

# 地盤防災観測網の構築と斜面安定性評価手法の提案

## Building the Observation Network for Prevention of Ground Disasters And the Proposal of the Method for Evaluation of Slope Stability

技術研究所 大津 慎一 OTSU SHUNICHI  
 技術研究所 山地 弘志 YAMACHI HIROSHI  
 技術企画部 中森 純一郎 NAKAMORI JUNICHIRO

土工事では、地すべりなどの災害危険箇所周辺での施工機会も多く、施工時の安全確保を図る上で十分な監視体制を構築する必要がある。地盤災害の監視では計測機器を効果的に設置して観測網を構築し斜面挙動を観測する方法が有効であるが、従来計測機器はコストや設置手間などの課題から十分な観測点数を確保するのが難しい。筆者らは、近年注目されている安価かつ設置が容易な地盤傾斜計を用いることで、これら従来計測機器の課題を解決した。本稿では、地盤傾斜計を用いた地盤防災観測網の構築および試験観測について報告する。またその観測データを用いた斜面全体の安定性評価手法について提案する。

キーワード：地盤防災，安全管理，斜面安定性評価，クリギング補間，自立型観測網

Some earth works are carried out around disaster black spots such as landslides and monitoring systems are necessary to confirm its safety. Although the observation network with effective arrangement of monitoring devices is useful for monitoring ground disasters, there is some difficulty to put enough number of conventional monitoring equipment due to its cost and/or those setting trouble. The authors solved those problems by using the notable ground clinometer that it is low cost and easy setting. This paper describes the building observation network for prevention of ground disasters by using the ground clinometers and the results of the test observation. And, the stability evaluation technique of the whole slope by using that observation data is proposed.

**Key Words:** Ground Disaster Prevention, Safety Management, Stability Evaluation of Slope, Kriging Method, Self-Supporting Observation Network

### 1. はじめに

わが国は、国土の約4分の3が山間部であり斜面崩壊や地すべりなどの危険性を有する地形も多い。道路や鉄道など社会インフラの整備に関わる土工事では、地すべり等の危険性を有する災害危険箇所周辺での施工機会も多い。また東日本大震災以降の地震活動の活発化や異常気象に伴う局所的大雨に起因する地すべりや斜面崩壊、土石流等の地盤災害が頻発化し、発生箇所が広域化するだけでなく、その災害規模も増大する傾向にある。このような地盤災害から第三者や施工現場など人的資源や財産を守り、社会生活や生産活動などの維持を図る上では、十分な監視体制を構築し地盤災害の防止および早期対策に努める必要がある。

地盤災害の防止あるいはその影響を最小限にとどめる

には、対象となる斜面やのり面に地盤挙動を観測する機器を効果的に設置し地盤観測網を構築することで巨視的な地盤挙動を観測するとともに、継続的な観測を行い定常状態との差異を捉えることで地すべりの前兆現象を早期に発見することが重要となる。しかしながら現在は、地盤伸縮計や地下水位計等の計測機器を設置し対象となる斜面やのり面の地盤挙動を観測する方法が一般的であり、これら計測機器は、いずれも局所的な地盤挙動を観測する機器であり斜面全体の巨視的な挙動を観測するものではない。計測機器の設置箇所についても地形・地質的知見をもとに選定されるが、必ずしも災害発生箇所に設置されることを担保するものではない。また今日の観測体制を見ると、その観測値があらかじめ定められた管理基準値を超えた時点で初めて観測データを評価する、あるいは目視等による不具合が発見された時点で観測デ



図-1 加速度センサーを用いた地盤傾斜計

ータを見直すといった利用にとどまっておき、観測データがあまり有効的に活用されていないのが現状である。

筆者らはこれらの状況を踏まえ、(財)日本建設情報総合センター平成27年度助成研究事業「防災観測網による観測データのデータベース化とフィードバック手法の研究」(助成番号: 2015-2号)において、斜面全体の巨視的な地盤挙動を観測し得る計測機器の選定およびそれを用いた地盤防災観測網の構築を進めるとともに、観測データを速やかにフィードバックし地盤災害の防災・減災に資するシステムの開発を進めてきた<sup>1)</sup>。

本稿では、計測機器として傾斜センサーを用いた地盤防災観測網の構築とそれによる地盤挙動の観測が可能であるかの検証について報告する。また地盤防災観測網の観測データを用いた斜面安定性評価手法を提案する。

## 2. 加速度センサーを用いた地盤傾斜計

今日の地盤監視に用いられる観測項目は、地盤伸縮変位観測、地表傾斜観測、坑内傾斜観測ならびに地下水位観測が主なものである。近年GPSによる座標観測も地盤監視に広く取り入れつつある<sup>2)</sup>。現在供用されている計測機器は局所的な測点や測線を観測する機器であり巨視

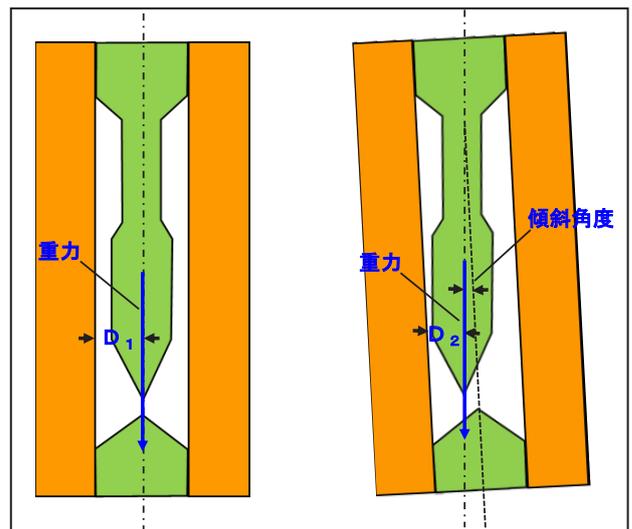


図-2 加速度センサーによる傾斜角度測定原理

的な地盤挙動を観測するには、計測機器を効果的に配置した観測網を構築する必要がある<sup>3)</sup>。しかしながら、これら計測機器は比較的高価であり、設置や電源供給・通信確保についても多大な費用を要するため、観測網を構築するに足る測点・測線数を確保するのが難しいといった課題がある。

このような状況のなかで、現在注目されている計測機器が図-1に示すような加速度センサーを用いた地盤傾斜計である。加速度センサーは、可動電極である錘と固定電極によって構成されており、加速度によって生じる錘の振れを電極間の距離として捉えることで加速度の測定を行う。このような加速度センサーを用いた傾斜計では、図-2に示すように重力を加速度としてとらえることで、電極間の距離をもとに錘の傾きを幾何学的に求め傾斜角度を検出する。

このタイプの傾斜計の特徴は、非常に消費電力が小さいためデジタルカメラ等に用いる一般的なリチウム一次電池で1年以上の連続稼働が可能であり、デジタル出力のため小電力無線通信等によるデータ送信に適する点にある。また比較的製品価格が安価であり、かつ軽量なため一人で複数個を容易に運搬しハンドハンマー等で簡便に設置できるといった利点もある。そのため本計測機器を用いることで機器導入コストや設置コストといった課題を解決することができ、比較的容易に数十点規模の観測点を設置することができ、対象となる斜面全体の巨視的な挙動を把握可能な観測網の構築が可能となる。

## 3. 地盤防災観測網による試験計測

今回、図-1に示す地盤傾斜計を用いて地盤防災観測網を構築するとともに、実際の施工現場に試験的に導入を

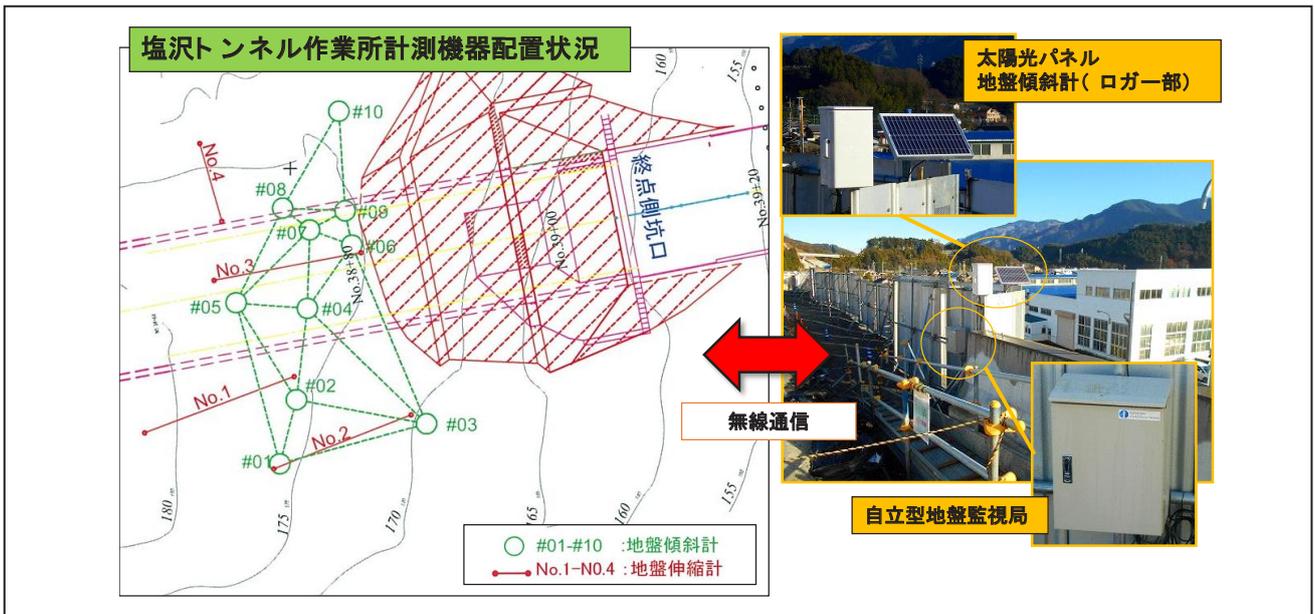


図-3 地盤傾斜計設置位置および観測機器構成

表-1 中部横断塩沢トンネルの工事諸元

発注者	国土交通省 関東地方整備局	
工期	平成27年1月28日～平成30年3月30日	
工事内容	トンネル延長	L = 649.0 m
	内空断面	A = 84.7 m <sup>2</sup> (DI-b)
	掘削方式	機械掘削 (NATM)
	地質	砂岩・泥岩互層

行い、外的要因に伴う地盤挙動の観測が可能であるかについての試験観測を行った。以下に地盤傾斜計を用いた地盤防災観測網の構築と試験観測について示す。

(1) 地盤傾斜計設置計画

本試験計測では、国土交通省関東地方整備局甲府河川道事務所のご指導・ご協力のもとに、表-1の工事概要に示す中部横断塩沢トンネル工事終点側坑口斜面に地盤防災観測網の構築を行い実施した。当該坑口斜面部は、事前の地質調査結果に基づいてトンネル施工に先立ち地すべり対策工の設計・施工が行われた。地盤傾斜計の設置計画は、地すべり対策工に付随する対策工実施後の斜面挙動観測および効果の確認を目的とした地すべり変位計等による斜面動態観測計画に基づき策定を行った。地盤傾斜計および前述の斜面動態観測計画に基づく地すべり変位計の設置位置を図-3に示す。

(2) 自立型地盤監視局

地盤防災観測網の観測データを現場事務所等に送信する通信網については、坑口付近において商用電源および有線通信手段の確保が困難である状況から、当社独自技

術である自立型地盤監視局を採用することとした。

自立型地盤監視局は、筆者らが(財)日本建設情報総合センター平成22年度助成研究事業「自立型防災監視システムの開発に関する研究」(助成番号:2010-6号)において開発を行った地盤監視に関わる各種計測機器の観測データを収集し配信する基地局である<sup>4)</sup>。自立型地盤監視局は、携帯ポケット通信モジュールを搭載しており、携帯電話によるポケット通信が可能なエリア内であれば一般電話回線等の有線通信経路を敷設する必要がない。また太陽光パネルと鉛蓄電池といった2系統の電源システムを有しており、十分な日照を確保できる箇所であれば外部からの電源供給を必要とせず、長期的な運用が可能である。

(3) 地盤防災観測網の構築

地盤傾斜計を設置する終点側坑口斜面部は、北向き斜面であり南方向の斜面背面部についても針葉樹等の高木が繁茂する植生となっているため、日中を通して十分な日照の確保が期待できない。このような理由から本基地局の設置は、十分な日照を確保できる終点側坑口の北側を流れる戸栗川対岸に設置することとした。また地盤傾斜計との通信経路は、基地局と地盤傾斜計との見通しが十分確保されているため、自立型地盤監視局および地盤傾斜計に搭載される特小無線機器による無線通信経路を用いることとした。

(4) 試験計測における傾斜量変動と考察

今回設置を行った地盤防災観測網では、地盤傾斜計のX軸方向を真北方向とし、 $\theta_x$ と $\theta_y$ の2方向成分の傾斜量

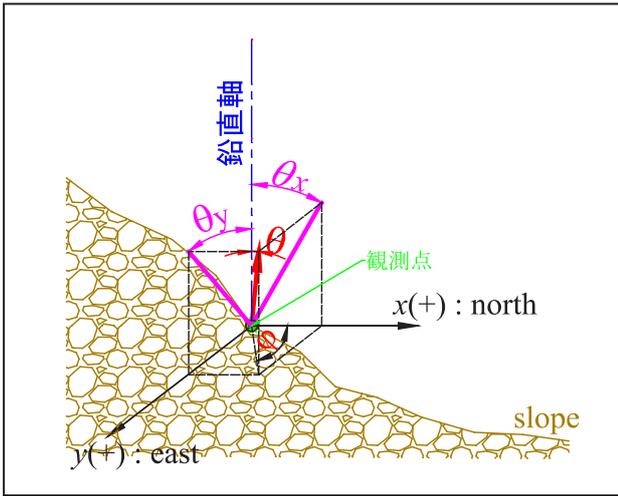


図-4 総傾斜量  $\theta$  および傾斜方向  $\varphi$  の概念

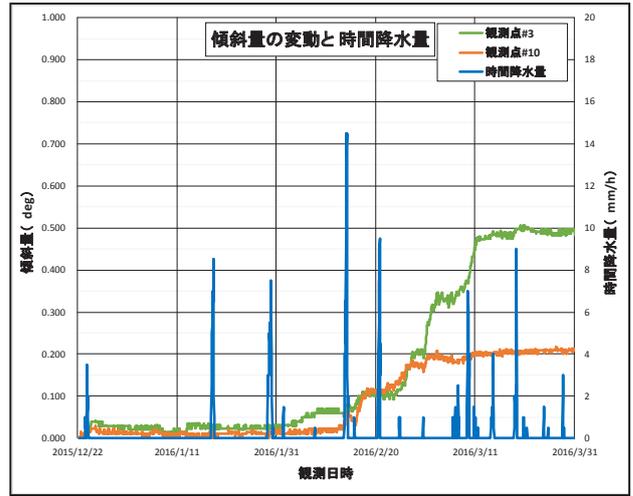


図-5 降雨影響による傾斜量変動と時間雨量

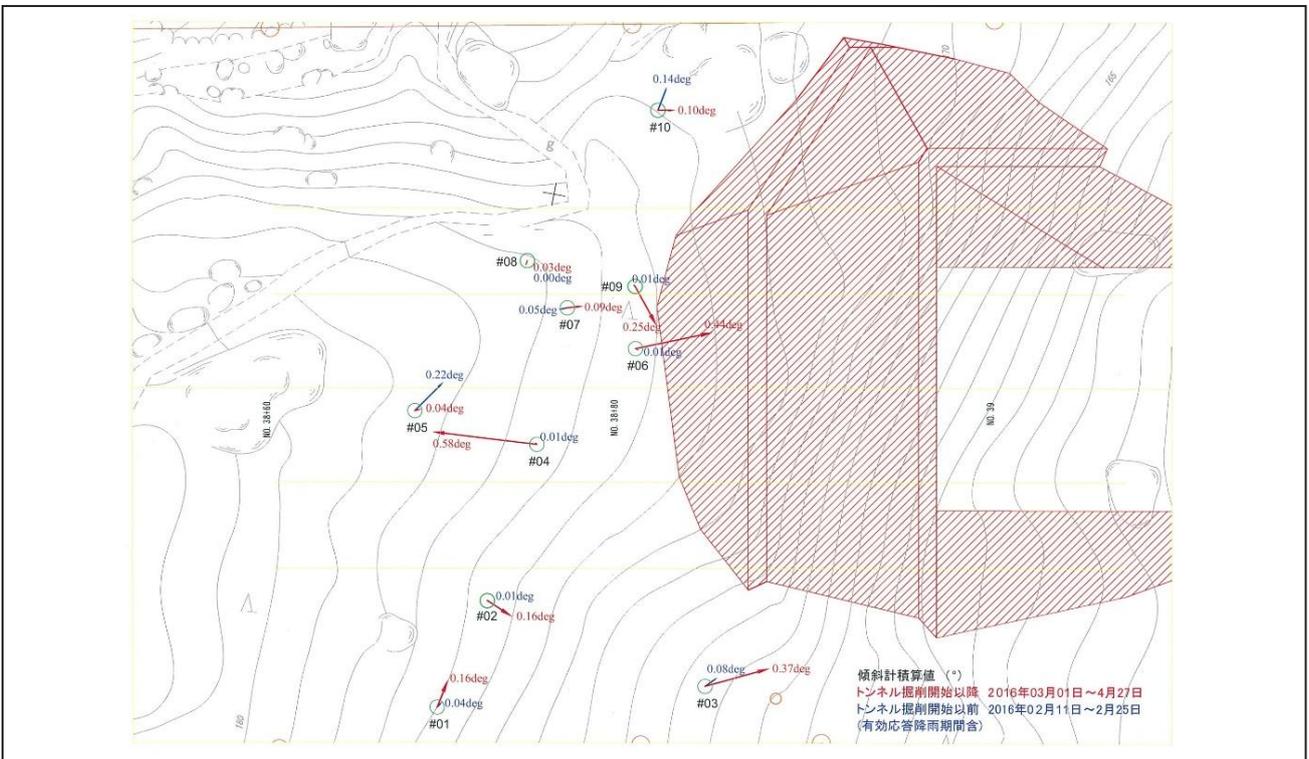


図-6 降雨およびトンネル掘削による傾斜量変動比較

について観測を行った。斜面によって安定性を評価する場合、傾斜量成分  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  よりも総傾斜量  $\theta$ 、ならびに傾斜方位  $\varphi$  を用いることが望ましい。各成分は図-4 に示す関係にあることから次の関係が与えられる。

$$\theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\theta_y}{\theta_x} \right)$$

(1)

a) 降雨による傾斜量変動

観測点により違いはあるが、2016年2月15日頃を基点とする傾斜量変動が観測された。当該時期においてトンネル掘削は開始されておらず、他の外的要因が考えられる。図-5 に示すように2016年2月における時間雨量と比較すると当該時期に集中的な降雨があり、降雨によって影響を受けた変動であると考えられる。

b) トンネル掘削による傾斜量変動

また2016年3月1日頃を基点とする傾斜量変動も観測されており、当該時期にトンネルの掘削が開始されたためその影響を受けた変動であると考えられる。

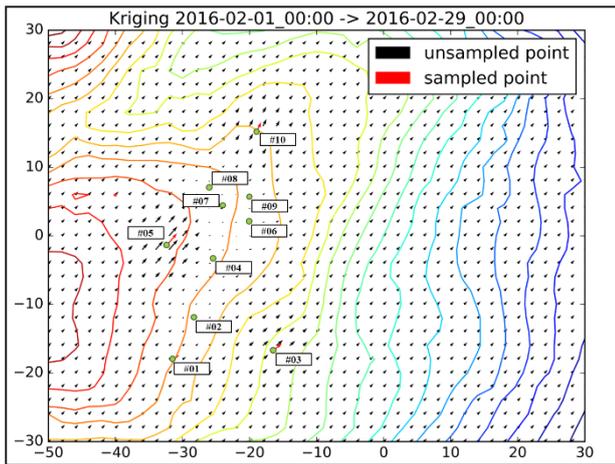


図-7 降雨応答におけるデータ推定

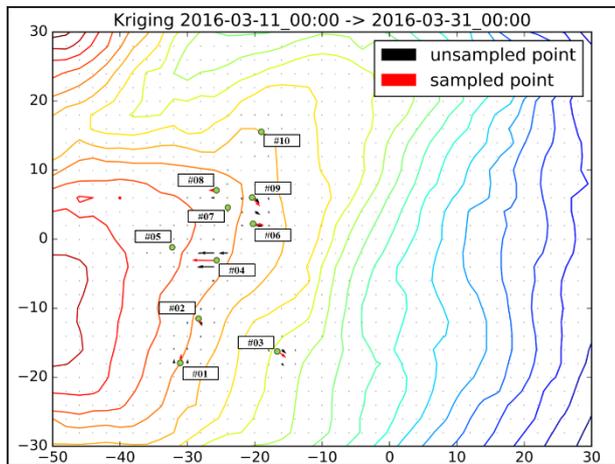


図-8 トンネル掘削応答におけるデータ推定

図-6 に降雨により発生したと考えられる傾斜量変動 (2016年2月11日～2月25日間の傾斜量増分) と、トンネル掘削により発生したと考えられる傾斜量変動 (2016年3月1日～4月27日間の傾斜量増分) を坑口のり面等高線上に図化したものを示す。

試験観測期間において併設する地盤伸縮計では有意なデータを確認することはできなかった。これは計測機器や設置条件など計測技術上の要因ではなく、地盤傾斜は地盤変位における微分項に相当し、観測項目である地盤挙動に対し鋭敏に反応したためであると判断する。したがって地盤傾斜計による観測により、斜面変形が微小な範囲で評価・把握し、事後の挙動を予測することが可能であると考えられる。

#### 4. 斜面安定性評価手法の提案

地盤傾斜計を用いた地盤防災観測網による観測は、地盤傾斜計を設置した箇所の局所的な地盤挙動を観測するものである。斜面全体の巨視的な地盤挙動を把握し斜面安定性の評価を行うためには、図-7 および図-8 に示すよ

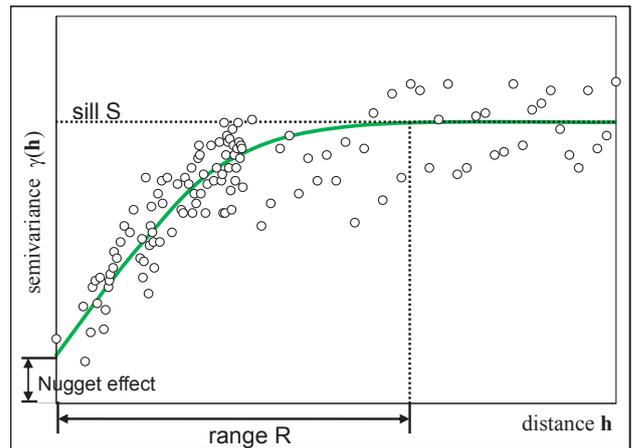


図-9 セミバリオグラム雲

うに観測網を構築する地盤傾斜計の観測データの特徴を保持しつつ斜面全体の挙動を推定する必要がある。以下ではクリギング補間を用いたデータ推定手法およびその補間データによる斜面安定性評価の可能性について検討を行う。

##### (1) クリギング補間によるデータ推定<sup>5),6)</sup>

クリギング補間とは、地理統計学の分野を中心に古くから実用的な利用が行われている加重平均による補間手法のひとつである。その特徴として、観測データが持つ空間的な特徴を局所的な特徴として保ちつつ観測空間全体の広域的なデータ推定を行うことがあげられる。クリギング補間によるデータ推定式は式(2)となる。

$$Z^*(x_0) = \sum \omega_i Z(x_i) \tag{2}$$

その重み  $\omega_i$  は、空間座標を伴う観測データについての観測点間の距離とデータの相関から図-9 に示すセミバリオグラム  $\gamma^*(|h|)$  を式(3)で表し、式(4)に導入することで求める。

$$\gamma^*(|h|) = b_0 + b_1 g(|h|) \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(3)のセミバリオグラムのパラメータ同定には様々な手法があるが、本検討では共分散関数  $g(|h|)$  に共分散関数モデルのひとつである球体モデルをあてはめる経験

セミバリオグラムによるパラメータ同定を用いる。以下に球体モデルおよび切片要素となるナゲット効果モデルを表す方程式を示す。

ナゲット効果モデル

$$g(|h|) = \begin{cases} 0 & |h| = 0 \\ 1 & |h| \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

球形モデル (R=a)

$$g(|h|) = Sph\left(\frac{|h|}{a}\right) = \begin{cases} 1.5\left(\frac{|h|}{a}\right) - 0.5\left(\frac{|h|}{a}\right)^3 & |h| \leq a \\ 1 & |h| \geq a \end{cases} \quad (6)$$

## (2) 斜面安定性評価の検討

図-7 および図-8 は、図-6 に示す降雨による傾斜量変動とトンネル掘削による傾斜量変動をクリギング補間によりデータ推定しメッシュ化したものである。このような観測データ分布を、移動平均法などの一般的な空間データ処理手法でデータ推定すると、大きな値から小さな値に向けてなだらかなデータ勾配が形成される。つまりデータ分布の平滑化が生じる。それに対してクリギング補間では、例えば図-8 の観測点#04 周辺では大きな傾斜変動観測値に影響された傾斜分布が推定されるものの、少し離れた箇所では観測点#04 の観測データの影響は見られない。また観測点#02 周辺の傾斜量推定に大きな傾斜変動を示す観測点#01 および#04 の影響は確認できない。

このようにクリギング補間では、局所的な傾斜変動の特徴を保持したデータ推定が可能となる。これは移動平均によるデータ推定手法などと異なり、距離間の共分散に依存してデータ勾配を形成するためであり、観測データ間距離が近くとも、測定データ間の相関が低く共分散が大きければ、その観測値が相互に与える影響は小さいものとなる。

これにより傾斜計を用いた地盤防災観測網による観測データをクリギング補間することによって、斜面全体の傾斜変動およびその規模と範囲を推定し、斜面安定性評価への活用が可能となると考える。

## 5. まとめ

地すべりや斜面崩壊等に至る斜面挙動は突発的に発生

するものではなく、局所的な小崩落やすべり等が跛行的に進行し大規模な地すべりや斜面崩壊へと至ると考えられる。またこのような局所的な斜面挙動は、沈静化に向かい安定化する場合もある。したがって斜面全体の巨視的な地盤挙動を観測し得る観測網により継続的な観測を行い、定常状態との差異から小規模で局所的な斜面挙動を把握することで斜面の安定性を把握するとともに、斜面が崩壊に至るか、安定化の方向へ向かうかの予測・評価することが可能になると考えられる。

これらを鑑み、今回報告した地盤傾斜計を用いた地盤防災観測網による観測およびクリギング補間による斜面挙動のデータ推定を行うことで、図-7 および図-8 に示すような降雨や施工等の外的要因による局所的な斜面挙動の把握が可能となり、その観測・分析データをもとに跛行的に進行する地盤挙動が斜面崩壊に至るものか否かについての予測・評価手法としての活用が可能であると考ええる。

今後はクリギング補間による斜面挙動推定データの可視化手法や Big data 的なアルゴリズムによる予測・評価の自動化等の施工管理者等へのフィードバック手法についても検討し、観測、データ取得、分析、フィードバックといった地盤防災に関わる一連の流れを実現する地盤防災監視システムの開発・構築を進める。

## 参考文献

- 1) 上西幸司ほか：防災監視網による観測データのデータベース化とフィードバック手法の研究に関する研究報告書，平成 27 年度一般財団法人日本建設情報総合センター研究助成事業報告書，助成番号 2015-2, 2015.
- 2) 岩崎智治ほか：斜面安全監視のための GPS 自動変位計測システム，応用地質 Vol. 52(2011 - 2012) No. 6, pp. 256-264, 2013.
- 3) 農林水産省：地すべり監視体制構築の手引き，2011.
- 4) 芥川真一ほか：自立型防災監視システムの開発に関する研究に関する研究報告書，平成 22 年度一般財団法人日本建設情報総合センター研究助成事業報告書，助成番号 2010-6, 2010.
- 5) 高阪宏行：クリギングとその地理的応用，日本大学文学部自然科学研究所研究紀要，No.34, pp.27-35, 1999.
- 6) 堤盛人，清水英範，井出裕史：誤差要素モデルに基づく Kriging を用いた空間内挿，応用力学論文集 Vol.3, pp.125-132, 2000.