

地盤振動データによる大規模な土砂移動を 検知するための観測局設置方法の検討

METHOD OF CONSIDERING OBSERVATION STATIONS FOR DETECTING LARGE-SCALE SEDIMENT MOVEMENT BASED ON SEISMIC DATA

小林正直¹・岸本優輝²・竹下航²・海原荘一³・谷田佑太³

Masanao KOBAYASHI, Yuki KISHIMOTO, Wataru TAKESHITA,

Soichi KAIHARA and Yuta TANIDA

¹国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター

(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

²国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所

(近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター) (〒637-0002 奈良県五條市三在町 1681)

³株式会社エイト日本技術開発 (〒700-8617 岡山県岡山市北区津島京町 3-1-21)

Key Words: seismic wave, large-scale sediment movement, seismic station

1. はじめに

深層崩壊等による河道閉塞(天然ダム)に対する対策としては、第一に、物理的現象に対する早期覚知と迅速な被害想定が重要である。国土交通省では、高感度地震観測網の地盤振動によって深層崩壊等の発生位置を早期に検知するための「大規模土砂移動検知システム」の整備を全国的に実施している。これは、深層崩壊など大規模な土砂移動では、発生位置から数十 km 先まで地盤振動が到達することが明らかになっている^{1,2)}ことに基づき、崩壊発生時の地盤振動を複数の振動センサーで捉え、大規模な土砂移動の発生位置・時刻を特定するシステム³⁾である。しかしながら、国土交通省が設置している振動センサー観測局の中には、観測局の環境条件の変化により移転を検討すべきものや、近傍の車両通行等の生活ノイズの影響により、検知範囲が比較的狭いものがある。そこで、本研究では振動センサーの移設検討事例を通して、望ましい振動センサー観測局の設置(移設を含む)方法について検討を行った。

2. 大規模土砂移動検知システムについて

「大規模土砂移動検知システム」は、高感度地震観測網により降雨による深層崩壊等を検知するもので、国土交通省の観測局と国立研究開発法人防災科学技術研究所(以下、「防災科研」と表記)の高感度地震観測網(Hi-net)のデータに基づき運用されている。本システムの各構成要素の役割を表-1に、大規模土砂移動検知システムの判定フローを図-1に示す。本システムは深層崩壊の発生頻度の高いエリアに対して、降雨時において約 300 万 m³規模の崩壊を検知する性能を維持することを目標としている。

なお、このシステムにおいては、原理上降雨に伴う現象のみを対象としており、大規模な地震に伴う土砂移動の検知は対象としていない。

(1) 観測局設置(移設を含む)方法検討の目的

現在の大規模土砂移動検知システムは、国土交通省の観測局だけでなく、防災科研のHi-netのデータも利用し、統合監視局で検知を行っている。

表-1 大規模土砂移動検知システム各構成要素の役割

| 構成要素 | 役割 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 観測局 | 観測局は大規模な土砂移動現象が発する地盤振動を観測する設備であり、測定箇所1箇所につき1局が設置される。地盤振動を観測するための振動センサー、観測記録を監視局に伝送するためのデータロガー、ネットワークへ接続するための伝送装置、電源装置等で構成される。 |
| 通信設備 | 観測局で得られた観測記録を監視局まで伝送するためのインフラ設備である。 |
| 中継局 | 中継局は各地方整備局等に設置されており、各地方整備局内の観測局のデータを受信し、統合監視局にデータを送信する役割を担う。 |
| 統合監視局 | 全国の国交省観測局及び全国のHi-netデータを受信し、受信した地盤振動を解析して、大規模土砂移動が生じたと判断される場合に、関係者へ情報を伝達するものである。 |

可能な崩壊規模に関わる知見もシステム整備開始時点では十分ではなかったために、観測局の見直しで検知性能が向上すると考えられる観測局がある。そのため、振動センサーの故障により、ボーリングによる観測孔の設置等を伴う観測局の機器等の更新が必要となった場合には、検知すべき範囲である深層崩壊推定頻度マップにおける発生頻度の高い・特に高いエリア等と、その観測局およびその周辺観測局の検知範囲を踏まえ、観測局の統廃合、移設、新規設置等を検討するのが望ましいと考えられる。そこで、観測原理に基づく検知範囲の確認と観測局の設置(移設を含む)方法について検討した。

(2) 観測原理

大規模土砂移動検知システムでは、土砂移動の発生場所(緯度・経度)、深度、発生時刻の4つを特定するため、4観測局が普通のノイズレベルよりも大きな振動を検知した場合に、地震や土砂移動等、何らかの現象が生じたものと判断する。大規模土砂移動検知システムの各観測局の振動データの検知方法は、図-2に示すように、普通のノイズレベルであるLTA(Long Term Average RMS(RootMeanSquare)の60秒間平均値)の数倍を閾値とし、STA(Short Term Average RMSの2秒間平均値)の超過状況をみて判定する方法による。RMSとは式(1)に示す振幅の二乗平均平方根のことである。なおLTAとSTAデータ長さについては、過去の土砂移動時の解析⁴⁾で使用されているものである。

$$RMS(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \{y(i, j)\}^2} \quad (1)$$

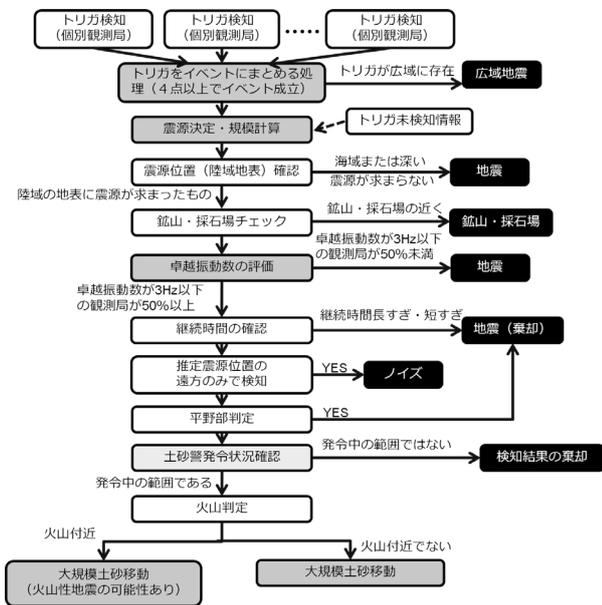


図-1 大規模土砂移動検知システムの判定フロー

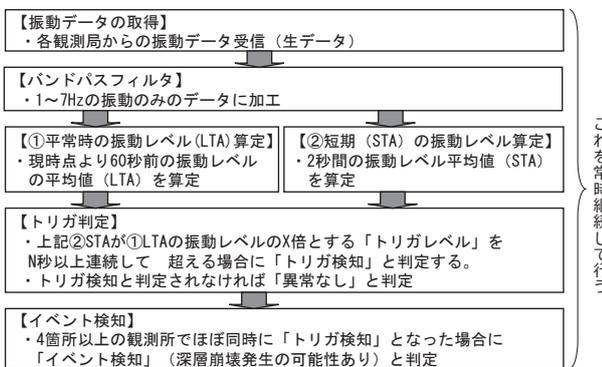


図-2 大規模土砂移動検知システムにおける振動データ処理フロー

ただし、システム整備の着手時点では、Hi-netのデータの使用を想定していなかった。加えて、検知

ここに、 $y : i$ 秒目における100Hzサンプリングの j 番目の速度成分データ、 $N : 1$ 秒間のサンプル数(100)である。

LTAは振幅の60秒平均、STAは2秒平均とし、トリガレベル、トリガ超過時間を越えたときにトリガ検知したと判定する。なお、各観測局のトリガレベル、トリガ超過時間は観測局によって異なる。このため、小さい規模の崩壊を検知するため、誤検知を減らすためには、ノイズレベルの小さい環境に観測局を構築することが重要である。国交省観測局および防災科研のHi-netの観測局の振動センサーは、主に速度計を用いており、振動データは速度振幅、データサンプリング間隔は100Hzである。

(3) 検知範囲

a) 検知対象とする範囲

大規模土砂移動検知システムの検知すべき範囲は、深層崩壊推定頻度マップ⁵⁾における発生頻度の「特に高い」エリアと「高い」エリアである。

b) 現状の検知範囲の確認方法

大規模土砂移動検知システムの各観測局の検知範囲は、過去の深層崩壊事例の崩壊規模と Hi-net の振動データに基づき、崩壊地直近の振動規模と距離減衰（地盤内の伝播に伴う振幅の減少）に基づいて検討されている³⁾。観測局の検知可能な範囲（検知半径）は各観測局の LTA の N 倍のトリガレベルと崩壊規模から(2)式にて求める。

$$r = 10^{\frac{0.92 \times \log_{10}(V \times 10^4) - \log_{10}(X \times N \times 10^{-8}) - 11.02}{1.15}} \quad (2)$$

ここに、 r ：検知半径、 V ：崩壊規模(万 m³)、 X ：10 分間 RMS 平均値(LTA=ノイズレベル)(μ kine)、 N ：トリガ倍数である。

国土交通省と Hi-net の観測局の各観測局のトリガレベルとトリガ超過時間は、生活ノイズによるトリガ超過に伴う誤検知が生じにくいよう調整を行っている。大規模土砂移動検知システムでは、60 秒間の RSM の平均値である LTA の数倍を閾値とし、この

トリガレベルを 2 秒間平均の STA が、超過するかどうかを判定している。大規模土砂移動は降雨時に伴い発生するが、振動センサーはボーリング孔内に設置しているものの風雨の影響により同時に LTA も上昇するため、無降雨時よりも降雨時の方が土砂移動は検知しにくくなる。また、生活ノイズは昼間と夜間で異なる。台風などの出水時のノイズレベルとトリガレベル、それに基づいた各観測局の検知範囲（検知半径）を算定し、観測原理に基づき 3 次元的な位置と時刻を特定するのに必要な、4 円以上の検知円が重複する範囲が検知可能な範囲である（図-3）。

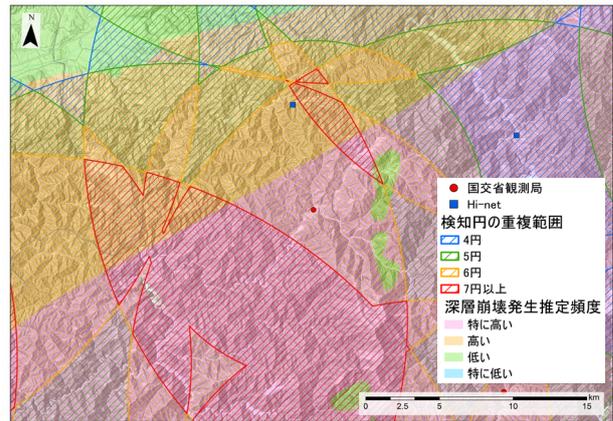
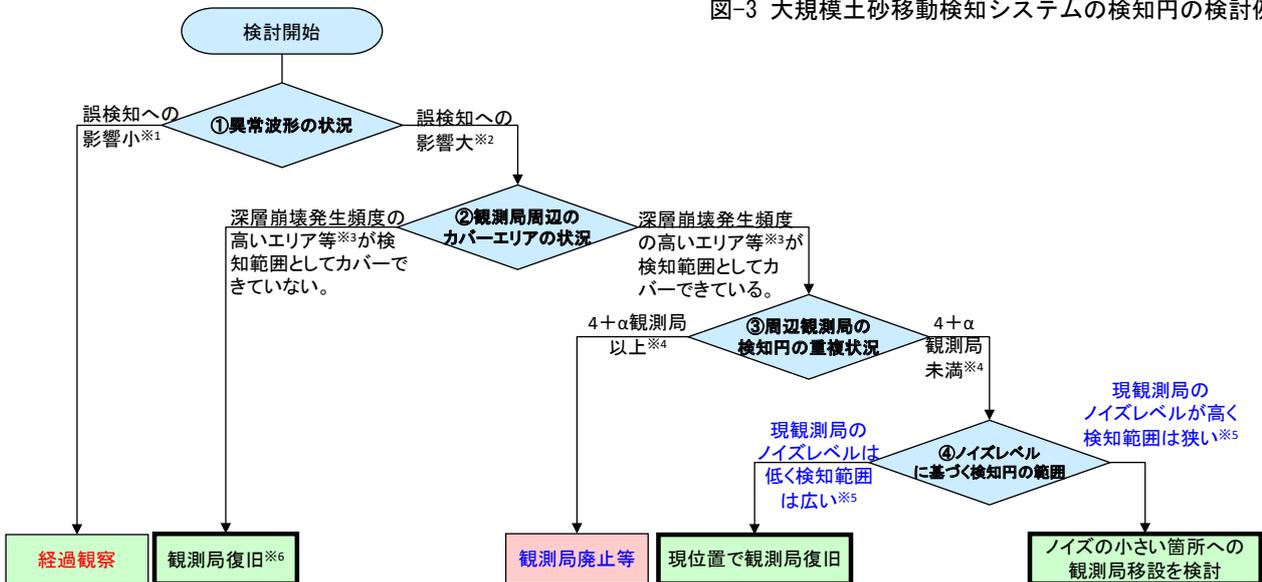


図-3 大規模土砂移動検知システムの検知円の検討例



- ※1 トリガ超過を判定している速度 UD(Z)成分でノイズ発生頻度が低いなど誤検知への影響が小さいケース。トリガ超過は速度 UD (Z) 成分で判定し、NS・EW はトリガ超過には影響しないがイベント成立後に震源決定・崩壊規模推定等で使用している。
- ※2 センサー故障やノイズにより明らかに土砂移動が検知できない状態のもの。
- ※3 深層崩壊の発生頻度の高いエリア・特に高いエリア、その他降雨による大規模土砂移動の発生実績がある等、検知対象とするエリア
- ※4 異常波形の生じた観測局周辺について、防災科研の Hi-net 観測局含む観測局の検知円の重なり具合を確認する（降雨時・300 万 m³ 規模）。4 観測局以上のトリガ超過で土砂移動の可能性を判定しているが、降雨時には欠測等もあるため余裕を見込むのが望ましい。
- ※5 既存資料や計測データから降雨時・300 万 m³ のノイズレベルでの対象観測局の検知範囲を踏まえて検討する。
- ※6 観測局復旧にあたっては、④のフローに準じて現観測局のノイズレベルを確認し、検知対象エリアをカバーできるよう、ノイズレベルが高い等の場合は観測局の廃止と機器の再利用等を検討する。

図-4 振動センサーに異常が生じた観測局の見直し等の対応フロー(案)

3. 大規模土砂移動検知システム観測局の移設検討事例

本章では、振動センサーの設置箇所を移設する必要が生じたことに伴う、観測局の移設に関する検討内容の一事例を報告する。

(1) 振動センサーの故障等に伴う観測局の見直し判断

異常波形の頻度や程度が著しい場合など、振動センサーの交換が必要な場合には、観測局の設置の見直しのタイミングとする必要がある。Hi-net を含む周辺の観測局の検知円の重複範囲を確認して、廃止、復旧、移設を判定するフロー案を作成した (図-4)。

なお、図-4 に示される観測局のノイズレベルについては、大規模土砂移動検知システムの管理資料として、毎月の 10 分間 RMS 値を求めており、その値を参照するのがよいと考えられる。また、検知範囲が十分でない場合は観測局を追加設置するといった対応も考えられる。

(2) 観測局の候補地の選定

本事例では、観測局を設置していた施設の移転の予定に伴い、既設観測局の検知円について重複範囲を確認した結果、検知範囲を維持するために観測局についても移設が必要と考えられたため、候補地の選定を行った。観測局については、同施設の敷地内に移設することとして施設管理者の了承を得た。この移転に伴う観測局の移動距離は直線距離で約 100 m であったため、観測局周辺のカバーエリアについて大きく変わることがないことを確認した。

(3) 観測局の候補地の調査

見直しにあたっては、観測局見直し後の検知範囲の確認が必要である。候補地調査の流れを図-5 に示す。調査では、地表のノイズレベル計測結果から、地中埋設時のノイズレベルを想定して、観測局を設置した場合の降雨時における崩壊規模 300 万 m³ に対する検知範囲を求め、検知対象範囲を 4 円以上でカバーできるかを確認することを最終目的とする。

なお、候補地が 3 箇所以上かつ複数の観測局の見直しを行う等の場合、それらの観測局設置位置の組み合わせ候補の中から選定することとなるが、観測局の検知時刻の差を利用して、その発生位置を推定しているため、観測局は互いに離れた位置がよいと考えられる。

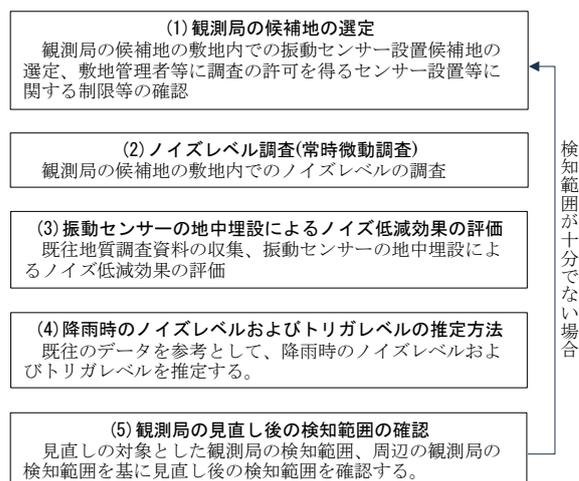


図-5 観測局の候補地の調査の流れ

a) センサー埋設位置の選定

観測局の候補地を選定した後は、電源・通信施設の設置作業、ボーリング孔の設置作業を考慮して、その敷地内において、ノイズレベルを計測するなどし、いくつかの振動センサー埋設候補地を選定することが望ましい。

本事例における候補地は、3 箇所程度で実施された既往ボーリング調査により深度 10 m 前後付近で N 値 50 以上の岩盤が見られ、センサーの設置に適すると考えられた。一方、既往研究⁹⁾により、埋設深度を深くすることと同様にノイズ発生源から遠い箇所に設置することが重要であると考えられることから、ノイズレベル調査 (常時微動調査) を実施した。

b) ノイズレベル調査 (常時微動調査)

常時微動計測に適した、微小な地盤振動を計測できる振動センサーを用いて、センサー設置候補地について図-6 の例に示すように、地上での常時微動調査を行った。ここでは 1 回で 10 分以上の振動計測を実施した。

微動計測で得た振動データは、大規模土砂移動検知システムと同様、1~7 Hz のバンドパスフィルターで処理後、式(1)に示す RMS 値 (Root Mean Square) の 10 分間平均値を求め、評価する。

振動波形の中に電氣的ノイズ (矩形的な波形や一定周期の波形の立ち上がりなど) の有無を確認することで、各箇所の電気ノイズの混入を把握可能となる場合もある。なお、計測中に地震等の大きな振動混入があれば、その計測結果を除外してもよいとした。

本事例では地点を 4 箇所定め、計測を行った。地点及び周囲の状況図を図-7 に、結果を表-2 に示す。10 分間 RMS 平均値は、地点 1 (3.7 μ kine)、地点 4 (4.0 μ kine) が低い値となり、地点 2 (7.6 μ kine)、



図-6 観測局設置候補地での常時微動調査の例

地点3 (7.3 μ kine) はやや高い値となった。10 分間の微動計測中に、数台の車両の通行が見られたが、通行時間のノイズの増大は見られなかった。そのため、地点 1~4 は道路に近いところにはなるが、影響は少ないと考えられる。

なお、振動波形の中に電氣的ノイズ(矩形的な波形や一定周期の波形の立ち上がりなど)は全計測地点で見られなかった。図-8 に各地点 1 回目の振動波形の例を示す。地点 2，地点 3 と地点 4 はノイズが混入していたが、ノイズの発生源は不明であった。(理由：車両通過時間と不一致。周辺建物は当該時刻には不使用。埋設管は近くになかった。また、RMS 値が低い地点 4 と高い地点 2・地点 3 は距離が数メートルしか離れていない。) 10 分間 RMS 平均値が低い、地点 1・地点 4 がセンサー設置位置として良いと考えられたが、地点 4 の近くに空調室外機が設置予定のため、最適箇所としては地点 1 を現段階で選定することとした。

4. 今後の調査について

本事例における移設に関する検討は継続中であるが、今後必要となる調査項目について整理して報告する。

(1) 振動センサーの地中埋設によるノイズ低減効果の評価

候補地を設定した後は、地中埋設時ノイズの評価を行う。既往の振動センサーの埋設深度とノイズ低減効果に関する調査結果⁶⁾を図-9 に示す。埋設深度が深くなるにしたがい、ノイズ比率(地下/地上)は低くなる傾向となっている。一方、図-9 に示す全国の国交省観測所のデータによれば、埋設深度が浅い箇所(25 m 以下)の平均値は0.82 で低減効果はあまりみられなかった。加えてばらつきもあることから、

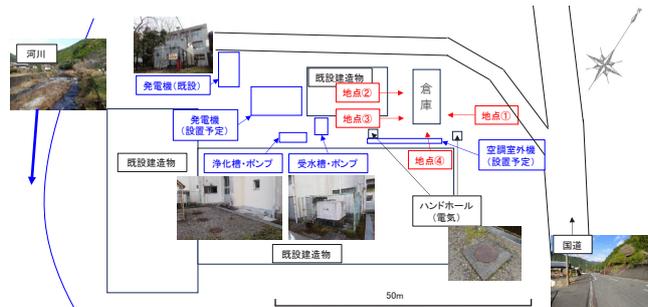


図-7 観測局設置候補地概況図

表-2 各計測地点における微動計測結果

| No. | 計測地点 | 計測回数 | 天気 | 計測日 | 計測開始時間 | 計測終了時間 | 10分間RMS値 (m/s) | 10分間RMS値 (μ kine) | 10分間RMS平均値 (μ kine) |
|-----|------|------|-------|-----------|--------|--------|----------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | 地点1 | 1回目 | 晴れ・微風 | 2022/12/7 | 10:40 | 10:50 | 3.65E-08 | 3.7 | 3.7 |
| | | 2回目 | 晴れ・微風 | 2022/12/7 | 10:50 | 11:00 | 3.69E-08 | 3.7 | |
| 2 | 地点2 | 1回目 | 晴れ・微風 | 2022/12/7 | 11:20 | 11:30 | 5.88E-08 | 5.9 | 7.6 |
| | | 2回目 | 晴れ・微風 | 2022/12/7 | 11:30 | 11:40 | 9.23E-08 | 9.2 | |
| 3 | 地点3 | 1回目 | 晴れ・微風 | 2022/12/7 | 11:50 | 12:00 | 5.41E-08 | 5.4 | 7.3 |
| | | 2回目 | 晴れ・微風 | 2022/12/7 | 12:10 | 12:20 | 9.16E-08 | 9.2 | |
| 4 | 地点4 | 1回目 | 晴れ・微風 | 2022/12/7 | 12:40 | 12:50 | 4.48E-08 | 4.5 | 4.0 |
| | | 2回目 | 晴れ・微風 | 2022/12/7 | 12:50 | 13:00 | 3.45E-08 | 3.4 | |

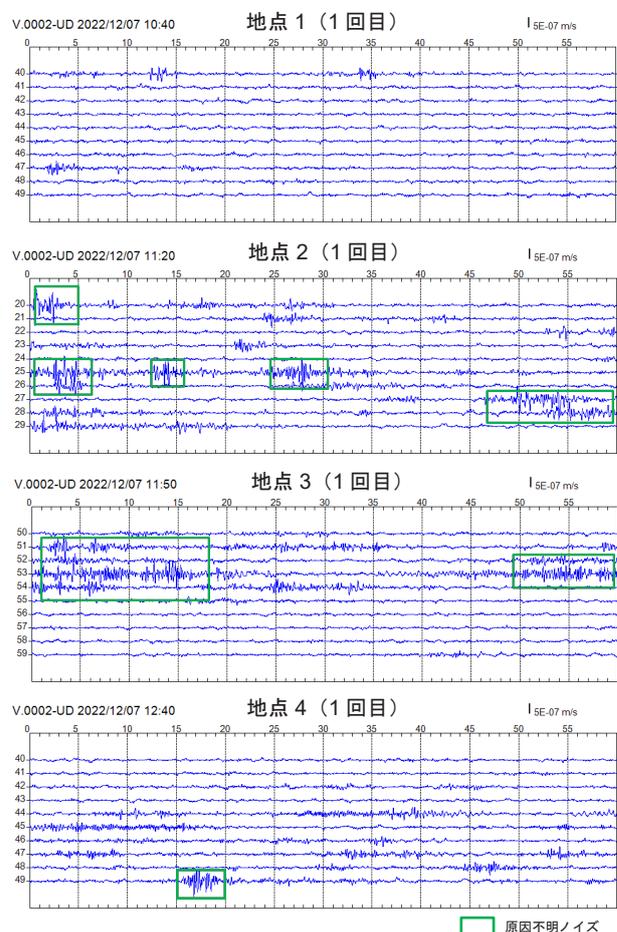


図-8 各地点における微動計測結果(1回目)

特に埋設深度が浅い地点においては、設置前時点で地下埋設による低減効果は見込まず、安全側で想定しておくのがよいと考えられる。

(2) 降雨時のノイズレベルおよびトリガレベルの推定

観測局の検知範囲を求めるため、ノイズレベルが

高くなる降雨時のノイズレベルおよびトリガレベルを、センサー設置後を想定して推定する。

ノイズレベル調査で得られる振動データは地表の昼間のノイズレベルであるが、埋設深度に応じ、ノイズ低減効果を設定してノイズレベルを推定する。加えて、全国の国交省観測局のデータを使用し、推定された昼間の地中のノイズレベルから降雨時のノイズレベルを推定する。

観測局のトリガレベルは、観測局設置後に取得した1箇月程度の振動データから、トリガ倍数・超過時間の候補について、昼間と夜間の超過頻度を求めて設定する(2.5回/hr程度で最も低いトリガ倍数のものを設定する手法が考えられる)。しかし、調査段階では実測の振動データがないことから、全国の国交省観測局のデータを使用し、推定された昼間の地中のノイズレベルからトリガレベルを推定する。

国交省観測局のデータでは、昼間(無降雨)のノイズレベル(RMS値)と、降雨時RMS平均値、および、トリガレベルの関係はリニアな関係になっていない。昼間のノイズレベルについて10 μ kine程度を境に2つに区分できると考えられる(図-10)。よって、ヒストグラムを整理したものを用いて設定する方法が考えられる。また、推定された昼間の地中のノイズレベルに基づいて、「降雨時のノイズレベル」と「トリガ倍数」を安全側の値として75パーセンタイル(上位25%)や95パーセンタイル(2 σ)の値を採用するといった選択肢が考えられる。

(3) 観測局の見直し後の検知範囲の確認

見直しの対象とした観測局の検知範囲、周辺の観測局の検知範囲を基に、GISで検知円の重複状況を確認し、4円以上の重複範囲で検知対象範囲が網羅されているかを確認する。

5. おわりに

本研究では、観測局の検知性能の求め方や観測局設置場所の検討方法について検討し、現地調査や既往の調査資料を整理することで、観測局の設置前に検知範囲を想定することが可能であることが明らかとなった。また、本稿では紙面の関係上割愛したが、本手法で検討した観測局の更新事例において、更新後の計測データに基づいて設定したトリガレベルが、更新前に想定していたトリガレベルより低く設定でき、想定より検知範囲が広がった事例もある。今後も、観測局移転に伴う調査と観測局の移転作業を進めていくとともに、観測局の適切な維持管理と、

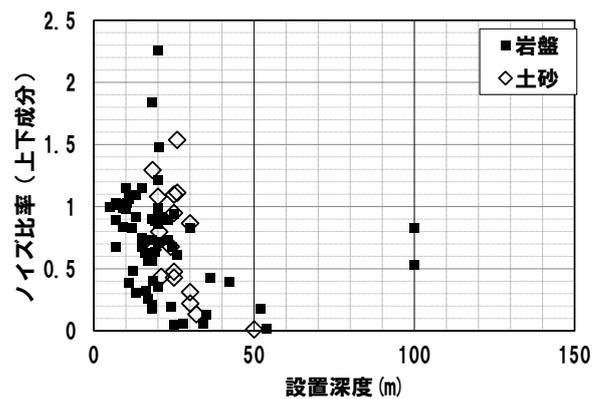


図-9 振動センサー設置深度とノイズ比率の関係⁶⁾

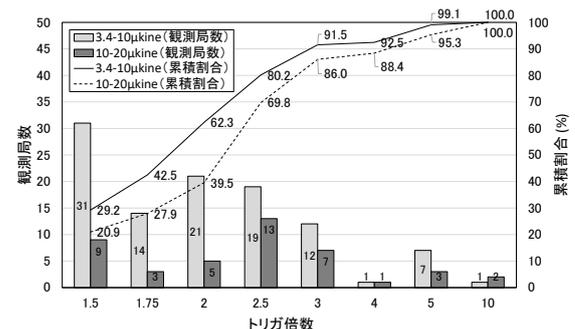


図-10 全国の国交省観測局データにおける昼間のノイズレベルが10 μ kine以上と未満の場合のトリガ倍数の分布の違い

観測データや知見の蓄積に取り組んで参りたい。

参考文献

- 1) 森脇寛：崩壊型土石流の流下に伴う地盤の震動特性—小谷村蒲原沢土石流—，地すべり，第36巻，第3号，pp.99-107，1999.
- 2) 大角恒雄，浅原裕，下川悦郎：2004年8月10日奈良県大塔村斜面土砂移動時のHi-netデータ解析—斜面土砂移動検知への応用—，自然災害科学，Vol. 24，No. 3，pp.267 - 277，2005.
- 3) 海原荘一，浅原裕，木下篤彦，中谷洋明，田中健貴：高感度地震観測網による大規模土砂移動発生時の地盤振動特性と検知，砂防学会誌，Vol.73，No.5，pp.27-37，2021.
- 4) 木下篤彦，海原荘一，山路広明，廣瀬昌宏，只熊典子，浅原裕：崩壊時の地盤振動特性に着目した大規模土砂移動の検知に関する研究，河川技術論文集，第23巻，pp.441-446，2017.
- 5) 国土交通省：深層崩壊推定頻度マップ，<https://www.mlit.go.jp/common/001197941.pdf>，2010.
- 6) 高原晃宙，木下篤彦，水野秀明，長谷川真英，梅田ハルミ，海原荘一，浅原裕：振動センサー設置深度とノイズ低減率の関係，平成28年度砂防学会研究発表会概要集，B-336~337，2016.

(2024.5.31 受付)