

レーザー波干渉装置を用いた亀裂性岩塊の安定性調査法の確立

岐阜大学 学生会員 ○野々山栄人
国際会員 沢田和秀
国際会員 八嶋 厚
国際会員 馬 貴臣
学生会員 山崎智久

1. はじめに

日本には険しい山が数多く存在し、各地で斜面災害が発生している。これらの斜面災害の中で、落石は最も発生頻度が高く、国・県道などでは数多くの落石危険箇所が選定されている。既存の落石安定度評価法は、専門家による地形地質踏査、地形図や空中写真による地形判読などに基づいて実施されている。地形地質踏査や地形判読では、専門家の判断に委ねられるところが大きく、浮石や転石(以下、浮石部)の定量的な評価が困難である。そこで、地形地質踏査や地形判読を補足するものとして、落石危険度振動調査法(旧 JH 方式)¹⁾が開発された。この調査法は、斜面上の個々の不安定岩塊の落石発生危険度をよりの確に評価するために用いられる。しかし、浮石部と基盤部に直接地震計を設置しなければならないため、計測に手間や費用がかかるだけでなく、計測器の設置および計測時に大きな危険が伴う。このため、落石安定度を定量的かつ客観的に判断でき、浮石部および基盤部の微動をより安全で効率的に計測できる手法が必要である。

近年になって、遠隔から構造物の振動を計測する手法として、レーザードップラー速度計(以下 LDV)を用いた手法(以下、非接触型計測)が提案された。LDV は、対象物にレーザー光を照射し、その反射光を受信することにより、遠隔から対象物の振動を計測することが可能である。この LDV は、センサと計測対象間の相対速度を検出するため、測定記録には LDV の振動成分も含まれる。そのため、屋外で振動計測を行う場合、LDV と三脚からなる系の固有振動や地盤に入力される各種ノイズ振動および風などの影響を無視することができない。上半ら^{2),3)}によって、LDV と等価な感度を有する接触型の微動センサを LDV に取り付けて、LDV 本体の振動速度を同時に計測し、その計測記録を用いて LDV 本体の振動の影響を除去する手法が提案された。本研究では、遠隔から亀裂性岩塊の振動を計測するために、LDV 本体の振動の影響を除去する技術を取り入れた構造物診断用非接触振動測定システム「U ドップラー」³⁾(レーザー波干渉装置、以下 LD)を使用した。従来の地震計を用いて直接振動を計測する手法(以下、接触型計測)に比べ、非接触型計測では、照射した光を反射させるターゲットを対象物に貼るだけで、対象物の振動を計測することが可能である。そのため、効率的かつ安全に計測することができる。しかしながら、非接触型計測では、レーザー照射方向のみの対象物の動きを計測するため、三次元的な動きを一度に計測することができない。そのため、非接触型計測による多次元計測に関する研究^{4),5)}も行われている。

本研究では、LD による亀裂性岩塊の安定度の評価方法や評価基準を確立することを目的としている。本報告では、亀裂性岩塊に対して、LD と地震計を用いて同期計測を行い、従来の接触型計測による計測結果と非接触型計測による計測結果を比較し、検討を行った。そして、得られた結果から亀裂性岩塊の安定度評価に適用できるか検討した。

2. 落石危険度振動調査法

落石危険度振動調査法¹⁾は、斜面上の浮石部と基盤部にそれぞれ地震計を設置し、計測対象物の振動を計測することにより、浮石部と基盤部の振動特性を分析し、浮石部の安定性を定量的に評価する手法である。

図-1 に地震計を利用した計測のイメージ図を示す。図-1 に示したように、浮石部の振動を計測する地震計は、落石の可能性のある岩体に設置する。基盤部の振動を計測する地震計は、落石後も残る岩盤あるいは地盤に設置する。地震計の設置位置は、浮石部にできるだけ近い箇所とし、地震計間の距離は10m 以内とする。地震計による計測で得られた振動特性のうち、危険度判定には、RMS(Root Mean Square)速度振幅比 R と卓越周波数および減衰定数を用いる^{1),6),7)}。卓越周波数と減衰定数については、速度時刻歴から逆解析を介して算出する。

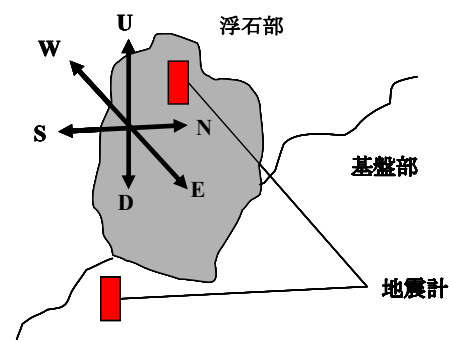
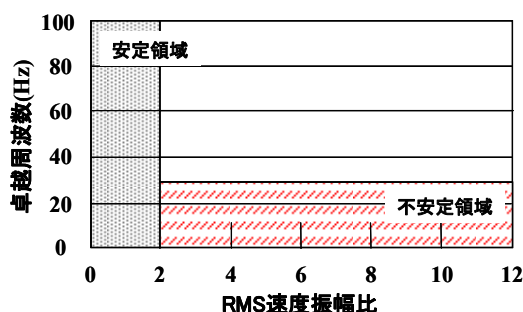


図-1 地震計を利用した計測(イメージ)

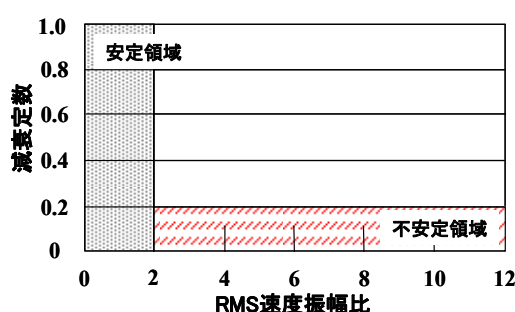
表-1 に、この3つの判定項目および判定基準についてそれぞれ簡単にまとめる。このRMS速度振幅比と卓越周波数および減衰定数を組み合わせて評価することで、浮石部の危険度を判定することができる。図-2 にRMS速度振幅比－卓越周波数、RMS速度振幅比－減衰定数から得られる判定図をそれぞれ示す。

表-1 落石危険度振動調査法の判定基準¹⁾

判定項目	判定基準
RMS速度振幅比 $R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 / n}{\sum_{i=1}^n X_i^2 / n}}$ X_i は基盤部の振幅値、 Y_i は浮石部の振幅値、 n はデータ数 浮石部が基盤部に対して、どの程度の大きさで揺れているかを表す	RMS速度振幅比が2以上である場合、浮石部が基盤部より大きな振幅で揺れており、危険であると判断できる
卓越周波数 フーリエスペクトルを求めた際、スペクトル密度が極大になる周波数 落石危険度振動調査法では、浮石部の卓越周波数に着目する	卓越周波数が30Hz以下である場合、浮石部が長い周期で揺れており、危険であると判断できる
減衰定数 揺れの減衰の程度を表す	減衰定数が0.2以下の場合、浮石部の揺れが減衰しにくく、長い間揺れていることを示し、危険であると判断できる



(a) RMS速度振幅比－卓越周波数



(b) RMS速度振幅比－減衰定数

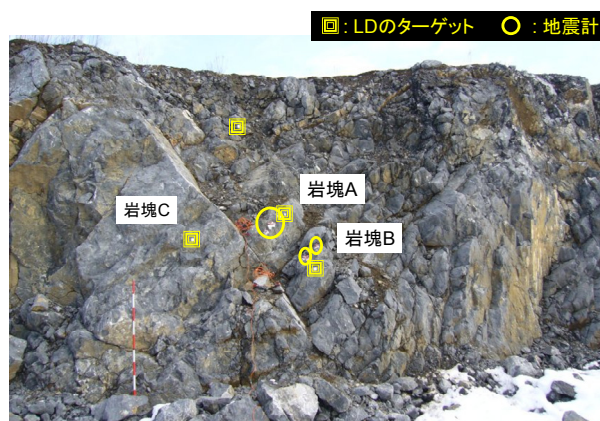
図-2 落石危険度振動調査法の判定図

3. 現場計測概要

写真-1 に示す亀裂性岩塊に対して、地震計による計測(以下、計測1)、1台のLDと地震計による計測(以下、計測2)および2台のLDと地震計による計測(以下、計測3)を行った。以下に、各計測の概要をまとめる。

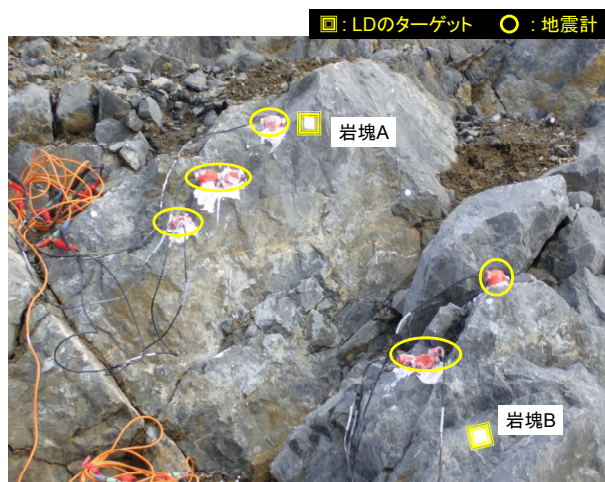
3.1 計測1

LDによる非接触型計測は、レーザー照射方向の振動を計測することにより安定性の判定を行うため、評価対象とする岩盤、転石および浮石の形状や周辺地形



(a) 全体図

写真-1 計測対象およびターゲット・地震計の設置箇所



(b) 拡大図 (計測 1 および計測 2)



(c) 拡大図 (計測 3)

写真-1 計測対象およびターゲット・地震計の設置箇所

に応じた適切な計測方向を見出す必要がある。そこで、従来から実施されている地震計を用いた接触型計測で得られる 3 方向成分の計測結果と比較し、岩の形状や周辺地形に基づく最適な計測方向を検討した。

落石危険度振動調査法にならない、写真-1(a)(b)に示すくさび型すべりが想定される亀裂性岩塊(岩塊 B)および基岩と想定した岩塊(岩塊 A)について、4.5Hz の地震計(鉛直の方向成分)および 28Hz の地震計(水平、前後、鉛直の 3 方向成分)を用いて計測を実施し、結果の整理を行った。図-3 に地震計の計測方向のイメージ図を示す。ここで、4.5Hz および 28Hz の地震計とは、固有周波数 4.5Hz および 28Hz の地震計である。表-2、表-3 にデータロガーのチャンネル内容、データ収録装置(地震計)の設定をそれぞれ示す。計測は、静寂な環境での常時微動と、起振機を用いて振動を加えた場合について、それぞれ 5 回ずつ計測を行った。亀裂性岩塊および基岩をそれぞれ計測し、得られた結果から、RMS 速度振幅比・卓越周波数・減衰定数を算出した。

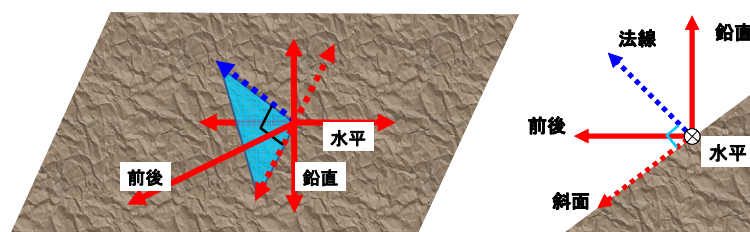


図-3 地震計の計測方向(イメージ)

表-2 データロガーのチャンネル内容一覧表

チャンネル番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
設置位置	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LD下
地震計	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.5Hz
方向	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	鉛直
チャンネル番号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
設置位置	岩塊A				岩塊B				-	-	-	-
地震計	4.5Hz	28Hz			4.5Hz	28Hz			-	-	-	-
方向	鉛直	鉛直	前後	水平	鉛直	鉛直	前後	水平	-	-	-	-

表-3 データ収録装置(地震計)の設定

サンプリング周波数 [Hz]	500
データ数	16384
プレトリガー	OFF

3.2 計測 2

写真-1 で示した現場で、岩塊 A、B を対象とし、LD と地震計の同期計測を実施し、得られた計測結果を比較した。LD のターゲットと地震計の設置箇所を写真-1(a)(b)に示した。表-4 にデータ収録装置(LD)の設定を示す。データ収録装置(地震計)の設定は表-3 に示した。比較に用いた地震計は、岩塊 A、B とともに、レーザ照射方向と同一方向である前後方向の地震計を用いた。計測では、1 台の LD を用いて行ったため、岩塊 A、B の LD による同期計測を実施できなかった。そのため、計測結果から、フーリエスペクトルを求め、地震計の計測結果と比較した。なお、LD から得られるフーリエスペクトルの縦軸は、フーリエ振幅である。一方、4.5Hz と 28Hz の両地震計から得られるフーリエスペクトルの縦軸は、振幅レベルである。これは、速度振幅(LD)と電圧振幅(地震計)をそれぞれフーリエ変換しているため、異なる値となっている。そこで、卓越周波数とフーリエスペクトルの形状の 2 項目に着目し、LD と地震計による計測結果を比較した。

表-4 データ収録装置 (LD) の設定

サンプリング周波数	[Hz]	500
計測時間	[sec]	35
速度出力レンジ	[mm/sec]	2
補正出力レンジ	[mm/sec]	2
HPF(ハイパスフィルタ)	[Hz]	OFF
LPF(ローパスフィルタ)	[Hz]	OFF

3.3 計測 3

落石危険度振動調査法¹⁾では、計測対象物である浮石部と安定な基盤部の振動特性を同時に計測し、比較することで、浮石部の安定性評価を行う。本研究でも、写真-1 で示した現場で、2 台の LD を用いて、浮石部と基盤部の振動特性を同期計測し、地震計の結果と比較した。写真-1(c)に示すくさび型すべりが想定される亀裂性岩塊(岩塊 A・岩塊 B)および安定した基岩と想定した岩塊(岩塊 C)について、LD、4.5Hz の地震計(鉛直方向)および 28Hz の地震計(水平、前後、鉛直 3 方向)で同期計測を実施した。表-5、表-6、表-7 にデータロガーのチャンネル内容、計測条件およびデータ収録装置(LD)の設定を示す。データ収録装置(地震計)の設定は表-3 に示した。今回の計測では、細かくデータを計測するために、LD のサンプリング周波数を 1000Hz に変更した。また、低周波成分を除去するために、HPF(ハイパスフィルタ)を使用した。計測は、静寂な環境での常時微動と、発電機および貫入試験機により振動を加えた場合について、亀裂性岩塊および基岩をそれぞれ 5 回ずつ計測した。得られた結果から、RMS 速度振幅比・卓越周波数・減衰定数を算出した。

表-5 データロガーのチャンネル内容一覧表

チャンネル番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
設置位置	岩塊C				岩塊B				岩塊A			
地震計	28Hz		4.5Hz		28Hz		4.5Hz		28Hz		4.5Hz	
方向	前後	鉛直	水平	鉛直	前後	鉛直	水平	鉛直	前後	鉛直	水平	鉛直
チャンネル番号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
設置位置	LD下				-	-	-	-	-	-	-	-
地震計	28Hz		4.5Hz		-	-	-	-	-	-	-	-
方向	前後	鉛直	水平	鉛直	-	-	-	-	-	-	-	-

表-6 計測条件

ケース	計測対象		試験条件
	LD1	LD2	
1	岩塊A	岩塊C	常時微動
2	岩塊B		
3	岩塊A		
4	岩塊B		発電機
5	岩塊A		
6	岩塊B		
			発電機+貫入試験

表-7 データ収録装置 (LD) の設定

サンプリング周波数	[Hz]	1000
計測時間	[sec]	35
速度出力レンジ	[mm/sec]	0.4
補正出力レンジ	[mm/sec]	0.4
HPF(ハイパスフィルタ)	[Hz]	0.2
LPF(ローパスフィルタ)	[Hz]	OFF

4.計測結果

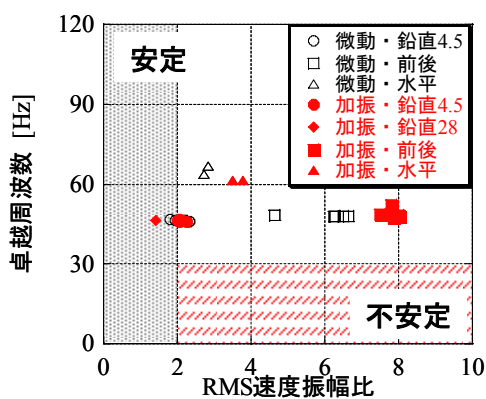
以下に、計測 1、計測 2 および計測 3 で得られた結果をまとめる。

4.1 計測 1

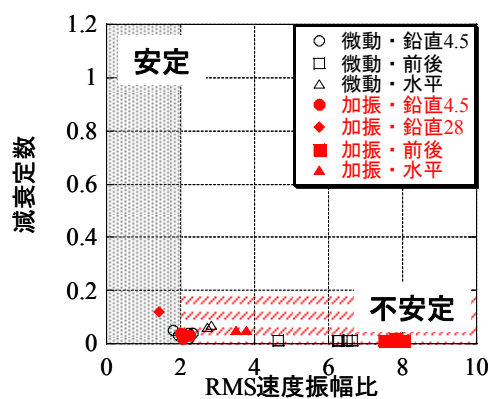
表-8 に水平、前後、鉛直の 3 方向の亀裂性岩塊と基岩の速度時刻歴から得られる RMS 速度振幅比を示す。また、図-4 に常時微動と加振させた場合の判定図を示す。表-8 から、鉛直や水平方向の RMS 速度振幅比に比べて、くさびが滑ろうとする前後方向の RMS 速度振幅比がかなり大きいことがわかる。また、図-4 の判定図からも同様に、前後方向を計測した結果が最も不安定であることがわかる。くさび型のような不安定形態を示す岩塊については、最も滑りやすい方向の RMS 速度振幅比を測定することで、岩盤の安定性評価ができることがわかる。一般的に、亀裂性岩塊で岩塊が滑りやすい方向は、斜面を平面仮定した場合、その法線方向から鉛直方向にかけてである(表-8 の斜線箇所)。つまり、斜面に正対した方向の振動を計測するのが、最も不安定性を評価するのに適していると言える。

表-8 RMS 速度振幅比

試験条件	地震計回数	4.5Hz	28Hz		
		鉛直方向	鉛直方向	前後方向	水平方向
常時微動	1回目	1.80	1.45	4.63	2.45
	2回目	1.95	1.56	6.25	2.77
	3回目	2.21	1.66	6.63	2.83
	4回目	2.21	1.56	6.51	2.73
	5回目	2.33	1.66	6.28	2.01
起振機による加振	1回目	2.01	1.42	8.01	3.77
	2回目	2.06	1.46	7.51	3.49
	3回目	2.05	1.42	7.85	3.54
	4回目	2.25	1.46	8.04	3.52
	5回目	2.13	1.43	7.80	3.43



(a) RMS速度振幅比－卓越周波数



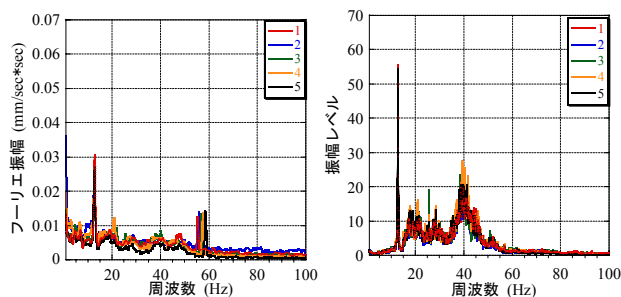
(b) RMS速度振幅比－減衰定数

図-4 判定図

4.2 計測 2

図-5～図-8 に常時微動と加振させた場合の岩塊 A、B のフーリエスペクトルをそれぞれ示す。図中の凡例は、計測回数である。今回行った LD による計測は、斜面にほぼ正対した方向から計測を行った結果である。図-5、図-6 に示すように、LD を用いた岩塊 A の計測では、常時微動、加振させた場合の両ケースともに、明確な卓越周波数が確認できず、地震計の結果とも一致しなかった。一方、図-7、図-8 に示すように、LD を用いた岩塊 B の計測では、40Hz と 50Hz 付近で明確な卓越周波数が確認できた。地震計でも、同一の周波数での卓越が確認でき、フーリエスペクトルの形状もほぼ一致している。岩塊 A の結果(図-5、図-6)と岩塊

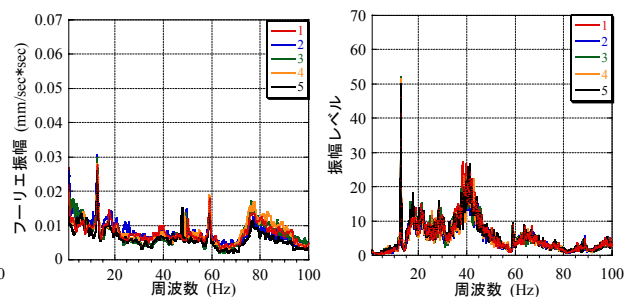
B(図-7、図-8)の地震計の計測結果を比較すると、岩塊 B の卓越した周波数の振幅レベルの値が岩塊 A より約 10 倍近く大きかった。今回の LD の計測結果では、フーリエ振幅の値が 0.05mm/sec*sec を超えた場合は地震計とほぼ一致した傾向が得られた。よって、ある程度以上の変位振幅であれば、LD でも十分に計測可能であることがわかった。また、斜面に正対した方向からの計測で、安定性を評価できることがわかった。



(a)LD

(b)地震計

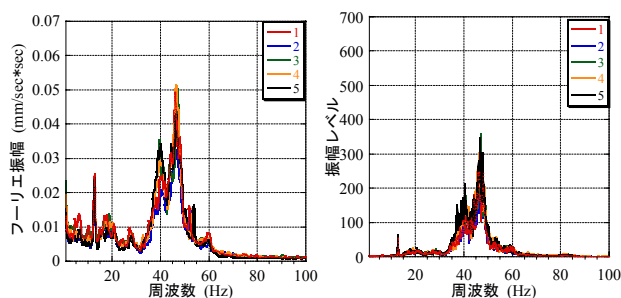
図-5 岩塊 A のフーリエスペクトル(常時微動)



(a)LD

(b)地震計

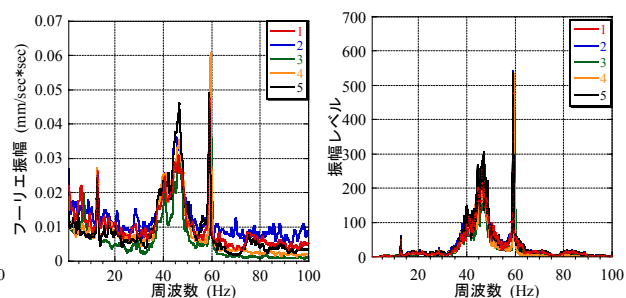
図-6 岩塊 A のフーリエスペクトル(加振)



(a)LD

(b)地震計

図-7 岩塊 B のフーリエスペクトル(常時微動)



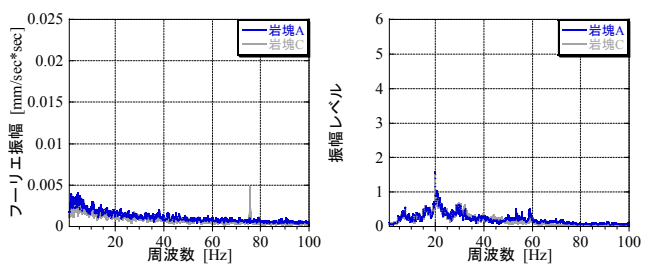
(a)LD

(b)地震計

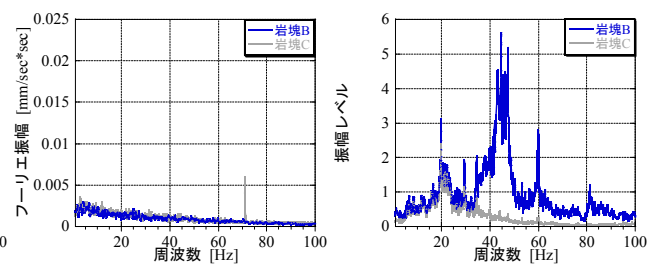
図-8 岩塊 B のフーリエスペクトル(加振)

4.3 計測 3

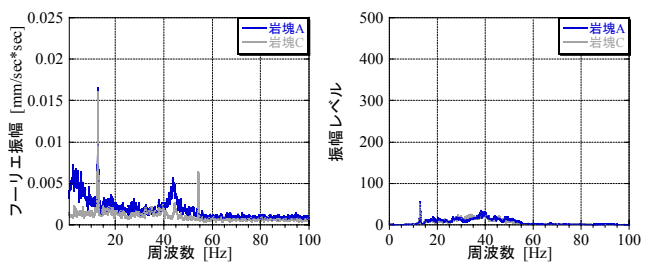
図-9～図-14 に各ケースで得られたフーリエスペクトル(1 回目)を示す。図-9、図-10 の LD による常時微動計測では、変位振幅が小さく、明確な卓越周波数が得られなかった。図-12、図-14 の岩塊 B では、LD と地震計で、45Hz と 60Hz 付近で周波数が卓越したことやフーリエスペクトルの形状がほぼ一致していることが確認できた。図-13 の岩塊 A でも、LD と地震計で、60Hz 付近で周波数が卓越することが確認できた。岩塊 A と岩塊 B の結果で、地震計の振幅レベルの値が約 80 を超えた場合や、LD のフーリエ振幅の値が 0.005mm/sec*sec を超えた場合に、LD と地震計がほぼ一致した傾向が得られた。岩塊 C は、岩塊 A と同様のフーリエスペクトルが得られたことから、同一の振動特性を有していると考えられる。すべての計測においてほぼ同様の結果が得られた。図-15 にケース 6 の判定図を示す。卓越周波数、減衰定数ともに、LD と地震計で同程度の値を示した。RMS 速度振幅比の値に関しては、LD と地震計で実際に得られるデータの種類の異なるため、RMS 速度振幅比の値に差異が生じたと考えられる。今後は、同じ単位基準で計測結果の比較を行う必要がある。なお、ケース 1、3、5 の LD と地震計およびケース 2、4 の LD では、逆解析の結果、卓越周波数と減衰定数を算出できなかった。また、今回の計測では、発電機と貫入試験機により加振を行った。図-11～図 14 に示すように、加振方法の違いによって、計測結果に違いが生じたことは明らかである。今後は、加振力・加振箇所・振動の種類など、種々の考慮すべき項目が考えられる。今後、詳細に検討することによって、最適な加振方法を選択できるようにする必要がある。



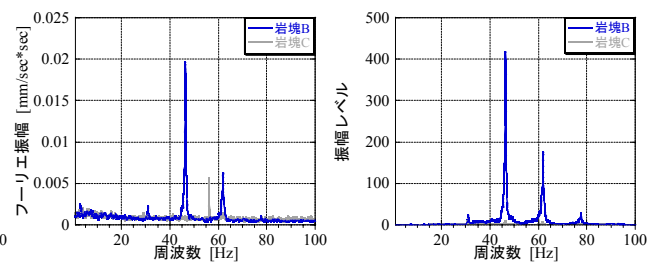
(a) LD (b) 地震計
図-9 ケース 1 のフーリエスペクトル



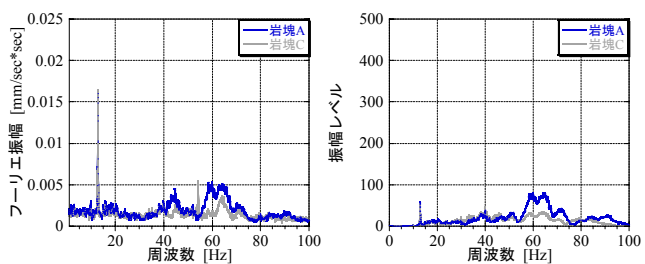
(a) LD (b) 地震計
図-10 ケース 2 のフーリエスペクトル



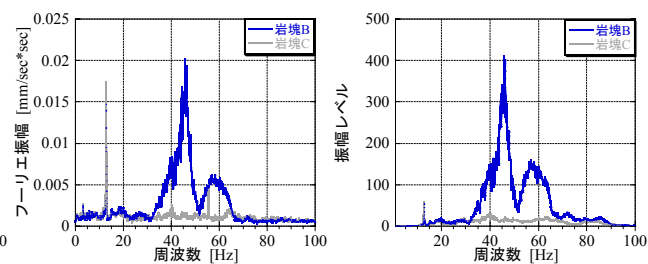
(a) LD (b) 地震計
図-11 ケース 3 のフーリエスペクトル



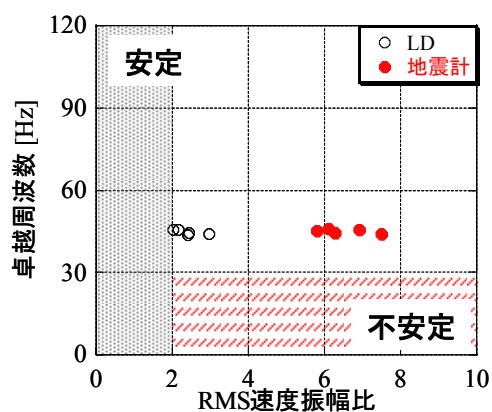
(a) LD (b) 地震計
図-12 ケース 4 のフーリエスペクトル



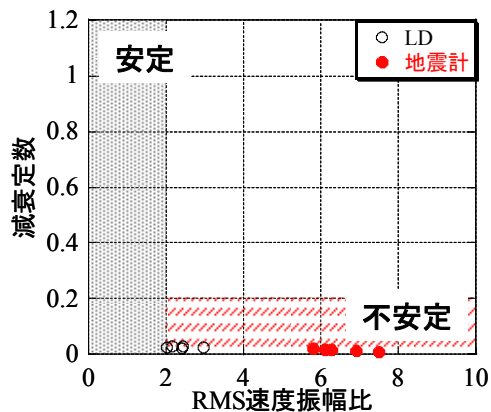
(a) LD (b) 地震計
図-13 ケース 5 のフーリエスペクトル



(a) LD (b) 地震計
図-14 ケース 6 のフーリエスペクトル



(a) RMS速度振幅比—卓越周波数



(b) RMS速度振幅比—減衰定数

図-15 判定図

5. まとめ

本報告では、同一の亀裂性岩塊に対して、3 種類の現場計測を実施した。まず、地震計を用いて、計測対象の滑りやすい方向を予測した。次に、1 台の LD と地震計の同期計測を実施した。さらに、2 台の LD と地震計の同期計測を実施した。LD と地震計を用いた計測では、従来の接触型計測による計測結果と非接触型計測による計測結果を比較し、検討を行った。LD を利用した亀裂性岩塊の安定性調査法は、現段階では、ある程度より小さい変位振幅を計測することは難しい場合があることがわかった。しかしながら、対象とした亀裂性岩塊および基岩を同じ振動で加振することによって、変位振幅を大きくし、地震計と同程度の精度で、安定性を評価できる可能性がある。以下に、得られた知見および今後の課題をまとめる。

- ・ くさび型のような不安定形態を示す岩塊については、最も滑りやすい方向を計測することで、岩盤の安定性評価ができることがわかった
- ・ LD を用いて、ある程度より大きい変位振幅を計測する場合、地震計のような接触型計測手法と同様に、計測対象物の卓越周波数を計測することが可能であることがわかった
- ・ 計測対象物付近を加振して変位振幅を大きくすることは、LD を用いた計測には有効である。しかしながら、加振する場所や方法などによって、計測に大きな影響を与える可能性があるため、加振方法を検討する必要がある
- ・ 地震計で収録される電圧データを振幅速度に変換し、同じ単位基準で計測結果を比較する必要がある

本研究で実施した LD による計測は、変位振幅を大きくすることで、高精度のデータを取得できる可能性が見出せた。さらに、種々の現場計測をテストし、実務に耐えうる計測手法に発展させ、亀裂性岩塊の安定性調査法を確立する予定である。

謝辞

本研究は、国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」事業の援助を受けて実施した。また、応用地質株式会社、住友大阪セメント株式会社、NPO 法人地盤防災ネットワーク村田芳信氏および岐阜大学客員教授浅野憲雄氏の協力を得て、現場計測を実施することができた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) JH 試験研究所 (2001): 落石危険度振動調査法調査マニュアル(案).
- 2) 上半文昭, 目黒公郎 (2003): 構造物診断を目的とした非接触微動測定法, 生産研究, 55 巻, 6 号, pp.585-590.
- 3) 上半文昭 (2007): 構造物診断用非接触振動システム「U ドップラー」の開発, 鉄道総研報告, 第 21 巻, 第 12 号, pp.12-22.
- 4) 宮下 剛, 藤野 陽三 (2007): レーザードップラー速度計を用いた三次元多点振動計測システムの開発, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No.4, pp.561-575.
- 5) 上半文昭 (2009): 構造物の非接触振動計測の効率化を図る, RRR, 第 66 巻, 第 2 号, pp.14-17.
- 6) 緒方健治, 松山裕幸, 天野淨行 (2003): 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, IV-61, pp.123-135.
- 7) 勘田益男, 宇賀田登, 荒井克彦, 中野秀明 (2007): 落石危険度調査法による岩接着効果の評価に関する模型および現場実験, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.3, pp.175-184.