

MEMS 型三軸傾斜計計測結果からの変動検知方法に関する検討

Study of Method for Detected Variations from Measurement Result of Triaxial MEMS Inclinometer

中村公一 Koichi NAKAMURA (鳥取大学大学院工学研究科)



社会インフラの維持管理・更新などに対応するため、国土交通省や経済産業省などでモニタリングシステムや機器の開発が行われている。その検討内容のひとつに、斜面や吹付法面など広い範囲を監視できるよう、機材単価・設置費用の面から多数設置可能な計測機材・手法がある。これに対して近年、MEMS 型加速度計を用いた MEMS 型傾斜計が開発され、利用がはじまっている。しかし新しい計測機器であることから、機器が必要とする性能・機器の設置方法・計測結果の整理方法など検討すべき事項が多岐にわたり、実務への利用は進んでいないのが現状である。本論文では、MEMS 型傾斜計の把握しておくべき個体ごとの特性、崩壊事例を用いて計測結果の整理方法を紹介する。

キーワード：傾斜計，MEMS，法面

(IGC : C-7, T-3)

1. はじめに

社会インフラの維持管理・更新などに対応するため、国土交通省や経済産業省などでモニタリングシステムや機器の開発が行われている¹⁾²⁾。計測対象となる構造物には、橋・トンネル・港湾施設・斜面や法面があげられており、様々な計測手法が検討されている。土構造物を対象とした計測では、例えば斜面のあるクラックを計測するなどこれまで計測対象は明確であったが、今後は斜面変動を面的に捉えることができる手法の開発が期待されている。これに対応するため、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 型加速度計を用い、計測した加速度から傾斜角度を算出する傾斜計がコンサルタントや計測器メーカーなどから販売、利用されはじめている³⁾⁴⁾⁵⁾。以後、MEMS 型傾斜計と呼ぶ。MEMS 型加速度計を用いる理由として、小型かつ軽量、省電力性に優れていること、センサ自体が安価であることから、設置条件を考慮した機器開発が容易であることが利点として挙げられる。これを多数設置することにより、斜面変動などを捉えることを目的としている。

地表面の傾斜変動量を捉える手法は、1950 年代半ばから水管式地盤傾斜計を用いた傾斜角度の計測が行われており、特段新しい手法ではない。地盤工学会では、水管式地盤傾斜計を用いた傾斜変動量測定方法 (JGS1721)⁶⁾として規準されている。また規準化はされていないが、近年のリアルタイム計測に対応するため、電気式地盤傾斜計が用いられることもある。この規準では設置台が必要となるが、この設置台は図-1 に示すように大きいものである。このような設置台が必要な理由として、水管式傾斜計は高感度であるため測定レンジが狭いため水平を確保する必

要がある、測定目的に対してノイズとなる傾斜変動の影響を最小限にするが挙げられる。このノイズとは、規準では地すべりのようなある程度深い箇所のすべりによる地表面変動を捉えることを目的としているため、車両の通行などによる強い振動や樹木根の成長による傾動の影響を受けないためである。しかし、基底変動⁷⁾⁸⁾と呼ばれる潮汐や温度変化・降雨などによる地表面変動は、設置台の有無に関係なく計測値に影響を与えることが指摘されている。

上記に対し MEMS 型傾斜計は、測定レンジについては問題無く対応できる。設置方法については、MEMS 型傾斜計は設置が簡単であることを利点とするため、架台が無いかまたは簡易な架台が用いられることが多い。そのため、規準よりも外的環境の変化が計測値に及ぼす影響が大きくなる傾向となる。したがって、計測結果には測定対象の変動以外の、様々な要因による変動が含まれる。このため、このような計測結果より崩落直前の大きい変動を捉えるだけでなく、小さい変動を検知し、崩落までの不安定化の進行度合いを、様々な影響を含んだ計測値より判断できる

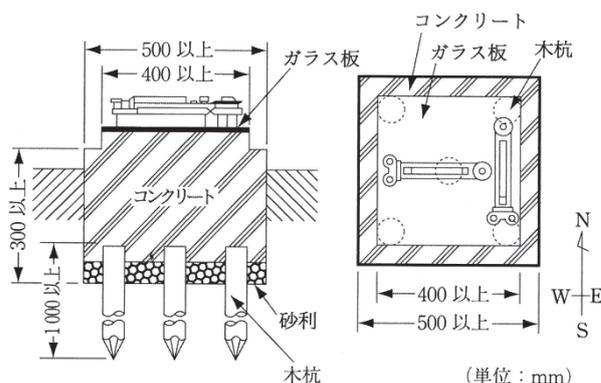


図-1 傾斜計設置台の例⁶⁾

手法が必要となる。

この他に、多数設置することで面的な情報を得ることを目的とする MEMS 型傾斜計では、設置箇所の選定と設置密度の決定方法も解決すべき問題点である。傾斜計はある 1 点の傾斜角度を測定し、伸縮計はある距離離れた 2 点間の変位量を計測する。したがって、伸縮計はどの地点の変位またはひずみを計測しているか明確であるが、傾斜計はどの程度の範囲を代表した計測値であるか明確ではない。岩盤斜面、吹付法面や法枠工など傾斜計設置箇所が固体であればクラックなどを目視確認することで判断することも可能と考えられるが、粒状体である土斜面では難しい点も多い。したがって本研究では、計測対象を岩盤、吹付法面、擁壁などとしている。

以上のように、傾斜角度の計測は新しい計測手法ではないが、センサ技術の進展により傾斜計の性能が変化し、それに対応した設置方法・手順や、計測結果の整理方法の検討が必要と言える。本論文では、MEMS 型三軸傾斜計を用いてこれまでに計測した崩壊事例を用いて、MEMS 型傾斜計の特徴と、これを踏まえた計測結果整理時の注意点について述べる。

2. 加速度から傾斜角度の計算方法と注意点

加速度計を用いた傾斜角度の計測は、加速度計の出力が重力に比例する性質を利用している。このとき、加速度から傾斜角度を求める計算で三角関数を用いる。したがって、一軸であれば図-2 に示す \sin カーブとなり、傾斜角度は式(1)で求められる。このため、用いる MEMS 型加速度計の分解能と、これより計算される傾斜角度の分解能が傾斜計の姿勢により変化することに注意が必要である。また、一軸では傾斜方向を特定できないため、実際には 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、生じる各軸の符号(正負)の違いにより傾斜方向を特定する。

以上の理由により、MEMS 型傾斜計で用いられる加速度計は二軸型^{9),10),11)}か三軸型^{12),13)}のどちらか、設置に設置架台を用いるかの違いがある。使用例として公表されている多くの場合、加速度の分解能をより小さく、かつ三角関数の影響を小さくするため、二軸傾斜計を計測対象に設けた水平な架台に設置するか、杭頭部に加速度計を設置している。これに対し、変状の進行状況確認が必要となる法面や岩盤斜面には傾斜が 30° を超える急斜面も数多く、また高所作業が必要であればなお設置は簡単でなければならない。このため著者は、MEMS 型三軸傾斜計を用い

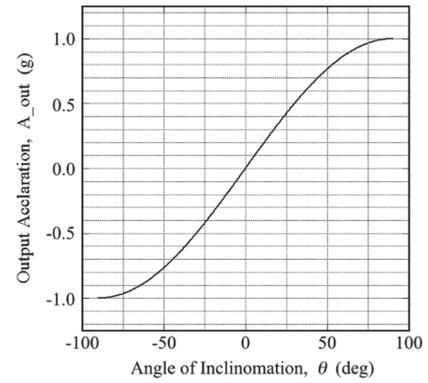


図-2 加速度と傾斜角度の対応関係

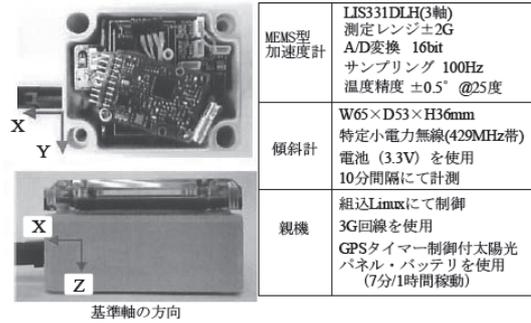


図-3 傾斜計の諸元

て検討を行っている。

図-3 に、本研究で用いた MEMS 型三軸傾斜計³⁾の仕様を示す。加速度の分解能は±2g、16bit であるため、約 $6.1 \times 10^{-5} \text{g/LSB}$ となる。上述のように、加速度を傾斜角度に変換するには三角関数を用いるため、加速度の分解能と傾斜角度の分解能は対応しない。これは、加速度が 1mg 変化したときの傾斜角度変化量は傾斜計の姿勢により変化するということである。このため、以降に説明する変動検知には加速度を用い、斜面変動の説明では状況がわかりやすいよう、必要に応じて式(1)~(3)により傾斜角度に換算している。式中の $AccX$, $AccY$, $AccZ$ は、それぞれ X, Y, Z 方向の加速度である。 θ , ψ , ϕ は、それぞれ傾斜角度を表す。 θ と ψ の基準面は仮想 XY 水平面、 θ は X 軸から、 ψ は Y 軸からの傾斜角度である。また、 ϕ は仮想 XY 水平面に垂直な軸からの傾斜角度を示す。

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

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

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

3. 外部環境の変化による加速度の変化

3.1 加速度に与える温度の影響

計測機器による計測値は、その大小は別として計測機器自体の温度変化の影響を受ける。そのため、試験場所の標準状態（JIS Z 8703-1983）の規準や、ほとんどの計測・測定器具は 20℃における精度や性能を示している。また、計測が長期間であるほど温度条件は重要となる。屋外での計測では、設置架台や計測対象も、気温変動や降雨により急速に冷却されるなど、計測結果に影響を与える要因が多くなる。さらに MEMS 型傾斜計はこれまでの計測機器に比較し分解能が向上しているため、小さな変化にもよく応答する。そのため計測結果は、短期間でみればノイズのような挙動を示し、長期間では主に平均気温の影響により年変動を起こしているようにも見える。このような計測結果より斜面変動を検知する方法が必要となるが、まず MEMS 型傾斜計の温度変化に対する影響を把握する必要がある。

3.2 MEMS 型三軸傾斜計の温度特性

3.1 で述べたように、計測結果には用いた傾斜計の影響がどの程度含まれているか、定量的に判断する必要がある。ひずみゲージ式のロードセルや水圧計では、出力の温度特性などの名称で測定量の変化に対する測定値の変化の度合いが個体ごとに数値が示される。しかし、MEMS 型傾斜計では、価格が廉価であることもひとつの利点であるため、温度特性に関するテストを行い、個体ごとの温度変化に対する影響の度合いが示されることはほぼ無い。そこで、本研究で用いた MEMS 型三軸傾斜計に温度変化を与え、計測される加速度変化の大きさを確認した。

MEMS 型三軸傾斜計を乾燥炉内に設置し、炉内温度を調整し傾斜計内部温度が約 30 度となった状態から、炉内温度を制御し傾斜計内部温度を変化させたときの加速度変化を図-4 に示した。図-4 の横軸は、基準とした時刻の傾斜計内部温度 $t(0)$ と任意時刻の傾斜計内部温度 $t(n)$ との差 $(t(n)-t(0))$ 、縦軸は基準とした時刻の加速度 $Acc(0)$ と任意時刻の加速度 $Acc(n)$ との差 $(Acc(n)-Acc(0))$ である。以降、この図を温度特性図と呼ぶ。今回の整理では、炉内温度変化開始時点を経験時刻とした。この整理法では、もし傾斜計内部温度変化が加速度に全く影響を与えないならば、X 軸上のみを移動する。

図-4 より、傾斜計内部温度は加速度に影響し、軸により異なることがわかる。用いた傾斜計では、X 軸と Z 軸は傾斜計内部温度の増加に対し大きく、Y 軸はほとんど影響しない挙動を示した。最小二乗法により、1℃あたりの

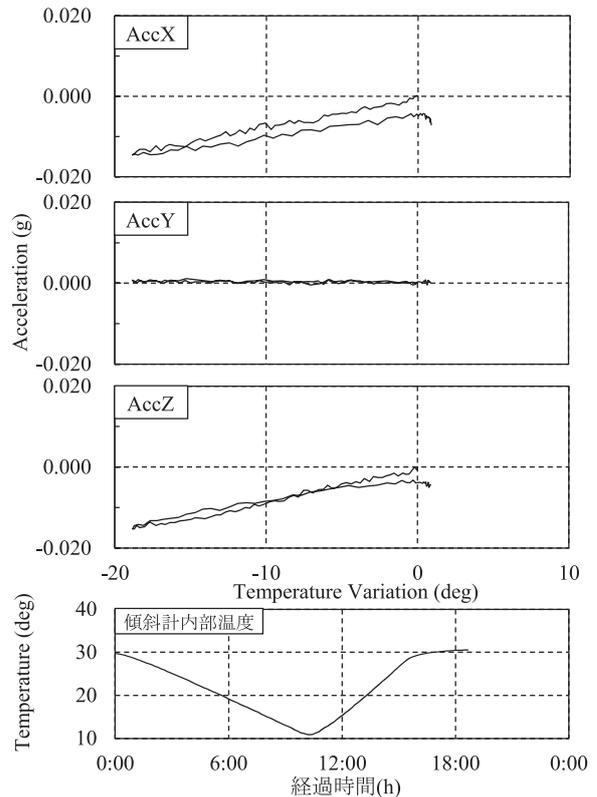


図-4 室内実験による傾斜計の温度特性

加速度変化量を求めると、X 軸は $5.61 \times 10^{-4} (g/^\circ C)$ 、Y 軸は $-1.523 \times 10^{-5} (g/^\circ C)$ 、Z 軸は $6.412 \times 10^{-4} (g/^\circ C)$ である。また、図-4 には示していないが個体ごとに異なることも実験により確認している。このような傾斜計内部温度変化による加速度変化が、計測結果の解釈を難しくする原因の一つとなる。この影響が小さくなるよう MEMS 型傾斜計の構造を考慮すればよいと考えられるが、必要性能と単価を検討して決定されるべきであろう。

4. 計測事例

4.1 傾斜計設置と計測方法

切土施工中の法面側部における、既設モルタル吹付法面の滑動崩壊（幅 4m、高さ 4.5m）を計測した事例を紹介する。図-5 には設置位置、崩壊状況、傾斜計初期姿勢を示した。図-5 に示すように、急傾斜のため伸縮計の設置が難しく、また場所の制約から光波やレーザーなどによる監視も困難であるため、MEMS 型三軸傾斜計を用いた。傾斜計は、法面作業員がロープにぶら下がり接着剤を用いて設置した。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、3G 通信によりデータベースへ保存した。

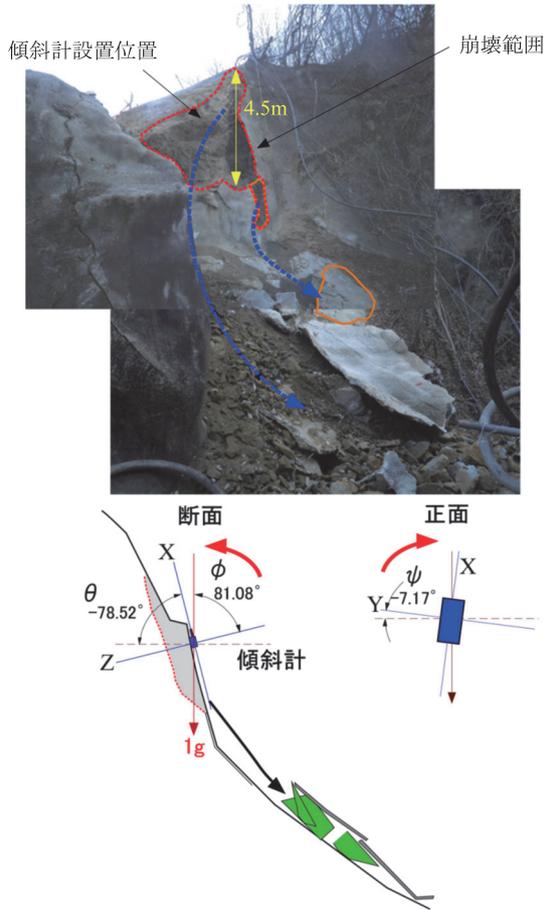


図-5 崩壊状況と傾斜計初期姿勢

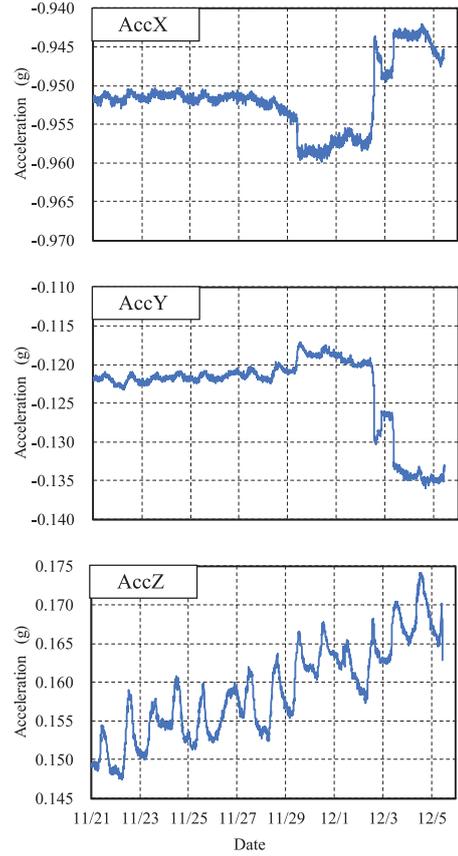


図-6 加速度の経時変化図

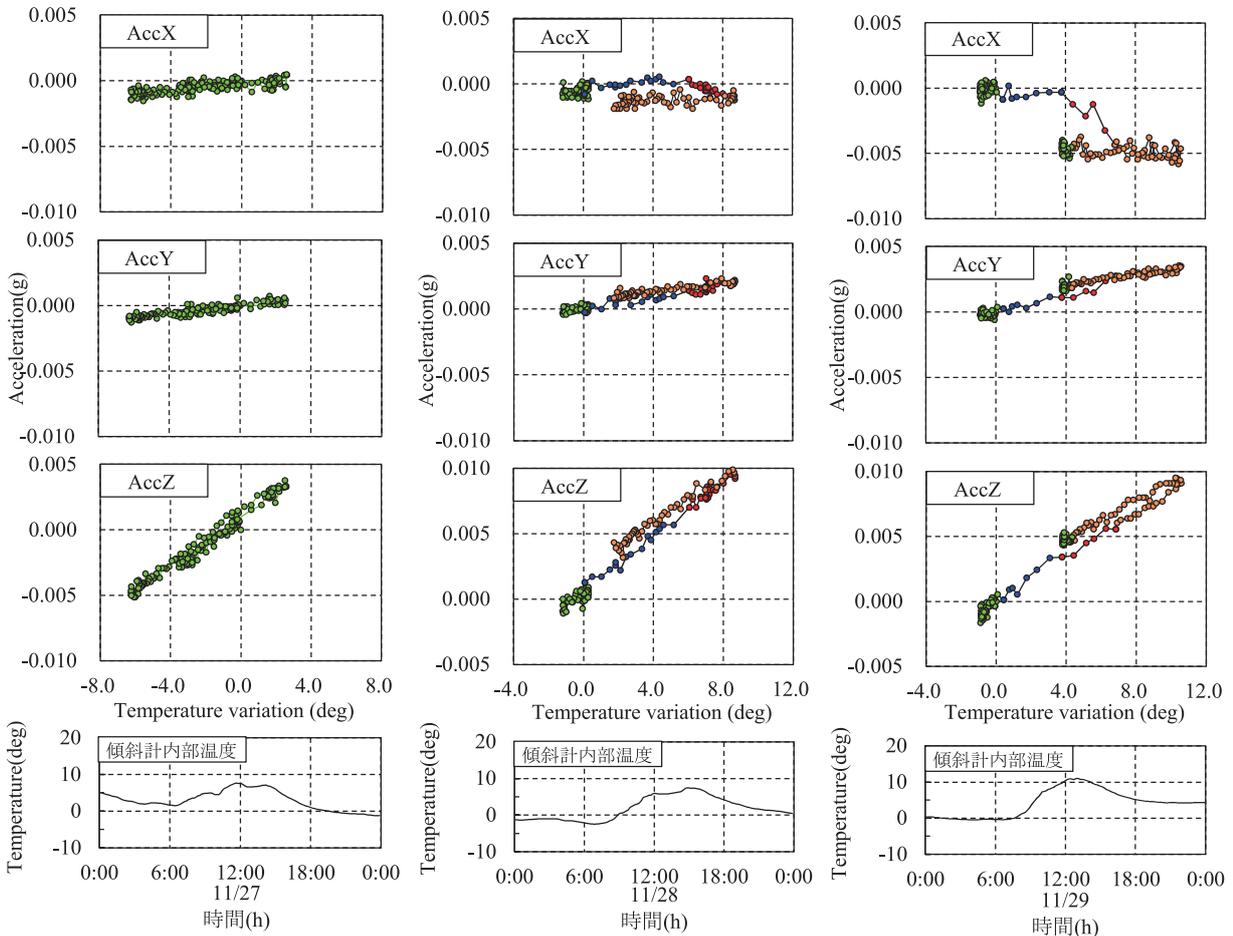


図-7 温度特性図

4.2 計測時の概況

施工中に 1cm 強の垂直な亀裂が確認された後、MEMS 型三軸傾斜計を設置した。11/20 に設置し、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。計測期間は、11/21 ~12/5 AM10:00 までである。なお傾斜計は、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ている。

4.3 経時変化図による加速度の変化状況

経時変化図による斜面変動の検討は、2 で述べたように三角関数により計算して求める傾斜角度よりも加速度を用いることが適切である。そこで図には、計測開始から崩壊までの加速度変化を示した。図-6 より、主に外気温変化による日周期変動があることがわかる。この計測は冬季かつ日射がほとんどあたらない場所であったことから、1 日の傾斜計内部温度変化は最大でも 10℃ほどである。これは温度条件としては非常によいと言え、夏季かつ日射があたるような箇所を設置した場合、1 日に 70℃近く変化する場合もある。

岩盤斜面や吹付法面などの計測では、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。ここで図-6 より、11/29、12/2、12/3 の X 軸と Y 軸の加速度変化より、斜面変動があったものと判断できる。この変動は前述の変動と考えられ、土の斜面のようにある時間変動が継続するような変動とは明らかに異なる。なお 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。

4.4 温度特性図による変動の特定

(1) 変動と急変

経時変化図で斜面変動と判断した 11/29 AM7:00 ごろの変化を、温度特性図によりそれ以前の兆候を捉えられるか検討する。そこで図-7 には、11/27、11/28、11/29 の温度特性図を示した。

はじめに、計測対象の変動の有無を温度特性図より判断する考え方として、変動と急変の 2 つに分類する。図-7 は、4.3 で説明した変動・累積の時間-変位関係の模式図である。ここではある程度時間をかけて変化するものを変動、短時間で変化するものを急変とした。この変動と急変を繰返し、また発生する時間間隔が短くなり、最終的には崩壊に至るものとする。

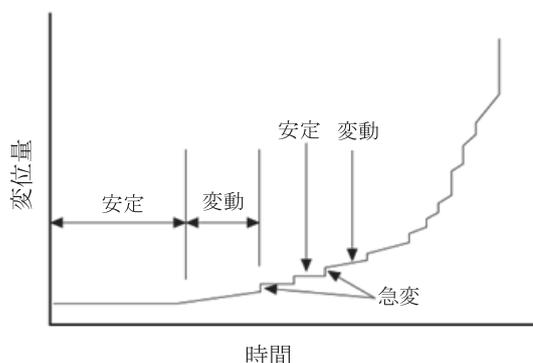


図-7 変動と急変の模式図

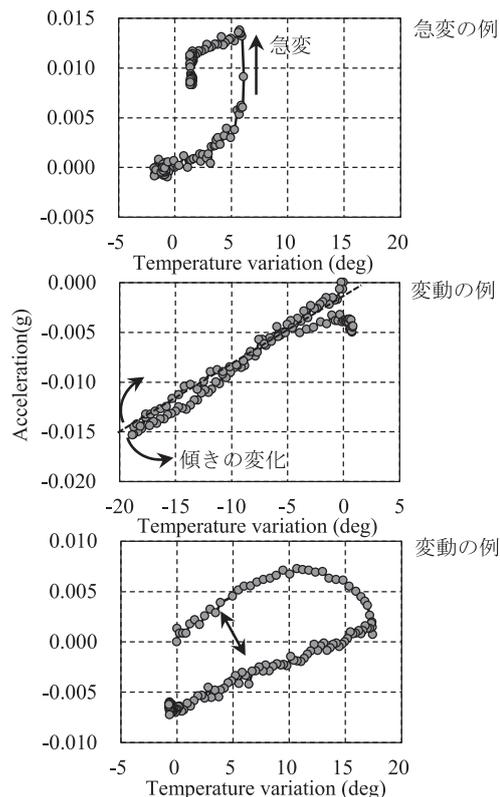


図-8 温度特性図による変動と急変の例

計測値は温度変化の影響を受けるため、4.3 にて説明した理由により、経時変化図より変動や急変を判断するのは困難である。そこで温度特性図による変動と急変の判断を、図-8 のように行うこととした。急変は短時間に起こる現象であり、傾斜計内部温度がほぼ変化せずに加速度が変化するため判断し易く、また変動時刻と変動量を特定できる。これに対し変動は、現在のところ定性的な判断となっている。変動と判断する方法は 2 つである。1 つは温度特性図に最小二乗法を適用し 1℃あたりの加速度変化量を求め、この値を前日までの状況と比較するものである。もう 1 つは、傾斜計内部温度の上昇・下降時の経路の変化である。これは図-8 中段の図のように、通常温度上昇下降ともに同じ経路で変動する。これに対し図-8 下段のように、同じ経路とならない場合もある。これら 2 つは温度特性が変

化したことより、斜面変動があったものと考えられるが、変動時刻と変動量の特定は難しい。しかし、このような変動を捉えることにより、斜面不安定化の進行を判断する指標になるものと考えている。

(3) 11/27 の変化状況

表-1 に 1℃あたりの加速度変化量を、11/27、11/28、11/29 それぞれと、図-4 の実験結果により求めたものを示す。

図-7 の 11/27 と図-4 の実験値を比較すると、X 軸は実験値と同様に正の相関であるが加速度変化量は小さくなる。Y 軸は、実験値はほとんど温度に影響されないが、X 軸と同程度の加速度変化量となる。Z 軸は、実験値よりも大きい加速度変化量となった。このように実験値と異なるが、11/21 から 11/26 まで表-1 に示した 11/27 とほぼ同じ加速度変化量であること、また経路の変化もないことから、変動がないものと判断している。

このように実際の計測では温度特性が変化するのは、設置方法や計測対象自体の温度特性が影響すると判断できる。したがって変動の有無を判断するには、まず数日計測した結果を温度特性図により整理し、変動が無いと判断できる結果を用いて傾斜計設置箇所ごとの特性を把握しておく必要がある。したがって、傾斜計個体ごとの温度特性を把握し、その結果をもとに実現場の計測結果に対し温度補正を行うことは困難であることを示唆している。

(4) 11/28 の変化状況

経時変動図により変動したと判断した 11/29 の前日 11/28 は、11/27 と比較すると X 軸の傾向は明らかに変化し、また全ての軸において温度上昇時と下降時の経路が異なることがわかる。図では、X 軸の加速度変化状況より 4 つの時間帯に分けて色分けしている。00:00～8:30 を緑 8:40～11:00 を青、11:10～14:40 を赤、15:00～23:50 をオレンジで示した。

X 軸を用いて説明する。00:00～8:30 までは温度変化量、加速度変化量ともに変化量は小さい。8:40～11:00 は温度変化とともに加速度も変化するが、1℃あたりの加速度変化量は 1.314×10^{-4} (g/℃) と 11/27 の値はほぼ同じである。したがって、どちらも変化無しと判断される。11:10～14:40 は負の相関と明らかに変化し、これは急変と言える。15:00～23:50 の 1℃あたりの加速度変化量は 0.464×10^{-4} (g/℃) であり、11/27 と比較して半分以下まで小さくなる。また、Y 軸と Z 軸の対応する時間から、温度下降時は上昇時と異なる経路であることがわかる。これより、11:10～14:40 の急変により温度特性が変化し、不安定化が進んだものと考えられる。

以上より 11/28 は、11:10～14:40 に吹付法面が変動し、15:00～23:50 は変動のため不安定化が進行し温度特性が

変化したものを反映した計測結果と判断できる。

(5) 11/29 の変化状況

00:00～8:00 を緑、8:10～9:10 を青、9:20～10:00 を赤、10:10～18:50 をオレンジ、19:00～23:50 を緑として、分けて示した。

00:00～8:00 と 19:00～23:50 は温度変化量が小さいため、斜面変動の判断が難しい。温度変化が無くとも判断できるような閾値を決めるなどの検討が必要と言える。8:10～9:10 の 1℃あたりの加速度変化量は 0.850×10^{-4} (g/℃) と、11/28 15:00～23:50 までとほぼ同じである。したがって、前日の急変により変化した温度特性から変化していない。9:20～10:00 は急変であり、経時変化図で変化したと判断できたものと対応する。10:10～18:50 の 1℃あたりの加速度変化量は -0.850×10^{-4} (g/℃) と負の相関へと温度特性が変化したことから、さらに不安定化が進行したものと考えられる。

表-1 1℃あたりの加速度変化量

日付	AccX (g/℃)	AccY (g/℃)	AccZ (g/℃)
11/27	1.144×10^{-4}	1.562×10^{-4}	9.462×10^{-4}
11/28	-0.266×10^{-4}	2.238×10^{-4}	10.923×10^{-4}
11/29	-5.144×10^{-4}	3.372×10^{-4}	9.230×10^{-4}
実験値	5.610×10^{-4}	-0.152×10^{-4}	6.412×10^{-4}

5. まとめ

MEMS 型三軸傾斜計による、既設モルタル吹付法面の滑動崩壊計測結果を用いて、計測結果整理方法と計測結果の着目すべき点を紹介した。その内容を以下にまとめる。

- (1) 一般的な計測機器と同様に、MEMS 型傾斜計も温度変化により計測される加速度も変化する。
- (2) 温度特性図により、計測対象の不安定化を変動と急変にわけて捉えることを示した。
- (3) 温度特性図により、経時変化図では検知することが難しい変動も捉えることを示した。
- (4) 問題点として、温度特性図では傾斜計内部温度変化と加速度変化の関係により変動・急変を判断するため、傾斜計内部温度が変化しない状態での斜面変動をどのように捉えるかが課題である。

緩傾斜の土砂斜面での計測と異なり、吹付法面や岩盤などの計測対象が固体である場合の計測結果は、亀裂分布や想定される崩壊形態の影響を強く受けると考えられる。また、当然のことながら MEMS 型傾斜計設置位置によっても、計測結果は変化する。このため、MEMS 型傾斜計設

置位置の選定方法も今後検討する必要がある。

危険な老朽吹付法面や岩盤斜面が我が国には数多く存在するが、その多くは計測機器の設置が困難な山岳道路脇の急斜面である。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。今後も事例を収集し、設置位置の選定方法、計測結果の整理方法、解析との連携について検討する。

謝辞

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、現場計測に関しては日本総合建設(株)小野様、オフィス im3 島内様、データ整理には鳥取大学大学院 安住様にご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会, <http://www.mlit.go.jp/tec/monitoring.html>, (2016.12)
- 2) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP), <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>, (2016.12)
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 地盤工学会:水管式地盤傾斜計を用いた傾斜変動量測定方法, 地盤調査の方法と解説, pp.847-855, 2013.
- 7) 渡正亮:地すべり調査における水管式傾斜計の利用法, 土木技術資料, Vol.1, No.11, pp425-427, 1959.
- 8) 谷口敏雄, 藤原明敏:地すべり調査と解析 -実例に基づく調査・解析法-, 1970.
- 9) 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.
- 10) 芳賀博文, 笹原克夫・平岡伸隆, 土佐信一, 板山達至, 王林: 実大規模模型斜面の多段階掘削過程における傾斜角による斜面の不安定度の分析, 第 55 回日本地すべり学会研究発表会, pp.5-6, 2016.
- 11) 大類光平, 笹原克夫, 伊藤和也, 吉川直孝, 平岡伸隆, 土佐信一, 板山達至: 北川村小島地すべりににおける MEMS 傾斜計の稠密観測で捉えた地表変動, 第 55 回日本地すべり学会研究発表会, pp.9-10, 2016.
- 12) 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, 2014.
- 13) 安住晴, 中村公一, 島内哲哉, 小野和行, 酒井直樹, 西山哲: ヒステリシスに着目した MEMS 型三軸傾斜計による斜面変動検出方法に関する検討, 第 55 回日本地すべり学会研究発表会, pp.124-125, 2016.

(2016 年 12 月 4 日 受付)

