



道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成 果 報 告 レ ポ ー ト
No. 20 - 4

研究テーマ

レーザー波干渉を利用した亀裂性岩塊の
遠隔からの安全な安定性調査法の確立

研究代表者： 岐阜大学准教授 沢田 和英
共同研究者： 岐阜大学准教授 馬 貴臣

平成 2 3 年 7 月

新道路技術会議

目次

概要（様式3の公表用資料）	1
第1章 序論	3
1.1 研究の概要と目的	3
1.2 研究の社会的背景	3
1.3 既存の亀裂性岩塊安定性調査法の整理	4
1.4 本報告書の構成	6
第2章 計測誤差について	7
2.1 作業の流れと誤差について	7
2.2 計測器本体の揺れによる誤差	8
2.3 反射光の量に関する誤差	9
2.4 計測システムによる誤差	9
2.5 空気の状態に関する誤差	10
2.6 気象条件に関する誤差	11
2.7 外部からの影響による誤差	14
2.8 まとめ	14
第3章 レーザー波干渉装置を利用した安定性調査法の適用可能性の検討	15
3.1 模型実験による適用可能性の検討	15
3.2 実岩盤斜面への適用事例	21
3.3 実岩盤斜面への適用事例	24
3.4 まとめ	40
第4章 レーザー波干渉を利用した安定性調査法の適用可能性の検討	41
4.1 実験条件	41
4.2 実験結果	42
4.3 まとめ	42
第5章 結論	45
参考文献・謝辞	46
謝辞	46
巻末資料	47

第1章 序論

1.1 研究の概要と目的

斜面災害のなかで、落石は最も頻度が高い。落石対策は、発生源対策と防護工に分けられる。自然災害に対する防災工事への費用投入が抑えられ続けている現状では、発生源対策を施しつつ、対処できない部分を防護工で補う合理的な対策が望まれる。本申請では、発生確率の高い落石の発生源対策に着目し、亀裂性岩盤の安定度評価を安全で効率的に調査する手法を提案する。

亀裂性岩盤斜面の安定性調査は、高感度地震計(速度計や加速度計)を直接岩盤に設置し、水平2方向と鉛直方向成分の計測結果から、振動解析を介して判定・評価を行うことが定量的な方法として一般的である。ところが、個々の不安定と思われる岩盤に接触し、計測器を設置し近距離で計測・調査することは大変危険であり手間もかかり、また、経費も高価である。図1.1のように不安定岩塊は、道路から見えにくく、現地に着くまであるいは現場での調査に危険が伴う。図1.2は、従来の地震計(速度計や加速度計)を利用した計測方法のイメージである。安定な基岩と不安定岩との微動応答の比較により調査する。安定な基岩を調査することも重要な調査であるが、基岩を決定するのもにも労力を必要とする。



図1.1 道路斜面上の不安定岩(イメージ)

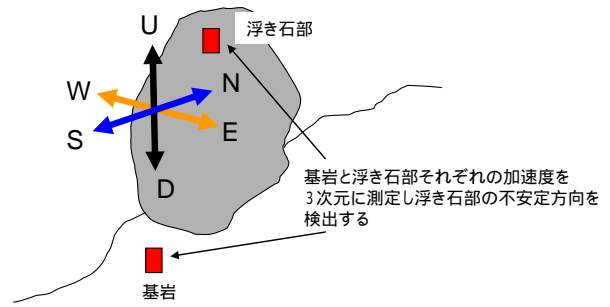


図1.2 加速度計を利用した計測方法(イメージ)

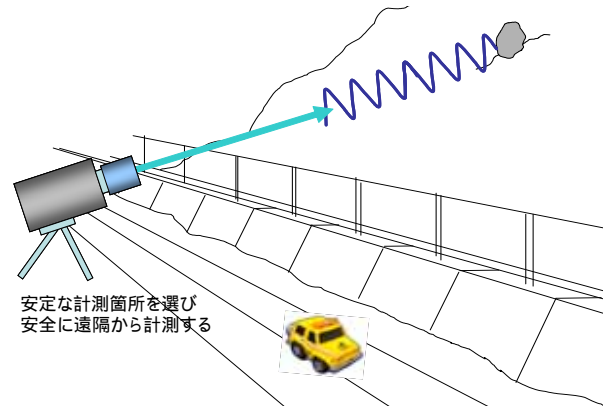


図1.3 本研究で提案する計測方法(イメージ)

これに変わる方法として、レーザー波のドップラー干渉を利用した岩盤の微動調査による安定性の評価法(以下、提案法)を提案する。遠隔から、非接触で亀裂性岩盤の安定度を安全に評価できる可能性が高い。本研究では、非接触の提案手法を用いて、亀裂性不安定岩塊の調査を行い、その適用性や適用範囲を整理する。また、従来の直接的な方法と比較することにより、提案調査方法の有効性を検討する。これらの成果により、不安定岩塊の非接触調査手法を確立する。

1.2 研究の社会的背景

亀裂性岩塊による災害の発生頻度及び現状の発生危険度について、全国の直轄国道の防災カルテ及び岐阜県管理道路の防災カルテを基に整理した結果を示す。表1.1は全国の直轄国道における要対策箇所数とカルテ対応箇所数である。同時に発生源対策が想定される要

対策箇所数と全体に対するその比率を示した。表1.2は中部地方整備局、表1.3は岐阜県の県管理道である。表中の数字は、管理項目のうち落石・崩壊もしくは岩盤崩壊のみに着目している。平成8年の総点検から平成18年までの10年間に、要対策箇所は減少している。しかしながら、ある箇所は定期点検業務などで、新たに要対策箇所として格上げされた場合もあり、対策による減少傾向は良好とは言えない。国および岐阜県が管理する道路斜面において、現状でも数多くの危険斜面が存在していることがわかる。また、対策工法として発生源対策を想定している箇所数もかなりの数であることが理解できる。表1.4には、月別降水量(平均値)と落石件数がまとめられている。この表より10月～1月といった渇水期の落石件数が少ないことがわかる。これは、落石は降雨を誘因として発生することが多いという事実を裏付けている。表2.6には、平成15年度～19年度の5年間ににおける落石災害にともなう対応費がまとめられている。県単事業費として4,658百万円にも及ぶことがわかる。これに、補助事業費7,310百万円を加えると、100億円を超える巨額が、災害復旧のために用いられていることがわかる。このように、落石の対策には多額の費用が必要であるとともに、未だ落石の発生が懸念される危険箇所は多く残されている。このような現状を研究の背景として、本研究では、レーザーを用いた不安定岩塊の調査法を提案するものである。提案する調査方法は既存の調査法に比べて経済性や効率性に優れていると考えられ、今後の亀裂性不安定岩塊の調査に対して有効な調査方法になる可能性がある。

表1.1 要対策・カルテ対応箇所数(全国)

直轄国道	要対策箇所数	カルテ対応箇所数	+	発生源対策が想定される要対策箇所数	発生源%
H8 総点検	4180	6407	10587	2995	28.3
H18 再点検	2226	6819	9045	1061	11.7
変化数	1954 減	412 増	1542 減	1934 減	16.6

表1.2 要対策・カルテ対応箇所数(中部地整)

直轄国道	要対策箇所数	カルテ対応箇所数	+	発生源対策が想定される要対策箇所数	発生源%
H8 総点検	453	630	1083	292	27.0
H18 再点検	326	790	1116	185	16.6
変化数	127 減	160 増	33 増	107 減	10.4

表1.3 要対策・カルテ対応箇所数(岐阜県管理道)

岐阜県	要対策箇所数	カルテ対応箇所数	+	発生源対策が想定される要対策箇所数	発生源%
H8 総点検	1637	2172	3819	238	6.2
H18 再点検	1317	2372	3689	193	5.2
変化数	320 減	200 増	130 減	45 減	1.0

表1.4 要対策・カルテ対応箇所数(岐阜県管理道)

月	降水量(H15～H18 平均) (mm)	発生件数(H15～H19 平均)
4	176	29
5	217	14
6	175	32
7	299	37
8	184	25
9	222	22
10	158	7
11	116	7
12	90	6
1	52	8
2	83	26
3	113	32

表1.5 年度別落石件数と県単対応費

年度	落石件数	県単落石対応費(千円)
H15	23	2,507,630
H16	50	200,000
H17	49	636,000
H18	61	1,095,000
H19	62	220,000

1.3 既存の亀裂性岩塊安定性調査法の整理

ここでは、既存の調査法(以下、従来法)について概略を説明するとともに、提案法との違いを整理する。

従来法である落石危険度振動調査法(旧 JH 方式)では、斜面上の浮石や転石などの不安定岩塊(以下、浮石部)と基盤部にそれぞれ地震計を設置し、雑振動または強制振動を計測することにより、浮石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。図 1.4 に地震計の設置状況の概略図を示す。図 1.4 に示すように、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の上部に設置する。基盤部の地震計は、落石後も残

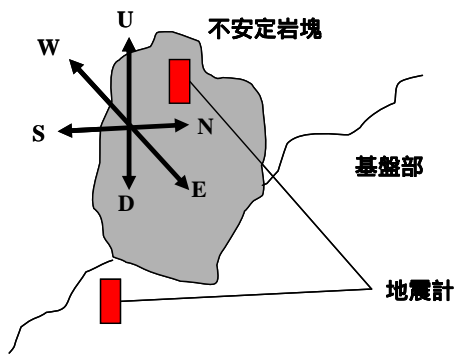


図 1.4 地震計の設置状況概略図

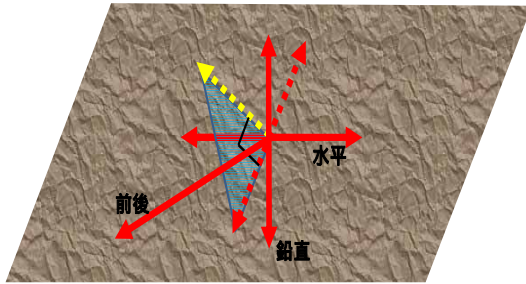


図 1.5 地震計の設置状況と計測方向

る岩盤あるいは地盤に設置する。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。この手法は、従来から行われている地質技術者による現地踏査などを補足するものとして、斜面上の個々の浮石・転石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。

従来法では、計測結果から得られる以下の3つの指標を用いて安定度の評価を行う。

- ・RMS振幅比
- ・卓越周波数
- ・減衰定数

これらの物理的な意味や算出方法は以下のとおりである。

•RMS速度振幅比

RMS速度振幅比とは、一定の時間内に計測された、基盤部と浮石部の振動の平均振幅の比であり、次式で表される。

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 / n}{\sum_{i=1}^n X_i^2 / n}} \quad (1.1)$$

ここで、 X_i および Y_i は基盤部および浮石部の振幅値であり、 n はデータ数である。図 1.6 に RMS 速度振幅比の評価方法のイメージ図を示す。RMS 速度振幅比は、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している。RMS 速度

振幅比の値が 2.0 より大きい場合、浮石部が基盤部より大きな振幅で揺れており、危険であると判断する。

•卓越周波数

卓越周波数とは、振動の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である。図 1.7 に卓越周波数の評価方法のイメージ図を示す。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。卓越周波数の値が 30Hz 以下である場合、浮石部が長い周期で揺れており、危険であると判断する。

•減衰定数

減衰定数は、揺れの減衰の程度を表す。図 1.8 に減衰定数の評価方法のイメージ図を示す。減衰定数の値が 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意味し、危険であると判断する。

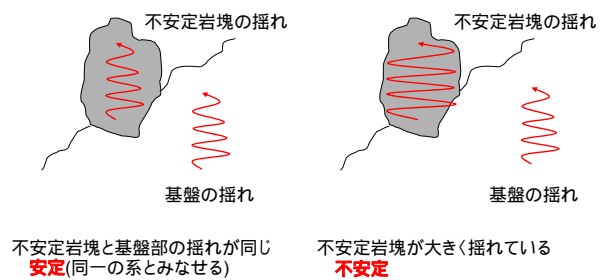


図 1.6 RMS 速度振幅比の評価方法のイメージ図

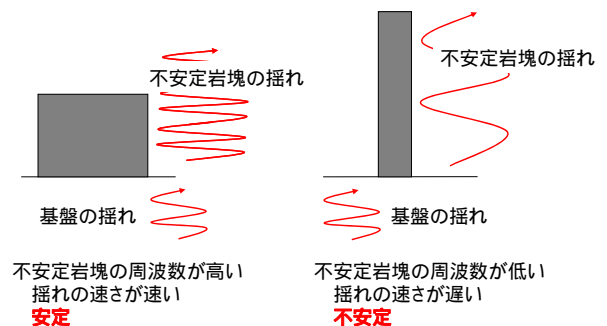


図 1.7 卓越周波数の評価方法のイメージ図

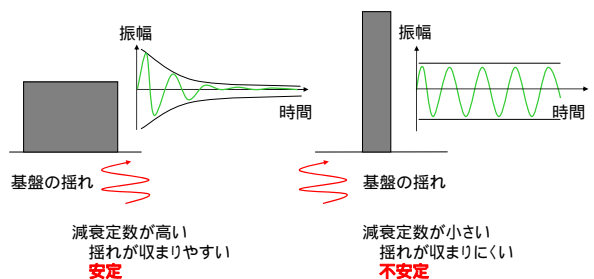


図 1.8 卓越周波数の評価方法のイメージ図

上記の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1.9と図1.10にRMS速度振幅比 - 卓越周波数、RMS速度振幅比 - 減衰定数の関係から得られる判定図をそれぞれ示す。各判定図において、安定領域と不安定領域が定義される。

表1.6は、従来法と提案法を、安全性、経済性、効率性の観点から比較して整理したものである。既存調査手法では、不安定な岩塊に直接接触し地震計を貼り付け、岩塊付近で計測を実施しなければならない。また、地震計の設置には養生期間がかかるものもある。一方、提案手法では、レーザーの反射を得ることができれば、危険な岩塊に接触する必要がないため、作業者の安全が確保される。レーザーの反射を得られない場合には、反射ターゲットを貼付けるか、反射用塗料を塗布するが、この場合の岩塊への接触時間はごく短時間ですむ。また、従来の方では、一箇所あたりの計測に対して最低90万円（その後地震計1箇所追加あたり45万円）の経費が必要となるが、提案手法を適用した場合、地震計を設置する時間等を節約でき、レーザーの反射さえ確保できれば、何力所でも短時間に計測が可能である。そのため、経費の面においても十分に優位で、効率的である。

1.4 本報告書の構成

本報告書2章では、計測誤差の原因について整理する。各種の検証から、影響の大きいと考えられる誤差の発生原因を抽出する。3章では、模型実験による検証事例と実岩盤への適用事例を示し、従来手法との比較を行うとともに、提案手法の適用範囲について言及する。4章では、従来の評価方法とは異なる方法で、提案手法による安定度評価の方法を提案する。5章では、本研究で得られた知見について整理

する。

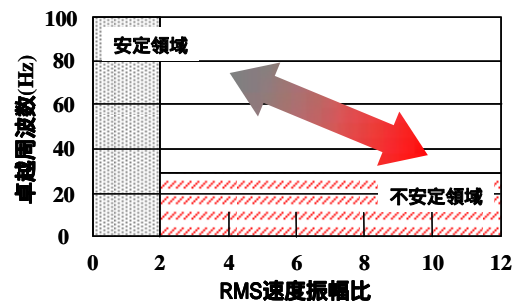


図1.9 判定図 (RMS 速度振幅比 - 卓越周波数)

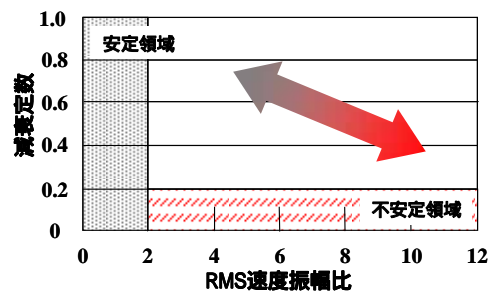


図1.10 判定図 (RMS 速度振幅比 - 減衰定数)

表1.6 既存手法と提案手法の比較

	既存手法	提案手法
安全性	不安定で危険かもしれない岩塊に直接計器を設置し、その近傍で計測を実施するため、常に危険である。	遠隔から安全に計測が可能である。信頼性のあるデータを得るために、反射材を貼り付けることが望ましいため、このときに唯一岩塊に直接接触する。
経済性	1箇所地震計を3点設置すると約90万円必要である。地震計1箇所追加すれば45万円加算されるため、非常に高価な計測方法である。	地震計を設置する必要がないため、レーザーの反射を得ることができれば、計測箇所を任意に設定できる。また、非接触であるため、地震計設置の養生のように準備に要する時間がきわめて短い。総じて、安全に多くのデータを得ることができ、経済性は非常に高い。
効率性	地震計を設置した箇所のみが計測可能である。地震計設置を伴うため、複数日以上現場作業が必要である。	調査箇所が特定でき、レーザーの反射を確保できれば、短時間で計測可能である。

第2章 計測誤差について

本研究の中で対象とする岩盤の揺れは、非常に振幅の小さいものであり、わずかな誤差やノイズが計測結果に大きな影響を与える。それが原因となり、計測結果の分析が困難となることも少なくない。そのため、本章では、計測誤差の原因について整理し、計測における留意点等をまとめる。

2.1 作業の流れと誤差について

図 2.1 は、提案法について、計測開始から安定度評価までの一連の流れを示したものである。図中で色分けされているように、大きく分類して、計測準備・計測・解析の3つの作業に分けられる。

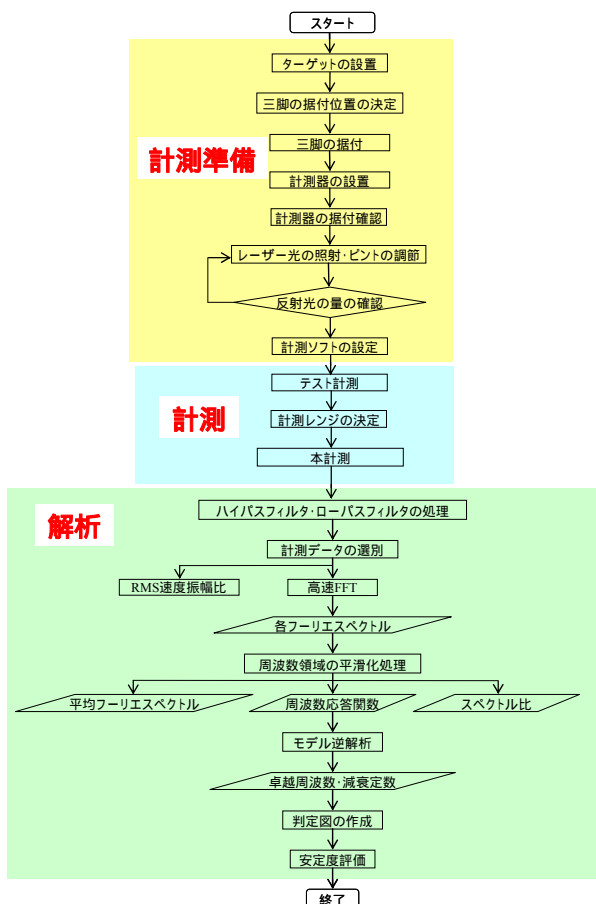


図 2.1 安定性評価法の流れ (提案法)

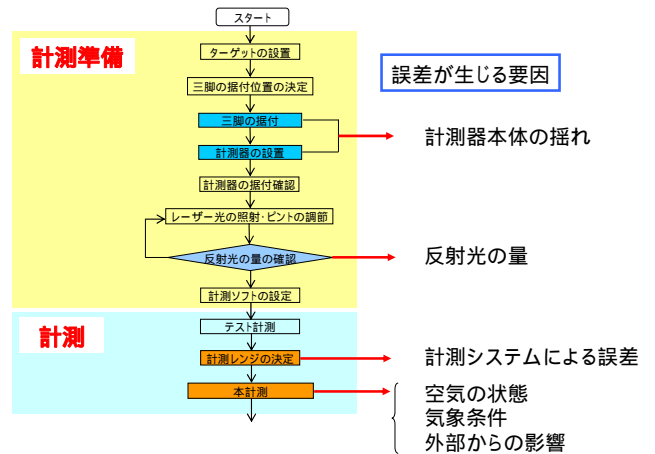


図 2.2 誤差が発生する箇所

「計測準備」では、計器の据え付けや調整を行う部分であり、必要に応じて、計測対象に反射板を設置したり、塗料を塗付したりする作業が必要となる。「計測」は、レーザー波のドップラー干渉を利用した計測機（以下、レーザー波干渉装置）を用いて、対象の振動を計測する作業である。最後の「解析」とは、計測されたデータを解析し、波の特性や各種の安定度指標を算出して、対象の安定度を評価する作業である。

これまでの模型実験や実岩盤斜面への適用結果より、提案法の計測において誤差が生じる原因として、以下の6つが考えられる。図 2.2 にそれらの誤差が発生する段階を示す。

- 計測器本体の揺れ
- 反射光の量
- 計測システムによる誤差
- 空気の状態
- 気象条件
- 外部からの影響

次節以降では、上記の6種類の誤差の発生原因について、検証結果や実際の適用結果をとり上げて説明する。

2.2 計測器本体の揺れによる誤差

レーザー波干渉装置の計測器本体に、計測器本体の揺れを計測する加速度計が内蔵されており、計測データから計測器本体の揺れを自動で解析して取り除くことができる。しかし、計測器本体の揺れが大きい場合、速度補正出力の設定値を超え、適切な補正処理を行うことが難しい場合もある。これによって、計測システム上の誤差が発生する。図 2.3 と図 2.4 は同一の対象物の振動(速度)を計測したものであるが、屋外で計測した結果であり、計測日には風が吹いていた。図 2.3 に示した振動の計測結果は、風が吹いていないときを狙って計

測した結果であり、図 2.4 は強い風が吹いているときの結果である。図 2.4 にはノイズのような波形が多く入っていることが確認できる。また、図 2.5 と図 2.6 は、図 2.3 と図 2.4 の計測結果をフーリエ変換し、各周波数帯の波のスペクトルを算出した結果である。これらの結果からもわかるように、同一対象を計測していても、計測器本体が大きく揺れてしまうような状況下では、計測器本体の補正が適切に機能しない場合があり、その結果、計測結果に影響を与える。また、計測器本体が大きく揺れてしまうような状況下での計測では誤差が発生しやすく、測器本体を設置する際の三脚の固定にも留意する必要がある。

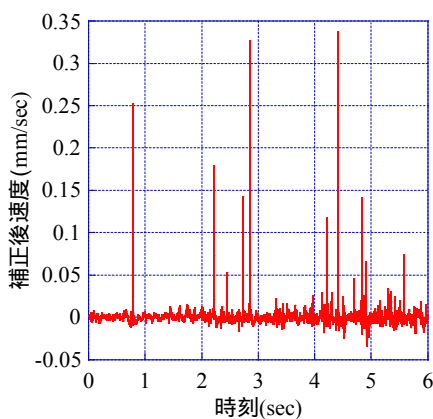


図 2.3 計測された速度の時刻歴(風なし)

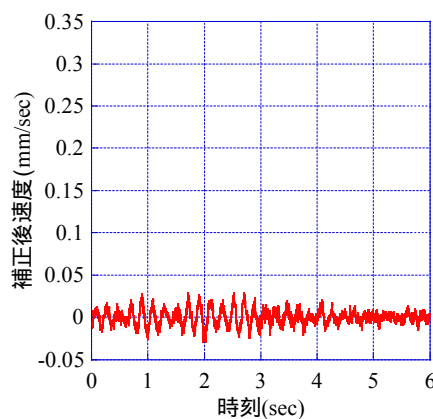


図 2.4 計測された速度の時刻歴(風あり)

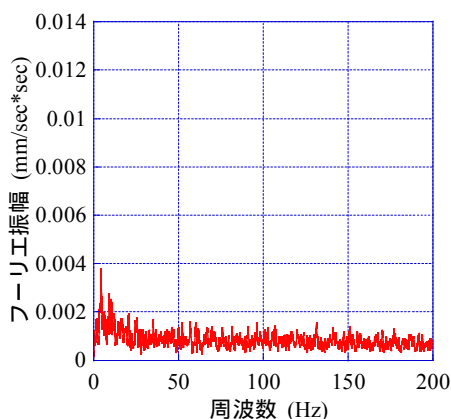


図 2.5 フーリエスペクトル(風なし)

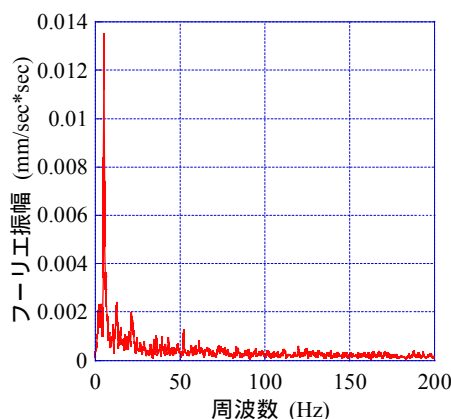


図 2.6 フーリエスペクトル(風あり)

2.3 反射光の量に関する誤差

計測の際に必要な反射光の量は、規定の値以上であることが望ましいが、遠方からの計測を強いられる場合や、対象物表面が反射しにくい状況であり反射板も設置するのが難しい場合は、十分な反射光を確保することが難しいことがある。ここでは、反射光の量が与える影響について説明する。ビルの外壁の振動計測で得られた速度振幅の時刻歴とフーリエスペクトルを図2.7と図2.8にそれぞれ示す。図2.7の速度振幅の時刻歴の中には、複数のスパイク波が確認できる。計測器本体には反射光の量を示すインジケータが内蔵されており、反射光の量を計測中に随時確認することができる。この計測の場合、反射光の量が少なく、不安定であったために複数のスパイク波が観測された。反射光の量が不安定であった要因として、レーザー光を照射するレンズのしぼりの調節が不十分であることが挙げられる。また、反射光の量が安定しており、スパイクが生じていない計測結果の速度振幅の時刻歴とフーリエスペクトルを図2.11,2.12に示す。このように、振動特性の評価結果にも大きな影響を与えるものであり、計測中は反射光の量を常に確認して作業を実施する必要がある。また、常に反射光の量が不安定になるような状況では、適用が難しい。

2.4 計測システムによる誤差

2.2節で説明したように、計測機本体には計測期器の揺れを補正する機能が備わっており、ある程度の小さい揺れであれば、問題なく計測できる。本研究で用いている計測システムでは、計測準備段階で、LDV 速度出力および速度補正出力の測定レンジを設定する。LDV 速度出力とは、レーザー波干渉装置によって計測された、計測対象物の振動速度である。速度補正出力とは、レーザー波干渉装置本体に内蔵されている加速度計から得られた

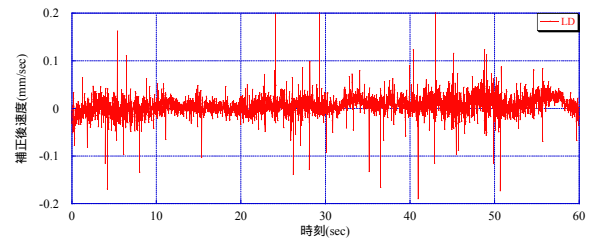


図 2.7 速度振幅の時刻歴（反射光の量が十分）

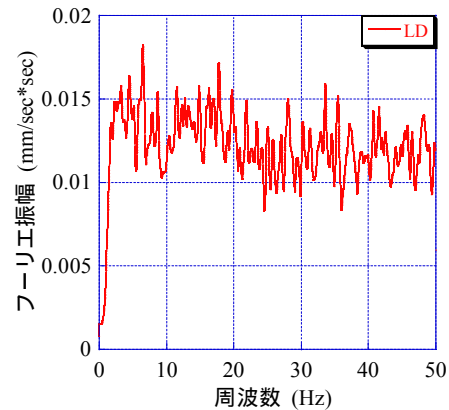


図 2.8 フーリエスペクトル（反射光の量が十分）

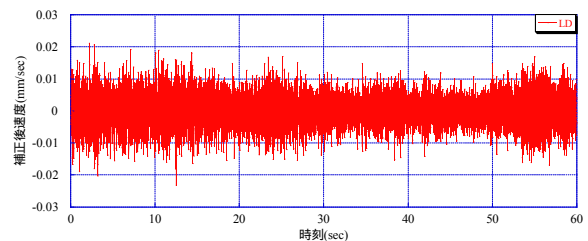


図 2.9 速度振幅の時刻歴（反射光の量が不十分）

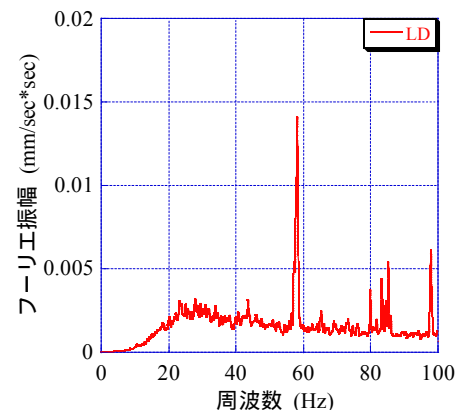


図 2.10 フーリエスペクトル（反射光の量が不十分）

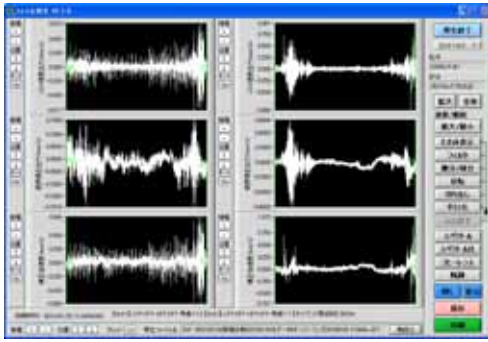


図 2.11 LDV 速度出力、補正速度出力および補正後速度出力の時刻歴（補正処理ができる場合）

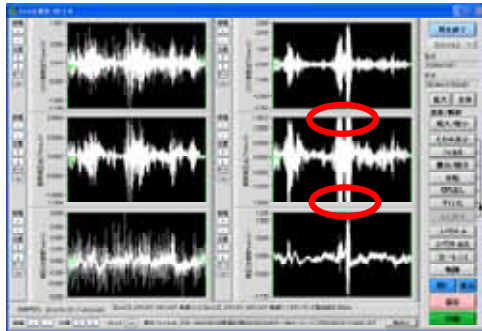


図 2.12 LDV 速度出力、補正速度出力および補正後速度出力の時刻歴（補正処理ができない場合）

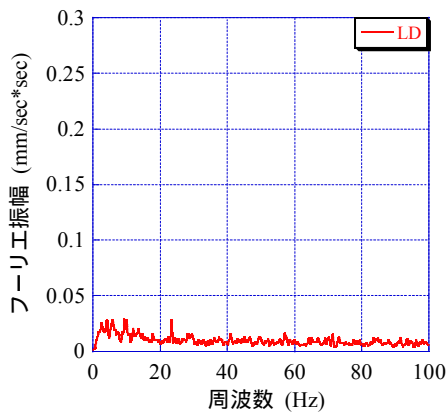


図 2.13 フーリエスペクトル（補正処理可）

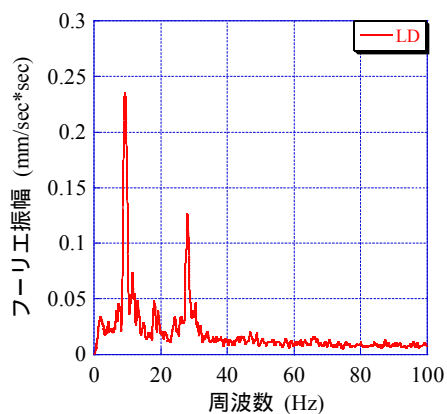


図 2.14 フーリエスペクトル（補正処理不可）

振動速度であり、この速度補正出力を用いて、計測器本体の揺れを取り除いている。計測対象物およびレーザー波干渉装置本体の振動が大きく、速度振幅が設定した測定レンジの値を超えた場合、計測対象物本来の速度振幅を正確に計測することができないだけでなく、得られる計測データは適切な補正処理がおこなわれない。そのため、設定する測定レンジによって、計測システム上の誤差が発生する。図 2.11 と図 2.12 に計測データの補正処理ができる場合とできない場合の LDV 速度出力、補正速度出力および補正後速度出力の時刻歴をそれぞれ示す。また、図 2.13 と図 2.14 に両者のフーリエスペクトルをそれぞれ示す。図 2.14(b)では、計測器本体の揺れが速度補正出力の測定レンジの設定値を超えたため(図中の赤丸)、本体の揺れを取り除くことができないことになる。また、図 2.14(a), (b)の補正処理ができる場合とできない場合のフーリエスペクトルを比較すると、値が明らかに異なっている。これらのことから、測定レンジの設定が不適切な場合、計測システムにより誤差が発生することがわかる。これを防ぐために、予備的に計測を実施し、振幅の大きさのある程度把握してから測定レンジの設定に戻り、再度計測するといった工夫が必要である。

2.5 空気の状態に関する誤差

図 2.15 に、屋外で計測された速度振幅の時刻歴の 1 例を示す。この計測結果に見られるように、計測時に瞬間的にスパイク波が観測されることがある。レーザー波干渉装置が照射しているレーザー光は、大気中を通るため、塵や黄砂などの大気中の不純物にレーザー光が当たることで光が遮られ、スパイク波のようなノイズが発生すると考えられる。スパイク波の生じる原因として、塵、黄砂、虫、雨、雪などが挙げられるが、その原因を特定するのは困難であり、計測前に事前にその影響を把握するのは非常に難しい。しかし、図 2.15 に示した瞬間的なスパイク波の存在が振動特性の

評価結果に大きな影響を与えることがある。図 2.16(a), (b)にスパイク波の前後の速度振幅の時刻歴を、図 2.17(a) ~ (c)に全体のフーリエスペクトルおよびスパイク波の前後で分割した場合のフーリエスペクトルをそれぞれ示す。図 2.17(b), (c)のスパイク波の前後で分割した場合には、フーリエスペクトルがほぼ一致していることがわかる。図 2.17(a) ~ (c)を比較すると、スパイク波が生じている場合のフーリエスペクトルは、スパイク波が生じていない場合のフーリエスペクトルと明らかに異なった分布になっていることがわかる。このことから、大気の状態や不純物の影響による瞬間的なノイズであっても、それを含めて解析してしまうと、スペクトルの分布に大きな影響を与えることが確認できる。そのため、計測時には、計測波形の中にスパイク波が入り込んでいないかを確認するとともに、どうしてもスパイク波が入り込んでしまう場合には、解析の過程でそれを除去して評価する必要がある。

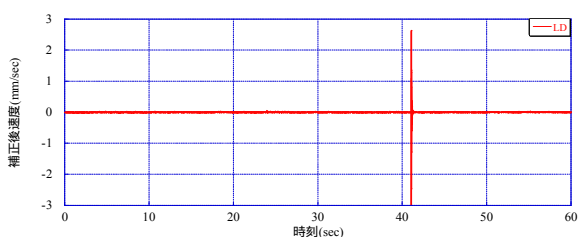
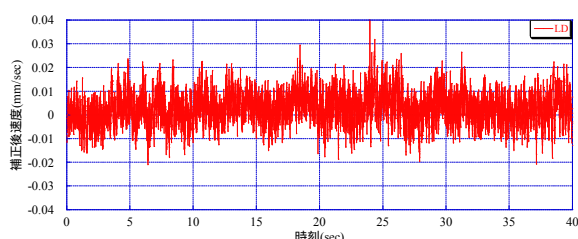
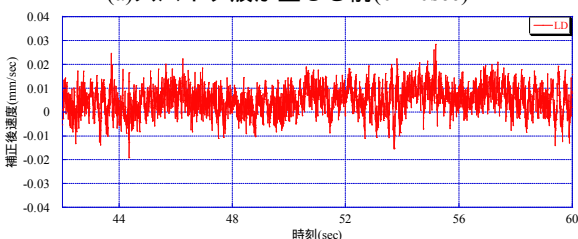


図 2.15 速度振幅の時刻歴

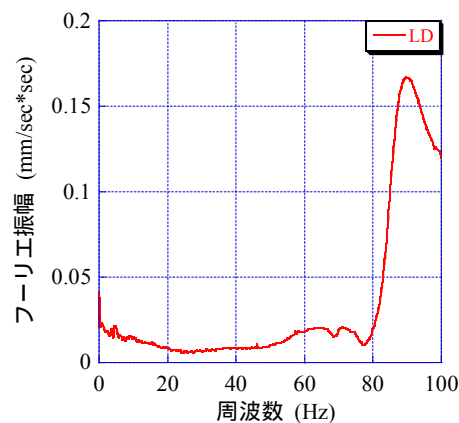


(a)スパイク波が生じる前(0~40sec)

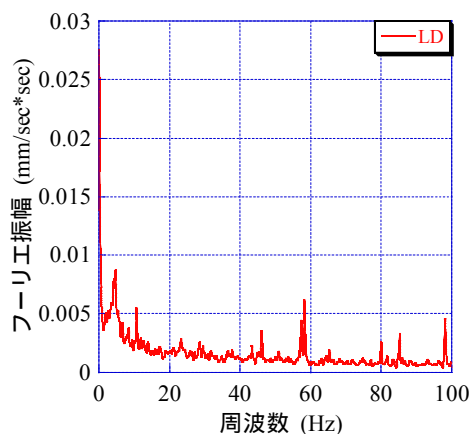


(b)スパイク波が生じた後(42~60sec)

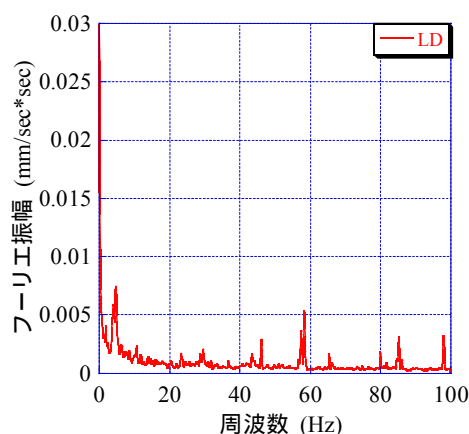
図 2.16 速度振幅の時刻歴



(a)全体のフーリエスペクトル(0~60sec)



(b)スパイク波が生じる前(0~40sec)



(c)スパイク波が生じた後(42~60sec)

図 2.17 フーリエスペクトル

2.6 気象条件に関する誤差

計測対象物、計測器の設置位置、計測器の設定を統一し、晴れ、曇り、降雨時の3つの気象条件下で計測対象物の振動速度をそれぞれ5回計測し、

気象条件が計測結果に与える影響について検討した結果について示す。また、別の計測場所であるが、降雪時の計測データについても示す。図 2.18 に晴れ、曇り、降雨時および降雪時の速度振幅の時刻歴の一例を示す。図 2.19 に、晴れの時、曇りの時および降雨時に得られたフーリエスペクトルを示す。図 2.18 に示すように、晴れの時および降雨時に、曇りの時に計測されなかったスパイク波が多数計測された。他の 4 回の計測でも同様に、晴れの時および降雨時にスパイク波が計測された。このスパイク波は、レーザー光が何らかの障害物に遮られ、反射光を受信できなかったため考えられる。降雨時には、雨粒が遮蔽物となるが、図 2.18(a) に示した晴れの時の計測結果にもスパイク波が多く生じている。これは、計測の翌日に黄砂の飛来が予報されていたこと、および計測時期が 3 月であったため杉やヒノキの花粉が飛散してい

たことから、大気中の花粉や黄砂によってレーザー光が遮られた可能性がある。これは、気象条件ではないが、これらが問題になることは前節で示した通りである。図 2.20 に、晴れの時の計測と同日に、室内の壁を計測した結果を示す。屋外に比べて室内での計測結果は良好で、室内の計測が好条件であることがわかる。図からも、スパイク波は確認できない。また、図 2.20 に示すように、曇りの時に比べ、晴れの時および降雨時は、フーリエ振幅の値が全体的に大きくなっていることが確認できる。降雪時に関しても、図 2.18(b) と同様に複数のスパイク波が生じていることが確認できる。

以上の結果より、計測時には気象条件にも留意しなければならないことがわかる。特に降雨時や降雪時の計測では、スパイク波が高い頻度で計測データの中に入り込んでしまうため、計測データの精度が著しく低下する可能性がある。

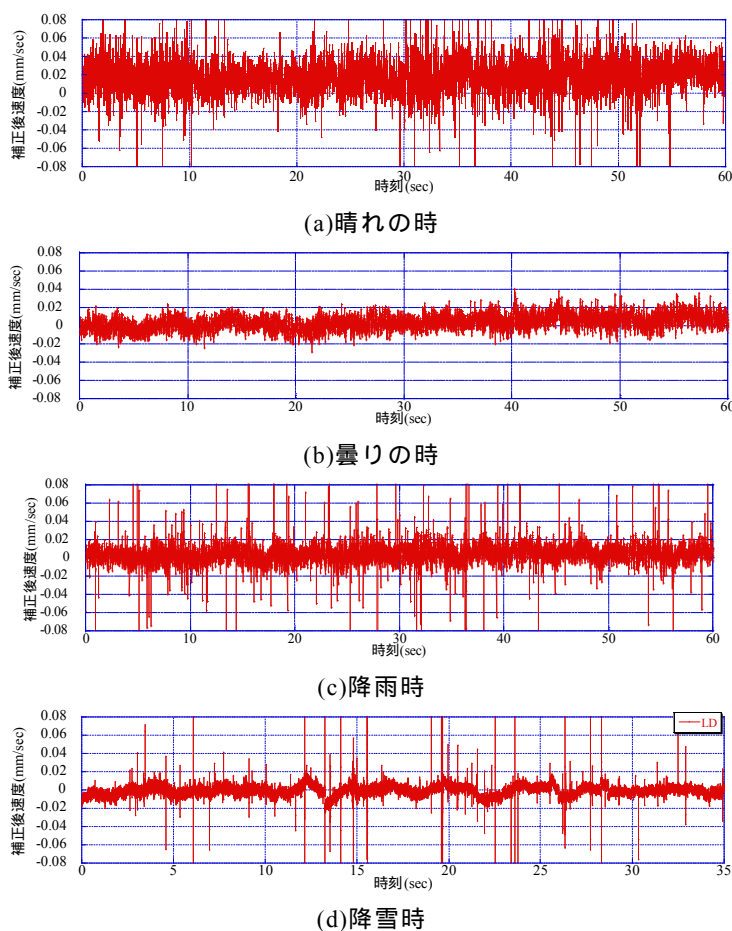
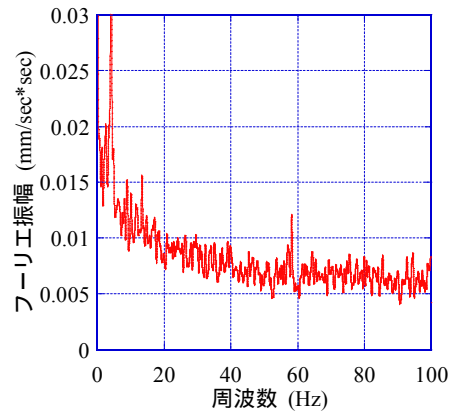
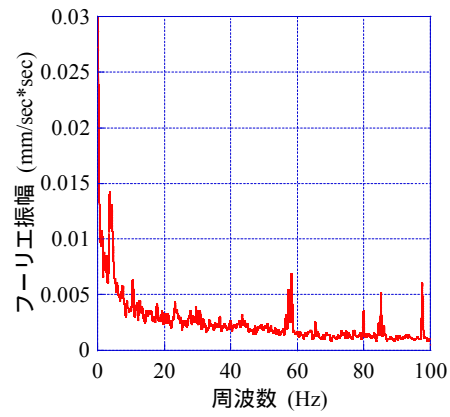


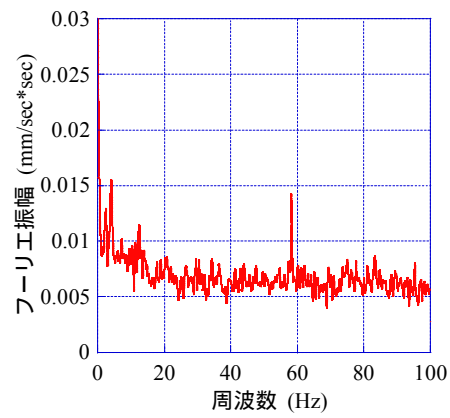
図 2.18 異なる気象条件のときの速度振幅の時刻歴



(a)晴れの時



(b)曇りの時



(c)降雨時

図 2.19 異なる気象条件のときのフーリエスペクトル

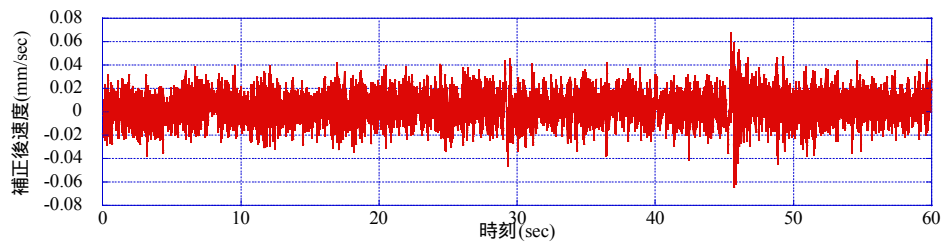


図 2.20 室内で計測したときの速度振幅の時刻歴

2.7 外部からの影響による誤差

外部からの影響として、歩行者や自動車、または動物などによって、計測時にレーザー光が遮られた場合などが考えられる。図 2.21 ~ 2.23 に計測時にレーザー光が歩行者によって遮られた時の速度振幅の時刻歴、発生したスパイク波の拡大図、得られたフーリエスペクトルをそれぞれ示す。図 2.22 より 0.8 秒ほどレーザー光が遮られたことが確認できる。図 2.23 のフーリエスペクトルでは、レーザー光が遮られた影響で低周波が卓越し、計測対象物の卓越周波数を確認できなかった。このことから、レーザー光が遮られるなどの外部からの影響は、評価結果に大きな影響を与えることがわかる。この場合も 2.5 節と同様にスパイク波を取り除いて解析する必要がある。

2.8 まとめ

本章では、6 種類の誤差の発生原因について説明した。これらの誤差については、計測する前にどの程度の影響があるかを予測しておくことが重要になる。本章では、定性的ではあるものの、計測誤差が発生する条件や対応策について触れた。これらの情報をもとにして、計測時の条件が悪い場合は、計測を中止する、または、計測したとしても参考値程度の扱いに留めるなどの注意が必要である。ただし、多くの場合、これらの誤差は計測データを見て初めて確認されることが多い。そのため、計測時には、得られる速度振幅の時刻歴とそのフーリエスペクトルをリアルタイムで確認しながら計測を行い、突発的に傾向が異なるような結果が得られた場合は、そのデータを除外する必要がある。また、どうしてもスパイク波が入ってしまうような計測現場では、解析の際に目視でスパイク波を除外して、フーリエスペクトルなどを算出するという工夫が必要となる。

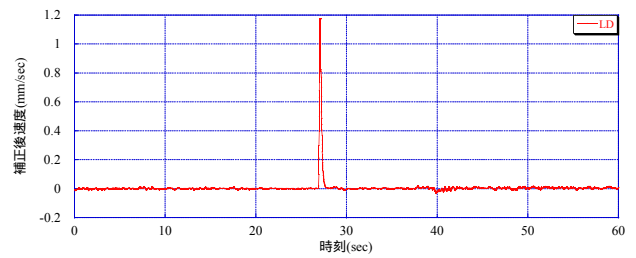


図 2.21 速度振幅の時刻歴

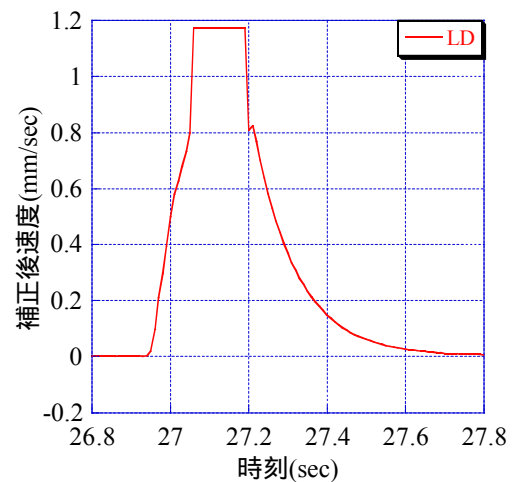


図 2.22 スパイク波部分の拡大図

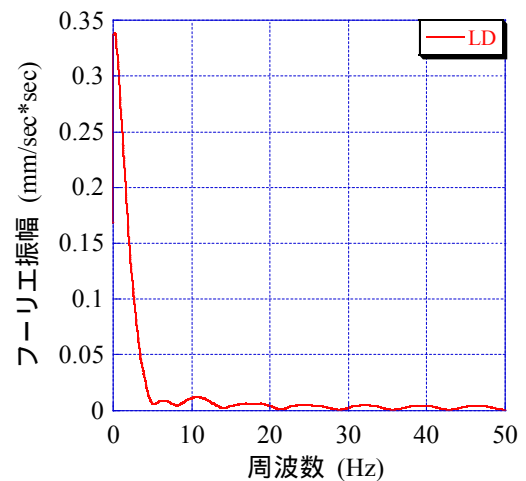


図 2.23 フーリエスペクトル

第3章 レーザー波干渉を利用した安定性調査法の適用可能性の検討

本章では、模型の斜面や実岩盤斜面を対象として、提案法を適用した事例について示す。また、従来法と提案法により得られた計測データの解析および両者の比較を行う。そして、提案法による亀裂性岩塊の遠隔からの安全な安定性調査法の適用可能性について検討する。なお、従来法では、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、両者の振動を比較することで、浮石部の安定性評価を行っている。そのため、本章の適用事例の中でも同様の評価を行っている。

3.1 模型実験による適用可能性の検討

不安定岩塊の簡単なテストモデルを設定し、既存の安定性調査法とレーザー波干渉を利用した遠隔からの安定性調査法による計測を実施した。

図 3.1 のようにレーザードップラーと人工斜面上に設置した人工浮石（コンクリートブロック）を設置し、提案手法および従来方式で計測した。斜面の角度、コンクリートブロックの設置方向などを変化させることで、浮石の不安定性を再現した。図 3.2～3.5 の 4 枚の写真は実験の様子を示したものである。遠隔よりレーザーを対象岩塊に照射し、反射波との干渉により岩塊の動的速度応答を測定する。

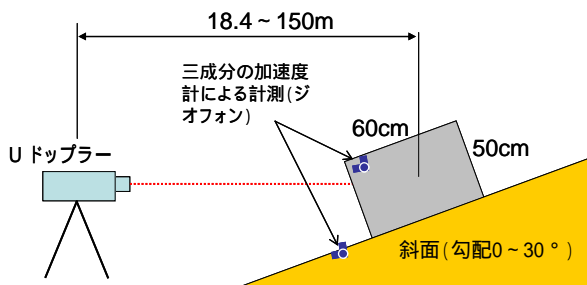


図3.1 モデル実験の概要図

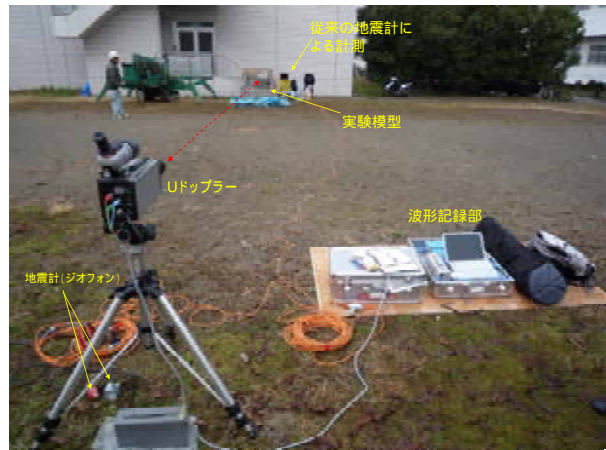


図3.2 実験概要と実験の様子



図3.3 実験概要と実験の様子



図3.4 実験概要と実験の様子



図3.5 実験概要と実験の様子

転石・浮石の大きさと状態、斜面の硬さと勾配等は、転石・浮石の安定度に影響を与える。そのため、以下に示す条件を考慮し、それぞれの条件を組み合わせ合わせて計26ケースの実験を実施した。

- ・ブロック: 2種類 (大60×50×40cm、小40×30×20cm)
- ・斜面種類: 2種類 (人工斜面と地盤)
- ・ブロック状態: 自然に置く、埋込み、上下重ね
- ・人工斜面の勾配: 3種類 (0°、20°、30°)
- ・測定距離: 18.4m、29m、150m
- ・反射板材料: 反射板、塗料、スプレー、修正液、白テープ

これらを組み合わせた26ケースについて、1つの実験ケースに対し、6回ずつ計測を実施した。

各回の計測時間は65s、記録サンプル速度は200Hzである。また従来手法と比較するために、地震計の計測は合図で同期記録を行った。ただし、記録サンプル速度は250Hzである。図3.6には、提案手法と既存手法の計測器の設置状況を示した。図中1~24の○で囲った番号はデータ取得チャンネル番号である。表3.1に、実験ケースの特徴をまとめた。また、図3.6に提案手法と既存手法の計測方法を示す。

最も遠方からの計測であるケース26(150m遠隔)について、従来法と提案法の評価結果比較の比較を行なった。図3.7の上段は、計測した速度振幅時刻歴であり、の下段は速度振幅時刻歴のスペクトル解析結果である。計測データ、解析データとも既存方法とほぼ同様の波形を得ることができた。これにより、遠隔から正確な変位計測ができることが実証された。なお、他のケースでも同様に、従来法と提案手法の整合性が確認されている。

ただし、この場合コンクリートブロックに測量用ターゲットが貼り付けてあり、レーザーの反射状況が最適な状況であった。

表3.1 実験ケース一覧(ケース1~12)

実験ケース	斜面勾配	ブロック	ブロック状態	LD距離	実施状況	内容	備考			
1	30°	大	横置き	29m	1-3回は1kHz記録、4-9回は200Hz記録	記録方法の検討				
2				ブロックに反射板を貼り、10回、65s/回	基本ケース					
3				修正液、反射なし200Hz記録(以降同じ)、300s記録	反射板材料及び設置角度の検討					
4				白いテープ、反射なし、100s記録						
5				スプレー、反射なし、100s記録						
6				塗料、反射なし、200s記録						
7				反射板を地震計に設置、5回記録						
8				反射板をブロックに設置、6回記録						
9				塗料、反射なし						
10				スプレー、6回						
11				小		同上		同上	以降は反射板を使用、6回	石サイズの影響
12				小		縦置き		同上	不安定、転倒	石の状態の影響

表3.1 実験ケース一覧（ケース13～15）

実験ケース	斜面勾配	ブロック	ブロック状態	LD距離	実施状況	内容	備考
13	20	小	同上	18.4m	反射板は両面テープで固定、6回	石の状態、斜面勾配の影響	
14	20	小	横置き	同上	反射板、6回	石の状態の影響	
15	26	大	横置き	同上	反射板、6回	石のサイズ、斜面勾配の影響	

表3.1 実験ケース一覧（ケース15'～16）

実験ケース	斜面勾配	ブロック	ブロック状態	LD距離	実施状況	内容	備考
15	26	大 + 小	上下横置き	18.4m	上のブロックに反射板	上下重なる場合の安定度	
15					下のブロックに反射板		
16	20	大	縦置き	18.4m		石のサイズの影響	

表3.1 実験ケース一覧（ケース17～19）

実験ケース	斜面勾配	ブロック	ブロック状態	LD距離	実施状況	内容	備考
17	20	大	縦置き、中間辺で自然に20cm埋め込み	18.4m同上			
18	20	大	横置き、長辺で自然に20cm埋め込み	同上		埋め込みの影響	
19	0	大	横置き	同上		斜面勾配の影響	

表3.1 実験ケース一覧（ケース20～22）

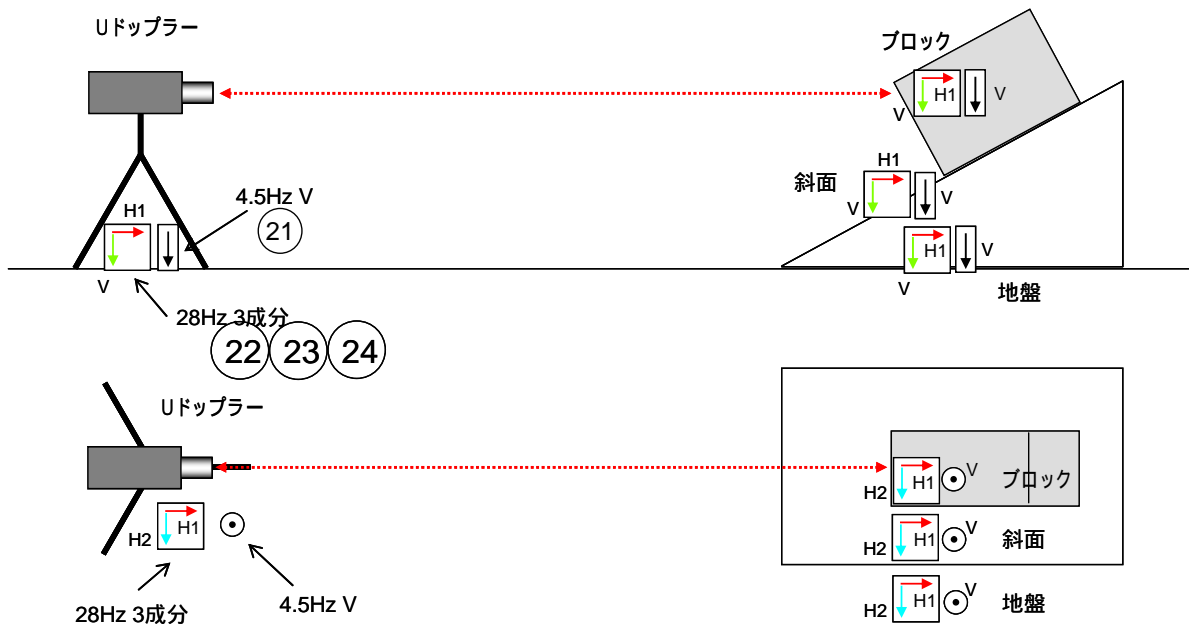
実験ケース	斜面勾配	ブロック	ブロック状態	LD距離	実施状況	内容	備考
20	0	大	縦置き	18.4m		石の状態の影響	
21	0	大	縦置き、中間辺で自然に20cm埋め込み	同上		石の状態と埋め込みの影響	
22	0	大	横置き	同上			

表3.1 実験ケース一覧（ケース23～24'）

実験ケース	斜面勾配	ブロック	ブロック状態	LD距離	実施状況	内容	備考
23	0	大	縦置き	18.4m			
24	0	大+小	上下横置き	18.4m	下のブロックに反射板	上下重なる場合の安定度	
24					上のブロックに反射板		

表3.1 実験ケース一覧（ケース25～26）

実験ケース	斜面勾配	ブロック	ブロック状態	LD距離	実施状況	内容	備考
25	10	小	縦置き	18.4m		実験26との比較ケース	
26				150m		東側の堤防からの遠距離計測	



ジオフォンデータファイル 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	地盤	斜面	ブロック	地盤			斜面			ブロック		
ジオフォン	4.5Hz	4.5Hz	4.5Hz	28Hz			28Hz			28Hz		
成分	V	V	V	V	H1	H2	V	H1	H2	V	H1	H2
チャンネル番号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
設置位置	-	-	-	-	-	-	-	-	Uドブラー地点			
ジオフォン	-	-	-	-	-	-	-	-	4.5Hz	28Hz		
成分	-	-	-	-	-	-	-	-	V	V	H1	H2

図3.6 提案手法と既存手法の計測方法（計測器の設置位置）

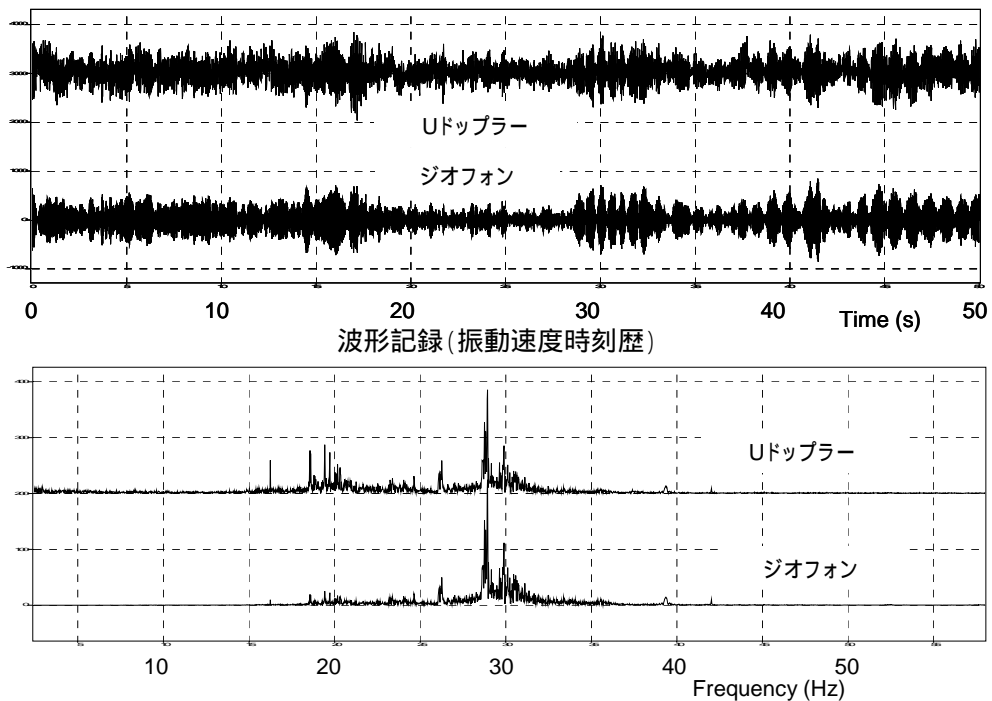


図3.7 既存手法と提案手法の計測結果比較（ケース26：150m遠隔、小ブロック、10度斜面）

3.2 実岩盤斜面への適用事例

山間部の不安定な亀裂性岩盤に対して提案手法を適用した事例について説明する。図3.8と図3.9のように、危険性のある岩塊は、裸地もしくは森林内にあることが多い。手入れされていない人工林の杉や檜は幹が細く、樹幹に葉を保っている状態であるため、人工林の斜面地は、日照がなく低木が育つことはない。このような状況下では、計測のターゲットとなる岩塊に対して、レーザー照射の方向を遮るものは多くないため、実際の現場で十分適用可能と考える。ただし、反射材の塗布方法については、不安定岩塊に近づく必要があるため、安全性を十分に検討する必要がある。

提案法の実現場での適用性を確認するために、実現場での計測を実施した。計測箇所は、岐阜県本巣市根尾板所地区内(図3.10参照)である。計測対象は、岐阜県森林土木効率化等技術開発モデル事業落石対策検討委員会により、岩盤接着工により対策済みの亀裂性岩塊である。現場は、対策を実施したにもかかわらず、岩盤接着工の効果が得られなかった岩塊部分が残っている。この箇所では、詳細な調査が実施されており、対策済みで安定している岩塊、対策済みでも不安定なままの岩塊の位置関係が詳細に記録されている。本研究では、これらの対象に対して、安定化している岩塊および不安定な岩塊の差異を見つけられるかどうかについて検証した。



図3.8 人工林地内に存在する亀裂性岩塊の一例



図3.9 自然林内の亀裂性岩塊の不安定部分の一例



図3.10 計測地概略 (yahoo地図より)



図3.11 計測地域航空写真 (yahoo地図より)



図3.12 計測地域地形図 (岐阜県県域統合型GIS)

実験現場は、図3.13に示したとおり、非常に険しい傾斜地であり、岩塊の直近からの計測は不可能であった。そのため、対象を見通せる近くの神社境内から計測を試みた。計測距離は、約180mである（図3.12参照）。本検証では、反射材として、測量用反射ターゲットを対象岩塊に貼り付けた。

提案法で計測した結果として、図3.13に示す浮き石部1の計測結果を図14に示す。この結果は、同箇所を5回ずつ計測した結果の平均的なものである。図3.15は、従来法の地震計を直接設置する計測方法によるY方向成分（斜面奥行き方向）の計測結果である。図3.15で斜面奥行き方向の計測結果を示したのは、レーザー計測による方法の計測方向とほぼ同じであるためである。図3.14は、縦軸に速度振幅比（dB） - 横軸に応答周波数（Hz）をプロットした。一方、従来手法である図3.15は、縦軸に周波数応答倍率（浮き石部1と基岩との微動の増幅） - 横軸に応答周波数（Hz）をプロットした。浮き石部1は、不安定なまま放置されている岩塊であり、調査現場で目視しても不安定な状態と確認できた。提案手法による計測の結果、図3.14からわかるように、9Hz付近で振動が卓越していることが確認できた。図3.16の既存手法の結果と比較すると、同様に8～9Hz程度の振動が卓越していることが確認できる。両手法の比較より、不安定な岩塊の卓越周波数は、ほぼ同じであることが確認できた。図3.16は、地震計を用いた計測結果の三方向成分を示したものである。

図3.17および図3.18は、図3.13に示す浮き石部3の計測結果である。図3.17は提案法による結果であり、図3.18は、従来法の地震計のY方向成分（水平奥行き方向）の結果である。図3.18には、地震計を用いた計測結果の三方向成分を示す。図3.17は、縦軸に速度振幅比（dB） - 横軸に応答周波数（Hz）をプロットした。一方、既存手法である図3.18は、縦軸に周波数応答倍率 - 横軸に応答周波数（Hz）をプロットした。浮き石部3は、対策を実施したことにより、安定化した

岩塊である。レーザーによる計測では、低い周波数域で卓越している振動はみられなかった。図3.18の既存手法の結果でも、同様に低い周波数域で卓越する振動はみられない。

以上の結果より、提案法は実岩盤斜面を対象にした場合でも、地震計を設置する従来法の結果と同様の結果を得られることがわかった。ただし、先述のように、本検証で対象とした不安定な浮石は、目視でも十分に不安定であることがわかるレベルのものであり、非常に危険度の高いものである。このように、危険度の高い不安定岩塊については、提案法が適用できることを確認した。



図3.13 比較対象の岩塊状況および計測箇所

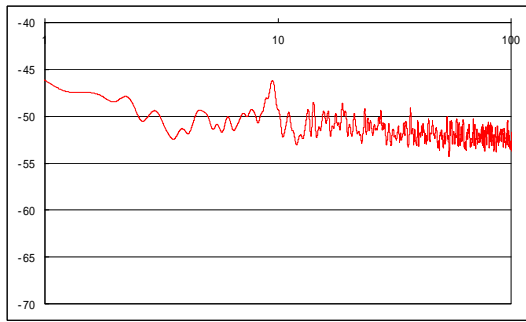


图3.14 浮き石部1 (提案法)

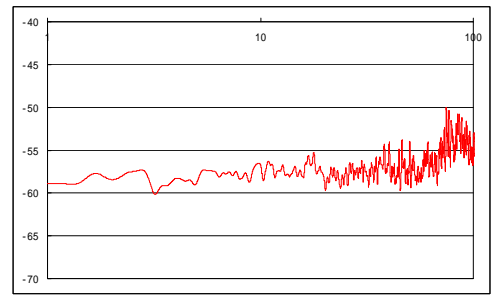


图3.17 浮き石部3 (提案法)

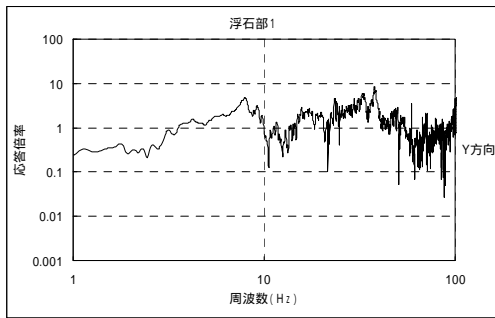


图3.15 浮き石部1 (従来法)

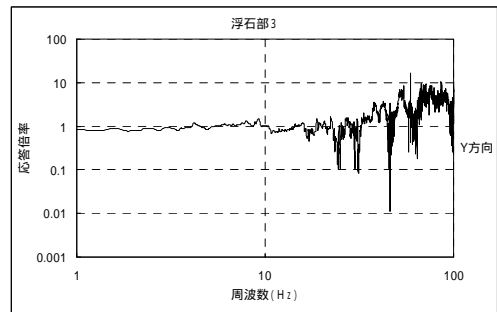


图3.18 浮き石部3 (従来法)

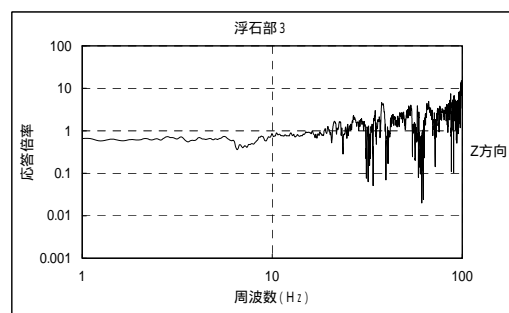
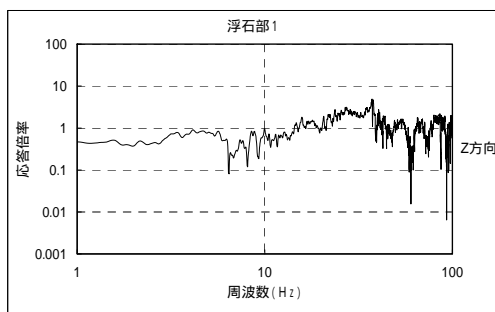
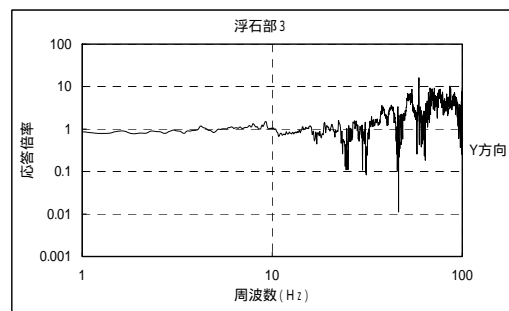
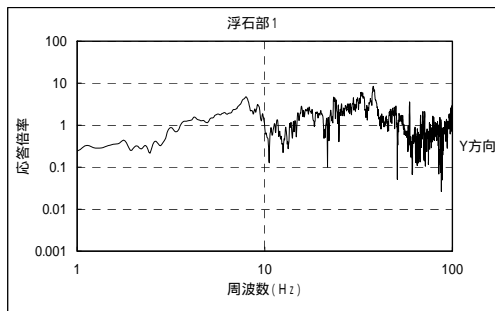
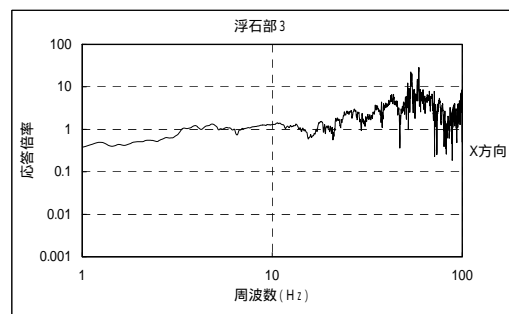
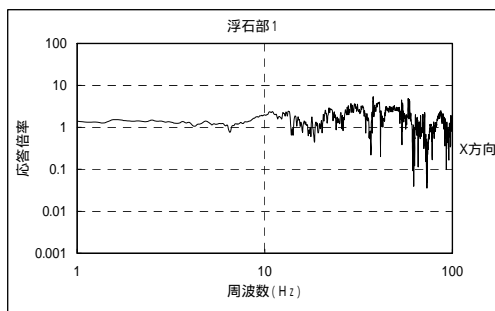


图3.16 浮き石部1 (従来法) 三方向

图3.19 浮き石部3 (地震計三方向成分)

3.3 実岩盤斜面への適用事例

図 3.20 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)と基岩と想定した岩塊(岩塊 C)について、2 台のレーザー波干渉装置、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。ここで、前後方向とは、斜面に対し正対している方向である。図 3.21 に地震計の計測方向のイメージ図を示す。また、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。図 3.22 と図 3.23 に本研究で用いた地震計の入力周波数に対する感度特性を示す。これらの地震計の特性からわかるように、4.5Hz の地震計は、4.5Hz 未満の周波数帯では、計測感度が著しく悪くなる。表 3.2~3.5 にデータロガーのチャンネル内容、計測条件、提案法および従来法で用いるデータ収録装置の設定をそれぞれ示す。提案法による計測では、低周波成分を除去するために、ハイパスフィルタ(HPF)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。

今回の地震計による計測では、計測対象の運動速度を電圧で計測している。そのため、提案法で得られる速度振幅とは異なり、電圧振幅となっている。本計測で用いた地震計のデータロガーは、地震計から入力された電圧をデータロガーの内部数値で出力している。このため、得られたデータロガーの内部数値に地震計の変換係数を掛け合わせることで電圧振幅となる。

ここで、地震計の変換係数の算出方法および電圧振幅への変換方法について、簡単にまとめる。まず、岐阜大学が所有するデータロガーの最大入力電圧を確認するために、入力電圧を変化させて、得られるデータロガーの内部数値の検証をおこなった。図 3.24 にデータロガーの内部数値と入力電圧の関係について示す。図から、180mVpp 以上の

入力電圧は、内部数値の値が飽和している。このことから、本計測で用いたデータロガーの最大入力電圧は 180mVpp であることわかる。次に、データロガーで得られる内部数値から入力電圧への変換係数を求める。図 3.25 に、図 3.24 の縦軸と横軸を入れ替えたデータロガーの内部数値と入力電圧の関係を示す。図に示すように、最大入力電圧以下の電圧範囲の値について、線形近似を行う。このとき、得られた近似直線の傾きが、内部数値から電圧振幅に変換するための変換係数となる。図 3.25 に示すように、今回の計測で用いた地震計の変換係数は 0.002097 である。電圧振幅への変換方法については、次式を用いる。

$$\text{電圧振幅} = \text{ロガー内部数値} \times 0.002097 \quad (3.1)$$



図 3.20 ターゲット・地震計の設置箇所

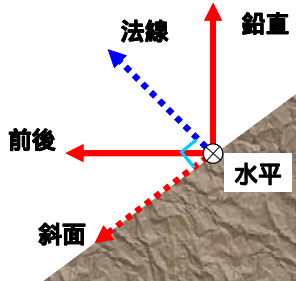
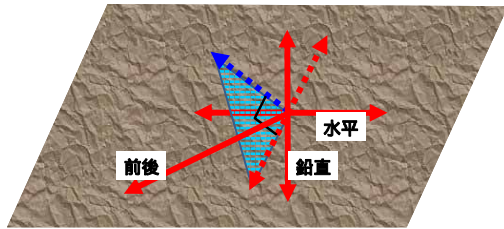


図 3.21 地震計の計測方向(イメージ)

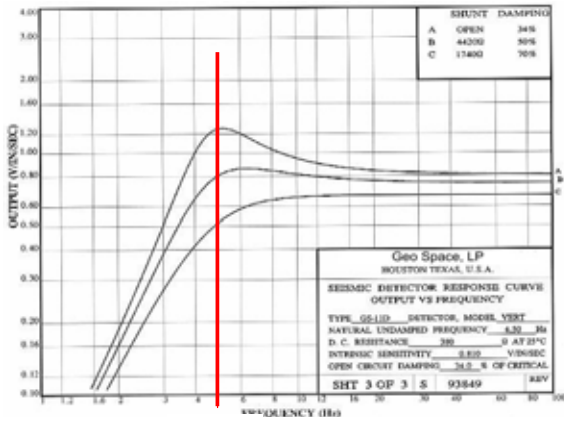


図 3.22 地震計 (4.5Hz) の感度特性

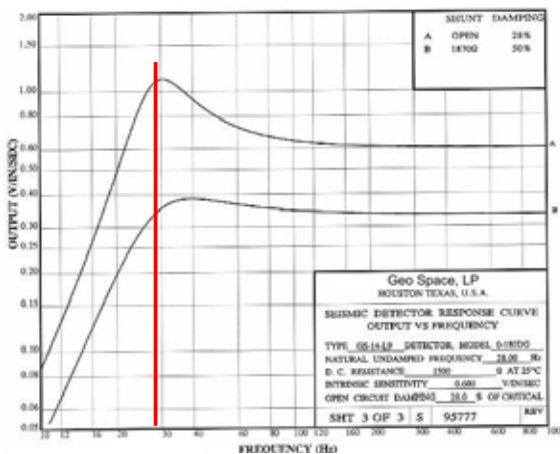


図 3.23 地震計 (28Hz) の感度特性

表 3.2 データ収録装置(レーザー波干渉装置)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

表 3.3 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

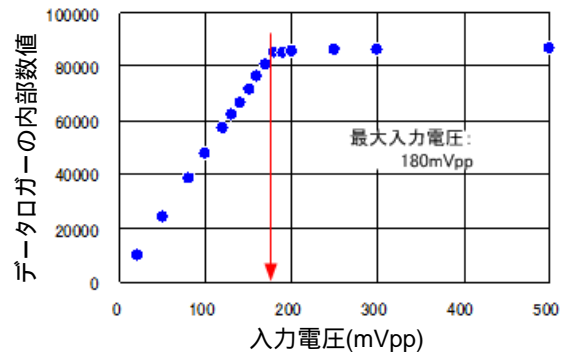


図 3.24 データロガーの内部数値と入力電圧の関係

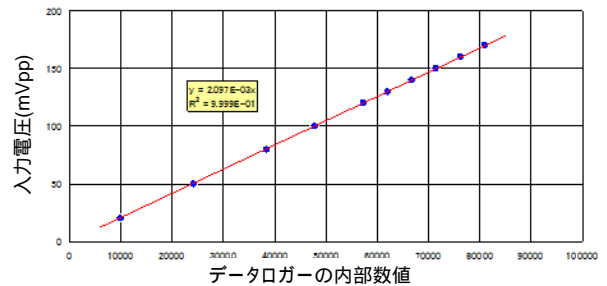
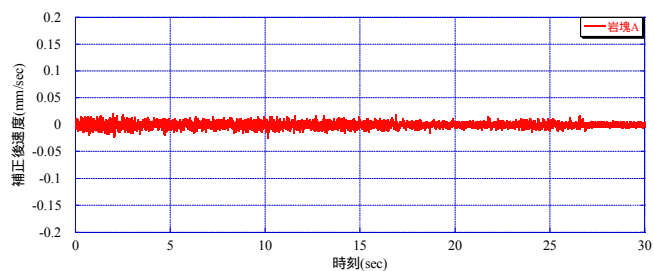


図 3.25 データロガーの内部数値と入力電圧の関係

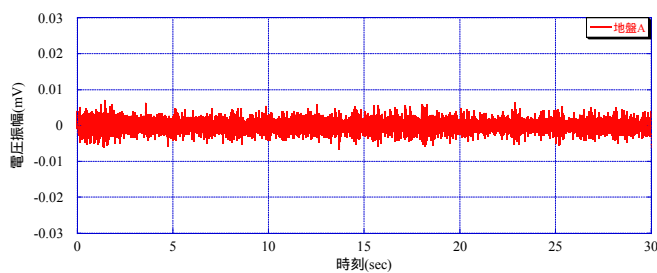
表 3.4 に示したように、本検証では、常時微動による計測だけではなく、振動源がある条件でも計測を実施している。振動源としては、発電機や簡易貫入試験器の振動を利用し、計 6 ケースの計測を実施した。得られた速度振幅(レーザー)および電圧振幅(地震計)の時刻歴を図 3.26 ~ 3.31 に示す。また、フーリエ解析によりスペクトル分布を算出した結果を図 3.32 ~ 3.37 に示す。

表 3.4 ケースごとの計測条件

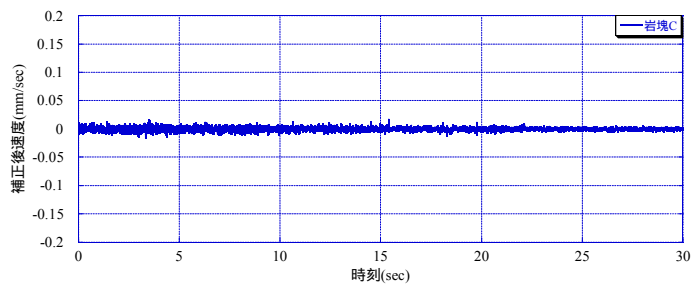
ケース	計測対象		試験条件
	LD1	LD2	
1	岩塊 A	岩塊 C	常時微動
2	岩塊 B		
3	岩塊 A		発電機
4	岩塊 B		
5	岩塊 A		発電機 + 貫入試験
6	岩塊 B		



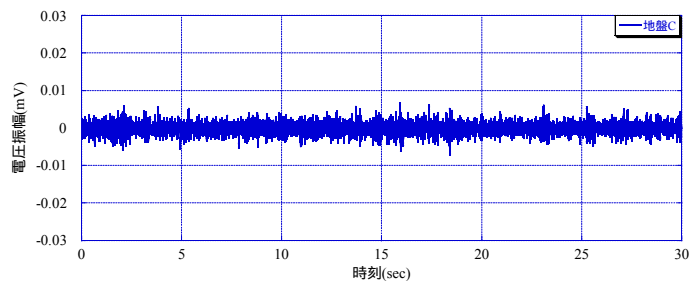
(a) 岩塊 A(提案法)



(b) 岩塊 A(従来法)

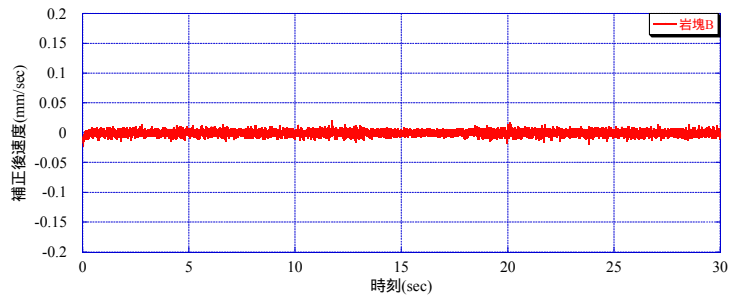


(c) 岩塊 C(提案法)

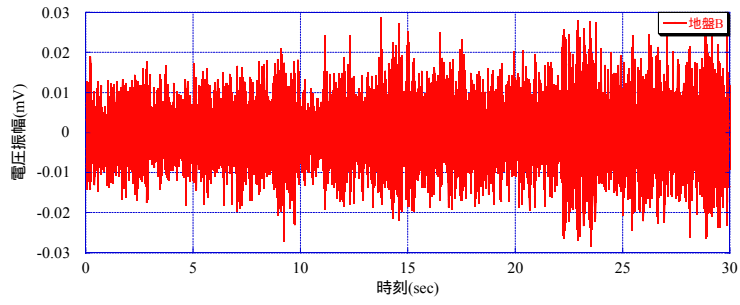


(d) 岩塊 C(従来法)

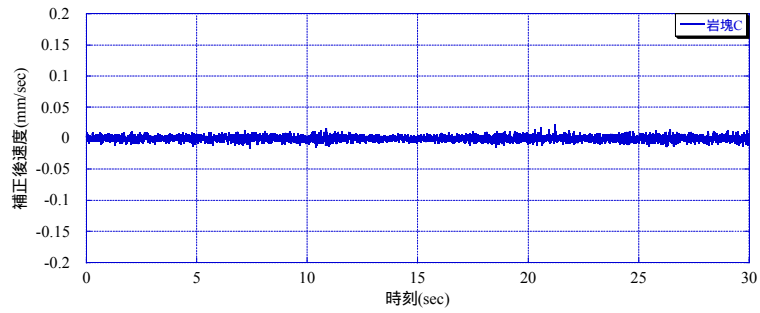
図 3.26 ケース 1 の速度振幅および電圧振幅の時刻歴 (常時微動)



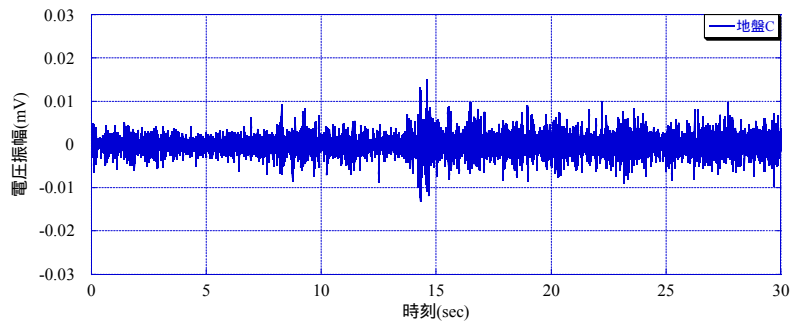
(a) 岩塊 B(提案法)



(b) 岩塊 B(従来法)

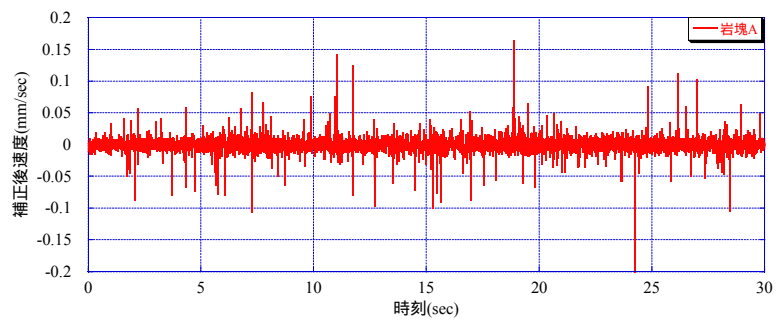


(c) 岩塊 C(従来法)

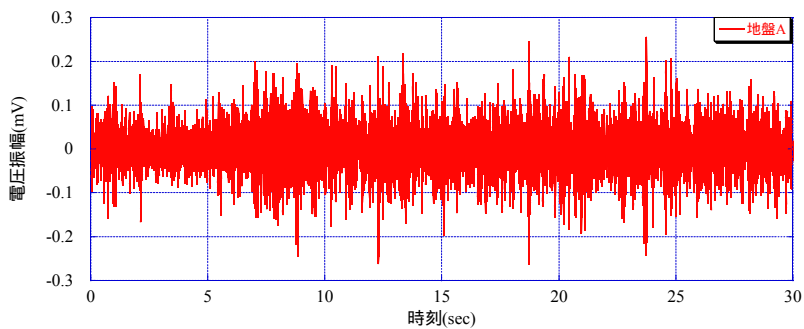


(d) 岩塊 C(従来法)

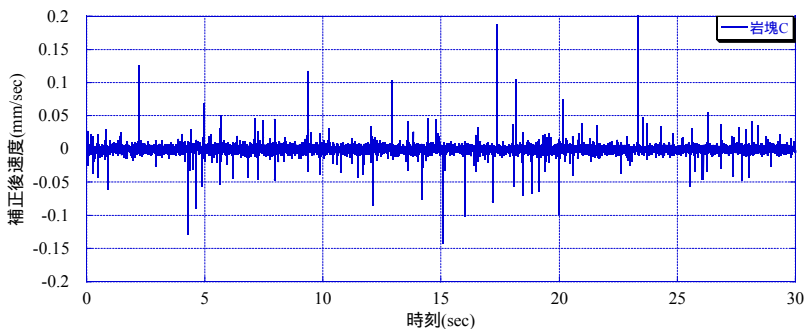
図 3.27 ケース 2 の速度振幅および電圧振幅の時刻歴 (常時微動)



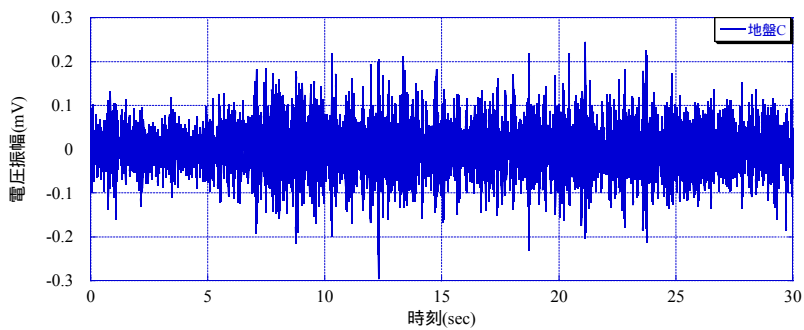
(a) 岩塊 A(提案法)



(b) 岩塊 A(従来法)

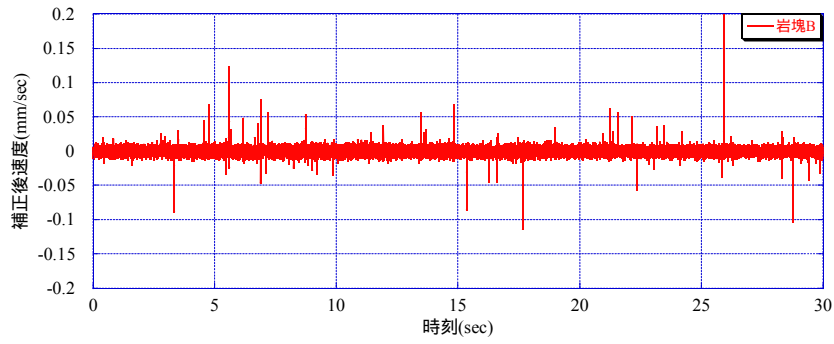


(c) 岩塊 C(提案法)

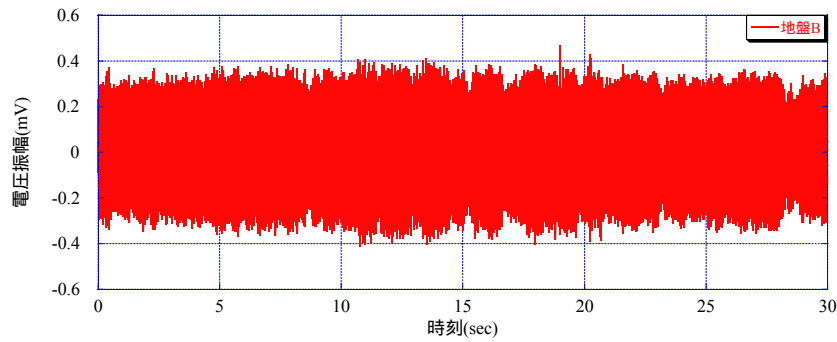


(d) 岩塊 C(従来法)

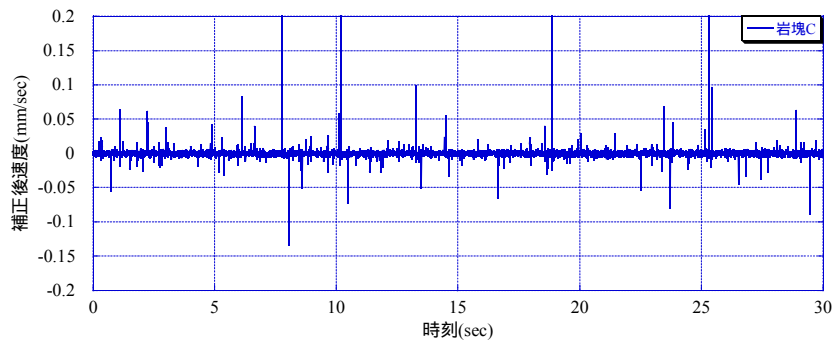
図 3.28 ケース 3 の速度振幅および電圧振幅の時刻歴 (発電機)



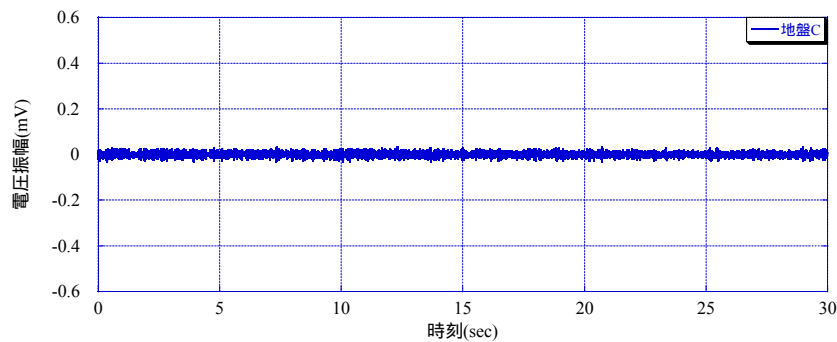
(a) 岩塊 B(提案法)



(b) 岩塊 B(従来法)

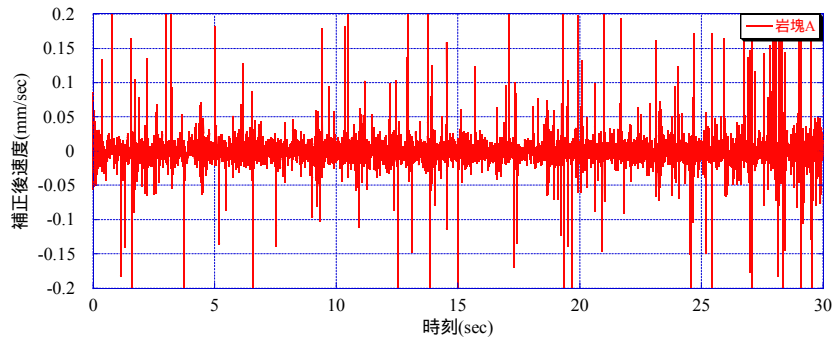


(c) 岩塊 C(提案法)

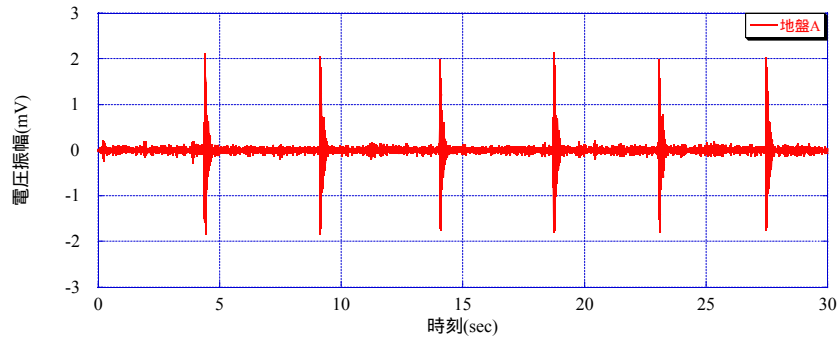


(d) 岩塊 C(従来法)

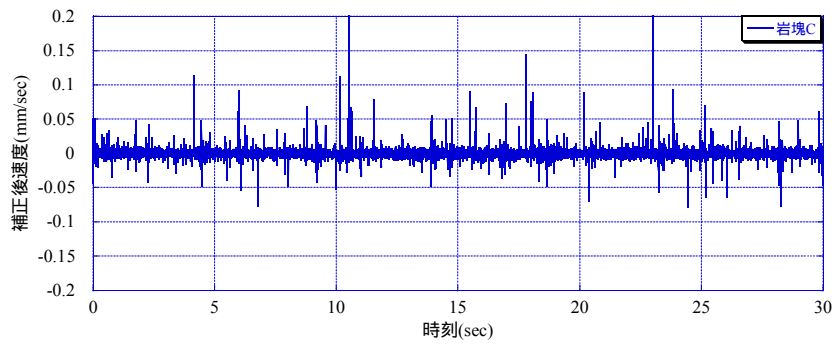
図 3.29 ケース 4 の速度振幅および電圧振幅の時刻歴 (発電機)



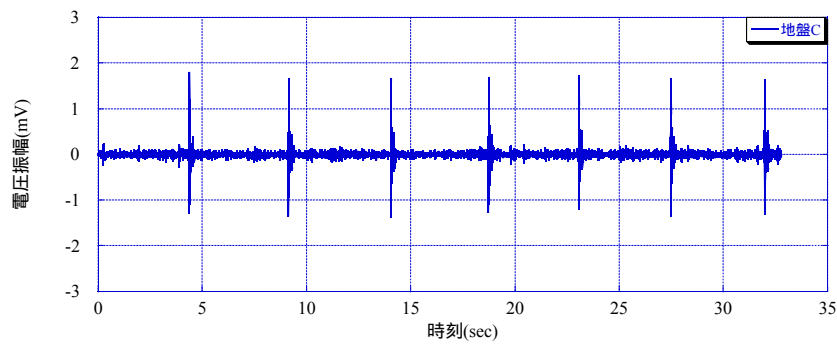
(a) 岩塊 A(提案法)



(b) 岩塊 A(従来法)

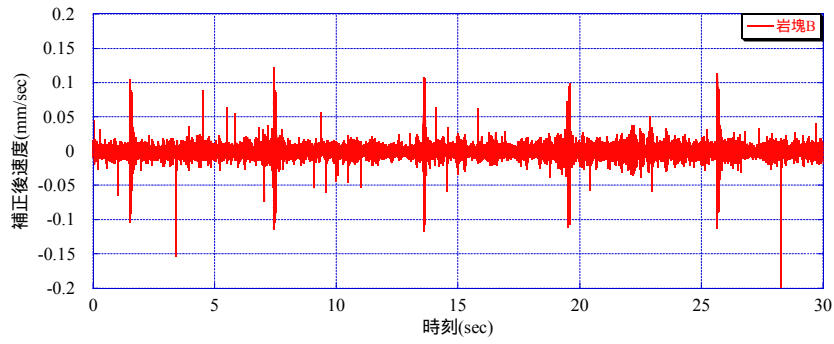


(c) 岩塊 C(提案法)

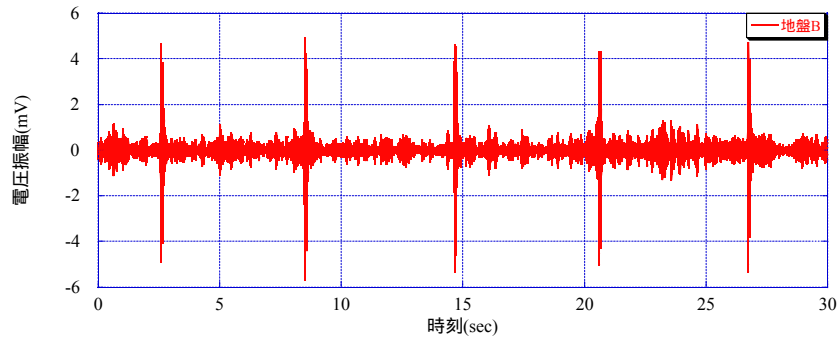


(d) 岩塊 C(従来法)

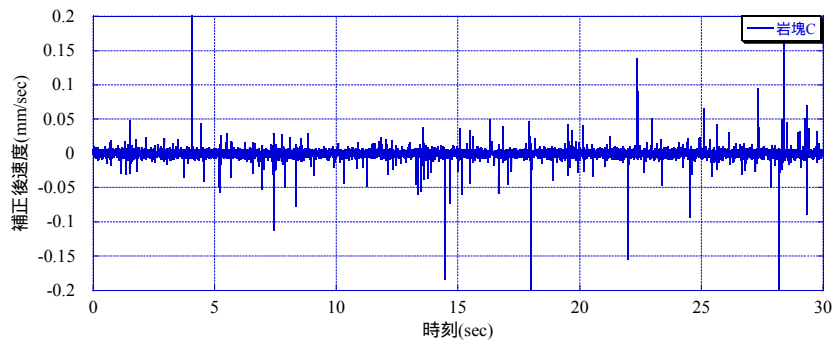
図 3.30 ケース 5 の速度振幅および電圧振幅の時刻歴 (発電機 + 貫入試験)



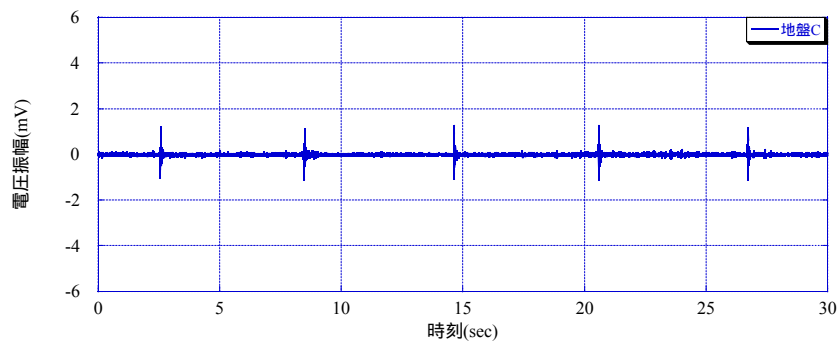
(a) 岩塊 B(提案法)



(b) 岩塊 B(従来法)

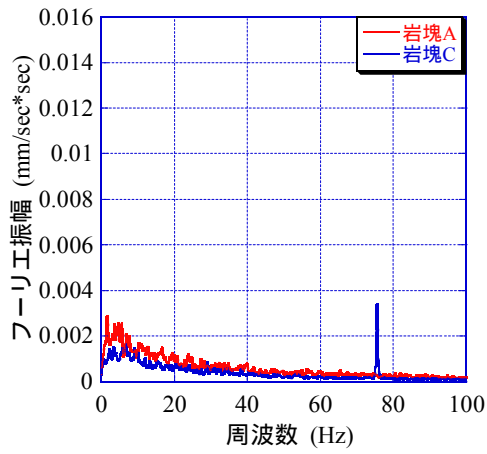


(c) 岩塊 C(提案法)

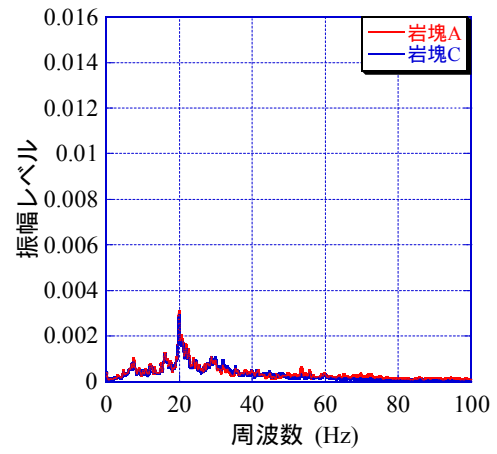


(d) 岩塊 C(従来法)

図 3.31 ケース 6 の速度振幅および電圧振幅の時刻歴 (発電機 + 貫入試験)

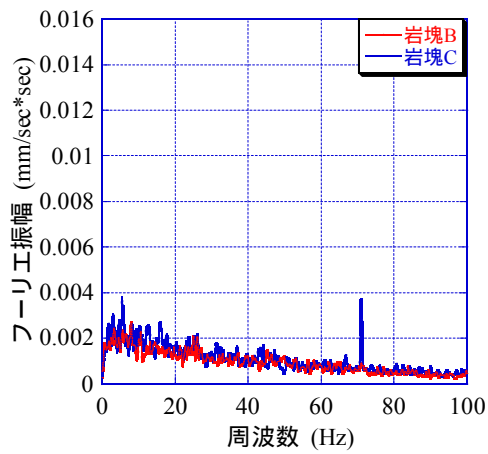


(a)提案法

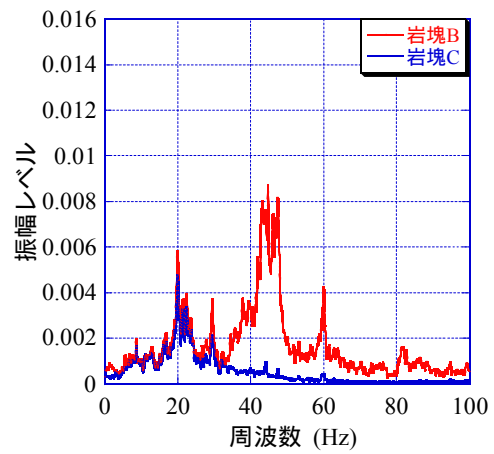


(b)従来法

図 3.32 ケース 1 のフーリエスペクトル (常時微動)

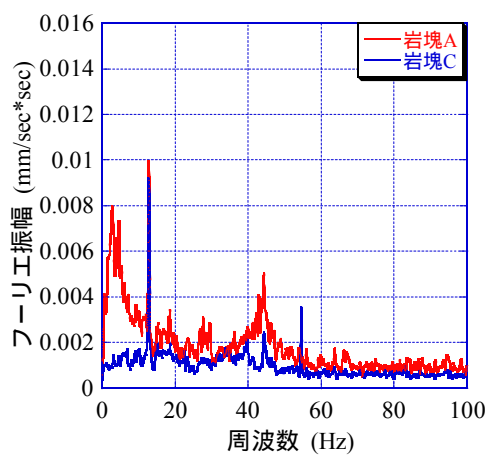


(a)提案法

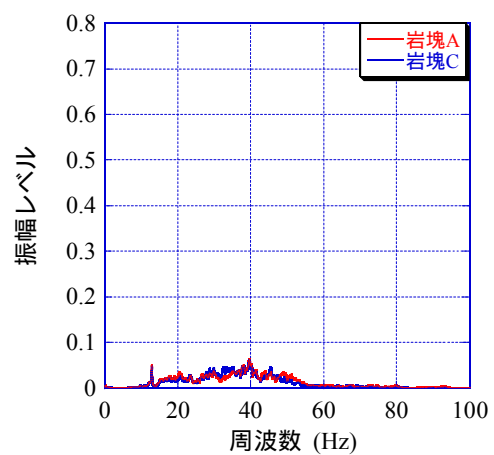


(b)従来法

図 3.33 ケース 2 のフーリエスペクトル (常時微動)

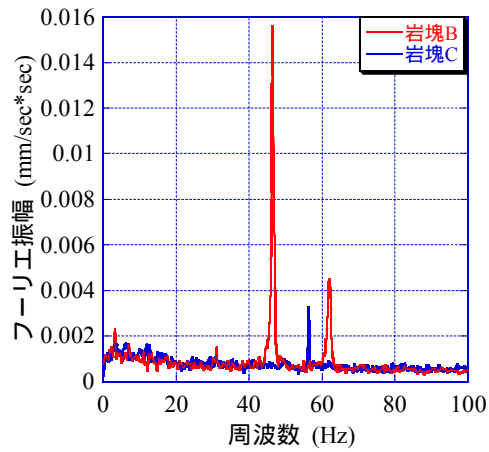


(a)提案法

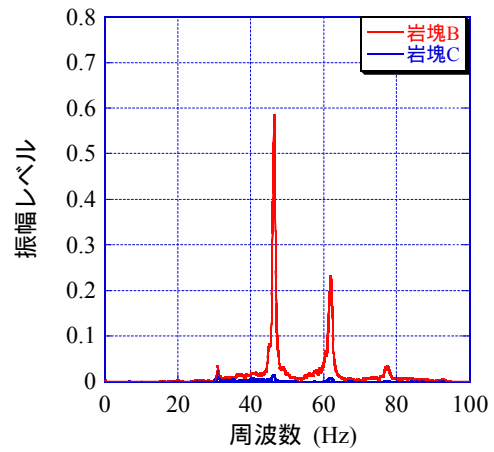


(b)従来法

図 3.34 ケース 3 のフーリエスペクトル (発電機)

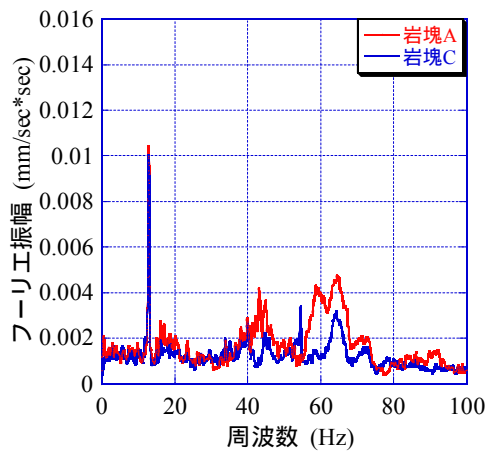


(a)提案法

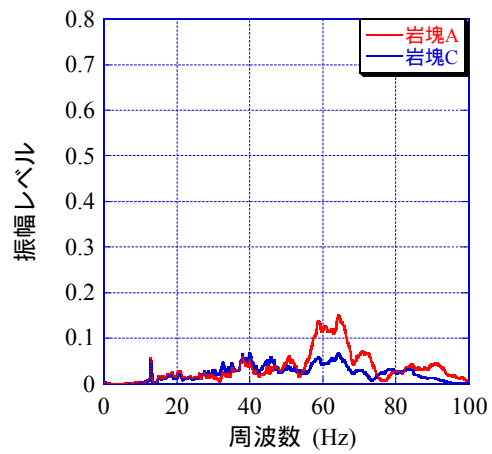


(b)従来法

図 3.35 ケース 4 のフーリエスペクトル (発電機)

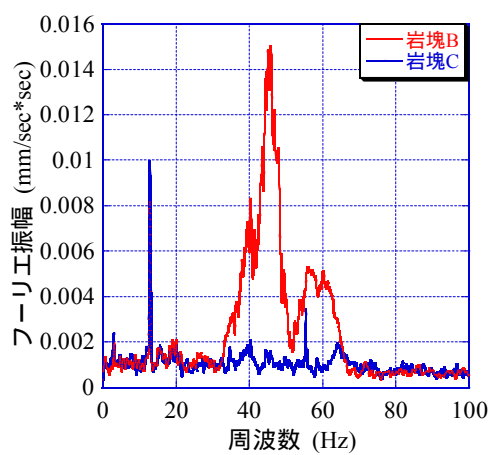


(a)提案法

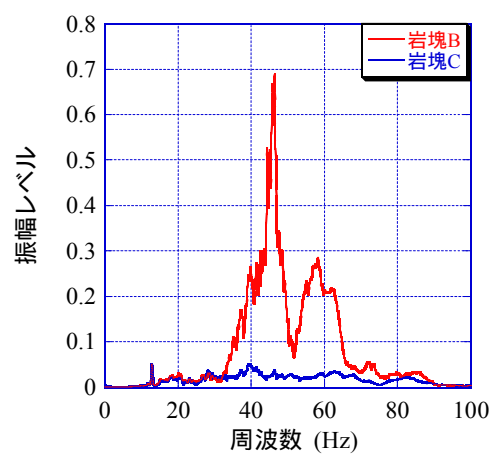


(b)従来法

図 3.36 ケース 5 のフーリエスペクトル (発電機 + 貫入試験)



(a)提案法



(b)従来法

図 3.37 ケース 6 のフーリエスペクトル (発電機 + 貫入試験)

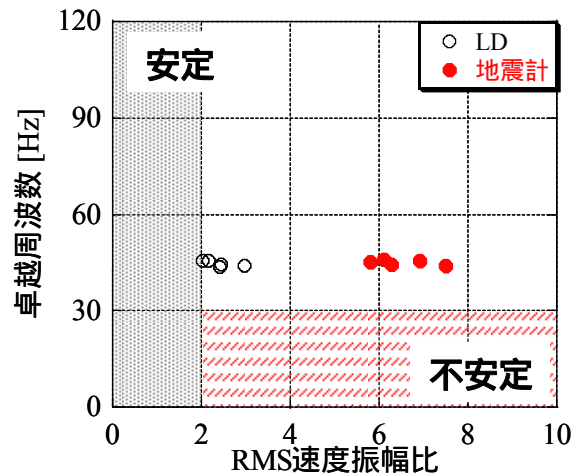
提案法による常時微動計測では、計測対象の変位振幅が小さく（図 3.26(a), (b), 図 3.27(a), (b)）、明確な卓越周波数が得られなかった（図 3.32(a), 3.33(a)）。一方、図 3.36、図 3.37 の岩塊 B では、提案法と従来法で、45Hz と 60Hz 付近で周波数が卓越したことやフーリエスペクトルの形状がほぼ一致していることが確認できた。これらの結果より、振動の大きさが小さい場合は、常時微動のみでは安定性評価が難しいが、加振することにより、評価が可能となる可能性を確認することが出来た。

図 3.38 と図 3.39 にケース 6 の判定図および提案法と従来法で得られた RMS 速度振幅比の相関図をそれぞれ示す。卓越周波数、減衰定数とともに、提案法と従来法で同程度の値を示したが、RMS 速度振幅比の値に差が生じた。RMS 速度振幅比の値が異なるために、判定図内でプロットされた点が従来法と提案法で一致していない。提案手法のレーザーによる結果の方が、RMS 速度振幅比が小さくなっていることがわかる。これは、図 3.39 の相関図からも理解できる。この原因については後述する。

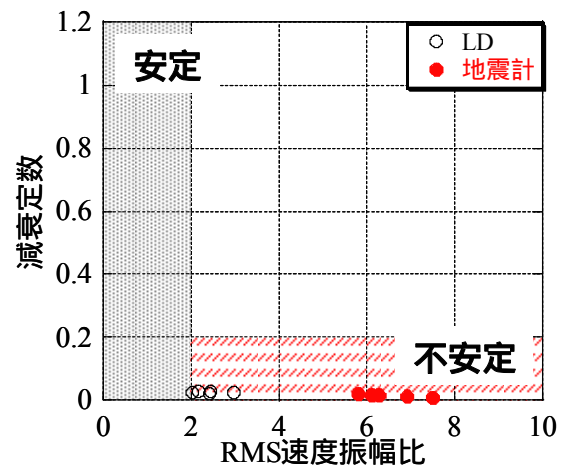
以下では、図 3.38 で示したような、提案法と従来法で RMS 速度振幅比が異なる点について考察する。図 3.38 に示したように、提案法と従来法で、卓越周波数や減衰定数は一致しているにも関わらず、RMS 速度振幅比に関しては、差異が生じた。考えられる原因として、以下の 3 点が挙げられる。

1. 提案法による計測で得られる値は速度振幅で、地震計を用いた計測で得られる値は、電圧振幅である
2. 地震計は、地震計の固有周波数より低い周波数帯で計測感度が低下する
3. 今回の計測では、計測対象の変位振幅(振動)が、提案法にとって小さかった

一つ目として、提案法で得られる値は速度振幅であり、地震計で得られる値は、電圧振幅であり、異なる値を比較していることが差異の生じる要因と考えられる。そのため、上述のケース 6 の計測結果に関して、従来法で得られた電圧振幅を速度



(a)RMS 速度振幅比 - 卓越周波数



(b)RMS速度振幅比 - 減衰定数

図3.38 判定図

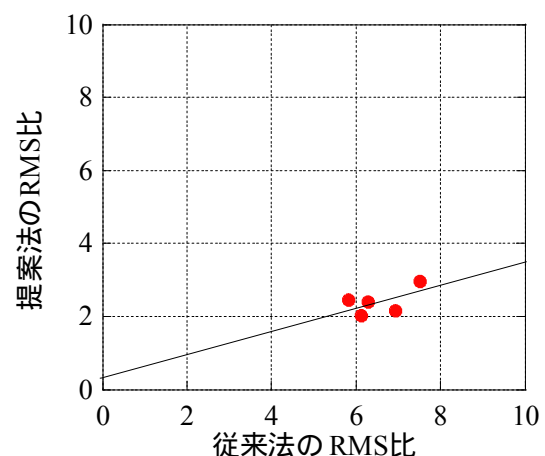


図 3.39 提案法と従来法で得られた RMS 速度振幅比の相関図

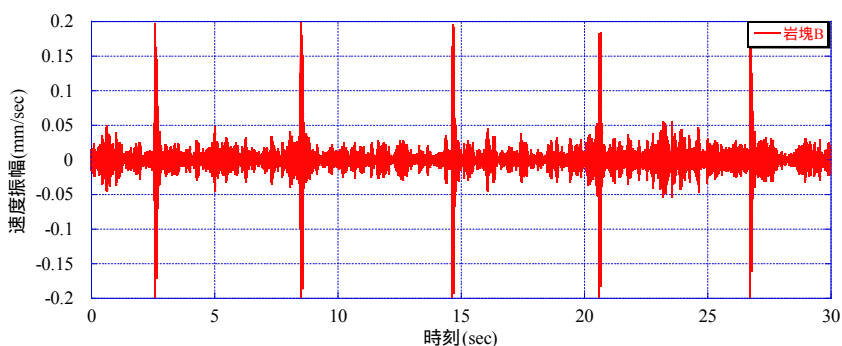
振幅に換算し、提案法で得られた結果との比較を再度行う。

以下に、地震計で得られる電圧振幅を速度振幅に変換する処理方法についてまとめる。個々の地震計には、それぞれ電圧振幅から速度振幅へ変換する値が定められている。そのため、電圧振幅とこ

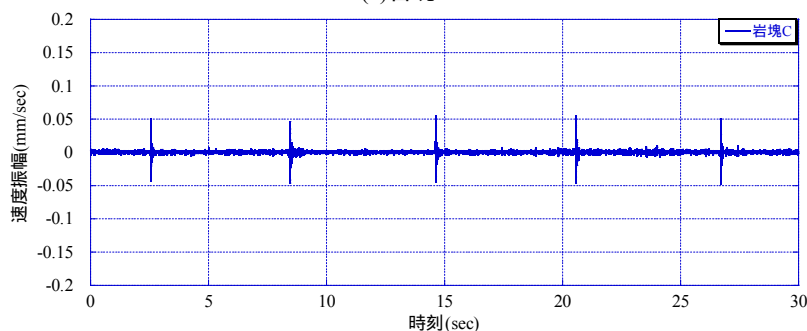
の変換係数から、速度振幅を算出することができる。岐阜大学が所有する2種類の地震計(4.5Hzと28Hz)に定められている変換係数について表3.6にまとめる。図3.40に電圧振幅から速度振幅に変換した場合のケース6の時刻歴を示す。

表 3.6 地震計の仕様

固有周波数	4.5Hz	28Hz
型名	GS-11D	GS-14-L9
変換係数	0.81 V/in/sec	0.60 V/in/sec
	31.9 mV/mm/sec	23.6 mV/mm/sec



(a)岩塊 B

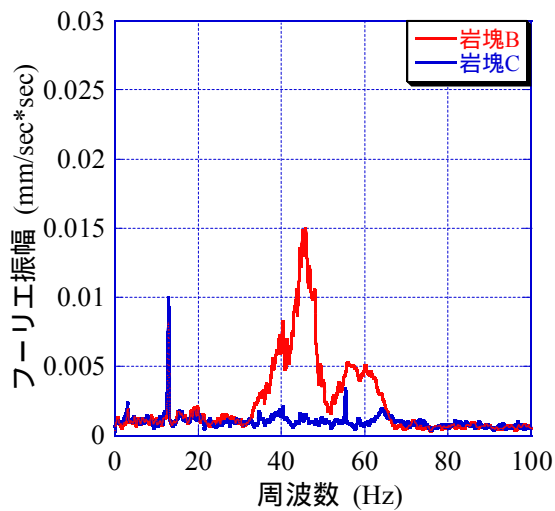


(b)岩塊 C

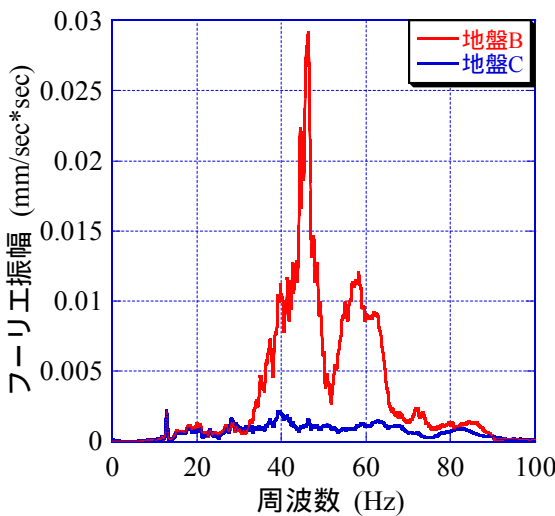
図 3.40 速度振幅の時刻歴(ケース 6)

図 3.41 にケース 6 の提案法と従来法のフーリエスペクトルをそれぞれ示す。図 3.41(b)は、電圧振幅(図 3.37 (b))から速度振幅(図 3.41(b))に変換することで、縦軸のフーリエ振幅の値が大きく変化していることが確認できる。速度振幅に変換した場合のフーリエスペクトルは、提案法のフーリエスペクトルとの厳密な一致は見られないが、等しいオーダーの結果が得られている。しかしながら、地震計の速度振幅は電圧振幅の値を定数で除して

いるだけのため、RMS 速度振幅比の値は変わらなかった。これらのことから、電圧振幅と速度振幅の違いが、RMS 速度振幅比の差異の原因にはならないと考えられる。



(a)提案法



(b)従来法

図 3.41 ケース 6 のフーリエスペクトル
(発電機 + 貫入試験)

二つ目に、地震計は、固有周波数より低い周波数帯で、感度が低下してしまう特性を有している。低周波数帯で感度が低下することが原因で、RMS 速度振幅比に差異が生じたと考えた。そこで、地震計の感度が低下する低い周波数帯に対し、感度を増幅させて、どの周波数帯でも同一の周波数となるような補正をおこなう。

以下に、その方法を簡単にまとめる。地震計の周波数特性 F は、次式で求めることができる。

$$F = \frac{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + 4h^2\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (3.2)$$

ここで、 f は周波数、 f_0 は地震計の固有周波数、 h はダンピング(減衰定数)である。図 3.42 に 28Hz の地震計の周波数特性を示す。なお、この時のダンピングは 0.70 とした。図 3.42 に示すような周波数特性を平坦な周波数特性に変換するために、次式を用いて、周波数特性を補正する。補正には、周波数特性の逆数を用いる。図 3.43 に周波数特性を平坦にするための地震計の補正曲線を示す。28Hz の地震計の周波数特性にこの補正曲線をかけることで、図 3.44 に示すような、平坦な周波数特性が得られる。

$$\begin{cases} A' = A \times \frac{F_0}{F_i} & \text{if } f \leq f_0 \\ A' = A & \text{if } f > f_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで、 A' は補正後のフーリエ振幅、 A は補正前のフーリエ振幅、 F_0 は周波数が固有周波数のときの周波数特性、 F_i は各周波数領域での周波数特性である。なお、この補正は周波数領域で行うため、速度振幅を一度フーリエ変換してから補正処理を行う。そして、補正処理を行った後に、フーリエ逆変換を行うことで、周波数特性が平坦になった速度振幅が得られる。

図 3.45 にこの補正処理を行った後にフーリエ逆変換して得られた速度振幅を示す。得られた速度振幅は、補正前の波形(図 3.31(b))と比較すると大きく異なることが確認できる。これは、補正曲線の補正値が、低い周波数帯になるにつれて 2 次曲線的に増大するため、低周波の感度特性がより高く増幅され、このような波形が得られる。この補正方法では、得られた波形の振動特性が変わってしまうため、今回はこの補正方法は採用しない。

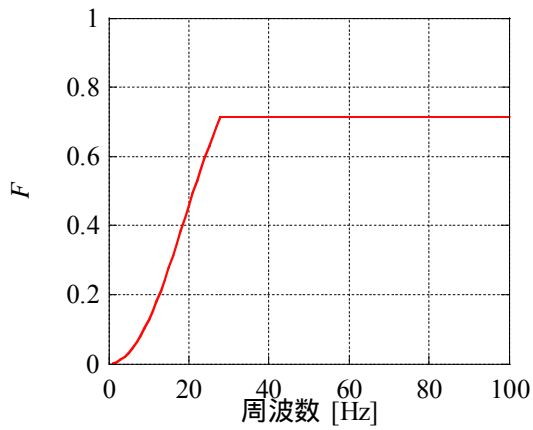


図 3.42 28Hz の地震計の周波数特性

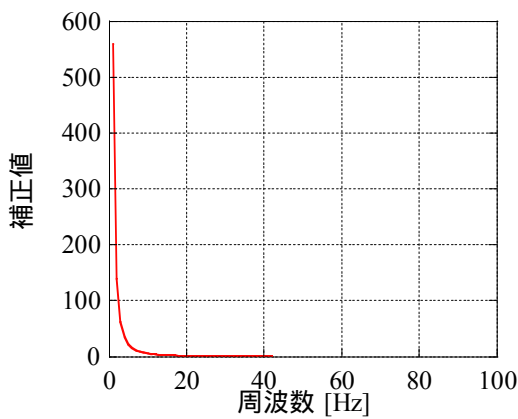


図 3.43 28Hz の地震計の周波数特性の補正曲線

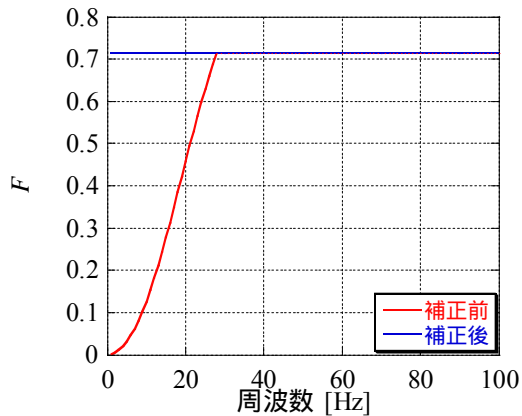


図 3.44 28Hz の地震計の補正前後の周波数特性

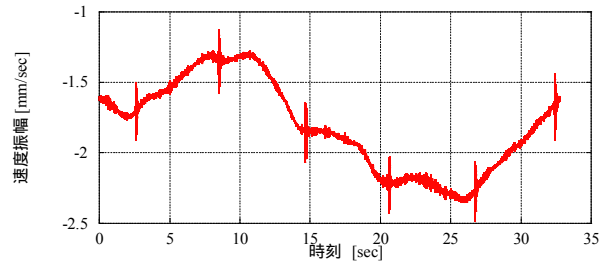
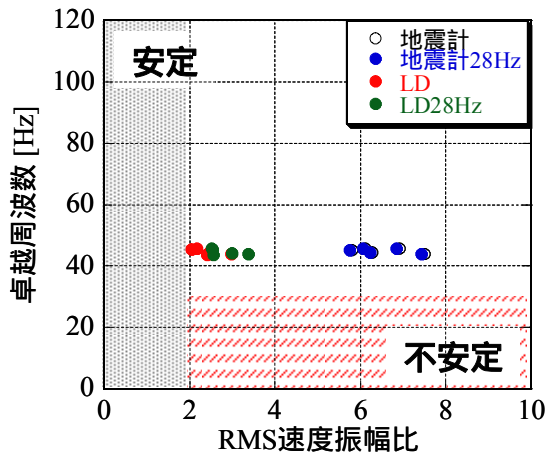
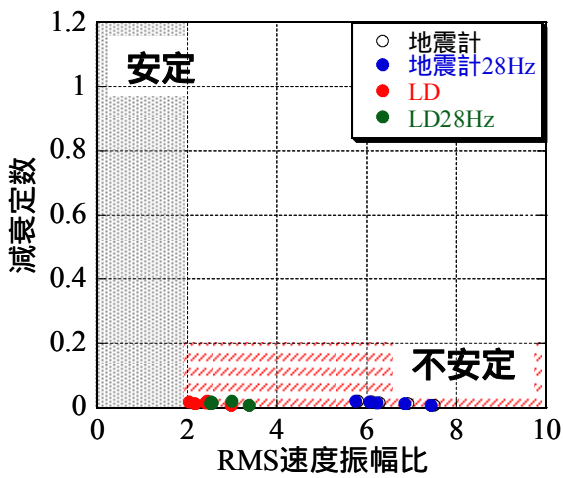


図 3.45 補正処理とフーリエ逆変換後の速度振幅
(ケース 6、岩塊 B)

今回は、以下に示す方法を採用する。提案法および従来法の速度振幅の時刻歴に、地震計の固有周波数と同じ値をカットオフ周波数として、ハイパスフィルタをかけた。この処理をすることで、地震計で感度が低下する固有周波数より低い周波数帯からの影響を除去することができ、提案法と従来法が同一の感度特性(カットオフ周波数より高い周波数)で比較することができる。この検証では、上述のケース 6 の計測結果を用いた。図 3.46、3.47 に提案法と従来法ともにカットオフ周波数 28Hz でハイパスフィルタをかけた判定図およびを提案法と従来法で得られた RMS 速度振幅比の相関図をそれぞれ示す。図 3.46 に示すように、ハイパスフィルタをかけることで、提案法では RMS 速度振幅比の値が大きくなり、従来法では RMS 速度振幅比の値はほとんど変わらず、両者の差はまだ大きいことが確認できる。図 3.47 に示した相関図から得られた相関係数は 0.414 となり、ハイパスフィルタをかけることで、逆に相関がない結果となった。これらの結果から、ハイパスフィルタをかけるだけでは、従来法と同レベルの RMS 速度振幅比が得られないことがわかった。以上のことから、それぞれのデータについてハイパスフィルタをかけても、結果に差がほとんどないため、RMS 速度振幅比の差異の原因にはならないと考えられる。



(a)RMS 速度振幅比 - 卓越周波数



b)RMS 速度振幅比 - 減衰定数

図 3.46 判定図

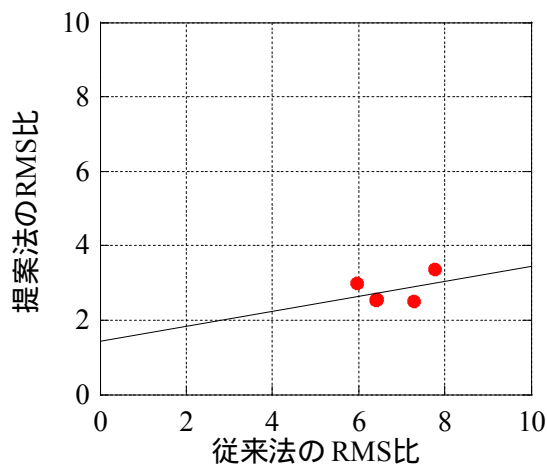
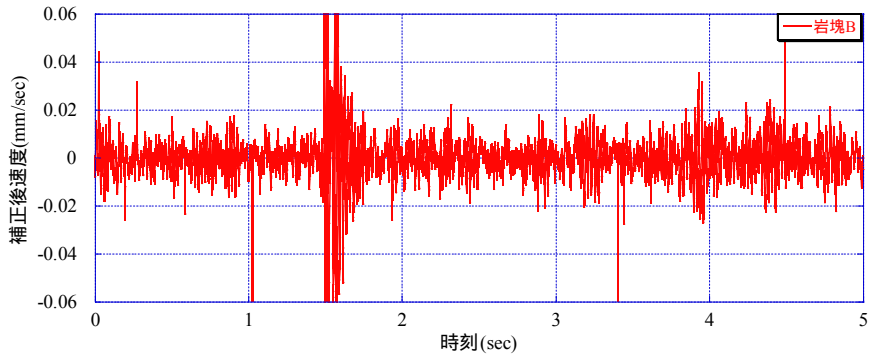


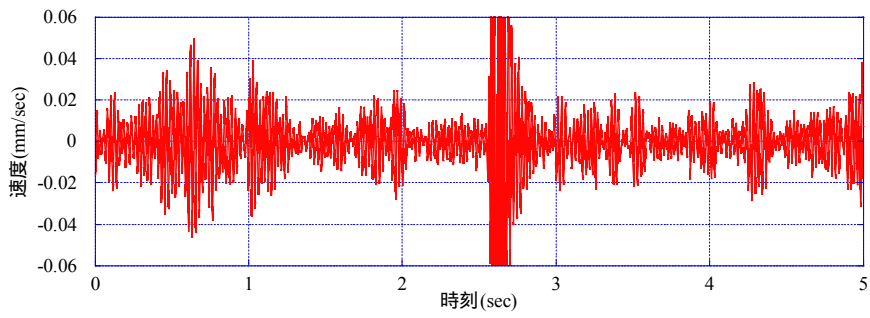
図 3.47 提案法と従来法で得られた RMS 速度振幅比の
相関図(ハイパスフィルタをかけた場合)

3 つ目として、提案法にとって、今回計測した計測対象物の変位振幅が小さかったことが原因で、RMS 速度振幅比に差異が生じたと考えた。図 3.48 に提案法と従来法で得られたケース 6 の岩塊 B と岩塊 C の速度振幅の時刻歴の拡大図(0~5sec)をそれぞれ示す。図 3.48(a), (b)に示すように、不安定岩塊である岩塊 B を計測した提案法と従来法の速度振幅では、振幅の値が概ね一致していることが確認できる。次に、図 3.48(c), (d)に示すように、基岩と想定した岩塊 C を計測した従来法の速度振幅は、ほとんど振動していないのが確認できる。一方、提案法では、従来法と比べると、速度振幅は振動しており、振幅の値も大きいことが確認できる。RMS 速度振幅比の計算では、分子と分母にそれぞれ、不安定岩塊と基岩の速度振幅を用いる。これらのことから、RMS 速度振幅比の分母が、提案法は従来法に比べて大きいことになり、それが原因で、RMS 速度振幅比の値が小さくなったと考えられる。

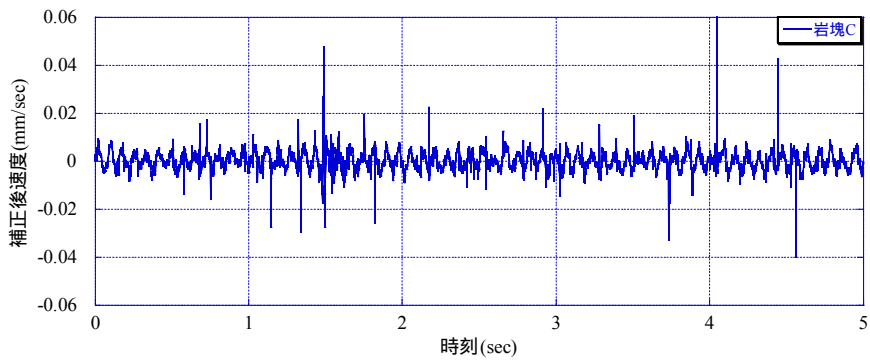
次に、提案法を用いて、どの程度の変位振幅を計測できるかを確認する。レーザー波干渉装置を用いて、変位振幅が既知な小型振動台を計測し、その時に得られた速度の時刻歴を積分して、変位量を算出した。変位計を振動台の天端に取り付けて、同期計測を行った。なお、今回は、振動台の変位振幅は約 1mm とした。図 3.49 に、提案法による振動台計測で得られた変位量および振動台に取り付けた変位計で得られた変位をそれぞれ示す。図 3.49 から、提案法を用いて、変位振幅 1mm を計測できることが確認できた。この 1mm という値は、本事業で対象としている計測対象物の変位振幅に比べて大きいと考えられる。これまでの FS を含む本事業および独自の研究から、提案法による計測で、計測対象物の変位振幅が小さい場合は、変位振幅を大きくする方法が有効であるということが確認できている。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。そのため、加振場所や方法についての検討が今後必要であると考えられる。



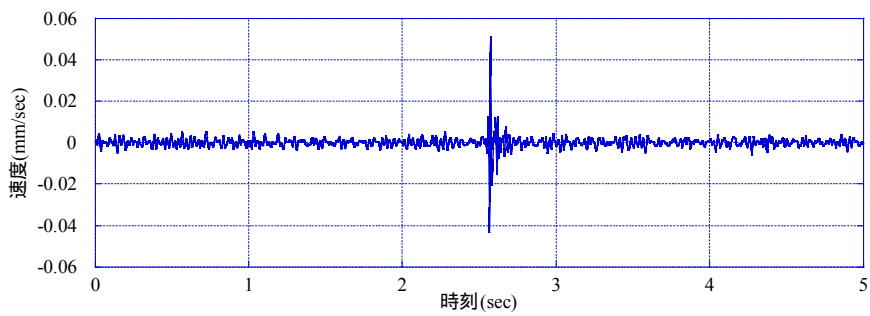
(a)岩塊 B(提案法)



(b)岩塊 B(従来法)

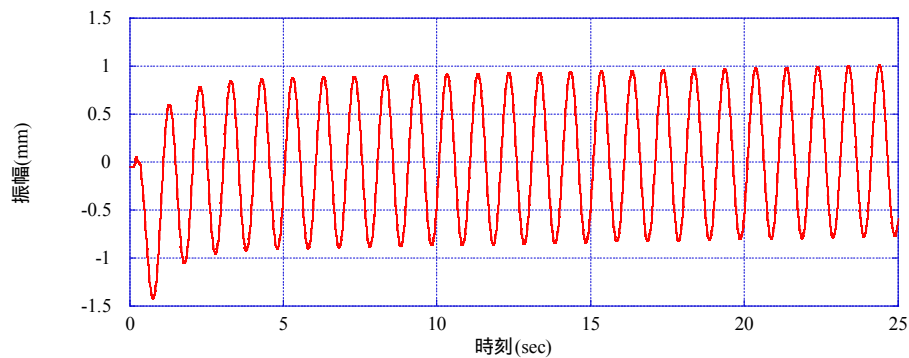


(c)岩塊 C(提案法)

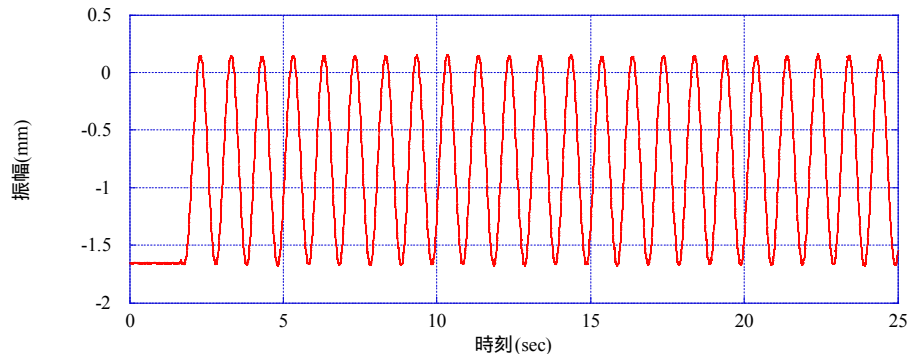


(d)岩塊 C(従来法)

図 3.48 提案法と従来法で得られた速度振幅の時刻歴の拡大図



(a)レーザー波干渉装置



(b)変位計

図 3.49 振動台計測で得られた変位量

3.4 まとめ

本章では、模型実験や実岩盤を対象とした検証を通じて、レーザー波干渉を利用した遠隔からの安定性調査法である提案法の計測精度や適用範囲について整理した。

模型斜面上にコンクリートブロックを設置して計測した検証（検証1）と、山間部において実岩盤を対象とした検証（検証2）では、従来法と提案法の結果には整合性が確認され、遠隔からレーザー波干渉を利用して調査する提案法の有効性が確認された。しかし、くさび型すべりが想定される亀裂性岩塊を対象とした検証（検証3）では、常時微動を対象とした場合、従来法と提案法により得られた RMS 速度振幅比の値に差異が生じていた。これにより、判定図に結果をプロットした場合、従来法との結果とのズレが確認された。検証1と検証2では、計測対象の安定度が低い状態であったため、提案法でも十分な精度で評価することができたと考えられる。対して、検証3では、常時微動のみでは、対象の振動が小さく、RMS 速度振幅比の値などに影響を与えたものと考えられる。また、この検証では、振動源を設けて加振することにより、変位振幅を大きくする方法が有効

であるということが確認された。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。そのため、加振場所や方法についての検討が今後必要であると考えられる。

第4章 レーザー波干渉を利用した安定性調査法の適用可能性の検討

提案法による安定性評価は従来法にならい、3つの指標を用いてきた。これまでに、提案法と従来法により得られたデータの解析および両者の比較により、特定のケースにおいては、卓越周波数と減衰定数の一致を確認することができた。しかし、RMS速度振幅比に関しては、常時微動のみでは計測対象の変位振幅が微小であるため、提案法と従来法において値の一致は確認できていない。そこで、不安定岩塊の安全度評価に用いる新たな指標として、モニタリング計測により計測対象の卓越周波数の変化を確認することで評価する方法の可能性について検討する。以下では、検証のために行ったコンクリートブロックを用いた模型実験について説明し、結果を示す。

4.1 実験条件

亀裂性岩塊の挙動をモニタリングすることで、計測対象の危険度を評価する手法の有効性を検討するため、計測対象が不安定状態になるにつれて、計測対象の固有周波数がどのように変化するかを模型実験により確認した。図4.1に示す1個あたり39cm×19cm×15cmのコンクリートブロックを1段積みから5段積みまで1段ずつ積んでいき、各段のコンクリートブロックの振動をレーザー波干渉装置によって計測した。提案法による振動計測では、前述のとおり、偶発的に計測データにノイズが入る場合があるため、計測時には計測対象の変位振幅の時刻歴を随時モニタリングし、ノイズの有無を確認しながら計測を行った。各ケースともノイズのないデータが5回収録できるまで計測を行った。図4.2に5段積みコンクリートブロックの様子を示す。表4.1~4.3に計測ケースの内容、提案法および従来法で用いるデータ収録装置の設定をそれぞれ示す。

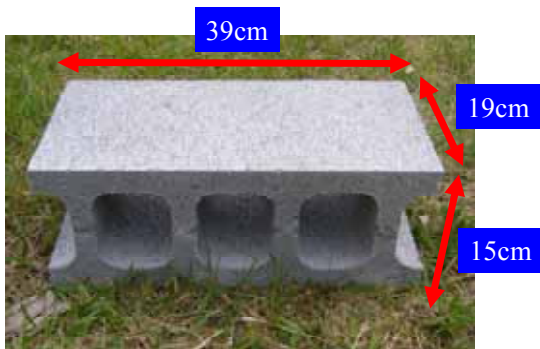


図4.1 コンクリートブロック



図4.2 5段積みコンクリートブロック

表4.1 計測ケース

case	積み数	計測段数
case1	1段積み	1段目
case2	2段積み	1段目
case3		2段目
case4	3段積み	1段目
case5		2段目
case6		3段目
case7	4段積み	1段目
case8		2段目
case9		3段目
case10		4段目
case11	5段積み	1段目
case12		2段目
case13		3段目
case14		4段目
case15		5段目

表 4.2 データ収録装置(レーザー波干渉装置)の設定

サンプリング周波数	(Hz)	1000
計測時間	(sec)	16
速度出力レンジ	(mm/sec)	0.2
補正出力レンジ	(mm/sec)	0.2
HPF(ハイパスフィルタ)	(sec)	5
LPF(ローパスフィルタ)	(Hz)	500

表 4.3 データ収録装置(地震計)の設定

サンプリング周波数	(Hz)	1000
データ数		16384
プレトリガー		OFF

4.2 実験結果

図 4.4~4.18 に各ケースで得られた提案法のフーリエスペクトルをそれぞれ示す。

ケース 1 ではコンクリートブロックの卓越周波数は 15Hz 付近となった(図 4.4)。ケース 2、ケース 3 の 2 段積みのコンクリートブロックでは各段とも卓越周波数は 8Hz 付近になり、ケース 1 と比べ卓越周波数の値が低周波になっていることが確認できる(図 4.5、図 4.6)。ケース 4~6 の 3 段積みのコンクリートブロックでは、2 段目、3 段目において、卓越周波数が 6.5Hz 付近となった。また、各段のフーリエ振幅の値が下段になるほど小さくなっていることが確認できる(図 4.7~図 4.9)。ケース 4 の 1 段目においては、卓越周波数の値が 5 回の計測で異なり、卓越周波数の特定ができなかった(図 4.7)。これは、1 段目のコンクリートブロックが上に積み重ねられているコンクリートブロックによって押さえられることで、上段のコンクリートと比べ変位振幅が小さくなっているため、提案法では卓越周波数を明確に出力することができなかったためと考えられる。ケース 7~10 の 4 段積みのコンクリートブロックでは、4 段目、3 段目において、卓越周波数が 5.5Hz 付近となった。2 段目、1 段目では卓越周波数の値にばらつきがあり、卓越周波数の特定はできなかった(図 4.9~図 4.12)。ケース 11~15 の 5 段積みのコンクリートブロックでは、5~3 段目において、卓越周波数が 4Hz 付近となった。2 段目、1 段目では卓越周波数の値にばらつきがあり、卓越周波数の特定はできなかった(図 4.13~図 4.17)。これらの結果より、コンクリートブロックの積み数が増加していくとコンクリートブロックの卓越周波数がより低周波域に移行することが確認できる。

4.3 まとめ

本章に示した検証結果より、計測対象の卓越周波数は不安定さを増すほどに低くなり、また、フーリ

エスペクトルの中に卓越周波数が明確に表れることが確認された。そのため、提案法を用いて定期的なモニタリングを実施することで、不安定岩塊が不安定化していく様子を評価することができる可能性がある。

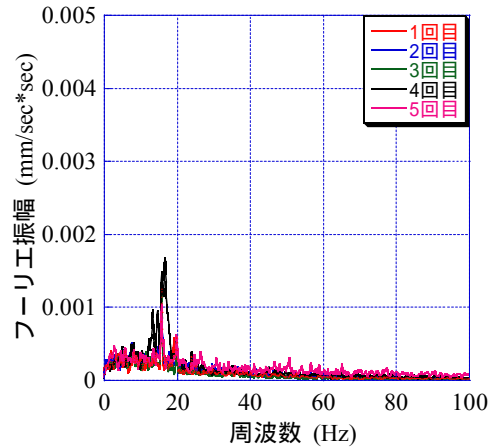


図 4.3 ケース 1 のフーリエスペクトル

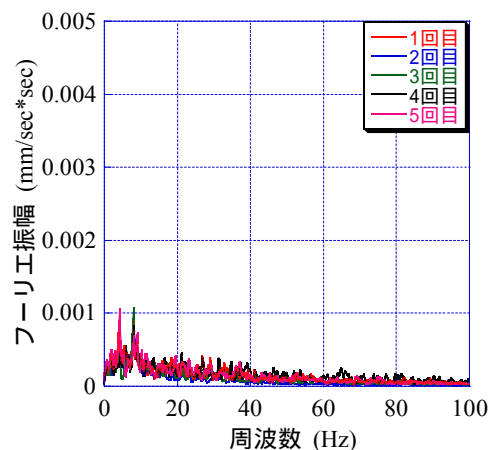


図 4.4 ケース 2 のフーリエスペクトル

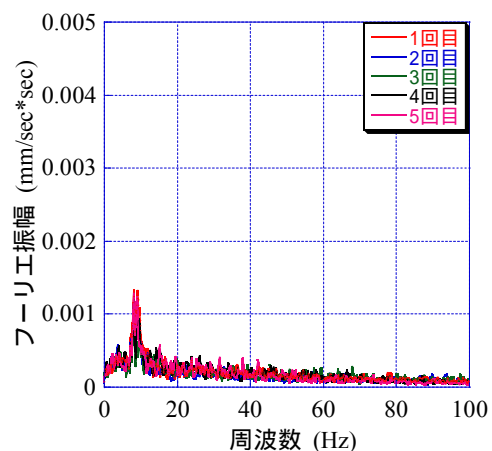


図 4.5 ケース 3 のフーリエスペクトル

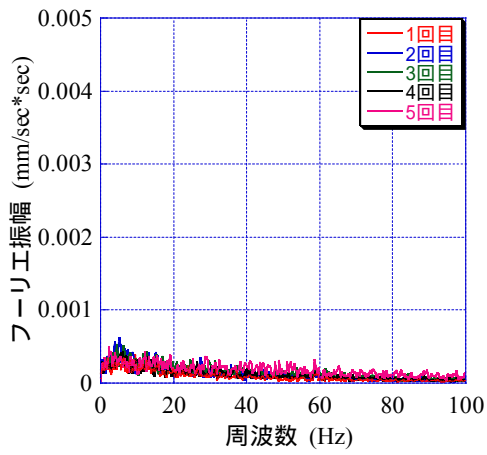


図 4.6 ケース 4 のフーリエスペクトル

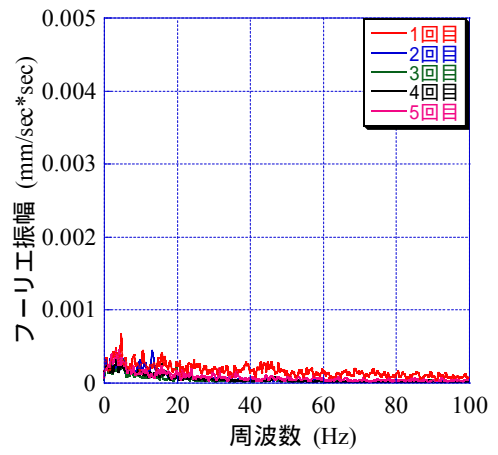


図 4.9 ケース 7 のフーリエスペクトル

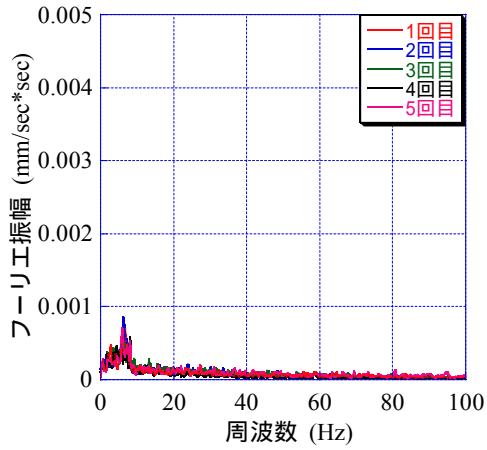


図 4.7 ケース 5 のフーリエスペクトル

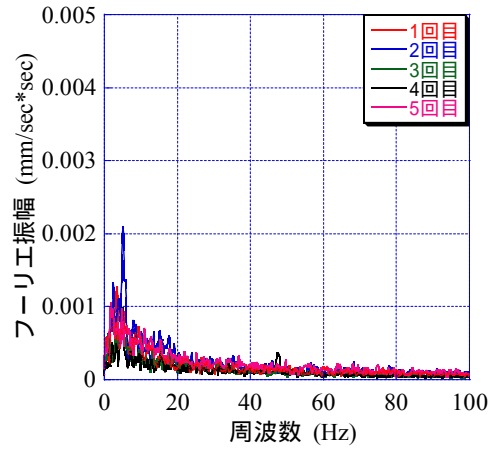


図 4.10 ケース 8 のフーリエスペクトル

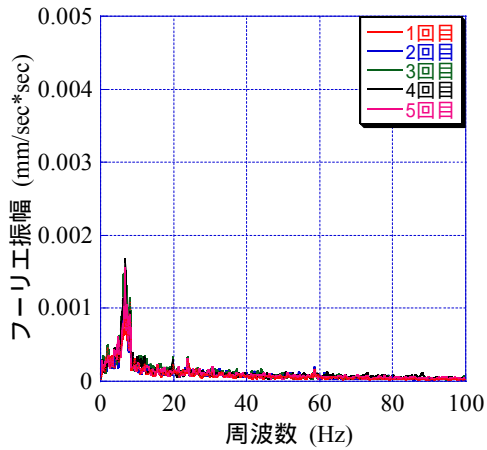


図 4.8 ケース 6 のフーリエスペクトル

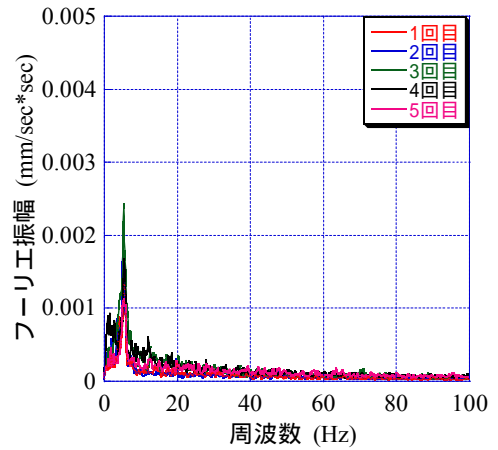


図 4.11 ケース 9 のフーリエスペクトル

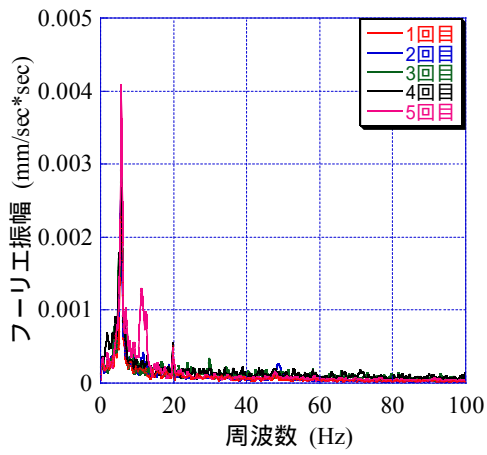


図 4.12 ケース 10 のフーリエスペクトル

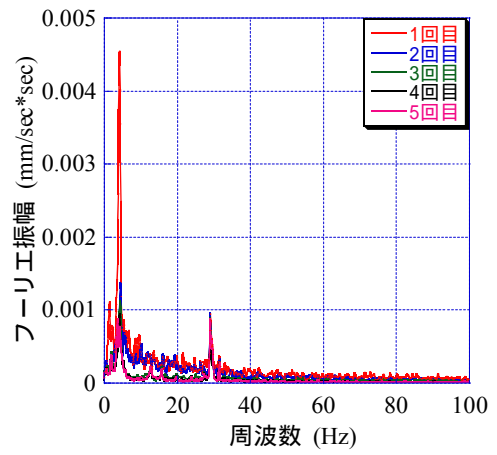


図 4.15 ケース 13 のフーリエスペクトル

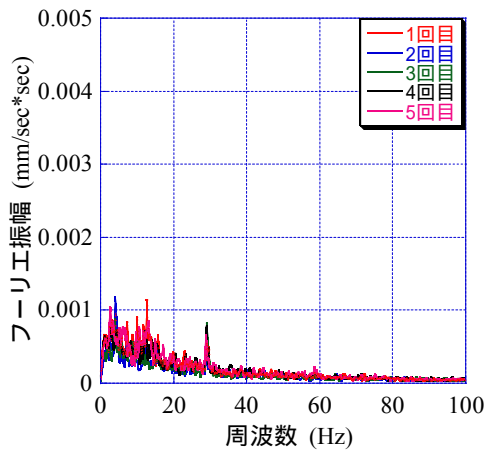


図 4.13 ケース 11 のフーリエスペクトル

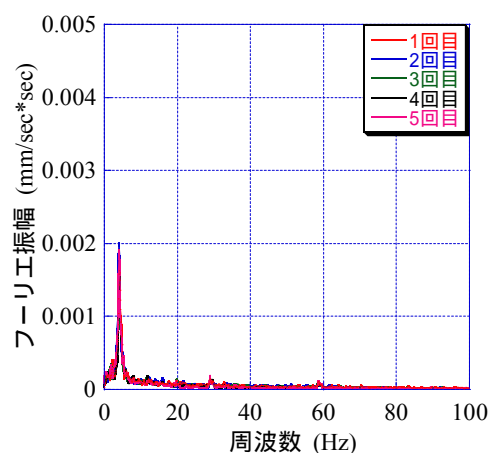


図 4.16 ケース 14 のフーリエスペクトル

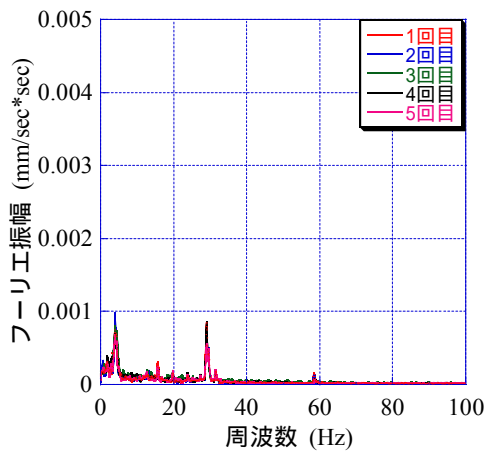


図 4.14 ケース 12 のフーリエスペクトル

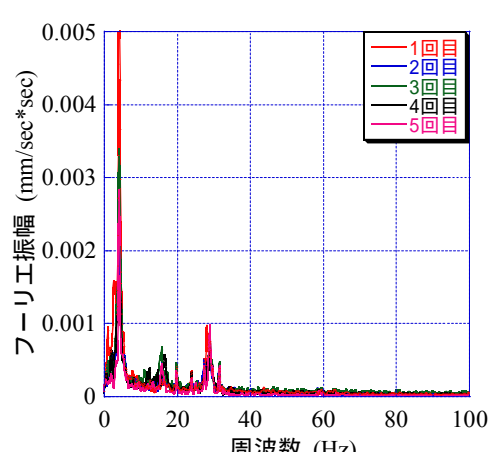


図 4.17 ケース 15 のフーリエスペクトル

第5章 結論

本研究では、亀裂性岩盤斜面を対象として、レーザー波のドップラー干渉を利用した遠隔からの安定度調査方法を提案し、各種検証や問題点の整理を行い、提案調査方法の有効性を検討した。本研究の検証結果や得られた知見を以下にまとめる。

- ・計測の誤差について、その発生原因を6種類に分類し、計測誤差が発生する条件や対応策についてまとめた。定性的ではあるが、これらの情報をもとにして、計測時の条件の良し悪しを判断する材料にできる。ただし、計測データを見て初めて確認できる誤差もあるため、計測時には、得られる速度振幅の時刻歴とそれのフーリエスペクトルをリアルタイムで確認しながら計測することが必要である。また、どうしても誤差が入り込んでしまう現場では、解析の際に目視で非物理的なスパイク波などを除外する必要がある。
- ・模型や実岩盤上を用いた検証では、ある程度不安定化した計測対象については、従来法と提案法の整合性が確認された。また、常時微動のみでは評価の難しい場合でも、振動源を設けて加振しながら計測することによって、提案法でもある程度の評価が可能であることを確認した。ただし、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、加振場所や方法についての検討が今後必要であると考えられる。
- ・常時微動のみで亀裂性岩盤の安定性を評価するための新たな方法として、モニタリング結果に基づく評価方法を提案した。この検証のために、コンクリートブロックを段積みにして、格段の振動特性を評価した。その結果、計測対象の卓越周波数は不安定さを増すほどに低くなり、また、フーリエスペクトルの中に卓越周波数が明確に表れることが確認された。そのため、提案法を用いて定期的なモニタリングを実施することで、不安定岩塊が不安定化していく様子を評価することができる可能性がある。

以上より、レーザー波のドップラー干渉を利用した提案法の適用に関して、以下の3種類の手段が考えられる。

従来法と同様の常時微動による評価

従来法と同様に、対象の振動を計測し、卓越周波数、減衰定数、PMS速度振幅比などの指標を用いて、安定性を評価する。この場合、ある

程度不安定化して振幅の大きく出るような対象であれば、評価が可能であるが、振幅が小さい場合は、卓越周波数やRMS速度振幅比の評価制度が低下し、評価が難しくなる。そのため、どの程度振幅が大きければ適用可能かについての検討が必要である。ただし、振動の振幅がある一定値以上といったシンプルな基準ではなく、対象の振動方向と計測方向、または基盤の常時微動の方向なども関連するものと考えられる。

振動源を設けて加振した計測結果による評価

常時微動では評価が難しい対象であっても、振動源を設けて、加振中に計測することで、評価が可能となるケースがある。これについては、振動源の振動特性や、計測対象と振動源の位置関係などについて検討する必要がある。

モニタリング計測による評価

計測時期を変えて複数回計測し、卓越周波数の値やスペクトルを分析することにより、計測対象の安定度が変化していく様子を確認できる可能性がある

参考文献

- [1] 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.
- [2] 上半文昭(2007), 構造物診断用非接触振動測定システム「U ドップラー」の開発, RTRI REPORT, Vol.21, No.12, Dec.
- [3] 竹本将, 松山裕幸, 緒方健治(2001), 振動特性を利用した落石調査手法の模擬実験と現地計測について, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.362-363.
- [4] 永吉哲哉, 田山聡, 緒方健治(1999), 振動特性を用いた落石危険度判定調査法の検討, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp.456-457.
- [5] 永吉哲哉, 松繁浩二, 別宮隆司(2002), 落石振動調査法による危険度評価の検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.1335-1336.
- [6] 日本道路公団試験研究所(2002), 落石危険度振動調査マニュアル(案).
- [7] 松尾博(2004), 工学のためのフーリエ変換.

謝辞

本研究は、岐阜県、(財)道路保全技術センター、(財)鉄道総合技術研究所、応用地質株式会社、住友大阪セメント株式会社の協力を得て、現地計測およびモデル実験を実施することができた。ここに謝意を表します。

巻末資料 レーザー波干渉装置

本研究で使用するレーザー波干渉装置(以下、LD)の概要を示す。LDの計測システムは、以下のように大別され、構成される。表 A.1 に計測システムを構成する使用機器の一覧を、表 A.2 ~ A.4 にLDの仕様を示す。

表 A.1 使用機器の一覧

	機器	数量	写真
(a)	LD	1	
(b)	パーソナル コンピュータ (以下、PC)	1	
(c)	データロガー	1	

表 A.1 使用機器の一覧

	機器	数量	写真
(d)	センサ信号 入力端子	8	
(e)	スコープ	1	
(f)	スコープ用 標準レンズ	1	
(g)	雲台	1	

表 A.1 使用機器の一覧

	機器	数量	写真
(h)	三脚	1	
(i)	信号出力ケーブル	1	
(j)	電源ケーブル	3	
(k)	USB ケーブル	1	

表 A.1 使用機器の一覧

	機器	数量	写真
(l)	バッテリー	2	
(m)	バッテリー用 充電ケーブル	2	

表 A.2 計測器の仕様

名称	メーカー	仕様
U ドップラー 振動計機体(LD)	グラフテック(株)	サイズ：113(W)×141(H)×351(D)mm 重量：5.5kg 応答周波数範囲：DC~600Hz 測定速度範囲：0.2μm/s~20mm/s 速度出力レンジ： 2×10^{-3} m/s/V 速度 L.P.F.：1kHz 固定 速度 H.P.F.：DC, 0.2Hz, 2Hz 感度：約-60dBm 演算周波数範囲：DC~200Hz 以上 角度検出：水平を基準に ±90° 測定可能 出力確度：LDV 出力 ±2%以内 微動速度出力 ±5% 傾斜確度演算用出力 ±5% 測定距離：1.0~100m(反射テープ使用時) 対物レンズ：300mm, f 3.5 センサ有効傾斜確度：±40° 以内 レーザー光源：He-Ne ガスレーザー レーザー光量：出力 1mW 以下 PC 演算後の確度：±3%以内(傾斜確度 10° 以内) ±5%以内(傾斜確度 20° 以内) ±10%以内(傾斜確度 30° 以内) ±15%以内(傾斜確度 30° 以上) 消費電力：約 30VA 使用環境：5~35℃, 30~80% R.H.

表 A.3 雲台の仕様

名称	商品名	メーカー	仕様
雲台	Manfrotto 405 (以前使用していた雲台)	Manfrotto	最大耐荷重量：8kg 重量：1.95kg 高さ：11.5cm

表 A.4 三脚の仕様

名称	商品名	メーカー	仕様
三脚	Manfrotto 475	Manfrotto	最大耐荷重量：12kg 重量：4.3kg