

落石危険度振動調査法への3成分小型加速度センサの適用 Application of a Three-Component Small Accelerometer to the Vibration Investigation Method of Rockfall Risk

小出陽菜¹, 吉川高広², 沢田和秀³, 赤沢 健⁴, 森本翔太郎⁵

1 岐阜大学・大学院自然科学技術研究科・koide.haruna.j8@s.gifu-u.ac.jp

2 岐阜大学・工学部社会基盤工学科

3 岐阜大学・工学部附属インフラマネジメント技術研究センター

4 第二建建設(株)

5 馬瀬建設(株)

概 要

本研究では、落石危険度振動調査法に基づいて、3成分小型加速度計による岩塊の安定度評価を行った。調査対象は落石対策便覧に基づき不安定と評価された岩塊である。まず、加速度計に顕著なドリフト現象が観察されたため、振動記録を抽出するとともに、逆高速フーリエ変換によるハイパスフィルタを適用し、その有効性を確認した。次にその方法に基づき、対象岩塊を評価した結果、浮石部では振幅が大きく、低周波成分が卓越する等、不安定と判定され、調査前の定性的評価と本手法による定量的評価は一致した。一方、目視により最も不安定と予想していた方向と実際に不安定と評価された方向は異なり、3成分を計測することの重要性も示された。

キーワード：落石，振動計測，現地調査

1. はじめに

落石は、斜面災害の中でも発生頻度が高く、予測が難しい。一度発生すれば、人的被害や社会的影響が極めて大きい。一般的な落石の安定度評価には、落石対策便覧¹⁾に基づく「5段階の安定度調査区分」や道路防災総点検要領に基づく「安定度調査表」などの採点方式が用いられるが、評価項目に「やや不安定」などの曖昧な表現が含まれるため、主観的・定性的な判断に依存して、調査者による判定にばらつきが生じ得る。その結果、不安定な岩塊が安定と誤認され、人的・物的被害につながる危険性がある。こうした課題に対して、振動計測を行うことで客観的かつ定量的な評価を可能とする「落石危険度振動調査法」²⁾が提案された。本手法は、基盤部と浮石部の振動計測を実施し、RMS 速度振幅比、卓越周波数、減衰定数に基づいて安定度を評価するものである。本研究の目的は、落石危険度振動調査法に3成分を無線で計測可能な小型の加速度センサを導入することで、安全かつ実用性の高い落石安定度調査手法を確立することである。

本論文では、落石対策便覧に基づく安定度評価¹⁾において「不安定」と判定され、対策が予定されている浮石を対象に落石危険度振動調査を行った。まず、対象岩塊の基盤部に2台の加速度センサを設置し、両センサで同様の振

動計測結果が得られるかを確認した。その結果、センサ特有のゆっくりと加速度が上昇するドリフト現象が観察され、落石危険度評価に悪影響が出るため、振動記録の抽出および逆高速フーリエ変換によるハイパスフィルタを適用し、その有効性を確認した。次に、その対策方法に基づいて、対象岩塊の基盤部と浮石部にセンサを設置し、落石危険度振動調査を実施した。

2. 落石危険度振動調査法

2.1 基本原理と評価指標

落石危険度振動調査法は、浮石部の振動特性と直近の安定した岩塊または地盤（以下、「基盤部」とする）の振動特性を比較し、浮石部の落石危険度を評価する手法である。危険度判定には、RMS 速度振幅比、卓越周波数（固有周波数）および減衰定数の3つの指標を用いる。振動源は近傍の道路交通振動等の微小な雑振動を利用する。浮石部を剛体、基盤をバネと粘性減衰からなるモデルで表現し、このモデルを1質点1自由度と想定する。図1に測定の概要模式図を示す。浮石部と基盤部に振動計を設置し、振動を測定することで評価を行う。

RMS 速度振幅比は、浮石部の振動記録と基盤部の振動記録のうち、振幅の大きさをRMS 平均 (Root Mean Square :

2乗した平均の平方根) し、比率で評価した値である。浮石部と基盤部の各々について RMS 速度振幅を求め、それらを除して比を求めたものである。これにより、一定時間内の振動の全体的な傾向を統計量として表現できる。例として、RMS 速度振幅比が 1.0 であれば、基盤部と浮石部は同じ速度で揺れているが、大きな値を示せば、その値だけ浮石部が基盤部より大きな速度で揺れていることを示す。

卓越周波数は、振動のフーリエスペクトルを求めた際に、スペクトル密度が極大となる周波数を示す。不安定な岩塊では、振動周期が長く、周波数は低い値を示す。減衰定数は、振動の収束のしやすさを示す指標である。不安定な岩塊では、振動が長く続き、エネルギーの消散が遅いため、低い値を示す。卓越周波数および減衰定数の算出では、まず基盤部と浮石部の振動記録に対して高速フーリエ変換（以下、「FFT」とする）を実施する。このフーリエ成分を元に算出した周波数応答関数に調和外力下での減衰振動モデルの理論値を逆解析により当てはめることで卓越周波数および減衰定数を求める。

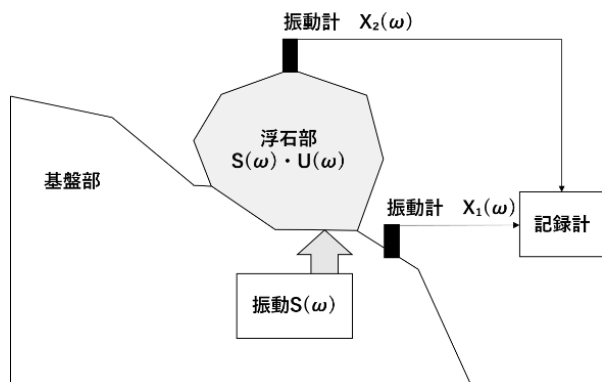


図 1 振動測定概要の模式図

2.2 落石危険度判定図

表 1 に RMS 速度振幅比、卓越周波数および減衰定数の危険度判定の基準を示す。RMS 速度振幅比は 2.0 以上、卓越周波数は 30Hz 以下、減衰定数は 0.2 以下の場合に危険と判定される。具体的には、横軸と縦軸に RMS 速度振幅比と卓越周波数および RMS 速度振幅比と減衰定数を用いて示す 2 種類の「落石危険度判定図」により評価する。図 2 は RMS 速度振幅比と卓越周波数の組み合わせであり、RMS 速度振幅比 ≥ 2.0 かつ卓越周波数 $\leq 30\text{Hz}$ の場合に不安定と判定される。図 3 は RMS 速度振幅比と減衰定数の組み合わせであり、RMS 速度振幅比 ≥ 2.0 かつ減衰定数 ≤ 0.2 の場合に不安定と判定される。つまり、両図において青色で示された領域に分布した場合、不安定と判定される。

表 1 落石危険度振動調査法に基づく危険度判定の基準

RMS 速度振幅比	2.0 以上
卓越周波数[Hz]	30 以下
減衰定数	0.2 以下

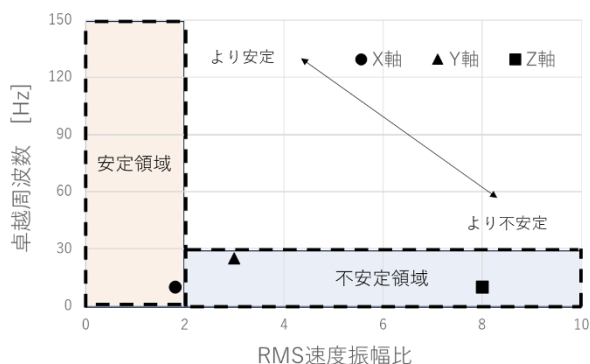


図 2 RMS 速度振幅比と卓越周波数の落石危険度判定図

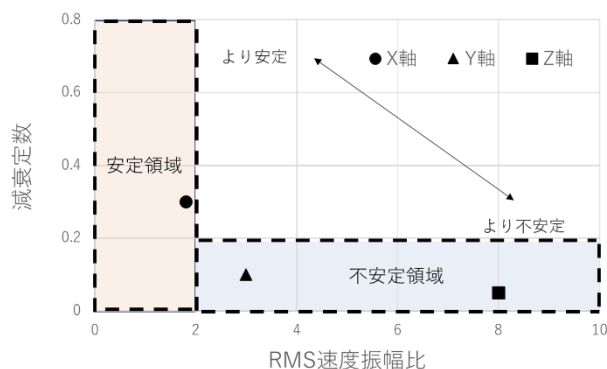


図 3 RMS 速度振幅比と減衰定数の落石危険度判定図

3. 調査概要

3.1 調査機器

落石危険度振動調査法に関しては、これまでも研究が行われているが^{3), 4)}、現時点では実用化に至っていない。その要因の一つとして、調査時の安全性の確保が難しいことが挙げられる。落石は急な斜面で発生することが多く、その調査は常に危険と隣り合わせで行われる。これまでに用いられてきた調査機器について、例えば藤田ら³⁾が用いたものは総重量約 60kg であり、また藤原ら⁴⁾が用いた携帯型計測システムは約 6.0kg 程度まで小型化されてきているものの、これらの機器はいずれも有線式であった。

本研究では、従来の装置と比較して、小型かつ無線で計測が可能となる、セイコーエプソン社製の加速度センサ M-A352 を搭載したロジカルプロダクト社の「高精度 3 軸ワイヤレス加速度センサ」⁵⁾（以下、「センサ」とする）を使用した。図 4 に本研究で使用した調査機器について示す。ノートパソコン、センサ 2 台、受信機、角座金のみで調査が可能である。本センサは外形 90×90×60mm、重量 550g と非常に小型で軽量なため、持ち運びが容易である。さらに、センサの通信距離は 500m であり、危険を伴う落石調査の安全性向上に寄与できる。なお、角座金を調査対象物にボンドで接着し、そこにセンサを磁石で設置することで計測を実施した。



図 4 調査機器

3.2 調査条件

調査対象は、岐阜県下呂市小坂町のがんだて公園に存在する岩塊である。対象岩塊は、落石対策便覧に基づく安定度評価において、既に「不安定」と判定され、令和7年度に対策が予定されている。さらに、対象岩塊は観光地に位置し、遊歩道から容易にアクセスが可能である。図5に調査対象岩塊の全景と基盤部および浮石部を示す。基盤部と浮石部の直線距離は約8.0mである。浮石部はオーバーハングしており、その下部には亀裂も確認された。本調査では、浮石部①、基盤部②および基盤部③の3か所を設定し、図5に示すX方向、Y方向、Z方向の3成分について加速度の計測を実施した。

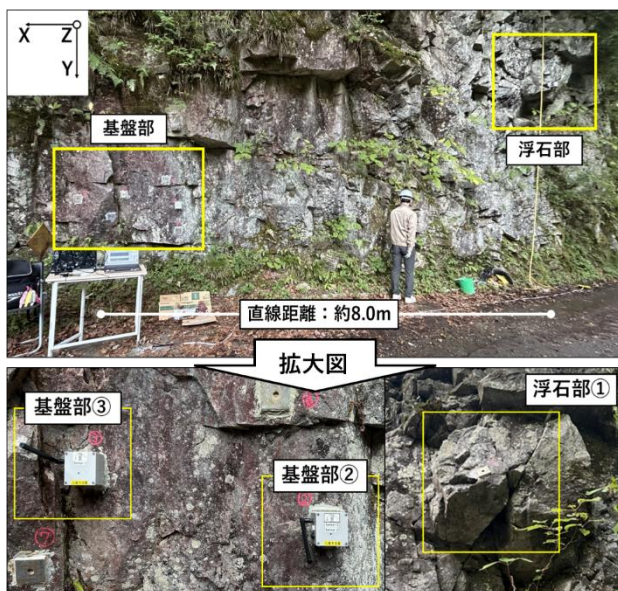


図 5 調査対象岩塊全景と基盤部および浮石部

本調査の計測条件は、サンプリング周波数 500Hz、計測時間 60s に設定した。また、安全な計測手法の確立を目的とし、常微振動のみを対象として実施した。強制振動を用いることでより明瞭な波形が得られる可能性もあるが、落石調査は常に危険を伴うため、計測作業の単純化が重要で

ある。調査は、2024 年 10 月 15 日および 2024 年 12 月 13 日の計 2 回である。

4. 3 成分小型加速度センサの適用結果

本章では、対象岩塊に対して実施した加速度計測結果に基づき、本センサの適用方法について検討した結果を示す。大きく分けて 2 種類の計測を実施した。1 つ目は、センサの個体差の確認およびその対応を目的とした調査である。2 つ目は、対象岩塊の落石危険度振動調査である。なお、取得データの方向を統一するため、計測開始前に浮石部①および基盤部②③において、センサ設置位置の水平・鉛直・方位を計測した。その結果を表 2 に示す。計測面はほぼ同じ方向を向いており、現地での角座金設置作業において、自然を相手にする以上、調整範囲には限界があり、危険が伴う調査においてこれ以上の精度は求めないこととした。

表 2 水平・鉛直・方位計測結果

	水平[°]	鉛直[°]	方位[°]
浮石部①	0.0	0.4	230
基盤部②	0.0	-1.1	227
基盤部③	0.0	-0.4	228

4.1 センサ適用方法の検討

対象岩塊の基盤部に 2 台の加速度センサを設置し、両センサで同様の振動計測結果が得られることを確認した。基盤部②と基盤部③において(図5参照)計12回の計測を実施した。計12回の代表として図6に、計測時間60秒(以下、[NOR (normal data)]とする)におけるX方向の(a)加速度の時刻歴、(b)速度の時刻歴、(c)加速度のFFT解析結果を示す。はじめに、図6に示す(a)加速度の時刻歴において、本来想定される岩塊の振動記録とは異なるセンサ特有のゆっくりと加速度が上昇するドリフト現象(以下、「ドリフト」とする)が観察された。この現象は程度の差はあるものの、全12回の計測において一貫して確認された。また、(b)の速度の時刻歴においても、速度が大きく変化する結果が示された。岩塊はその場に小さく振動しており、一方向にゆっくりと速度が変化していく挙動は不自然と考えられる。つまり、本来の岩塊が持つ振動とは異なる外的要因による影響であると考ええる。さらに、(c)加速度のFFT解析の結果において、低周波成分が多く含まれおり、緩やかに変動するドリフトの存在が確認できる。なお、調査対象以外の岐阜大学校内においても計測を実施し、いずれの環境下においてもドリフトを確認した。以上の結果から、センサ間の個体差に起因するドリフトを考慮したデータ処理が必要であり、本研究では2段階の検討を行った。

第一に、60秒間の計測データから、目視によってドリフトが最も少ない20秒間の選定を実施した。この検討は、緒方ら²⁾の研究において計測時間が20秒に設定されていることを参考としている。図6に示した60秒間の計測結果のうち、30秒から50秒の区間を抽出し、再解析した結

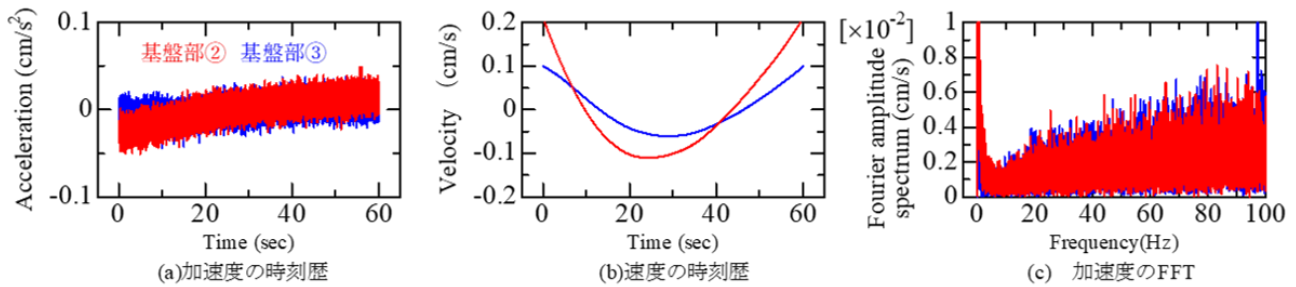


図 6 計測時間60秒の結果：[NOR]

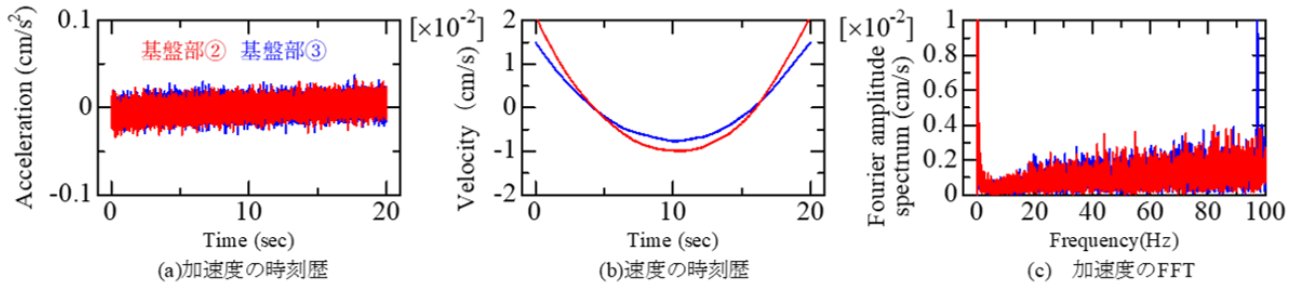


図 7 計測時間20秒選定後の結果：[CUT]

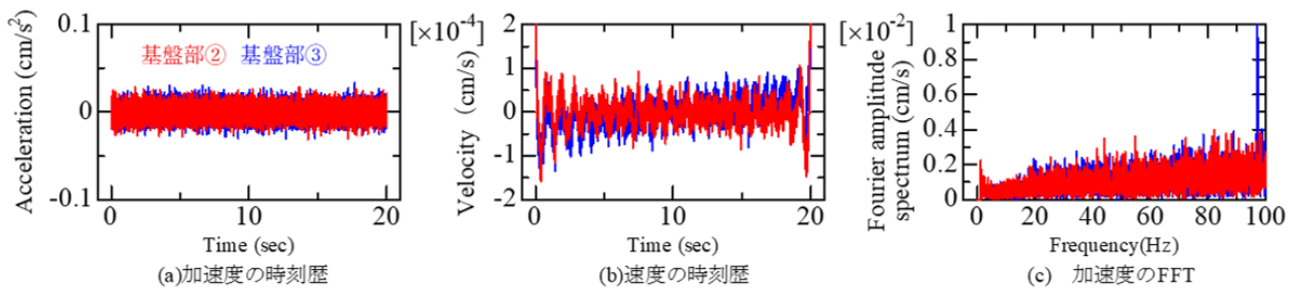


図 8 ハイパスフィルタ2Hz 適用後の結果：[HPF]

果（以下，[CUT (cut data)]とする）を図 7 に示す。(a)加速度の時刻歴と、図 6 に示す NOR の同項目を比較すると、視覚的にドリフトは確認されなかった。また、(b)速度の時刻歴においても、振幅は約 1/10 程度まで減少しており、ドリフトの適用方法として、20 秒間の抽出が一定の効果を有することが示された。一方で、依然として速度には不自然な変化が存在しており、完全な補正には至っていないことが確認された。(c)加速度の FFT 結果から、20 秒抽出後も低周波成分が多く含まれており、可視的には確認しにくいドリフトが発生していることが確認された。

第二に、この低周波成分がセンサのドリフトに対応すると考え、ハイパスフィルタを用いた低周波成分の除去を実施した。具体的には、逆高速フーリエ変換（以下、「逆 FFT」とする）を用いる手法を採用した。本手法は、FFT 結果に基づき、事前に決めた周波数のフィルタリングを実施し、その後、周波数領域から得られたデータを再度時間領域に変換するものである。図 7 に示した 20 秒間の抽出結果に対して、ハイパスフィルタを 2Hz として適用した解析結果（以下，[HPF (high pass filter)]とする）を図 8 に示す。(a)加速度の時刻歴は CUT と同様に視覚的なドリフトは確

認されなかった。また、(b)速度の時刻歴を NOR および CUT と比較すると、波形に明らかな差異が認められ、特に振幅は CUT と比較しても 1/100 程度まで低減し、岩塊がその場で小さく振動している挙動を得ることができた。(c)加速度の FFT から 2Hz 以下が除去されていることがわかる。

最後に、NOR、CUT、HPF の解析結果における RMS 速度振幅比を表 3 に示す。NOR における RMS 速度振幅比は 1.92 を示し、同一基盤上での計測にもかかわらず約 2 倍も速度振幅比に差が生じた。次に、CUT 処理における RMS 速度振幅比は 1.36 を示し、NOR と比較して 1.0 に近づいたことが確認された。さらに、HPF 処理における RMS 速度振幅比は 1.05 を示し、1.0 に極めて近い値を示した。以上より、計測時間 20 秒間の抽出および逆 FFT によるハイパスフィルタ適用の有効性が示された。

表 3 図 6-8 における RMS 速度振幅比の算出結果

	RMS 速度振幅比
NOR	1.92
CUT	1.36
HPF	1.05

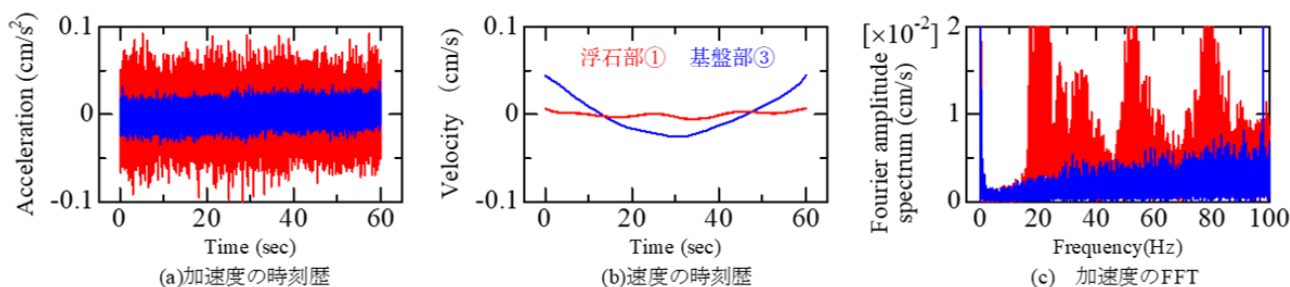


図 9 計測時間60秒の結果：[NOR]

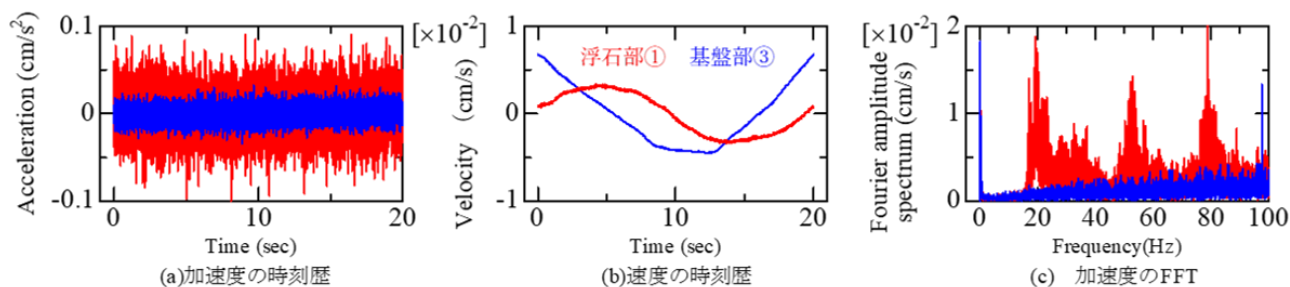


図 10 計測時間20秒選定後の結果：[CUT]

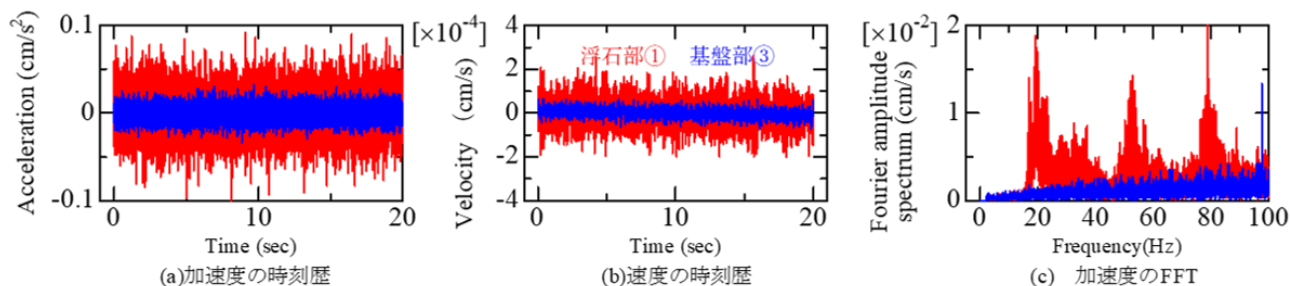


図 11 ハイパスフィルタ2Hz 適用後の結果：[HPF]

4.2 落石危険度振動調査

次に、浮石部と基盤部にセンサをそれぞれ設置し、前節で示した方法に基づいて、対象岩塊の落石危険度振動調査を行った。具体的には、浮石部①と基盤部②③において(図 5 参照)計 19 回の計測を実施した。計 19 回の代表として、図 9 に計測時間 60 秒 (以下、[NOR]) における、X 方向の(a)加速度の時刻歴、(b)速度の時刻歴、(c)加速度の FFT を示す。赤色の波形が浮石部①、青色の波形が基盤部③の計測結果を示す。(a)加速度の時刻歴より、基盤部と比較し浮石部における振幅が大きいことが確認された。一方で、(b)速度の時刻歴においては、センサが有するドリフトの個体差に起因して、浮石部よりも基盤部の速度が大きく示された。(c)加速度の FFT 解析から、低周波成分の卓越が確認されている。

次に、図 9 に示した 60 秒間の計測結果のうち、20 秒から 40 秒の区間を抽出し再解析した結果 (以下、[CUT]とする) を図 10 に示す。(a)加速度の時刻歴、(b)速度の時刻歴、(c)加速度の FFT のいずれにおいても、NOR と同様の傾向が確認された。ただし、加速度の可視的なドリフトは減少し、速度の振幅も減少傾向が示された。

最後に、図 10 に示した 20 秒間の抽出結果に対して、ハ

イパスフィルタ 2Hz を適用した解析結果 (以下、[HPF]とする) を図 11 に示す。図 11 に示す(a)加速度の時刻歴は、NOR と同様の傾向が確認された。一方、(b)速度の時刻歴は、NOR および CUT と比較して速度が大幅に抑制されており、岩塊が本来有する振動特性が明瞭に示されていると考えられる。このことから、ハイパスフィルタの有効性が確認できる。

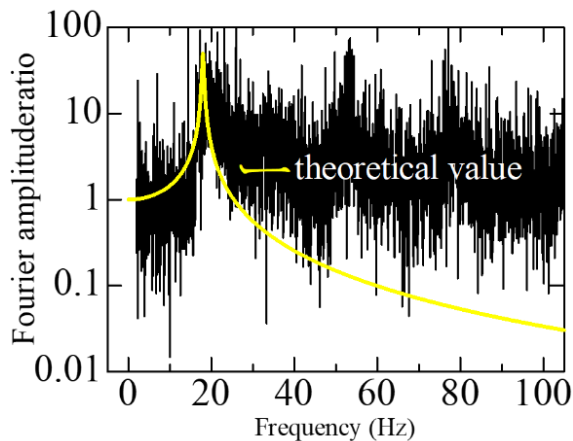
次に、NOR、CUT、HPF の解析結果における RMS 速度振幅比を表 4 に示す。NOR における RMS 速度振幅比は 0.14 を示し、浮石部の加速度が明らかに大きいにもかかわらず、基盤部が浮石部の速度を上回るという逆転が生じている。次に、CUT においては RMS 速度振幅比が 0.66 を示し、程度は減少したが、NOR と同様に逆転が生じている。一方、HPF における RMS 速度振幅比は 3.17 を示し、基準値の 2.0 以上の値を示す結果が得られた。以上の結果から

表 4 図 9~11における RMS 速度振幅比の算出結果

	RMS 速度振幅比
NOR	0.14
CUT	0.66
HPF	3.17

も、本センサ適用において CUT と HPF という 2 つの処理の有効性が示された。

また、図 11 の HPF の解析結果における周波数応答関数を図 12 に示す。図中の黄色の線は、モデルの逆解析により得られた理論値を重ね合わせたものである。図 12 では、卓越箇所が 3 か所確認され、そのうち最も低い周波数帯域に対して、モデルの逆解析により得られた理論値を適用した。その結果、卓越周波数 18Hz、減衰定数 0.01 が得られ、当該岩塊は不安定と判定された。



(d) 周波数応答関数

図 12 図 11 の HPF 結果における周波数応答関数

4.3 落石危険度判定図

浮石部および基盤部にセンサを設置して実施した全 19 回の計測結果を危険度判定図により図 13 および図 14 に示す。計測時間 20 秒の抽出およびハイパスフィルタ 2Hz の適用により得られた結果から作成したものである。はじめに、落石危険度判定図より RMS 速度振幅比には全体としてばらつきが見られた。このことから、信頼性の高い評価を実施するためには、単回の計測ではなく、複数回の計測が必要であると言える。計測データにばらつきが生じることは、対象が自然環境である以上不可避な不確実性に起因するものと考えられる。図 13 に示す、RMS 速度振幅比と卓越周波数における落石危険度判定図においては、X 方向の結果がほぼ全ての不安定領域に分布しており、当該岩塊の X 方向の不安定性が強く示された。著者らは調査前に Z 方向が主観的に最も不安定と予想していたが、この判定は異なる結果であった。したがって、3 成分のセンサを用いることで、目視では判断しにくい評価が可能になると言える。また、Y 方向および Z 方向においても、多くのデータが不安定領域あるいはその周辺に分布しており、3 方向いずれにおいても不安定の兆候が確認された。図 14 に示す RMS 速度振幅比と減衰定数における落石危険度判定図においても同様であり、X 方向の結果は不安定領域に集中し、Y、Z 方向においても同様の傾向が確認された。これらは、落石対策便覧に基づく安定度評価と一致し、本センサの落石危険度振動調査への有効性が示された。

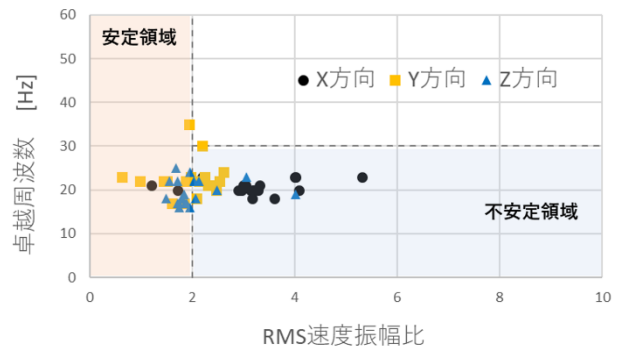


図 13 落石危険度判定図 (RMS 速度振幅比-卓越周波数)

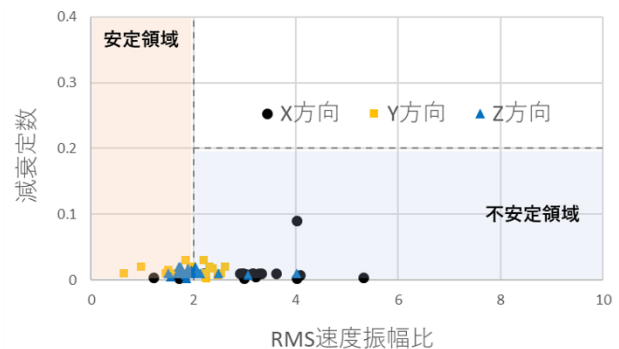


図 14 落石危険度判定図 (RMS 速度振幅比-減衰定数)

5. 結論および今後の課題

本研究では、岐阜県下呂市がんだて公園の岩塊を対象に、3 成分小型加速度センサを用いて、落石危険度振動調査を実施し、その適用方法について検討した。その結果、以下の 3 点が明らかとなった。

- 1) 同一基盤上での計測を実施した結果、本センサの個体差に起因する「ドリフト」現象が観察され、落石危険度評価への悪影響が確認された。この対策として、計測時間の適切な選定および低周波成分の除去を行うことで、適切な振動特性を明瞭に抽出することが可能となり、評価精度を向上させることができた。
- 2) 1)の方法に基づき、対象岩塊に対して落石危険度振動調査を実施した結果、対象岩塊は「不安定」と判定された。したがって、調査前に得られていた落石対策便覧に基づく安定度評価と本研究における落石危険度振動調査による評価は一致した。
- 3) 著者らが調査前に目視により不安定と予想していた方向とは異なる方向で不安定と判定された。したがって、3 成分加速度センサを用いることで、目視では判断しにくい方向別の評価が可能となり、その有効性も示唆された。

今後は、他の岩塊への適用事例を増やし計測データを蓄積し、統計的手法により判定傾向を分析することで、判定精度の向上を図る。また、引き続き最適なフィルタリング周波数の設定やドリフトへの適切な適用方法の検討を行

う。最終的には、測定から危険度判定までの自動システムを構築し、安全かつ実用性の高い落石評価手法の確立を目指す。

謝辞

馬瀬建設株式会社の角脇陸大氏には現地計測におけるセンサ設置などの準備においてご協力頂いた。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，丸善出版，p-59, pp. 331-333, 2017.
- 2) 緒方健治，松山裕幸，天野淨行：振動特性を利用した落石危険度の判定，土木学会論文集，No. 749/VI- 61, pp. 123-135, 2003.
- 3) 藤田鶴也，瀧澤嘉男：落石危険度振動調査法の応用利用—岩盤接着工の対策効果確認—，全地連「技術 e-フォーラム2009」松江, pp. 1-2, 2009.
- 4) 藤原 優，三塚 隆，久田裕史，竹本 将：岩塊の長期振動モニタリングによる安定性評価に関する考察，土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 75, No. 4, pp. 415-429, 2019.
- 5) LOGICALPRODUCT：「高精度ワイヤレス加速度センサ」，型番[LP-WS92-EACS01-2]，入手先<<https://lp-d.co.jp/list/detail/6>> （参照 2025.7.3）