

模型実験を用いた地中音による地すべり予測に関する基礎研究

建設設計工学研究室 上畑 吉紀
指導教官 宮木 康幸

1.はじめに

現在、地すべりや崩壊の危険性がある斜面の監視には様々なシステムが利用されており、わが建設設計研究室でも CCD カメラを用いた斜面監視システムを開発している。しかし、このシステムの短所として、監視の対象が斜面の地表のみであることが挙げられる。そこで、斜面監視の新たな手法として、斜面の移動が地表で観測される前の段階で、地中の土構造が変動するときの地中音から地すべりを予測できないかとの考えに至った。このようにして、一昨年度から音響的手法を用いた斜面監視システムが考案された。

2.研究の目的

地すべりが発生する前には、平常時に比べて、地下水の流れや土構造の変動による地中音の微小変化があると考えられる。そこで、本研究は写真-1 に示す振動センサを用いて、これらの地中音の変化を前兆現象として捉え、地すべりするための基礎的な検討を行うものである。



写真-1 センサ

昨年度は、地すべり現場での計測が行われたが、採集された地中音が前兆現象によるものかどうかの特定ができなかった。そのため、これを特定するには、前兆現象とこれが発する地中音との関係を明らかにしなければならない。その方法として、今年度は模型を用いた実験を行うことにした。この模型実験により、地すべりの前兆現象であると考えられる地下水の流れを擬似的に発生させ、これが発する低周波音を測定し、地すべりの予測に繋がるかどうかを検討することを目的とする。

また、新たな地すべり現場で地中音の計測を行い、採集したデータと模型実験の結果との比較を行う。

3.模型について

地すべりとは、どこにでも発生するわけではなく、粘土が広く分布しているところや、池または沼が多く存在するところなど、その発生する地質・地形は限られている。このような特定の場所において、降雨や融雪などによる地下水に代表される、誘発要因の影響を受けることによって起こり得る現象である。したがって、これを再現するため模型には砂と粘土を二層に敷き詰め、境界付近に擬似的に水を流す。本実験では、この地下水の流れを前兆現象として考える。実験に使用する模型の概要を図 3-1 に示す。

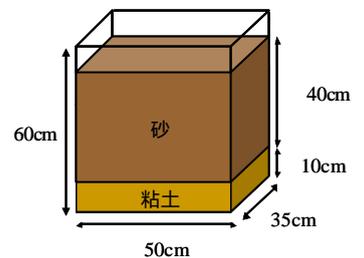


図 3-1 模型の概要

4.測定機器の接続状況

測定機器の接続状況を図 4-1 に示す。センサは、特性の異なる J センサおよび S センサの 2 種類を用いて、それぞれ模型に打ち込んだ単管パイプに取り付ける (写真-2)。

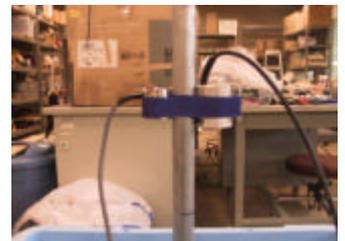


写真-2 センサ取り付け

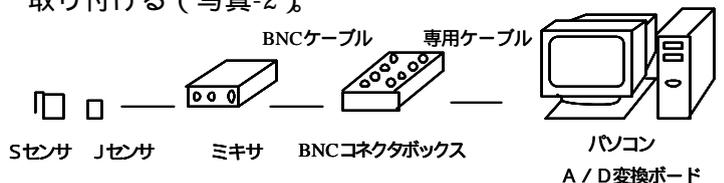


図 4-1 接続状況

5.模型を用いた基礎実験 (第 1 期)

今年度は、地すべりの前兆現象である地下水の流れを、模型を用いた実験によって擬似的に発生させ、センサで変化を捉えられるか検討することを目的としている。そのため、まず模型に水を流した前後で、音の大きさや周波数成分に変化が現れるか実験を行った。実験場所を写真-3 に示す。

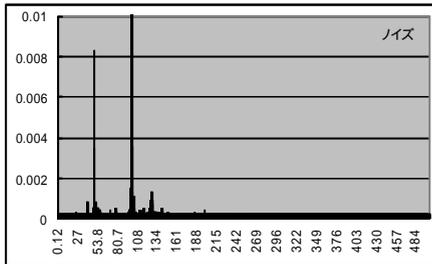


写真-3 音響振動工学センター室内

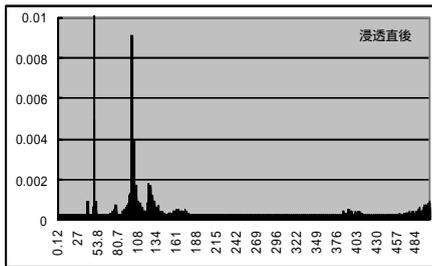
5.1 実験方法と結果

高速フーリエ変換（以下、FFT とする）による計算結果を S センサについて示す。

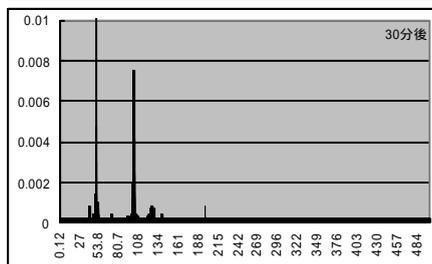
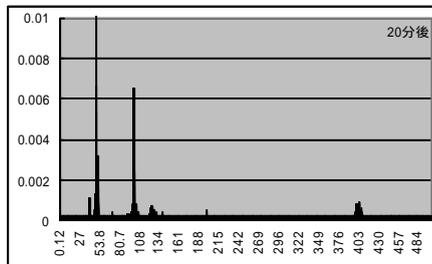
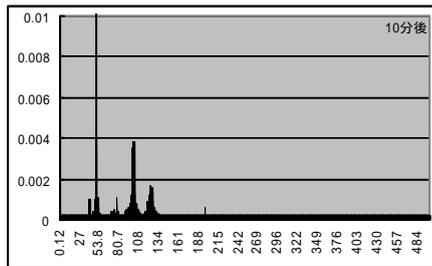
5.1.1 水を供給しない状態でノイズを測定（図 5-1）



5.1.2 水を供給した直後を測定（図 5-2）



5.1.3 水が浸透していく経時変化を測定（図 5-3）



5.2 考察

浸透直後や経時変化を測定すると、ノイズ時に比べ 80Hz から 180Hz 付近の周波数において、出力される電圧に変化を確認することができた。しかし、これらの変化以上に 50Hz、100Hz 付近の周波数が卓越していることが分かった。

6. 模型を用いた基礎実験（第 2 期）

前節の実験結果から、模型内に水を流すことによる地中音の変化を確認することができた。しかし、同時に 50Hz や 100Hz 付近の周波数も卓越しており、これが電源ノイズである可能性が高いとの指摘を受けた。これは、パソコンの電源や蛍光灯等による影響が考えられる。そこで、できるだけノイズの少ない環境下で実験を行うべく改善を行った。

6.1 実験方法の改善

電源ノイズの影響を少なくするために、模型を残響室前室へ、パソコンを残響室内へとそれぞれ別の部屋に設置した（写真-4、5）。また、実験時はすべての電気を消すことにした。



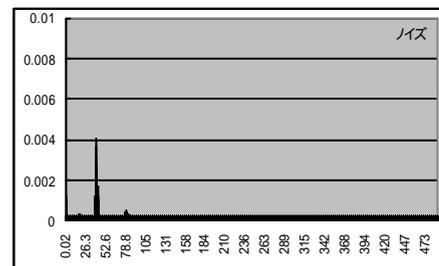
写真-4 残響室前室

写真-5 残響室

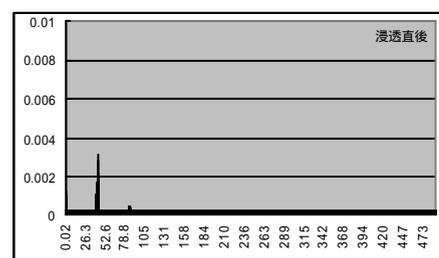
6.2 実験方法と結果

FFT による計算結果を S センサについて示す。

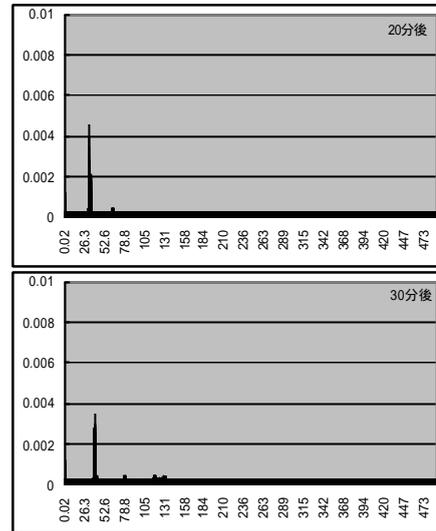
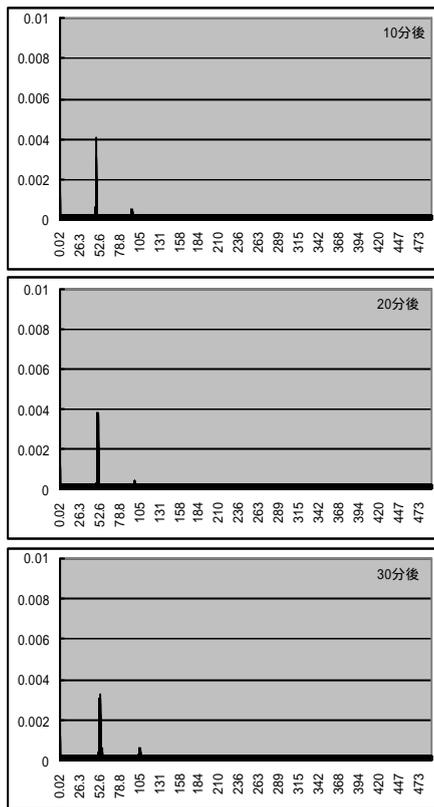
6.2.1 水を供給しない状態でノイズを測定（図 6-1）



6.2.2 水を供給した直後を測定（図 6-2）



6.2.3 水が浸透していく経時変化を測定 (図 6-3)



6.3 考察

図 6-1 の結果から、前節まで卓越していた 50Hz、100Hz 付近の周波数が見られなくなった。このことより、これまで卓越していた周波数は、指摘された通り電源ノイズであったことが分かった。図 6-3 の結果から、水を浸透させたことによって周波数が数 Hz ずつ高い領域へと移動していく現象が見られた。水の供給により試料は湿潤状態になることから、これに伴う音は低くなることが予想される。しかし、これとは逆に徐々に高くなっていることから、水による影響を捉えているものと考えられる。また、これは図 6-6 に示すように、排水させたことによっても同様の現象となるため、模型内の水位による影響でないことも確認できた。

これらの結果から、水を浸透または排水させたことによる周波数領域での変動は、ほとんどが 100Hz 以下の領域で起こっていることが分かった。

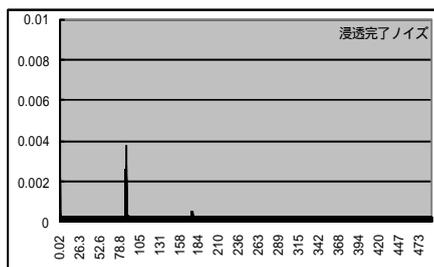
7. 模型を用いた基礎実験 (第 3 期)

前節の結果から、水の流れによる周波数成分の変化を確認することができた。そこで、模型内を流れる水の流速を変えた場合、周波数成分に特徴が掴めるか実験を行った。

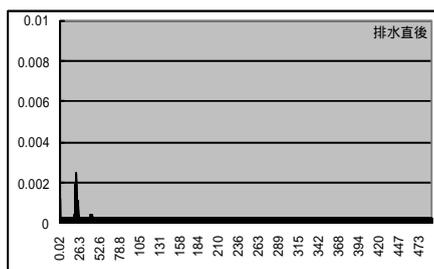
7.1 実験方法の改善

定水位による流速の変化をできるようにバルブを取り付けた筒を製作した (写真-6、7 参照)。これにより、まず筒内の水位を一定に保ち、その後模型内に水を流し、模型内の水位も一定に保つことで、模型から流れ出てくる流量を一定となるようにした。

6.2.4 浸透完了時のノイズを測定 (図 6-4)



6.2.5 水を排水させた直後を測定 (図 6-5)



6.2.6 排水したときの経時変化を測定 (図 6-6)

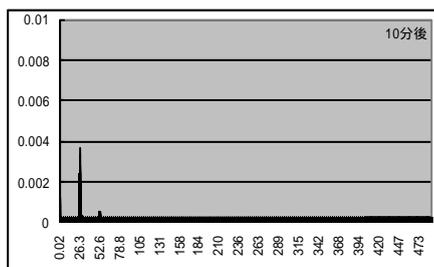




写真-6 筒の製作

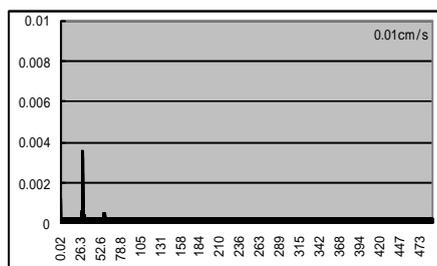
写真-7 バルブ部分

地下水の流速は、通常の地盤状態では最大でも0.01cm/sであることが分かっている。一方で、地すべりが発生し得るときの流速というのは未知であるため、本実験ではこれを通常の3~5倍であると仮定した。流速は0.01cm/s、0.025cm/s、0.036cm/s、0.045cm/s、0.05cm/sの5種類でそれぞれ一定となるように保ち、実験を行った。

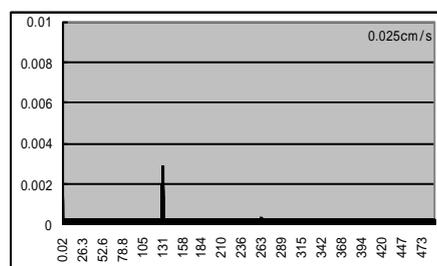
7.2 実験方法と結果

FFTによる計算結果をSセンサについて示す。

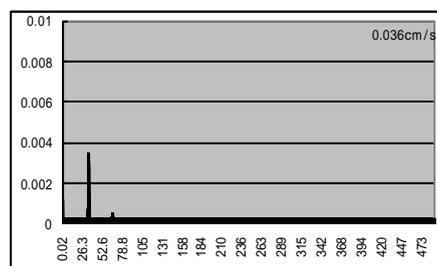
7.2.1 流速 0.01cm/s 時の結果 (図 7-1)



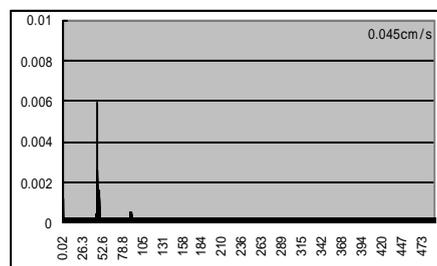
7.2.2 流速 0.025cm/s 時の結果 (図 7-2)



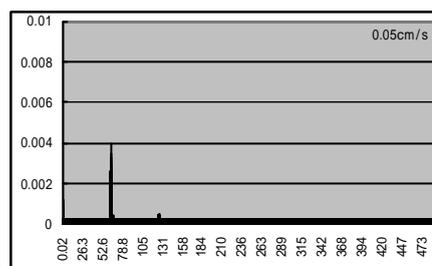
7.2.3 流速 0.036cm/s 時の結果 (図 7-3)



7.2.4 流速 0.045cm/s 時の結果 (図 7-4)



7.2.5 流速 0.05 時の結果 (図 7-5)



7.3 考察

図 7-2 に示す結果から、卓越周波数は130Hz付近まで一気に高くなったことが分かる。一方で、これを除いた他の流速で比較すると、流れが早くなるにつれて徐々に周波数が高い領域へ変化していくという傾向が見られた。この結果からは、どれくらいの流速であれば、どの程度の周波数となるかという特定には至らなかった。しかし、流速を変化させたことによる周波数領域での変動は、ほとんどが100Hz以下であることが分かった。

近年では、岩盤の崩落を音により予測する手法として、AE(アコースティック・エミッション)と呼ばれる技術が用いられている。この手法では、数kHzから数百kHzという非常に高い周波数領域で変化があると言われている。このことから、音による現象の予測としては高い周波数領域ばかりが着目される傾向がある。しかし、今年度の実験結果から、地すべりを対象とした地盤においては、100Hz以下という低い周波数領域に着目すべきではないかということが分かった。

8. 地すべり現場への適用

昨年度までは沖見地すべり現場で計測を行っていたが、今年度は新しく西山地すべり現場での計測を行った。

8.1 地すべり現場の概要

今年度、計測を行った西山地すべり現場は、新潟県刈羽郡西山町の国道116号線沿いに位置する。平成14年11月16日頃、この西山現場において地すべりが発生したとの情報を得た。再度、地すべりが発生する危険性が高いとのことであったので、現場設置を行った。この地すべりは、国道116号線沿いの切り通し部分で発生し、幅約50m、高さ約20mにわたり円弧型の地すべりを起こしていた(写真-8)。



写真-8 地すべり現場

平成 14 年 11 月 22 日、計測を開始した時点ですでに押え盛土や水抜きボーリングなどの防止対策工事が行われていた。また、地すべりの観測装置として地表面伸縮計が 3 箇所に設置されていた。

8.2 西山地すべり現場の計測

8.2.1 設置状況

風雨を避けるためパソコン等の機材はテントの中に設置した(写真-9)。テントを設置した位置は、写真-8 に示す地すべり面から後方に 5~6m 下がった山中である。このテントから約 1m 離れた樹木と、約 3m 離れた位置に打ち込んだ単管パイプにそれぞれ J センサと S センサを取り付けた(写真-10、11)。



写真-9 機材設置状況



左：写真-10 樹木に付けたセンサ

右：写真-11 単管パイプに付けたセンサ

センサは、樹木には高さ約 50 cm に位置に、単管パイプは 1m のものを 50 cm 打ち込み、30 cm の位置に取り付

けた。なお、単管パイプには、外部の影響を少なくするために防音用のパイロンを被せている。

8.2.2 計測状況

計測状況は、以下の通りである。

計測期間 :平成 14 年 11 月 22 日 16 時半 ~ 11 月 26 日 11 時半

- ・サンプリング周波数 8000Hz
- ・サンプリング間隔 30 分
- ・サンプリング時間 10 秒間
- ・データ個数 80000 個

8.3 斜面の移動状況

現場に設置された地表面伸縮計の結果から、11 月 26 日の午前 6 時頃から、斜面の移動が再び観測されたとの情報を得た。そこで、計測を行った期間について、3 つの地表面伸縮計および累計雨量の関係を図 8-1 に示す。

11/22 16:30 ~ 11/26 11:30

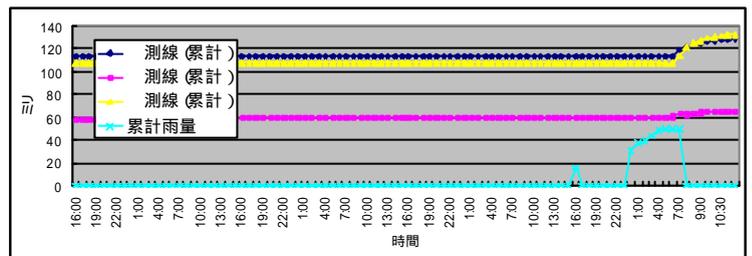
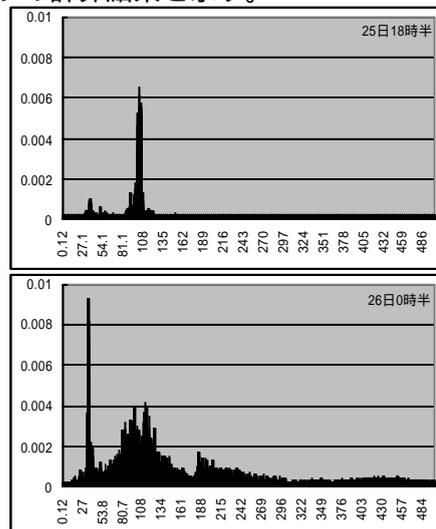


図 8-1 累積雨量と地表面伸縮計の累計変位量の関係

8.4 計測結果

前節の結果から、11 月 26 日の午前 6 時頃から斜面の移動が観測されていることから、センサを用いて行った計測のうち、この時間の前後を調べてみる。図 8-2 に、移動が観測された半日前に当たる、25 日の 18 時半から 6 時間毎の単管パイプに取り付けた S センサの計算結果を示す。



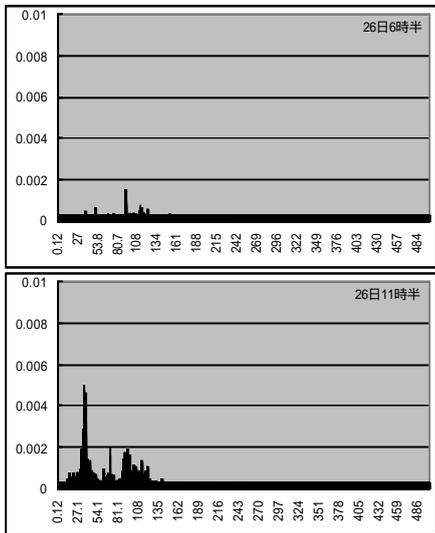


図 8-2 6 時間毎の計測結果

図 8-2 の結果から、26 日 0 時半に 80Hz から 250Hz 付近の周波数で変動が見られる。しかし、このような広い周波数領域での変化は風による場合が多い。採集したデータを音ファイルに変換した結果からも、これは風であることを確認した。模型実験の結果から、水の影響による地中音の変化は 100Hz 以下の領域で発生することが分かっている。そこで、図 8-2 の結果について 100Hz 以下に着目してみると、西山地すべり現場においては 35Hz 付近の周波数に、時間による出力電圧の変動が見られる。したがって、この変動を 25 日の昼から 26 日の昼にかけて時系列で表し、これを図 8-3 に示す。また、同じ時間帯での時間雨量の推移を図 8-4 に示す。

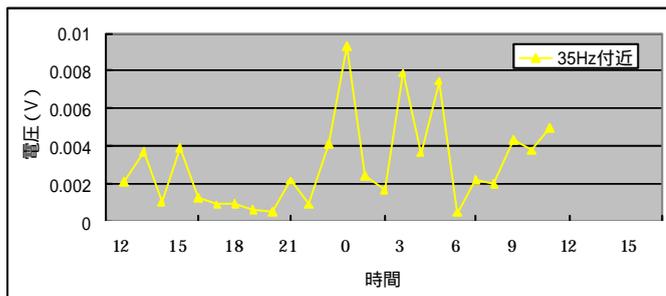


図 8-3 時間による 35Hz 付近の電圧の変動

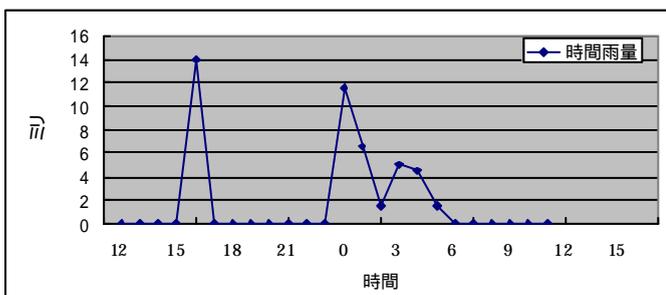


図 8-4 時間雨量の推移

8.5 考察

図 8-3、図 8-4 を見ると、26 日 0 時以降で観測された降雨によって、出力電圧は大きくなっており、その大小関係も類似していることが分かる。しかし、26 日の 6 時以降では降雨は観測されていないにも関わらず、徐々に電圧が大きくなっていることが分かる。この結果から、雨水が浸透したことにより形成された地下水流が、6 時頃に斜面が移動したことにより一時的に遮断され、その後時間の経過とともに再び流れ始めたことが考えられる。

9. 結論

- (1) 模型内の水の影響による周波数成分の変化を、FFT による計算結果から確認できた。
- (2) 岩盤崩落の予測とは異なり、地すべりを対象とした地盤においては、周波数の変動は 100Hz 以下の領域であることが分かった。
- (3) 現場計測において、センサを単管パイプに取り付ける場合、防音対策としてはパイロンだけでは不十分であり、改善の余地があることが分かった。

10. 今後の課題

- (1) 現在使用しているセンサの特性は、変動が確認できた 100Hz よりも高い周波数帯にある。したがって、さらに低い周波数領域に特性を持つセンサを使用することが望ましい。
- (2) 異なる寸法の模型で同様の実験をする必要がある。また、使用する砂や粘土についても、異なる物性値の試料で実験する必要がある。
- (3) 単管パイプを用いて地すべり現場での計測を行う場合、ノイズを少なくするためには、パイロン以上に防音効果の高い装置を考案する必要があると考えられる。

11. 参考文献

- (1) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994 年
- (2) 山本荘毅：地下水文学、共立出版、1992 年
- (3) 高橋彦治：土木技術者のための地質学、鹿島出版会、1974 年