速度傾斜センサによって捉えた事例を報告する.

## 2. 加速度から傾斜角度への変換方法

加速度センサを用いた傾斜角度の計測は, 加速度センサの出力が重力に比例する性質を利用している. このとき, 加速度と傾斜角度との関係は, 図-1 に示す sin カーブとなり, 傾斜角度は式(1)で求められる. しかし, 一軸だけでは傾斜方向を特定することが困難である. 通常は X と Y の二軸を直交かつ地面に平行に, すなわち出力信号が 0g となるように設置し, こうすることで生じる各軸の符号(正負)の違いにより傾斜方向を特定している. ただし, 前述のように加速度と傾斜角度の関係は sin カーブであるため, 傾斜角度の計測結果に精度を要求すると, 必然的にその測定範囲は直線で近似可能な $\pm 20 \sim 30$  度程度の狭い範囲に限定される. それでも, せいぜい $\pm$ 数度の測定レンジしかなかった従来型のセンサに比べれば大きな利点といえる.

一方, 変状が認められ, 変状の進行状況確認が必要となる法面や岩盤斜面の中には傾斜が $30^\circ$ を超える急斜面も数多い. このような場所で二軸センサを用いる場合には, 計測精度を考慮すると設置のための架台が必要となるが, 三軸加速度センサを用いればそのような作業は必要なくなる.

平面である X,Y 軸に, 垂直な Z 軸を追加するということは, XY 軸が 0g のとき Z 軸は -1g となることを意味している. このため XY 軸が sin に比例するとき Z 軸は cos に比例することになり, 図-2 に示すように感度の補間が可能となる. これによって, センサの姿勢を球体でとらえることが可能になる. 三軸における XY 平面の傾斜角 ( $\theta$ )

と重力ベクトルを基準とした Z 軸の傾斜角 ( $\phi$ ) は、通常式(2)、式(3)で求められる。ただし、傾斜が緩い斜面への設置はともかく、傾斜変化の大きい急崖への設置やセンサの数が多くなると、水平面と垂直を基準として各軸の傾斜を表す方が実務的と考えられる。そこで、本研究ではセンサの姿勢を求める方法として、式(4)~式(5)を用いた。ここでの基準軸は、Z 軸の場合重力ベクトルであり、XY 軸はこれと直交する水平軸(水平面)である。なお、 $AccX$ ,  $AccY$ ,  $AccZ$  はそれぞれ X, Y, Z 方向の加速度である。

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{A_{x\_out} [g]}{1g} \right) \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{AccX}{AccY} \right) \quad (2)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{AccZ}{\sqrt{AccX^2 + AccY^2 + AccZ^2}} \right) \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{AccX}{\sqrt{AccY^2 + AccZ^2}} \right) \quad (4)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{AccY}{\sqrt{AccX^2 + AccZ^2}} \right) \quad (5)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{AccX^2 + AccY^2}}{AccZ} \right) \quad (6)$$

### 3. 対象法面の状況、傾斜計設置方法、測定方法

傾斜計を設置したのは、切土施工中の法面側部において崩壊が想定された、既設のモルタル吹付け法面である。MEMS 型三軸傾斜計を用いたのは、崩壊が想定される箇所がオーバーハングぎみの急斜面で、伸縮計に代表される一般的な計測機器の設置が難しく、場所が狭いために光波やレーザーなどの非接触型計測器による監視も困難であったためである。このようななか選択された小型軽量の MEMS 型三軸傾斜計 (図-3) は、法面作業員がロープにぶら下がった状態で接着剤を用いて設置した。要した時間は 10 分ほどである。図-4 は、崩壊断面における MEMS 型三軸傾斜計の姿勢を示した図である。同図には、正面からみた傾斜計の姿勢と計測開始時の角度を示した。

傾斜計は 10 分間隔で計測を行い、測定したデータを 1 時間ごとに、特定省電力無線により親機へと転送した。傾斜計親機を含む基地局は、川を挟んだ対岸(距離約 180m)に設置した。これは、基地局の電力に太陽光パネルとバッ

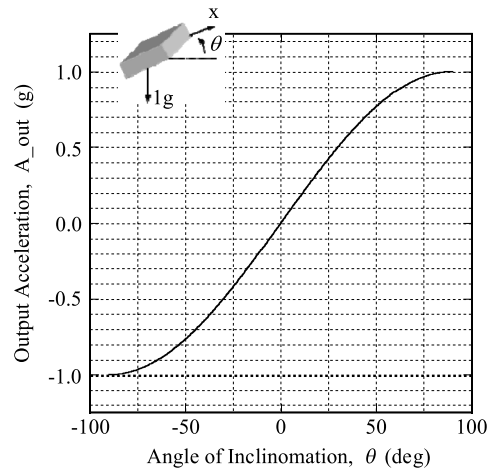


図-1 傾斜角度と出力加速度の関係 (一軸の場合)

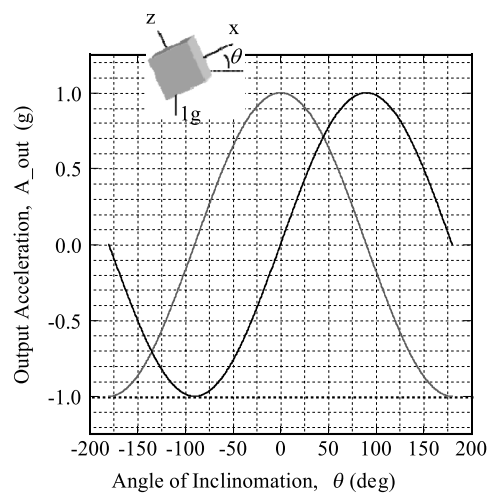


図-2 傾斜角度と出力加速度の関係 (二軸の場合)

テリを用いたため、日照時間を考慮してのことである。ただし、それでも傾斜計親機と OS 組込型ボード PC の稼動用電力が不足気味であったことから、ここでは GPS タイマーを用いた電力供給装置を用い、1 時間に 7 分だけ電力を供給するようにして省電力化をはかった。

計測データは、親機で受信後、3G 回線により東京のデータベースまで転送し、このデータを施工現場、松本(長野県)、東京および鳥取の 4 カ所で共有しながら監視を行い、崩壊発生までの挙動を捉えた。

## 4. 計測結果

### 4.1 計測時の概況

対象法面に 1cm 強の垂直な開口亀裂が確認されたのは 2012 年の 11 月半ばである。MEMS 傾斜計センサを設置したのは 11/20 であり、11/21 より計測を開始した。その後法面作業員から、亀裂が数 cm に拡大したとの連絡があっ

MEMS型三軸傾斜計による法面崩壊の計測事例

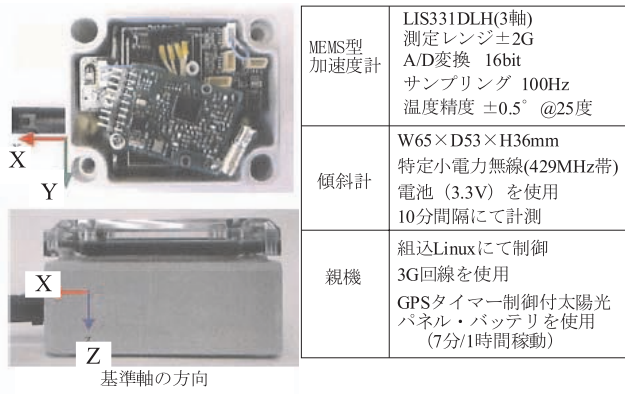


図-3 傾斜計とシステム諸元

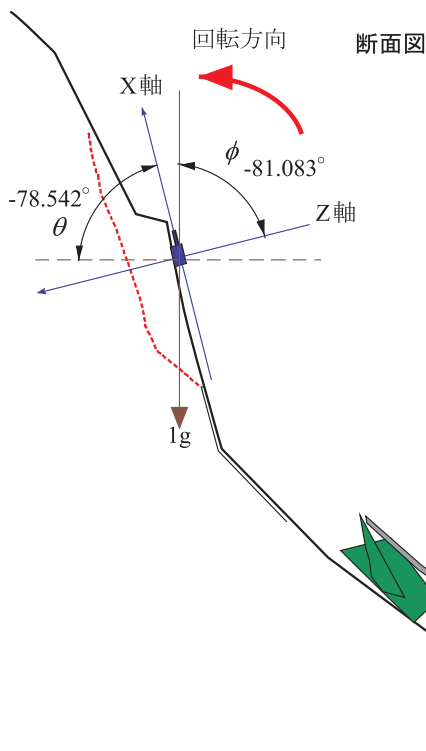
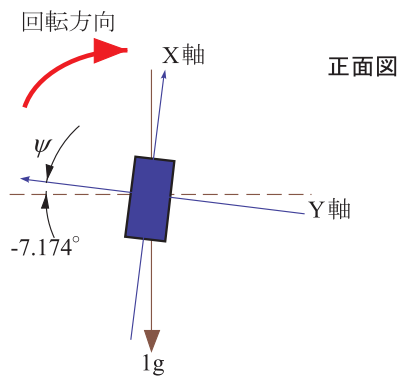
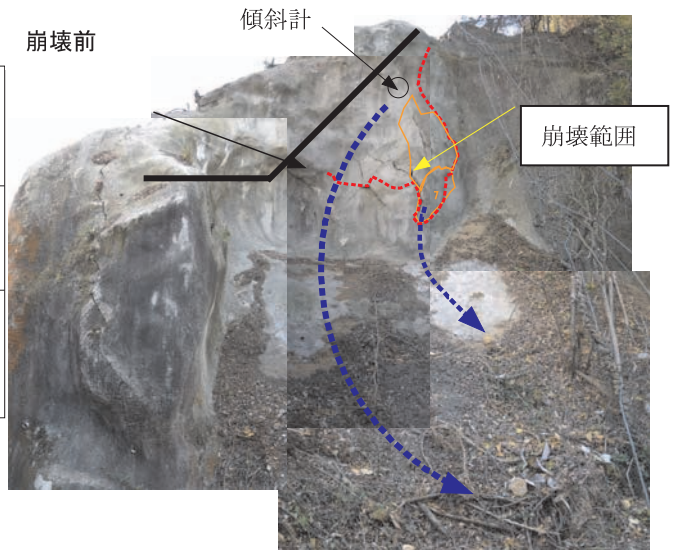


図-4 傾斜計設置姿勢と崩壊直前の回転方向



図-5 崩壊前後の状況

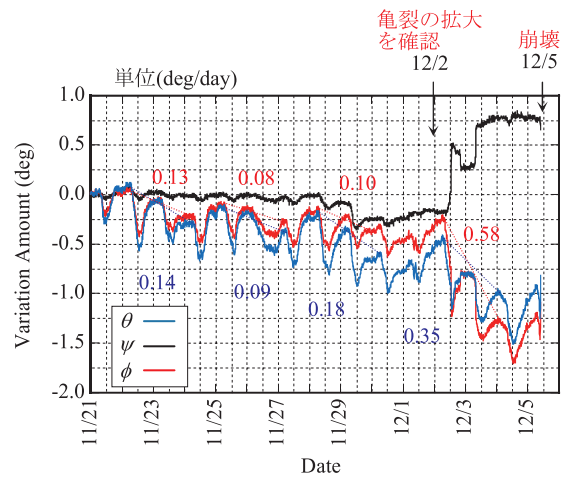


図-8 崩壊前後の状況

たのは 12/2 の昼である。亀裂はその後拡大を続け、12/5 の昼に崩壊した（図-5 下）。計測期間は、11 月 21 日～12 月 5 日の 10 時までである。傾斜計は、その破損を心配した作業員によって崩壊の 2 時間ほど前に取り外された。

#### 4.2 加速度の計測結果

岩盤斜面や吹付けなどでの計測では、しばしば階段状（スティックスリップ）やのこぎり状の変動・累積が見られる。原因は、ブロック内の亀裂の伸張、ブロック同士のせん断などによる局所的かつ急激な動きによるものと考えられる。このような変動を捉える場合、データを傾斜角度に変換する前の一次データ、すなわち加速度データでみるとわかりやすいことが多い。これは、二軸以上の場合には、その変換過程で変動イベントが隠れてしまうためである。図-6 は、各軸の加速度の計測結果であるが、この図からは 11/29、12/2、12/3 の XY 軸になんらかの急な変動が生じたことがわかる。Z 軸も、日周期的な変動に隠れてはいるがよくみるとほぼ同時期に小さな累積変動が認められる。ここではこのうちの 11/29 AM6:00 頃と 12/2 AM6:00 頃の 2 つの変動に着目した。

#### 4.3 傾斜角度の計測結果

図-7 は式(4)～(6)に示す式を用いて変換した各軸の傾斜角とセンサ内温度の経時変化図である。図中には、加速度データから判明した急変時期と、その時点での傾斜角度の変化を記している。

加速度と同様、 $\phi$  と  $\theta$  には、 $0.5 \sim 0.7^\circ$  の日変動がみられる。 $\psi$  にも目立たないものの  $0.07^\circ$  ほどの同様の変動が認められる。一般に加速度センサは温度の影響を受けやすいと言われるが、周期が同じで変動幅が軸によって異なるような場合、むしろ設置箇所周辺への日照による膨張・収縮の影響が考えられる。

$\theta$  はほぼ法面と断面方向の水平面からの角度である。計測開始当初より角度は減少傾向を示すが、これは法面の後方回転を意味する。 $\psi$  は法面の走向とほぼ平行な方向であり、水平面との角度を表す。11/29 に  $-0.22^\circ$ （左回転）、12/2 には反転して  $+0.29^\circ$ （右回転）している。一旦小さく左に傾いた後、大きく右側に回転するように崩壊したことを意味する。重力方向の上向きとの角度を示す  $\phi$  は、 $\theta$  と同じほぼ断面方向であるが、計測開始当初より角度が減少傾向であり、これも  $\theta$  同様に後方回転を意味している。

計測開始から崩壊直前までの最大角度量は、 $\theta$ 、 $\psi$ 、 $\phi$  ともにおよそ  $1.5^\circ$  程であった。

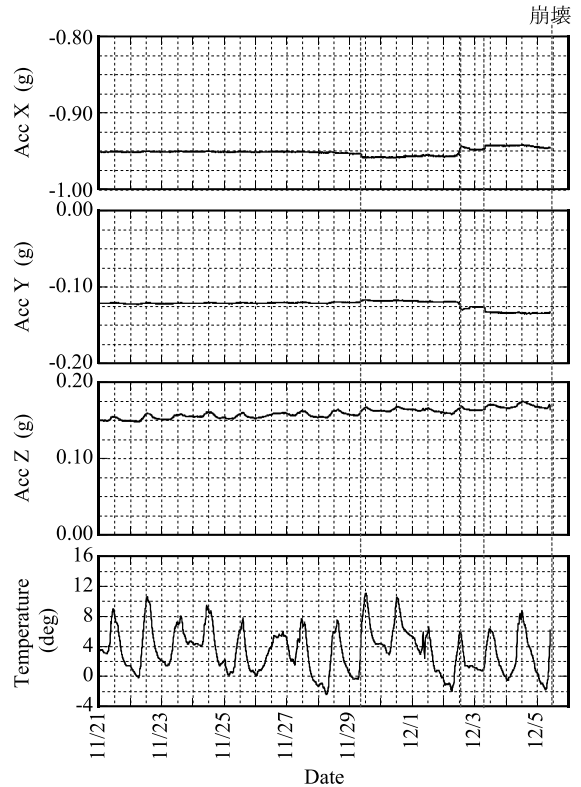


図-6 加速度の計測結果

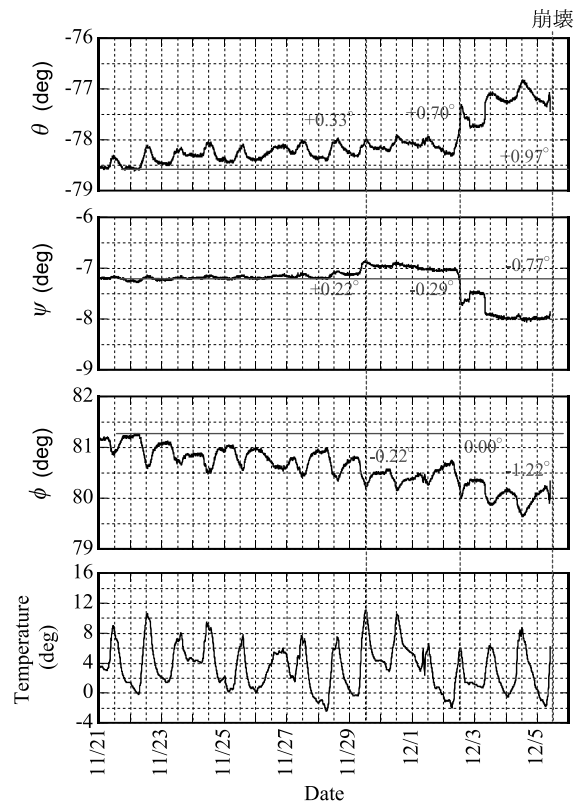


図-7 傾斜角度の計測結果

#### 4.4 崩壊までの全変動量とひずみ

計測開始（11/21）から崩壊する 12/5 までの間における 2 箇所の変動時点（11/29 AM6:00、12/2 AM6:00）の累積傾斜角度と、それから求めた亀裂変位とせん断ひずみの値を表-1 に示した。亀裂変位は、崩壊の下端からセンサまでの高さを 3m として角度の正接で、せん断ひずみは得られ

た亀裂変位を高さで除して求めた。各期間におけるこれらの変動値と法面作業員からの聞き取った状況を対照すると、崩壊までの経緯は次のようになる。

計測開始時には1~2cm程度の幅(0.38~0.58%)であった亀裂の拡大(2~4cm(0.73~1.22%))に気づいたのは12/2の昼であった。その後、亀裂は5~7cmへと急速に拡大し(1.34~2.30%)、崩壊の危険を感じて退避したのが12/5午前、そして同日昼には崩壊した。なお上述括弧内の%はせん断ひずみを示す。このような崩壊までの観察と計測データから、変動は12/2前後を境に、一気に危険な状態になったものと推察される。

#### 4.5 傾斜速度からみた崩壊までの流れ

崩壊までの変動を速度(deg/day)で整理したのが表-2である。また図-8には、11/21からの変動量を示した。図-8よりデータが日変動しているうえに2~3日動いては戻ると、のこぎり状の累積変動であることがわかる。このため、速度は日速度(deg/day)として、その間の日変動の山と山を結んだ後で大きく変化する。これは $\psi$ の不連続な変動でも明らかだが、 $\theta$ と $\phi$ でみると、最初は $\theta=0.09\sim 0.18\text{deg/day}$ 、 $\phi=0.08\sim 0.13\text{deg/day}$ 程度であった速度が、12/2前後を境に $\theta=0.35\text{deg/day}$ 、 $\phi=0.58\text{deg/day}$ と3~4倍になっている。このような速度の違いから、12/2の $\psi$ の変動、すなわち法面に平行な方向の不連続な動きが崩壊に決定的な影響を及ぼすものであったことがわかる。実際、12/2時点での $\theta$ のせん断ひずみも1%を超えている。

このようにみると、計測開始から12/2までが変位がほぼ定速度で増加する定常クリープ状態、それ以後に三次クリープ状態に突入したものと想定される。ただし、図-8からは、11/29の $\psi$ の変動イベント前後で $\theta$ と $\phi$ が微増しているようにも見える。この点に注目すると、11/29以後には既に三次クリープに入っていた可能性もあり、その場合の定常クリープ速度は $\theta$ で0.08~0.13deg/day、 $\phi$ で0.09~0.14deg/dayと少し小さくなる。表-2にはこの点を考慮して、変動速度を表-1同様に区分(11/29, 12/2)してまとめた。

本結果からみると、いずれかの軸の傾斜が0.1~0.2deg/dayで数日続き、想定せん断ひずみが1%を超えるると三次クリープ域に入ったものと解釈できる。

## 5. まとめ

傾斜80°の吹付け法面で発生した滑動型崩壊(幅4m、高さ4.5m)の発生までの挙動を、MEMS型三軸傾斜計を

表-1 期間別の状況

	変動種別	$\theta$	$\phi$	$\phi$	現地での判定
11/21 ~ 11/29	角度	0.33	0.22	0.22	拡大に気づかない
	亀裂変位	1.73	-1.15	-1.15	
	せん断歪み	0.58	0.38	0.38	
11/29 ~12/2	角度	0.70	-0.29	0.00	拡大に気づく
	亀裂変位	3.67	1.52	0.00	
	せん断歪み	1.22	0.51	0.00	
12/2~ 12/5	角度	0.97	-0.77	-1.22	危険と感じる
	亀裂変位	5.08	4.03	-6.39	
	せん断歪み	1.69	1.34	2.13	

(角度(°), 亀裂変位(cm), せん断ひずみ(%))

表-2 期間別の想定変動

	$\theta$ (deg/day)	$\phi$ (deg/day)	$\phi$ (deg/day)	想定変動
11/21~ 11/29	0.08	—	0.09	二次クリープ
11/29~ 12/2	0.18	—	0.10	
12/2~ 12/5	0.35	—	0.58	三次クリープ

用いて計測した。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 計測データは、吹付け自体の日周期的な変動により、階段状またはのこぎり状に動きながら累積した。計測開始から崩壊直前までの傾斜角度の変化はおおよそ1.5°であった。
- (2) 累積する傾斜角度と拡大する亀裂の状況から、崩壊までの間を二次クリープと三次クリープの2つの段階に区分した。二次クリープの傾斜速度は0.08~0.18deg/dayであり、三次クリープで崩壊直前の傾斜速度は0.35~0.58deg/dayであった。
- (3) 二次クリープから三次クリープへ変化した時期は、法面作業員が亀裂の拡大に気づき、せん断ひずみが1%を超えた時期とほぼ一致する。

緩傾斜の土砂斜面での計測と異なり、吹付け法面や岩盤での計測は、亀裂の分布や崩壊形態の影響を強く受けると考えられる。当然のことながら、その計測結果はセンサ設置位置によって左右される。この点では、結果の判定方法の良否や値の大小については今後の課題である。しかし、本事例からは少なくとも、急斜面に簡易な方法で接着させたMEMS型三軸傾斜計が、 $10^{-2}$ オーダーの傾斜速度を捉

えられることがわかった。危険な老朽吹付け法面や岩盤斜面が我が国には数多く存在するが、その多くはセンサ自体の設置が難しい山岳道路脇の急斜面であり、監視には多くの困難を伴う。MEMS 型三軸傾斜計は、これらの問題を解決する一助になるものと期待される。今後、設置方法のシステム化を含めて、計測事例を収集していきたいと考えている。

#### 謝辞

本計測を実施するにあたり、計測システムへの電力供給装置を作成していただいた(株)コンラックス松本の古澤様に、ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 小野武, 西山哲: 無線センサデバイスを活用した道路管理手法について, 平成 23 年度近畿地方整備局研究発表会論文集, No.5, 2011.
- 2) 酒井直樹, 石澤友浩, 福園輝旗: 傾斜計による大型盛土斜面長期計測とその早期崩壊予測への適用性の検討, 第 61 回砂防学会研究発表会概要集 pp.96-97, 2011.
- 3) 田邊裕明, 瀬古一郎, 西江俊作, 王林, 山口弘志: 伸縮計及び傾斜センサーによる地すべりの観測事例, 第 47 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1837-1838, 2012.
- 4) 萩原育夫, 西山哲, 島内哲哉, 山本剛: ナローバンド無線を利用した岩盤斜面モニタリング, 日本応用地質学会平成 21 年度研究発表会, pp.57-58, 2009.
- 5) S.Nishiyama, Y.Ohnishi, M.Ryu, S.Hagiwara, T.Shimauchi, H.Hamasaki, S.Miki, T.Sasaki and N.Minakata: Measurement management of rock slope monitoring using DDA, *Proceedings of ICADD-11*, pp.269-274, Kyushu University, 2013.
- 6) 南方菜緒, 矢野隆夫, 三村衛, 西山哲: 地すべり防止のための擁壁のモニタリング手法の開発, 第 48 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.383-384, 2013.
- 7) 中村公一, 島内哲哉, 小野和行, 西山哲: MEMS 型三軸傾斜計による法面崩壊の計測事例, 第 49 回地盤工学会研究発表会発表講演集, pp.1735-1736, 2014.

(2014 年 6 月 25 日 受付)