

土木研究所資料

不安定岩盤ブロック抽出のための 岩盤斜面振動計測マニュアル（案）

平成 1 9 年 7 月

独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ
地すべりチーム

Copyright © (2007) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

不安定岩盤ブロック抽出のための 岩盤斜面振動計測マニュアル（案）

土砂管理研究グループ	上席研究員	藤澤和範
	元 総括主任研究員	浅井健一 ^{*1}
	総括主任研究員	永田雅一
	主任研究員	石田孝司

要旨

岩盤斜面の崩壊は、表層崩壊に比べて発生頻度は低いものの、崩壊が発生した場合には甚大な被害が生じるため、岩盤斜面の対策や監視は道路防災上の重要な課題である。しかしながら、広範囲に存在する岩盤斜面のすべてに対して対策や監視を行うことは困難であることから、道路防災点検やその後の詳細調査を行うことにより、対策や監視を行うべき斜面を特定している。

岩盤斜面の詳細調査においては、地表踏査等によって亀裂の分布や開口度等を調査し、安定性の評価を行って不安定岩盤ブロックを抽出するとともに、崩壊の素因、崩壊規模、崩壊形態等を推定する。しかしながら、亀裂の地中部分の分布や開口度等を正確に把握するのは困難である。このような場合における詳細調査の補助手段の1つとして、常時生じている岩盤ブロックの微動（常時微動）や車両走行等による人工的な振動が与えられた時の岩盤ブロックの振動を測定し、岩盤ブロックの安定性評価を行って不安定岩盤ブロックを抽出する手法の詳細や注意点等について「不安定岩盤ブロック抽出のための岩盤斜面振動計測マニュアル（案）」としてとりまとめた。

キーワード：岩盤斜面、常時微動、振動

*¹ 現 材料地盤研究グループ総括主任研究員

目 次

第1章 総 則	1
第2章 計測技術の概要	2
第3章 振動計測の計画	4
3-1 事前調査	4
3-2 振動計測点の配置	4
3-3 振動計測機器の選定及び岩盤への設置方法	6
3-4 計測する振動の種類と振動源	8
第4章 振動計測の実施	9
4-1 振動計測のサンプリング周波数	9
4-2 振動計測の時間長	10
4-3 振動源の大きさ	11
第5章 計測結果の解析	12
5-1 解析の流れ	12
5-2 振動波形記録の出力	13
5-3 周波数スペクトル解析	13
5-4 振動粒子軌跡の出力	14
5-5 累積振幅比の出力	14
第6章 不安定性の評価	15
6-1 不安定岩盤ブロックと安定岩盤の振動特性の違い	15
6-2 同一岩盤ブロックに配置された複数の計測点の振動特性	18

6-3	実際の岩盤斜面で計測を行い評価した事例	20
6-4	対策工（岩盤接着工）の施工前後に計測を行った事例	34
参考文献		36

第1章 総 則

本マニュアル（案）は、道路管理者が実施する岩盤斜面の調査において、振動計測手法を用いて岩盤ブロックの安定性を評価し不安定岩盤ブロックを抽出する際の参考書としてとりまとめたものである。

岩盤斜面の崩壊は、表層崩壊に比べて発生頻度は低いものの、崩壊が発生した場合には甚大な被害が生じるため、岩盤斜面の対策や監視は道路防災上の重要な課題である。しかしながら、広範囲に存在する岩盤斜面のすべてに対して対策や監視を行うことは困難であることから、道路防災点検やその後の詳細調査を行うことにより、対策や監視を行うべき斜面を特定している。

岩盤斜面の詳細調査においては、地表踏査等によって亀裂の分布や開口度等を調査し、安定性の評価を行って不安定岩盤ブロックを抽出するとともに、崩壊の素因、崩壊規模、崩壊形態等を推定する。しかしながら、亀裂の地中部分の分布や開口度等を正確に把握するのは困難である。このような場合における詳細調査の補助手段の1つとして、常時生じている岩盤ブロックの微動（常時微動）や車両走行等による人工的な振動が与えられた時の岩盤ブロックの振動を測定し、岩盤ブロックの安定性評価を行って不安定岩盤ブロックを抽出する手法の詳細や注意点等について本マニュアル（案）で解説するものである。

なお、本マニュアル（案）は、道路以外で取り扱われる岩盤斜面の調査においても準用することができる。

第2章 計測技術の概要

本手法は、安定岩盤では周囲の亀裂が密着していて基盤と一体となっているのに対し、不安定な岩盤ブロックでは亀裂の開口・劣化が進んで基盤と分離しているため、不安定岩盤の方が安定岩盤よりも大きく振動するという考えに基づいている。

計測及び解析の流れについて以下に説明する。

(1) 計測

図-2.1に示すように、対象岩盤に複数の計測点を設けて振動計を取り付け、岩盤ブロックの常時微動および人工的な振動を与えたときの振動（車両走行振動等）を計測する。

計測の対象となる岩盤斜面の条件（規模、亀裂の状況、振動源からの距離等）は様々であるため、入力振動の大きさは常に同じではない。したがって、原則として計測点のうち1つを安定岩盤に設けて比較する必要がある。

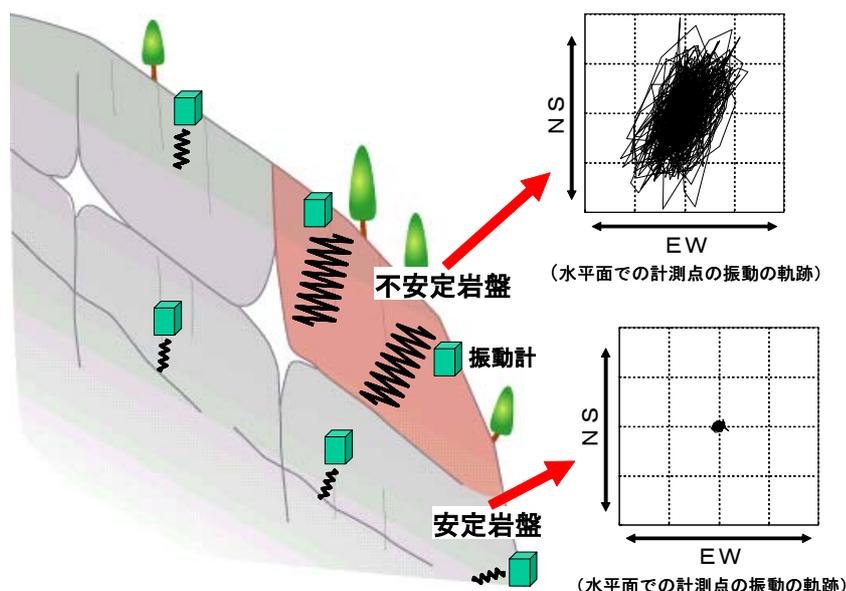


図-2.1 計測技術のイメージ

(2) 解析

本手法における解析処理の流れを図-2.2に示す。このうち、振動波形の出力、周波数分析及び振動粒子軌跡の出力は一般的な解析手法である。

振動波形記録は振幅や減衰の状態などを比較できるため、岩盤ブロックの不安定性の判断や同じ不安定でも同一ブロックかどうかの判断を行う材料となる。

周波数分析によって求められる周波数スペクトルは岩盤ブロックの固有周波数に関係すると考えられるため、特に岩盤ブロックの大きさやブロックの同一性を検討する上で重要な情報となる。

振動粒子軌跡（オービット）は平面内での計測点の動きを示すもので、振幅に加えて卓越する振動方向が示されるため、岩盤ブロックの不安定性やブロックの同一性に加えて、不安定な方向を判断する材料となる。

また、岩盤ブロックの安定性を評価する新しい指標として、累積振幅（入力振動によって岩盤ブロックの計測点が一定時間内に実際に動かされた軌跡の累積長さを示す）がある。

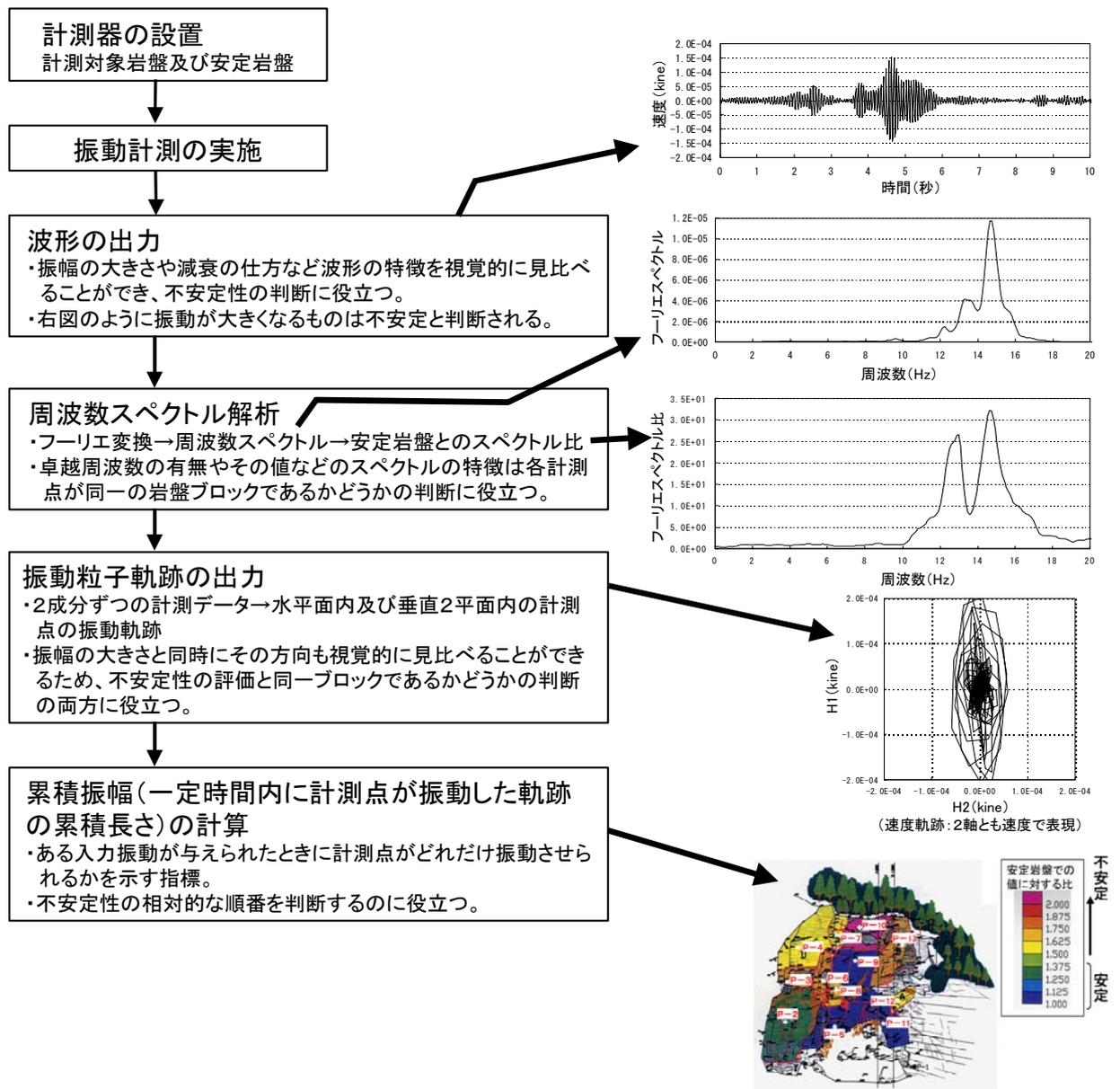


図-2.2 解析処理の流れ

第3章 振動計測の計画

3-1 事前調査

事前に踏査等により現地調査を行い、岩盤の亀裂状況から不安定な岩盤ブロックのブロック分けを実施して、不安定ブロックのタイプや安定性について想定する。

3-2 振動計測点の配置

3-1でブロック分けを行った主要な不安定ブロックを網羅するように計測点を配置する。ブロック分けが不明瞭な場合は、岩盤斜面全体で計測の空白域がないように、計測点を配置する。これは、計測結果から、同一ブロックか異なるブロックかを判断できると考えられるためである。

また、入力振動の大きさが常に同じではないことを考慮し、原則として測定点のうち1つを安定岩盤に設けて比較する必要がある。

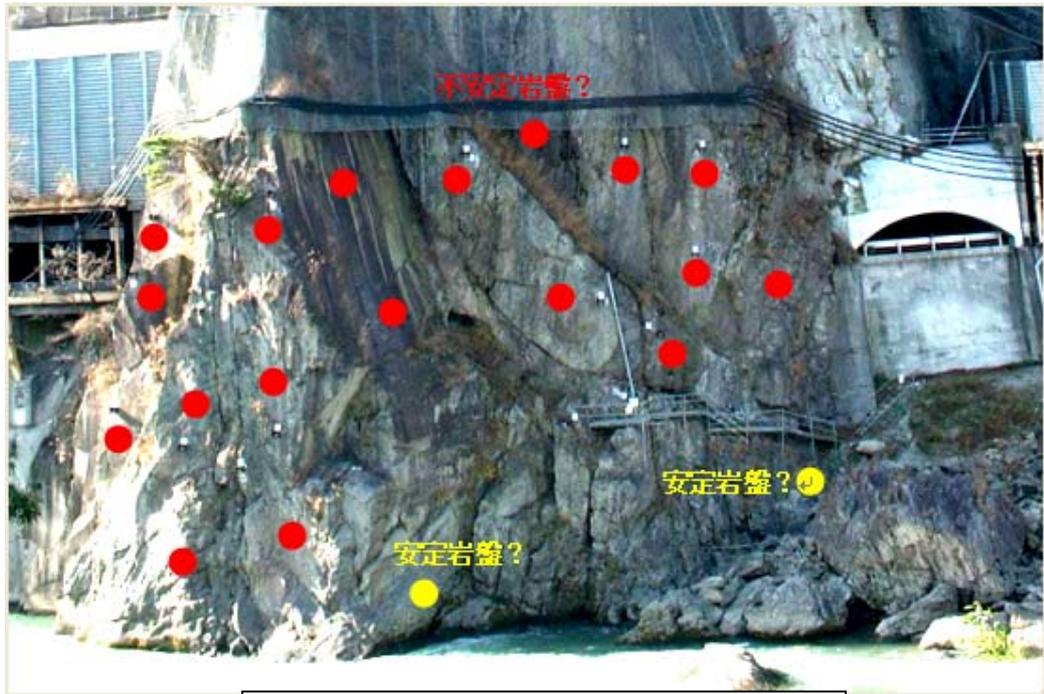
計測点の配置方法として、以下の3ケースが考えられる。

- ①主要な不安定ブロックが明瞭な場合；不安定ブロックを網羅するように計測点を配置する。
- ②主要な不安定ブロックが不明瞭な場合；斜面全体で計測の空白域がないように、計測点を配置する。
- ③計測対象とする不安定ブロックが限定される場合；不安定ブロックに複数点の計測点を配置する。

以下に、計測点の配置例を示す。

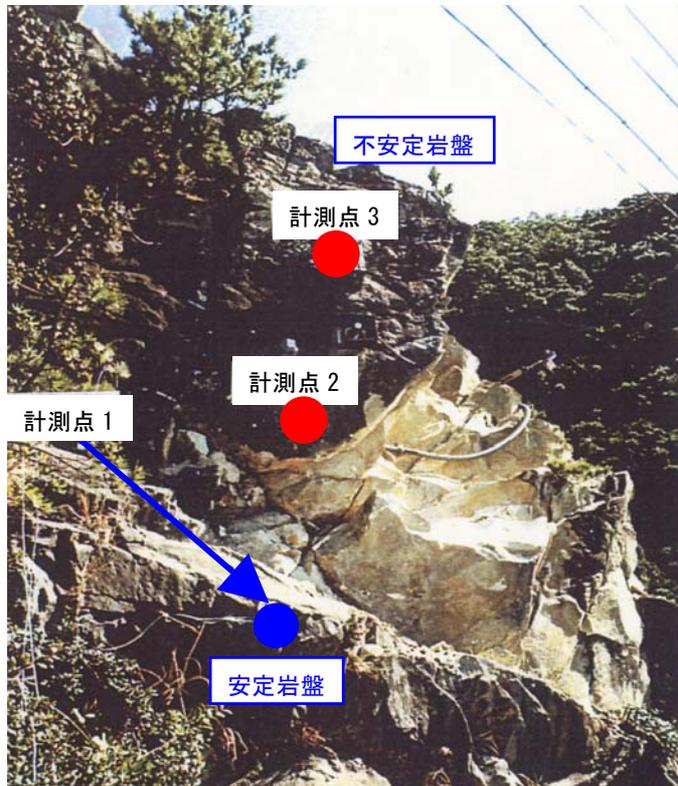


※不安定ブロックを網羅するように計測点を配置する。



計測点の配置例②
 (主要な不安定ブロックが不明瞭な場合)

※ 斜面全体で計測の空白域がないように、計測点を配置する。また、どれが安定岩盤であるのか想定できない場合、複数の候補を上げて計測を行い（本配置例では黄色の丸印で示した計測点）、計測結果から安定岩盤を判断する必要がある。



計測点の配置例③
 (計測対象とする不安定ブロックが限定される場合)

※本配置例では1つの不安定ブロックの上下2箇所計測点を配置している。

3-3 振動計測機器の選定および岩盤への設置方法

岩盤の常時微動は、速度レベルで $10^{-5} \sim 10^{-4}$ kine、周波数帯域は 1～50Hz 程度であると考えられるため、このような微少なレベルの振動を精度良く測定できる計測機器を選定する必要がある。

なお、岩盤ブロックの不安定性やブロックの同一性に加えて、不安定な方向を判断する材料となる振動粒子軌跡（オービット）を得るために、3成分の振動計を選定することが望ましい。なお、3成分の方向は、斜面方向・斜面と直交する方向・上下方向に合わせるなど、所定の方向を向くように考慮する。

長期的な計測の場合は、振動計を岩盤と一体となるように、長期間固着して設置する必要があると考えられるが、短期的に計測を実施して岩盤ブロックの安定性を評価する場合は、簡便で経済性に優れた測定系として、小型軽量のジオフォン等を容易に設置することで対応可能と考えられる。以下に、設置例を示す。

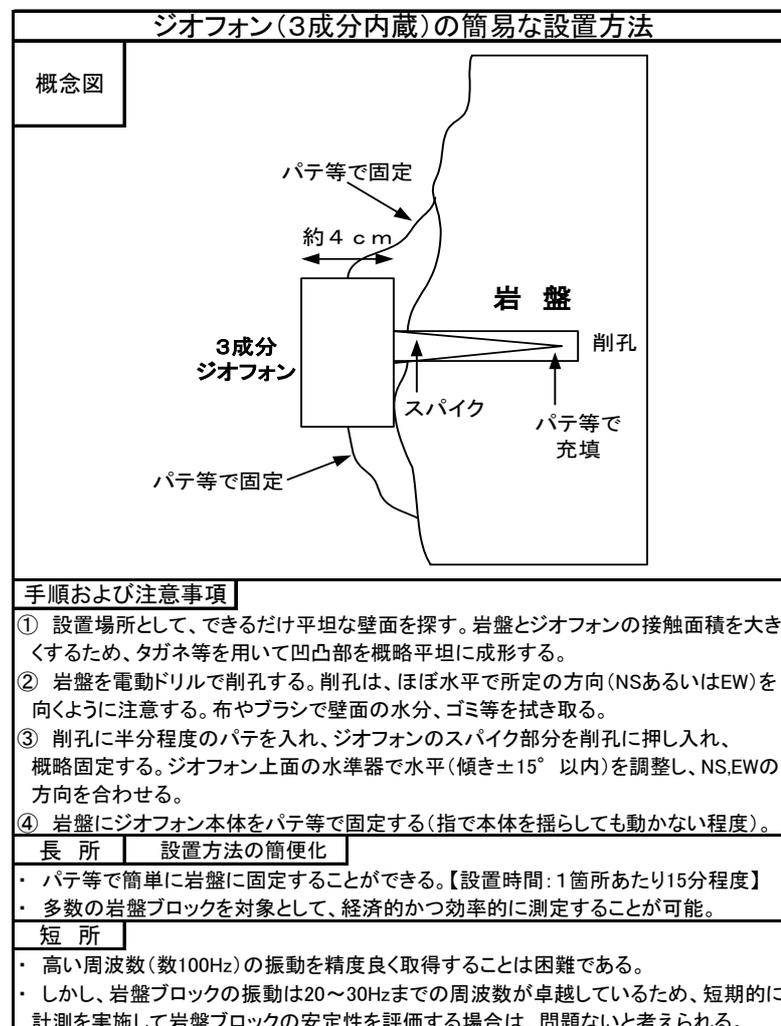


図-3.3.1 振動計の簡易な設置方法の事例



写真-3.3.1 小型振動計の事例
(図-3.3.1の機種の場合、右は岩盤に設置した状況の例)



写真-3.3.2 ロッククライミングによる振動計の設置作業の事例
(小型軽量の機種であれば足場がなくても設置可能)

3-4 計測する振動の種類と振動源

岩盤ブロックの常時微動および人工的な振動を与えたときの振動を計測する。

常時微動は、近傍に明確な振動源がない状態で常時生じている微少な地盤の振動で、岩盤斜面においても生じている。

人工的な振動を与えたときの振動は、安定岩盤と不安定岩盤の振動の違いが常時微動の場合よりも明確に現れやすい。このときの振動源としては車両走行、打撃振動などがあるが、以下の理由により、車両走行による振動を計測するのが人工的な振動原による振動として望ましい。

- ・道路沿いの現場の場合は一般車両走行時に計測すればよいため、特別な振動源を別途用意する必要がない。また、交通量が極端に少ない場合であっても搬入に使用した車両を走行させることで計測可能である。
- ・対象斜面全体に振動が伝わりやすい。

対象となる岩盤斜面が国道などから離れていて、車両走行振動を計測することが困難な場合は、代用振動源として重錘落下のような打撃振動を用いることも考慮する。打撃振動の場合、起振する場所（対象となる岩盤斜面からの距離）については十分にわかっていないが、ある程度、離れた位置で起振し、岩盤ブロック全体に振動が入るよう留意することが望ましい。

なお、起振する場所が、対象となる岩盤斜面に対して近過ぎる場合に想定される悪影響として、

- ・一部の岩盤ブロックに対して、局所的に強い振動を与えてしまう可能性がある。
- ・その結果、岩盤ブロック本来の振動方向とは異なる計測結果となる可能性がある。

等が考えられるが、振動源の適切な場所（対象岩盤斜面からの距離）についてはよくわかっていないことと、現場条件によっても異なることが考えられるため、現場で何箇所か振動源の場所を変えて試行しながら計測することも考慮する。

第4章 振動計測の実施

4-1 振動計測のサンプリング周波数

岩盤ブロックの常時微動および車両走行振動の卓越周波数は、最大で50Hz程度までと考えられるため、振動計測のサンプリング周波数は100Hz以上とすることが望ましい。

図-4.1.1に、サンプリング周波数の違いによる振動波形記録およびフーリエスペクトルの比較例を示す。同図から、振動計測のサンプリング周波数を100Hz以上に設定すれば、振動波形記録の振幅およびスペクトル形状において、あまり差異はみられないことがわかる。

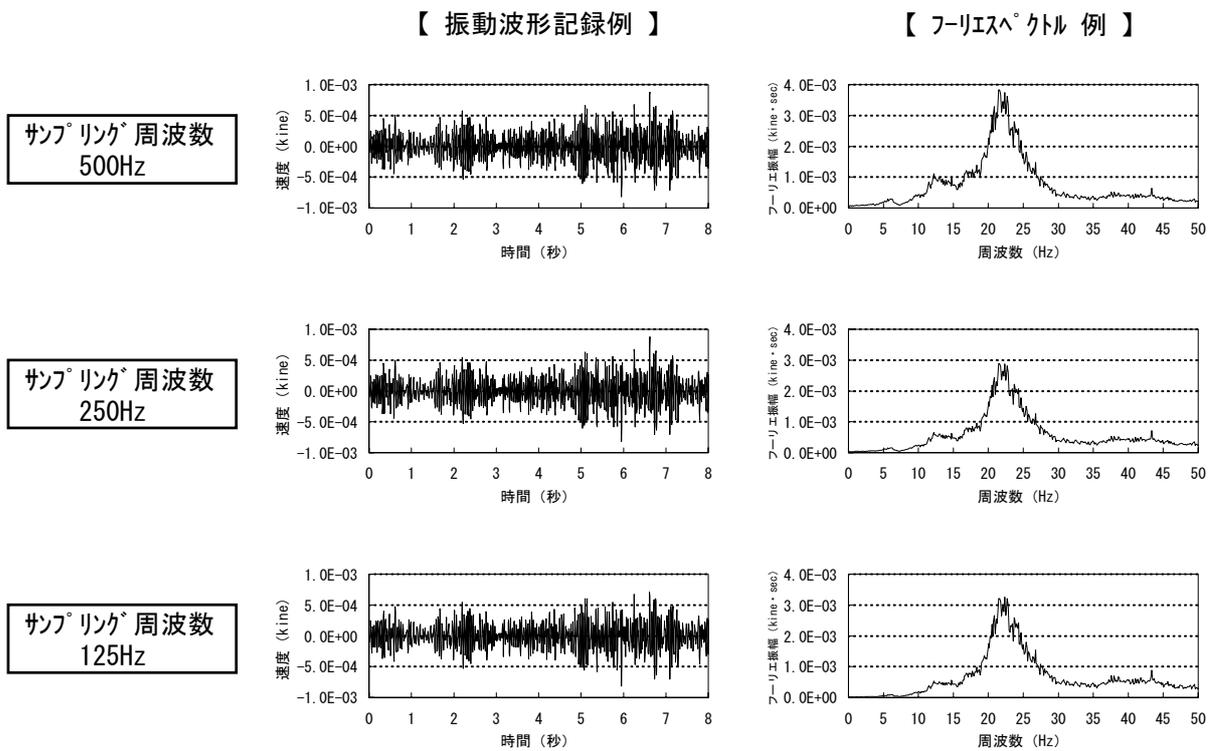


図-4.1.1 サンプリング周波数の違いによる振動波形記録およびフーリエスペクトルの比較例

4-2 振動計測の時間長

振動計測で得られた波形記録をもとに周波数スペクトル解析を実施するにあたり、どの程度の時間長で定常的なスペクトルを得ることができるかに留意する必要がある。

図-4.2.1に、波形記録のデータ時間長による周波数スペクトルの比較例を示す。

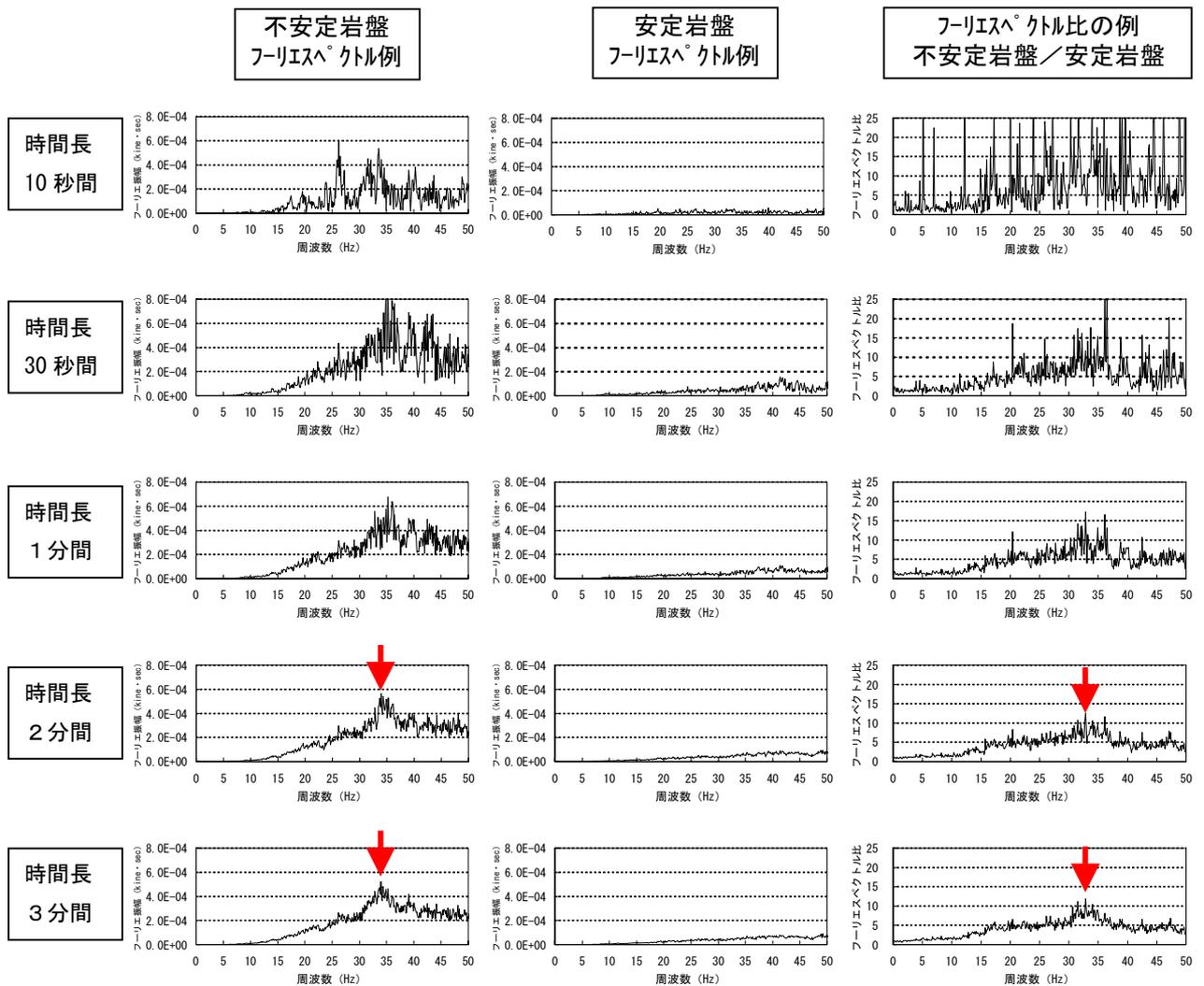


図-4.2.1 波形記録のデータ時間長による周波数スペクトルの比較例

1分間のデータ時間長でスペクトルは概ね安定するが、できれば2～3分間程度のデータ時間長が必要と考えられる。

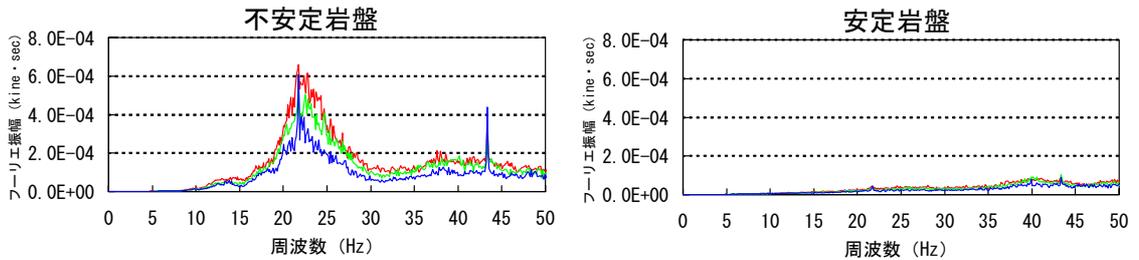
以上のことから、突発的なノイズを含まない安定した波形記録を合計で2～3分間程度確保することができるように振動計測を実施することが望ましい。

4-3 振動源の大きさ

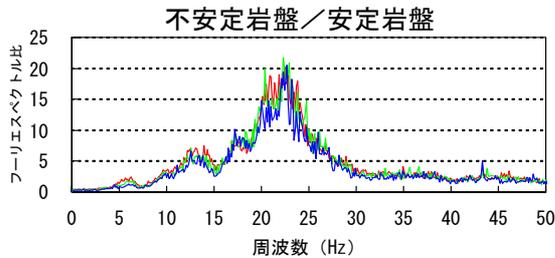
車両走行振動の場合、計測対象とする岩盤斜面が国道に近いほど、また、走行する車両が大型であるほど、振動源として比較的大きなシグナルが期待できる。

岩盤ブロックの振動特性を明瞭に把握するために、振動源のシグナルは大きいことが望ましいが、安定岩盤の振動特性で正規化することにより、振動の大小による影響は大きくないと考えられる。

【 フーリエスペクトル例 】



【 フーリエスペクトル比の例 】



- : 大型車両走行振動
- : 中型車両走行振動
- : 小型車両走行振動

図-4.3.1 振動源の大きさによる周波数スペクトルの比較例

振動源の大きさが異なるため、スペクトル（図-4.3.1の上段）では振幅などが異なるが、安定岩盤との比をとること（図-4.3.1の下段）で、あまり差異はみられないことがわかる。

車両走行振動のように岩盤斜面全体に振動が伝わりやすい場合は、振動の大小に関わらず、比較的安定した計測結果を得ることができると考えられる。

第5章 計測結果の解析

5-1 解析の流れ

振動計測の解析の流れを図-5.1.1に示す。

振動計測で得られた車両走行振動・常時微動等の観測記録から、計測点・成分（方向）毎に時刻暦波形を作成し、振動波形記録・振動粒子軌跡・累積振幅比（安定岩盤の累積振幅と不安定岩盤の累積振幅との比）を出力する。また、周波数スペクトル解析を行い、フーリエスペクトル・フーリエスペクトル比（不安定岩盤のスペクトルと安定岩盤のスペクトルとの比）を出力する。

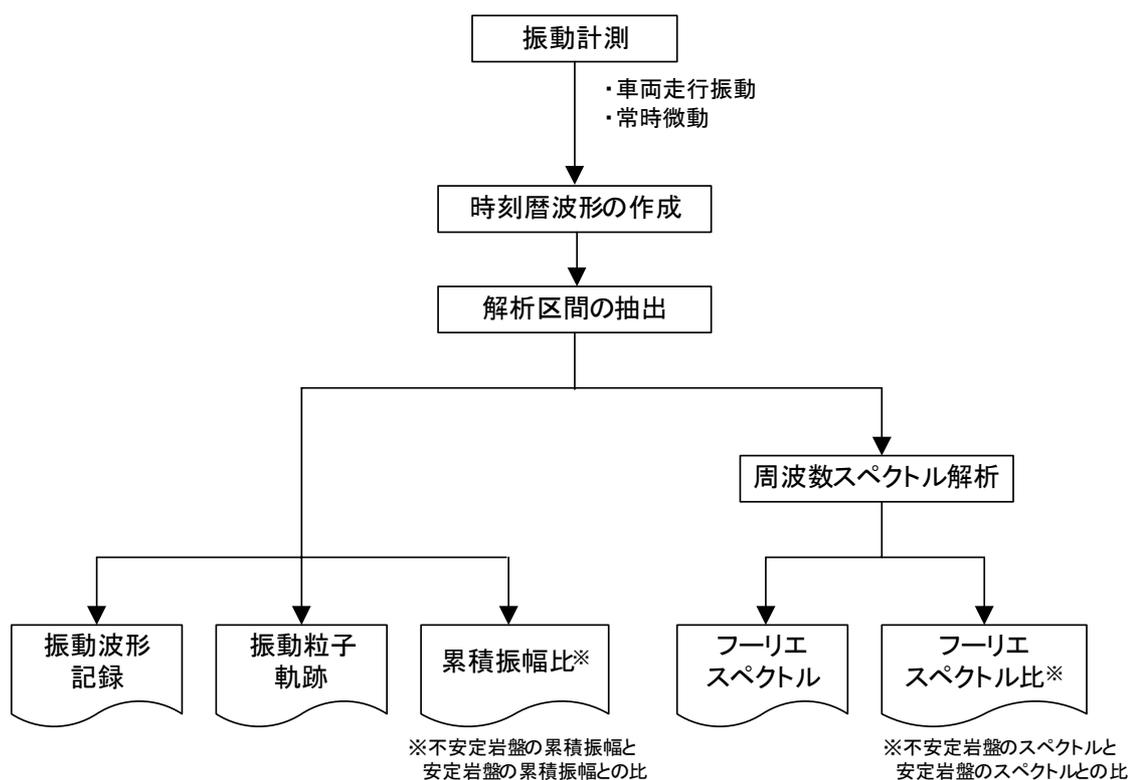


図-5.1.1 振動計測の解析の流れ

5-2 振動波形記録の出力

時刻暦波形の中から突発的なノイズを含まない安定した部分を、解析区間として抽出する。なお、1波の解析区間長は10~20秒程度とし、4-2で述べたように、合計で2~3分間程度の解析時間長を確保することが望ましい。

そして、各計測点における3成分（南北、東西、上下方向）の振動波形記録（車両走行振動、常時微動）を出力し、計測点によって振動の大きさがどのように異なるかを把握する。

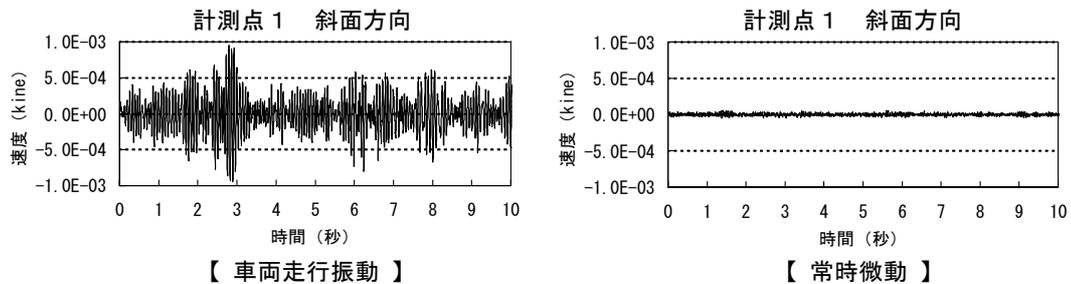


図-5.2.1 振動波形記録例

5-3 周波数スペクトル解析

5-2で述べた解析区間毎に周波数スペクトル解析を行い、複数のフーリエスペクトルを求める。そして、アンサンブル平均することで安定したフーリエスペクトルを出力し、各計測点における3成分（南北、東西、上下方向）の卓越周波数等を把握する。

なお、卓越周波数等を決定し易くするために、ハミング関数等のウィンドウ処理により、スペクトルを平滑化することも考慮する。

さらに、入力基盤と考えられる安定岩盤のスペクトルと不安定岩盤のスペクトルとの比を求め、安定岩盤と不安定岩盤との間で、どのような周波数の振動が増幅されているのか等を把握する。

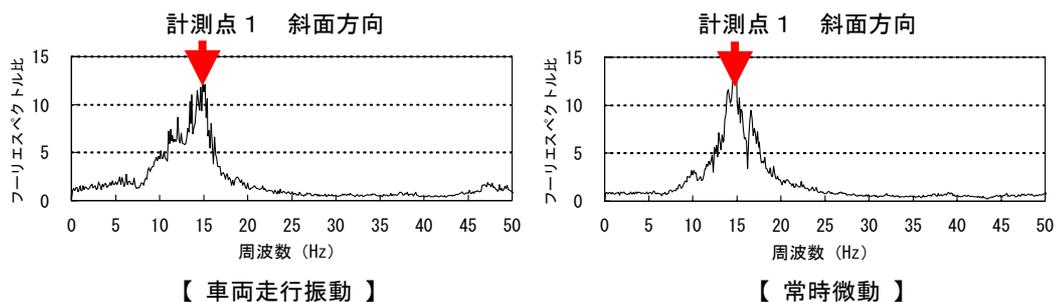


図-5.3.1 フーリエスペクトル比（不安定岩盤／安定岩盤）の出力例

※18波（1波の記録時間長：約10秒×18=180秒）のフーリエスペクトルをアンサンブル平均し、ハミングのウィンドウ処理により平滑化した。

5-4 振動粒子軌跡の出力

振動波形記録をもとに、2次元平面内での軌跡を示す振動粒子軌跡を出力する。

例えば、各計測点における振動方向を、NS-EW・NS-UD・EW-UDの3平面について整理し、特有の方向に振動しているのか、あるいは大きい幅の軌跡となっているのかを把握する。

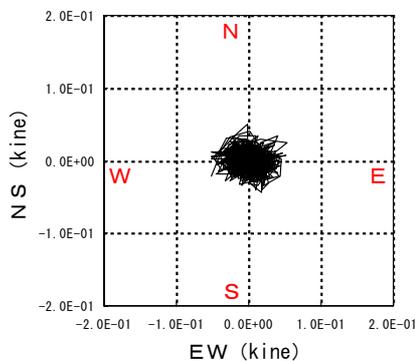


図-5.4.1 振動粒子軌跡 (NS-EW ; 水平面) の出力例

5-5 累積振幅比の出力

各計測点における振動波形の振幅の絶対値を計測時間内で累積した値（一定時間内での軌跡の累積長さ）を計算する（ここではこれを「累積振幅」とよぶ）。次に、安定岩盤の累積値で割ることにより、不安定岩盤の計測点における累積振幅比を出力する。

累積振幅比は、岩盤ブロックの安定性の評価指標となる振動の大きさ（エネルギー）を定量的な数値によって比較できるパラメータであると考えられる。

また、累積振幅比は、常時微動の場合において安定岩盤と不安定岩盤の振動の違いが明確でない場合でも振動の大きさの傾向が現れやすいため、車両走行時の計測結果とのクロスチェックにより、不安定性の評価に役立つ。

第6章 不安定性の評価

計測の対象となる岩盤斜面の条件（規模、亀裂の状況、振動源からの距離等）は様々である。そのため、安定岩盤と不安定岩盤の振動の違いの現れ方も現場によって様々であると考えられる。したがって、不安定性の評価を一律のしきい値を用いて行うのは不適切であり、岩盤の状況（亀裂等）と解析によって得られた振動波形記録・振動粒子軌跡・フーリエスペクトル・フーリエスペクトル比（不安定岩盤のスペクトルと安定岩盤のスペクトルとの比）・累積振幅比（安定岩盤の累積振幅と不安定岩盤の累積振幅との比）を比較しながら総合的に評価することが必要である。

不安定性の評価の参考として、実際の岩盤斜面における事例を示す。

6-1 不安定岩盤ブロックと安定岩盤の振動特性の違い

不安定岩盤ブロックと安定岩盤の振動特性の違いを示すものとして、岩盤ブロックの下部を破碎することによって人工的に不安定化させて計測を行った事例を写真-6.1.1、図-6.1.1及び図-6.1.2に示す。

不安定岩盤ブロックと安定岩盤の振動特性の違いとして、以下の点が挙げられる。

安定岩盤では、振幅が小さいとともに、フーリエスペクトルのレベルも低く、明瞭な卓越周波数のピークが見られない傾向がある。また、振動の方向性も明確でない場合が多い。

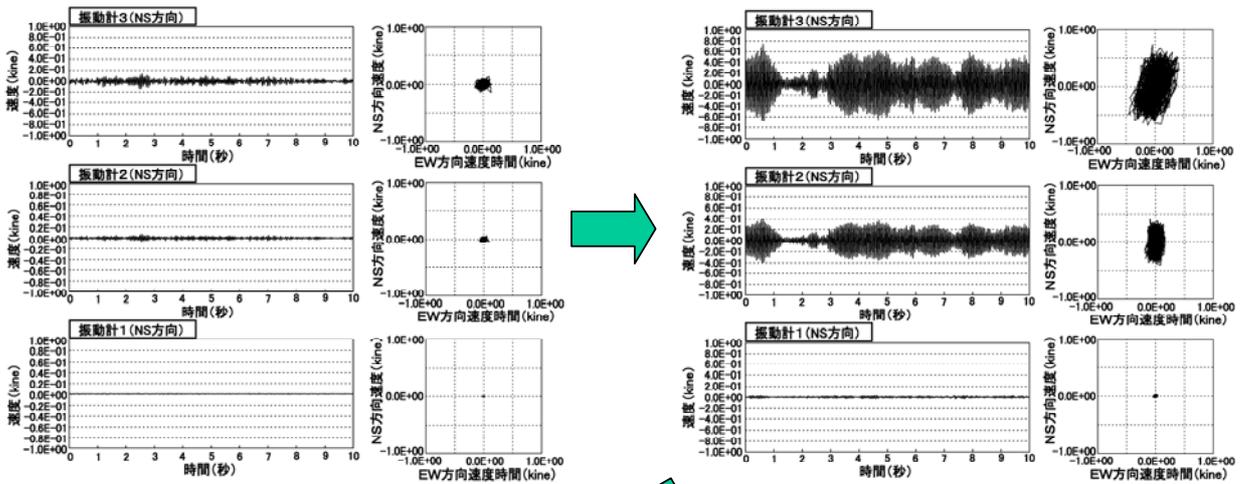
不安定岩盤ブロックでは、振幅は大きく、フーリエスペクトルのレベルも高い。また、明瞭な卓越周波数のピークが見られる場合が多い。振動の方向性については明確な方向性を持つ場合と方向性を持たない（全方向に振動する）場合の両方あり得る。



写真-6.1.1 人工的に岩盤ブロックを不安定化させて計測を行った事例の

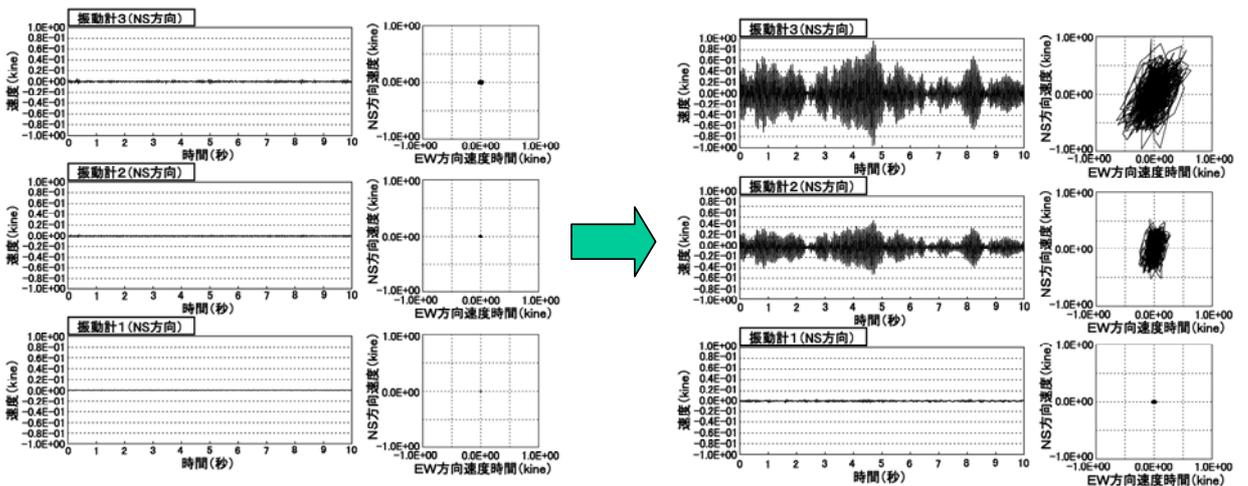
現場写真及び計測点配置

（左写真は右写真に対して右側方から撮影した全景）



①初期段階：比較的安定

②岩盤ブロックの下部を破碎：不安定化



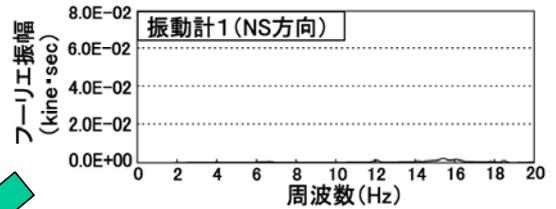
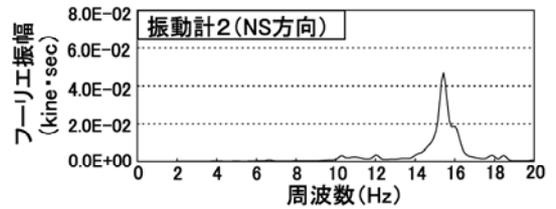
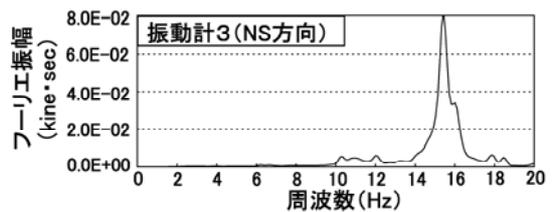
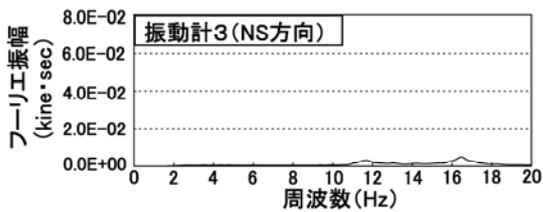
③岩盤ブロックをエアバッグで背後に押しつけて一時的に安定化

④エアバッグによる押しつけを解除：再び不安定化

図-6.1.1 人工的に岩盤ブロックを不安定化させて計測を行った事例の

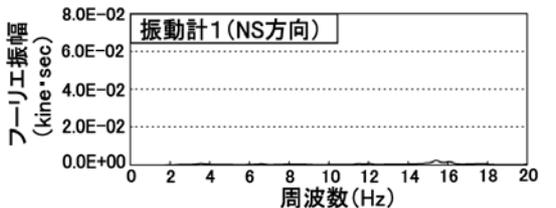
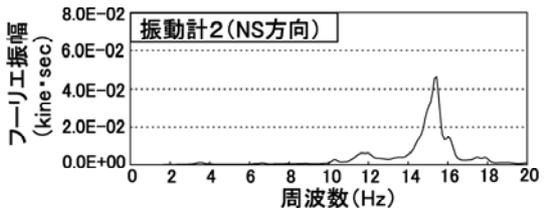
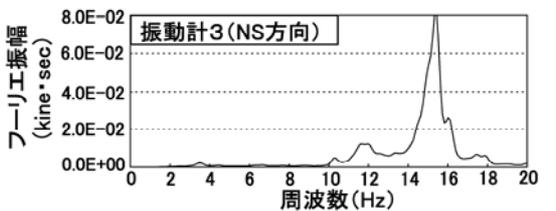
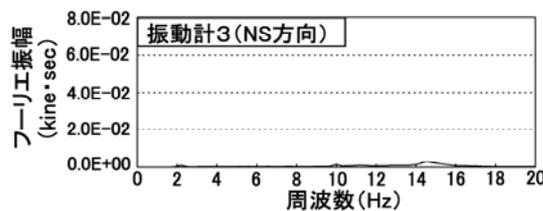
振動波形記録及び振動粒子軌跡

(振動計1は安定岩盤、振動計2は岩盤ブロック下部、振動計3は岩盤ブロック上部)



①初期段階: 比較的安定

②岩盤ブロックの下部を破碎: 不安定化



③岩盤ブロックをエアバッグで背後に押しつけて一時的に安定化

④エアバッグによる押しつけを解除: 再び不安定化

図-6.1.2 人工的に岩盤ブロックを不安定化させて計測を行った事例のフーリエスペクトル (振動計1は安定岩盤、振動計2は岩盤ブロック下部、振動計3は岩盤ブロック上部)

6-2 同一岩盤ブロックに配置された複数の計測点の振動特性

同一の不安定岩盤ブロックに複数の振動計が配置された場合の振動特性を示す事例を図-6.2.1に示す。また、6-1で述べた事例（写真-6.1.1、図-6.1.1、図-6.1.2）も同じく同一ブロックに複数の振動計が配置された事例に相当する。

同一ブロックに配置された振動計では、振動の方向（振動粒子軌跡の形状）が類似している。また、通常は岩盤ブロックの下部を支点にして振動すると考えられるため、上部の振動計ほど振幅が大きくなる傾向を示す。さらに、フーリエスペクトルで卓越周波数のピークが見られる場合には、同じ付近にピークが現れやすい。

反対に、上下関係にある振動計で下部の方が振幅が大きい場合や、振動の方向（振動粒子軌跡の形状）や卓越周波数が異なる場合は、それらは別々のブロックとして振動していると考えられる。

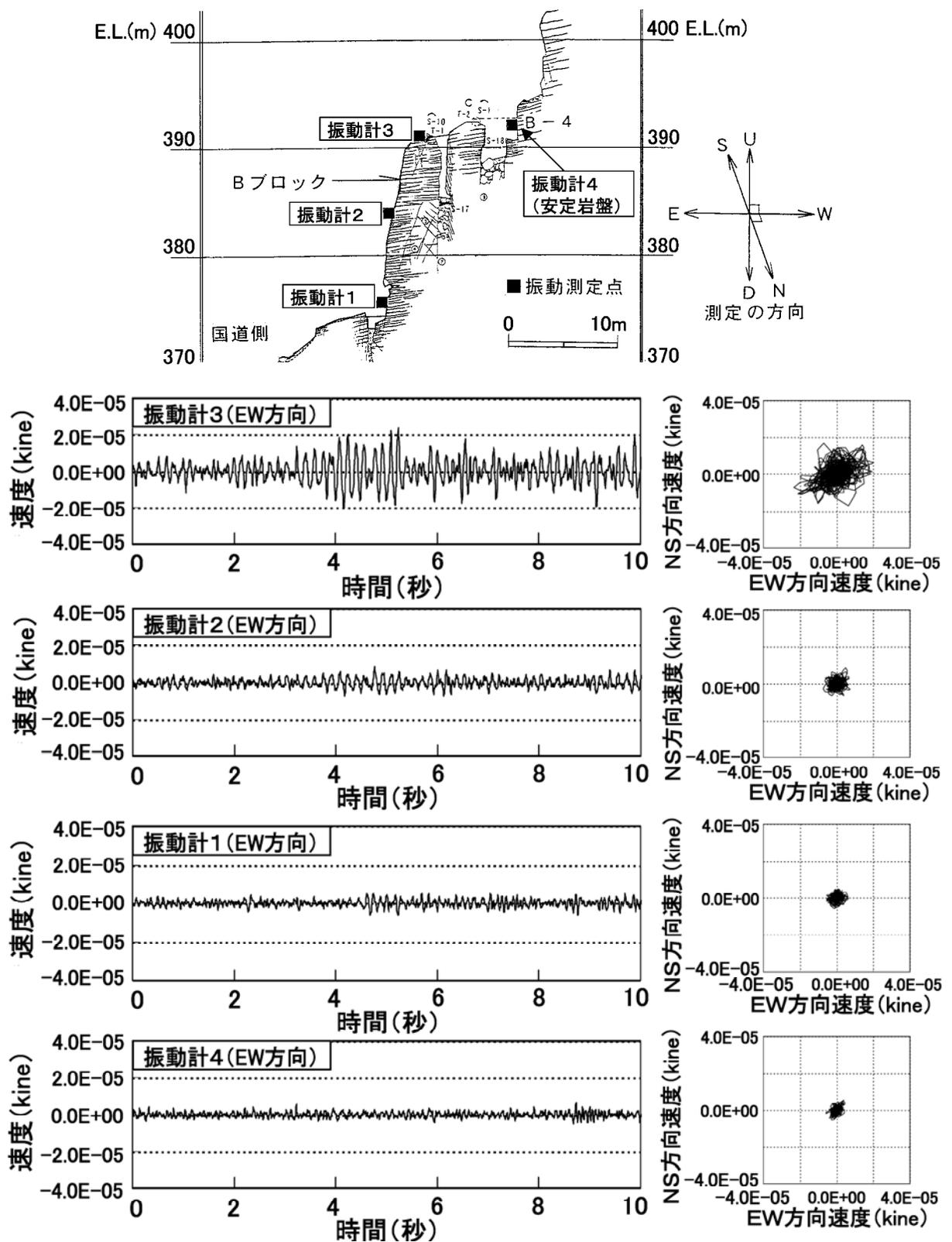


図-6.2.1 同一の不安定岩盤ブロックに設置した振動計の計測事例
(振動波形記録及び振動粒子軌跡)

6-3 実際の岩盤斜面で計測を行い評価した事例

不安定岩盤ブロック抽出のモデルケースとして選定した岩盤斜面において計測、解析及び評価を行った事例を示す。

1) 計測現場の状況及び計測点配置

計測を行った岩盤斜面は、第3章3-2の計測点の配置例①で示したものと同一であり、結晶片岩の片理面による水平方向の亀裂と、それに直交する垂直方向の亀裂が数多く発達し、多数のブロックに分かれている（写真-6.3.1）。開口亀裂も多く、不安定ブロックが多いと想定される。

計測点は、主要な岩盤ブロックを網羅するよう、写真-6.3.1に示すように安定岩盤1点を含む計13点（P-1～P-13）を設定した。

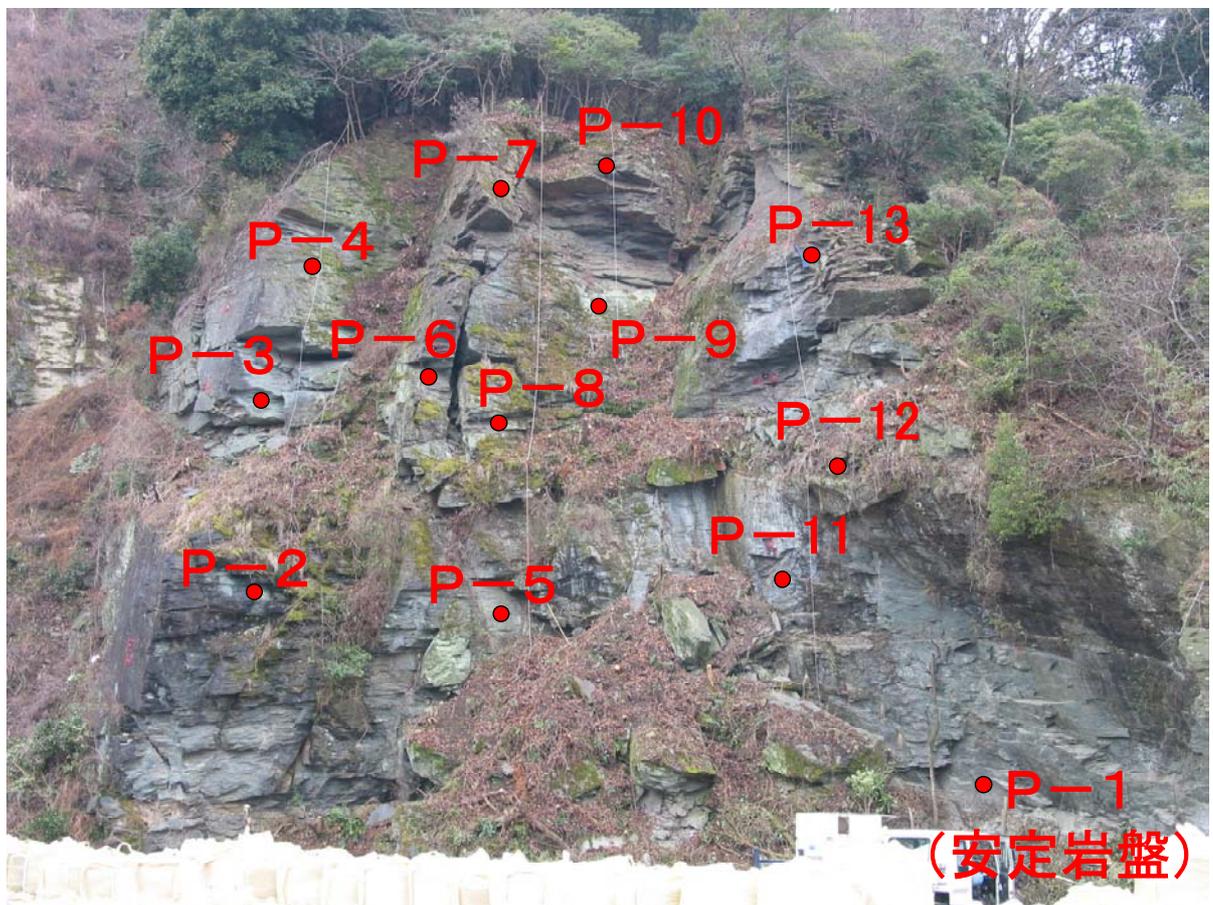


写真-6.3.1 不安定岩盤ブロック抽出のモデルケースとして計測を行った事例の現場写真及び計測点配置

2) 振動計

第3章3-3に示した事例と同じ、小型軽量の3成分速度型振動計（振動を速度で捉える方式）を用いた。

振動計の台数は、データレコーダーのチャンネル数との関係で4台とし、そのうち1台を常に安定岩盤（P-1）に設置し、残りの3台の振動計の配置を変えながら、下記の4回の振動計配置パターンに分けて計測を行った。

- ① P-4・P-3・P-2・P-1
- ② P-7・P-6・P-5・P-1
- ③ P-10・P-9・P-8・P-1
- ④ P-13・P-12・P-11・P-1

3) 振動源

常時微動と車両走行時の振動を計測した。なお、車両走行振動については、現場付近の道路の交通量がきわめて少ないため、計測機材等の運搬に使用した車両を走行させて計測を行った（写真-6.3.2）。



写真-6.3.2 振動源としての車両走行

運搬用の2トントラックを使用。より確実に振動が生じるよう路面にゴムを敷いて実施（矢印）

4) 振動波形記録

3成分のうち、代表例として斜面縦断方向の振動波形記録を図-6.3.1及び図-6.3.2に示す。常時微動においては、振動波形記録では差が見られないが、車両走行時においては、図-6.3.2に矢印で示すように、不明瞭ながらも安定岩盤P-1よりも大きい振幅が記録されている部分がある。それらのうち、P-3及びP-8は、それぞれの直上位の計測点（それぞれP-4及びP-9）よりも振幅が大きい。一方、P-5、P-9、P-11及びP-12においては安定岩盤P-1に対して特に振幅が大きい傾向は見られない。

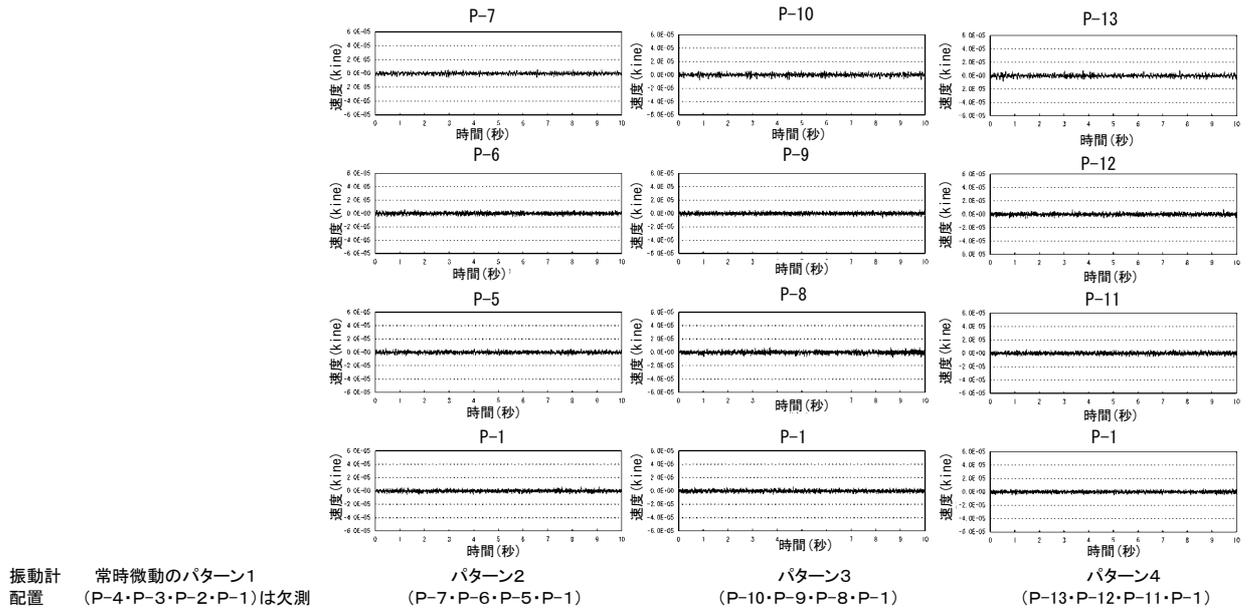


図-6.3.1 常時微動の振動波形記録（斜面縦断方向、10秒間）

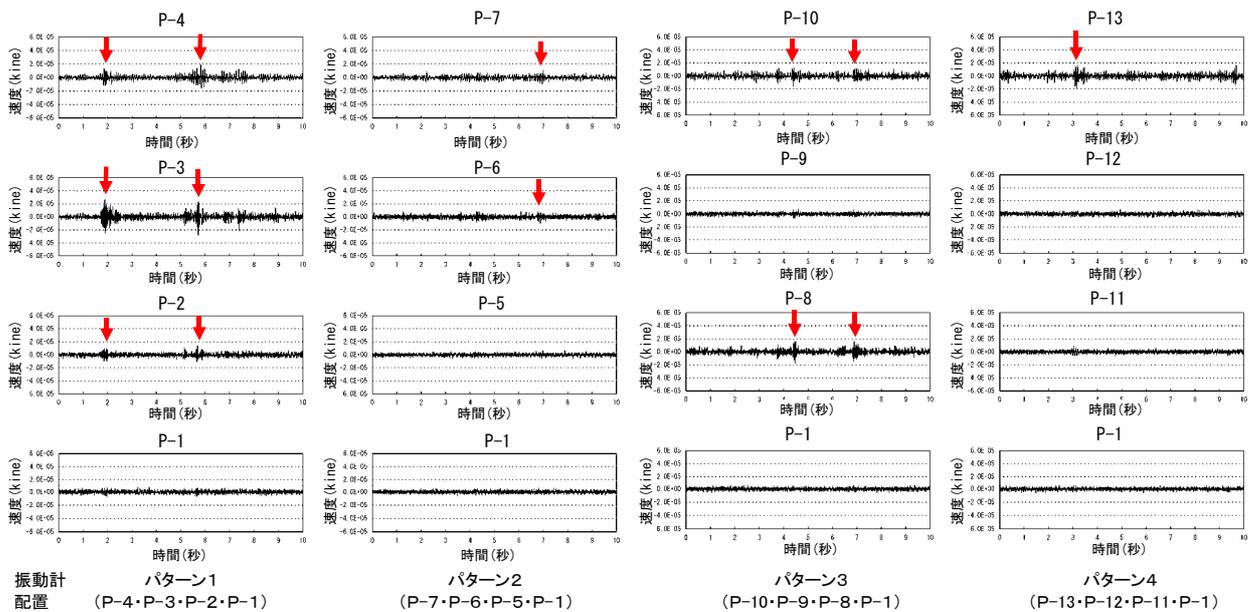


図-6.3.2 車両走行時の振動波形記録（斜面縦断方向、10秒間）

矢印で示した例のように、安定岩盤よりも大きい振幅が記録されている部分がある。

5) フーリエスペクトル

3成分のうち、代表例として斜面縦断方向のフーリエスペクトルを図-6.3.3及び図-6.3.4に示す。振動波形記録では差が見られなかった常時微動においても、図-6.3.3に矢印で示すように、必ずしも明瞭ではないもののフーリエスペクトルのピーク（卓越周波数）が認められる計測点が見られる。特にP-10及びP-13は明瞭なピークを示す。また、P-8はフーリエスペクトルのピーク自体は明瞭ではないものの、直上位のP-9や安定岩盤P-1と異なるスペクトル形状を示す。その他の計測点については安定岩盤P-1に比べて特に異なる特徴は見られない。

車両走行時においては、図-6.3.4に矢印で示すように、フーリエスペクトルのピークがより明瞭に見られる。P-8は常時微動の場合に比べてより明瞭なピークを示し、直上位のP-9との違いがよりはっきり現れている。P-7についても、常時微動の場合に比べてより明瞭なピークを示す。P-6はフーリエスペクトルのピークは明瞭でないが、常時微動の場合と異なって安定岩盤P-1よりフーリエスペクトルのレベルが若干高く、またP-7とスペクトル形状が異なる。P-3及びP-4は明瞭なピークを示すが、スペクトル形状が異なり、P-3ではP-4と異なるスペクトルのピークがもっとも卓越している。P-2はP-3やP-4と異なりピークは明瞭ではないが、図-6.3.4に示した矢印付近を中心に10~30Hz付近のフーリエスペクトルのレベルがやや高くなっている。一方、P-5、P-9、P-11及びP-12においては安定岩盤P-1に対して特に異なる特徴は見られない。

なお、39Hz付近などに見られる鋭いピークは何らかの原因で生じたと思われるノイズであり、岩盤自体の振動特性を示したものではない。

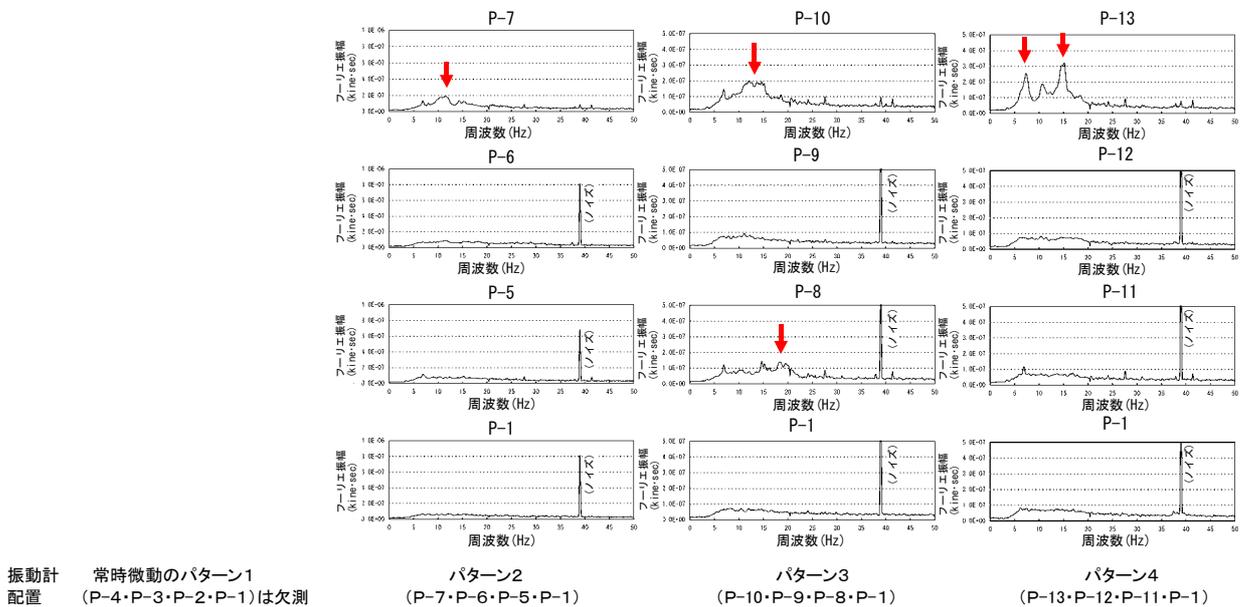


図-6.3.3 常時微動のフーリエスペクトル（斜面縦断方向）

矢印で示した例のように、フーリエスペクトルのピークが見られる部分がある。明瞭なピークを示すものと、不明瞭なもの両方が見られる。

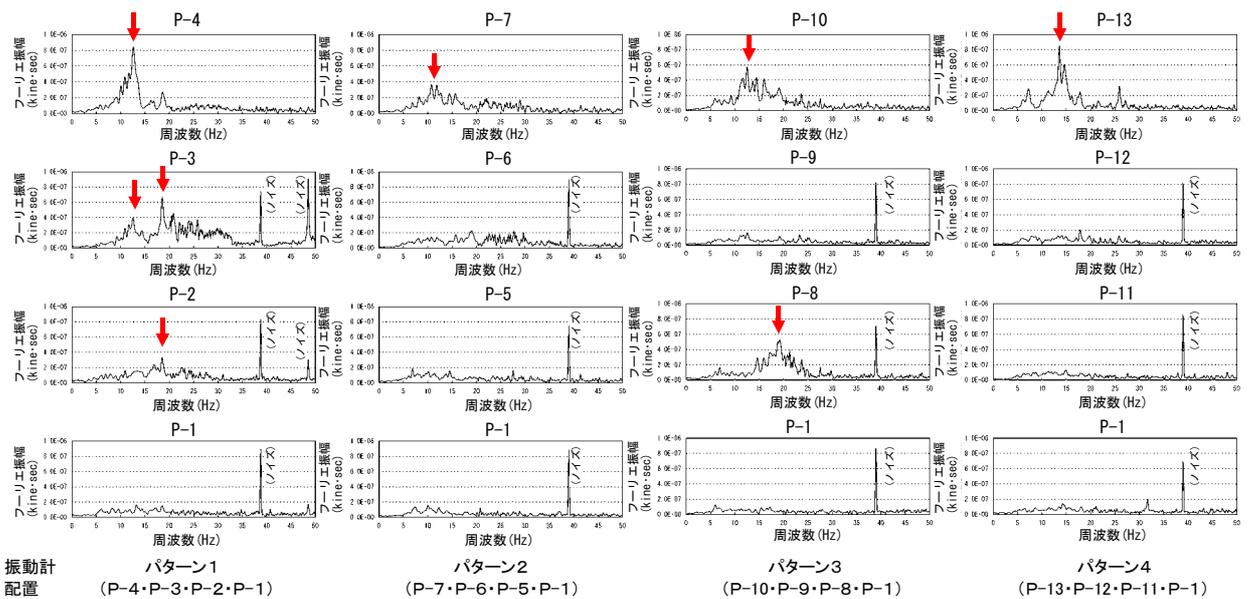


図-6.3.4 車両走行時のフーリエスペクトル（斜面縦断方向）

矢印で示した例のように、フーリエスペクトルのピークが見られる部分がある。明瞭なピークを示すものと、不明瞭なもの両方が見られるが、常時微動の場合に比べて明瞭に現れる傾向がある。

6) フーリエスペクトル比

3成分のうち、代表例として斜面縦断方向のフーリエスペクトル比を図-6.3.5及び図-6.3.6に示す。本現場では、常時微動、車両走行時とも、比を計算する前のフーリエスペクトル（図-6.3.3及び図-6.3.4）に比べてピーク（卓越周波数）が不明瞭となる傾向があるが、図-6.3.5及び図-6.3.6に矢印で示したようなピークが認められる。P-8のスペクトル比の形状が直上位のP-9と異なるのは比を計算する前のフーリエスペクトルの場合と同様の特徴である。

P-7は、比を計算する前のフーリエスペクトルの場合と異なり車両走行時の方が常時微動の場合に比べてピークが不明瞭になるが、10~30Hz付近のスペクトル比のレベルが若干高い傾向にある。P-6のフーリエスペクトル比のレベルは常時微動の場合に高まりがほとんど見られないが、車両走行時には15~35Hz付近のスペクトル比のレベルが若干高く、P-7より若干高い周波数域でレベルが高い傾向にある。P-3及びP-4も明瞭なピークを示し、P-3では比を計算する前のフーリエスペクトルの場合に比べてピークが複数に分かれるが、P-3とP-4でスペクトル比の形状が異なるのは比を計算する前のフーリエスペクトルの場合と同様の特徴である。P-2は比を計算する前のフーリエスペクトルの場合に比べて逆にスペクトル比のレベルの高まりが見られない。

なお、比を計算する前のフーリエスペクトルにおいて39Hz付近などに見られたノイズは、スペクトル比の計算によって見られなくなった。

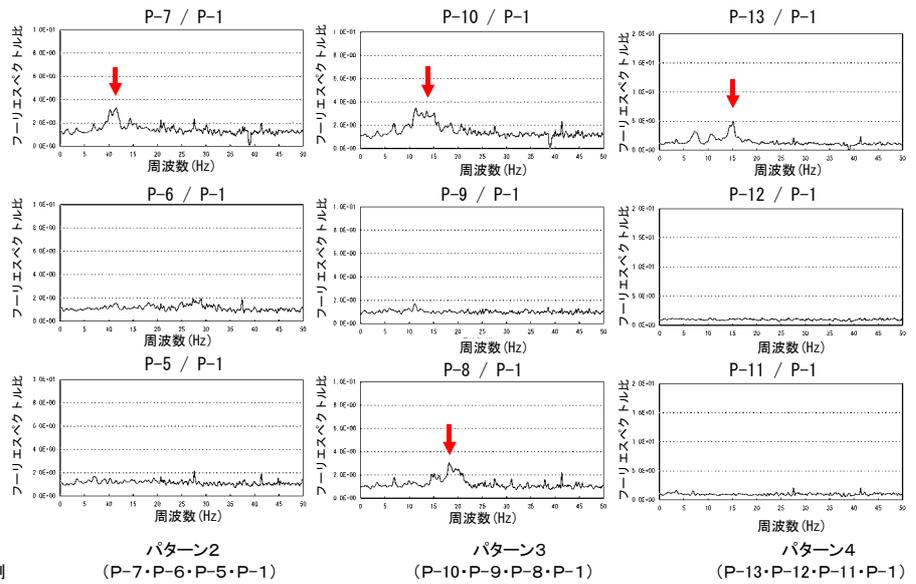


図-6.3.5 常時微動のフーリエスペクトル比 (斜面縦断方向)

矢印で示した例のように、フーリエスペクトル比のピークが見られる部分がある。明瞭なピークを示すものと、不明瞭なもの両方が見られる。

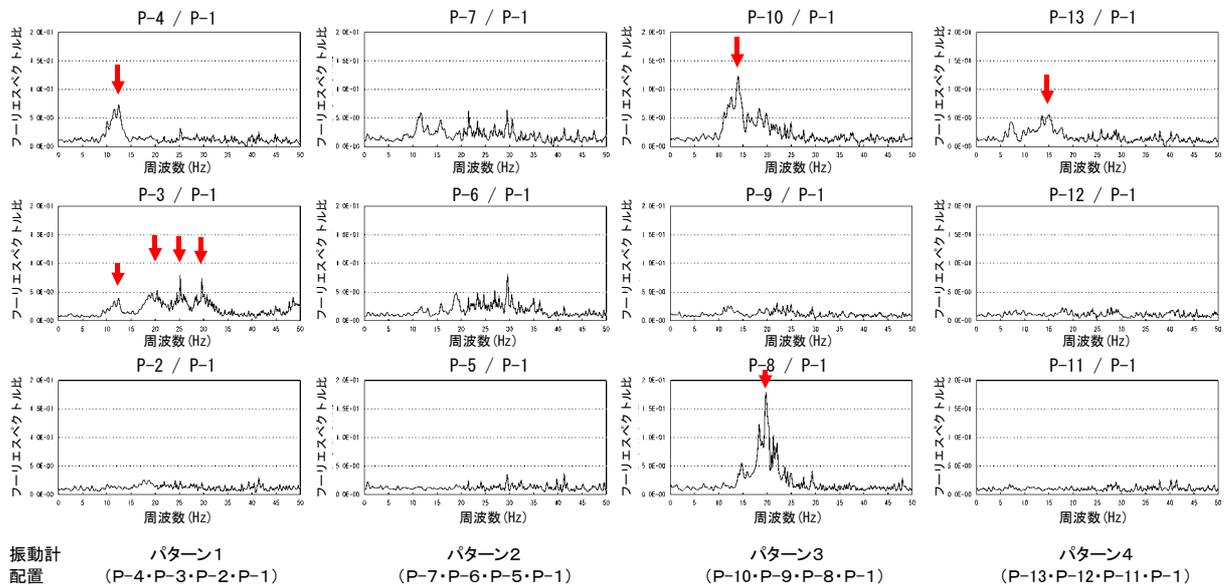


図-6.3.6 車両走行時のフーリエスペクトル比 (斜面縦断方向)

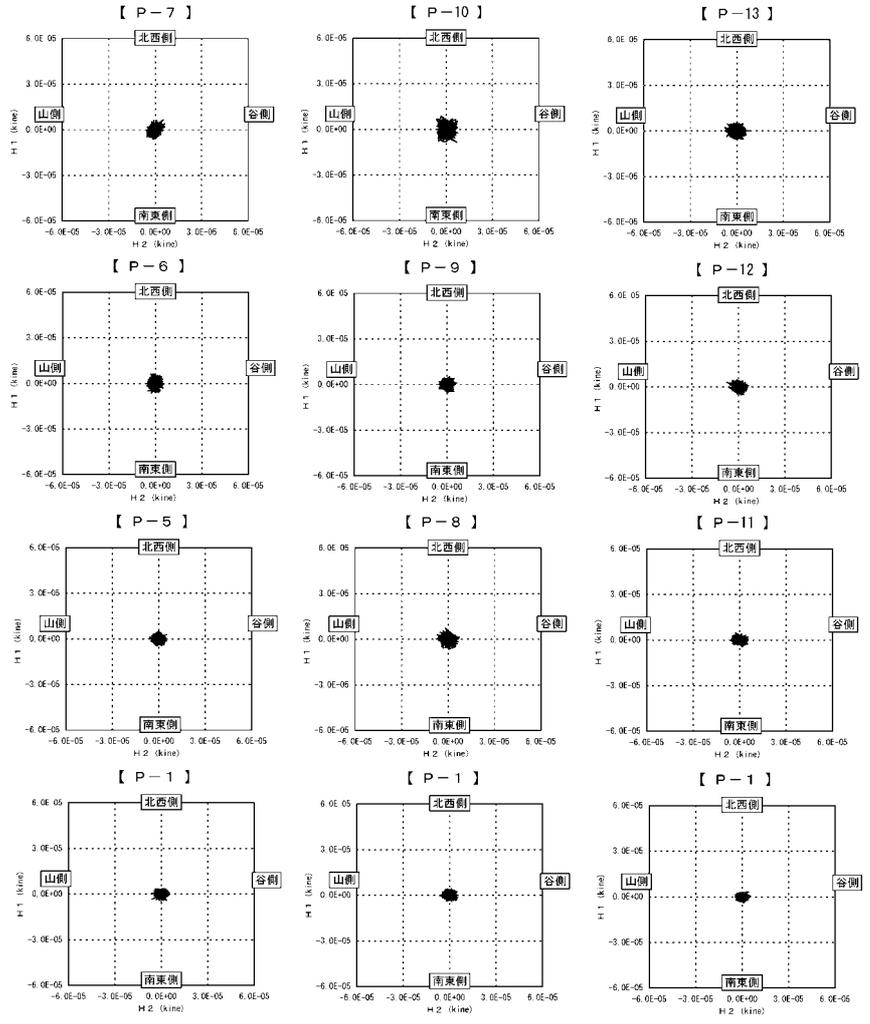
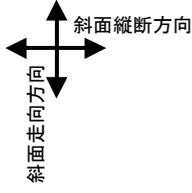
矢印で示した例のように、フーリエスペクトル比のピークが見られる部分がある。明瞭なピークを示すものと、不明瞭なもの両方が見られる。

7) 振動粒子軌跡

代表例として、3成分の振動データのうち水平2成分（斜面縦断方向及び斜面走向方向）のデータを用いて解析した水平面の振動粒子軌跡を図-6.3.7及び図-6.3.8に示す。なお、両図とも、縦軸及び横軸を速度で表示した「速度軌跡」を示している。

常時微動においては、振動波形記録の場合と同様、各計測点の差は明瞭ではないが、注意深く見ると、P-10、P-13は安定岩盤P-1より振幅が若干大きい。また、P-8については、安定岩盤P-1より振幅がわずかに大きいとともに、直上位の計測点P-9に比べても振幅がわずかに大きい。さらに、P-7及びP-6についても、安定岩盤P-1より振幅がわずかに大きい。これらの例のように、振動粒子軌跡では振動波形記録よりも振幅の大きさを判別しやすい。その他の計測点については、安定岩盤P-1との振幅の差が認められないか、またはわずかに大きい可能性もあるが判然としない。

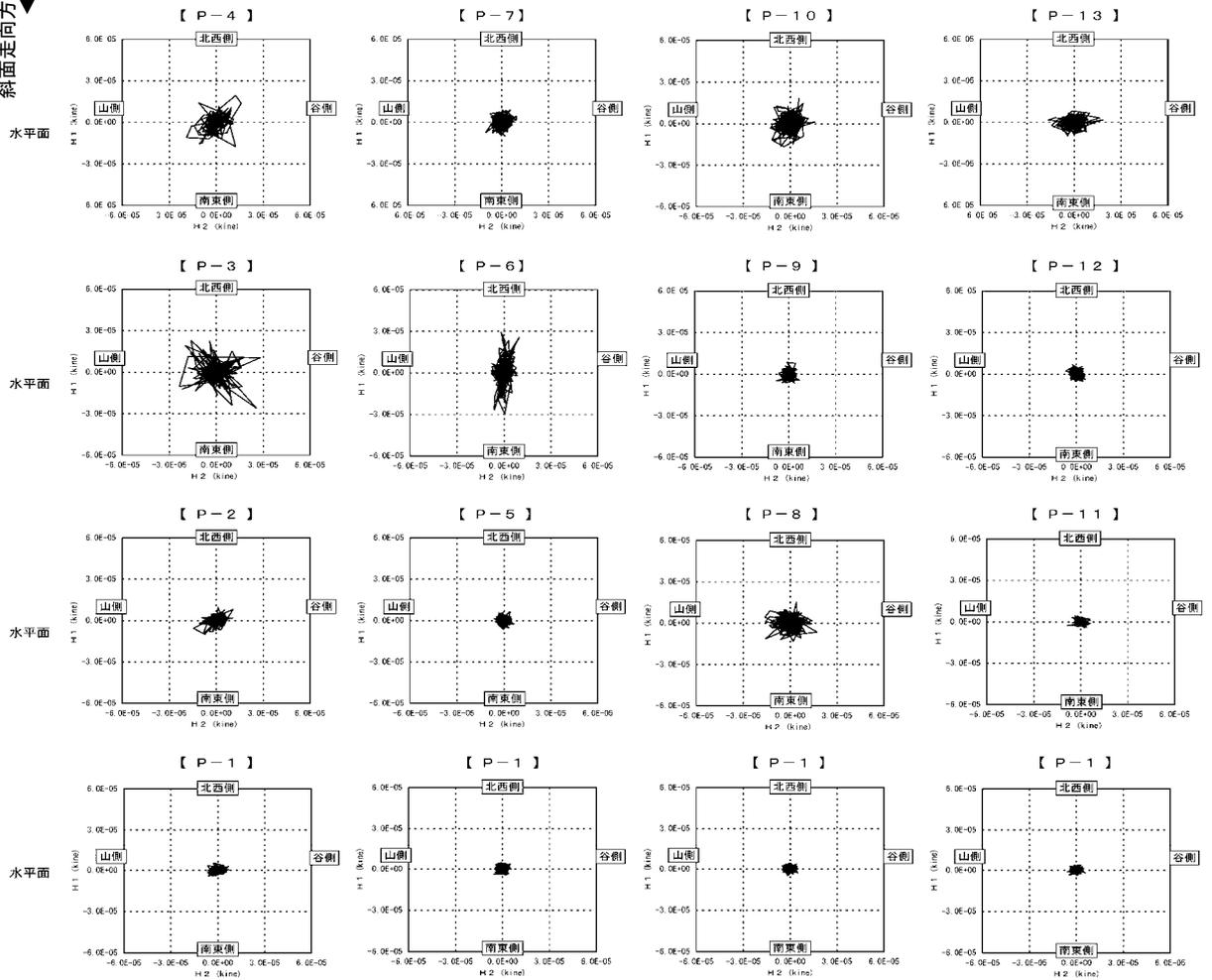
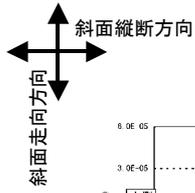
車両走行時においては、常時微動の場合よりも振幅の差が明瞭に現れるとともに、常時微動の場合と同様、振動波形記録よりも振幅の大きさを確実に判別しやすい。P-10及びP-13は明らかに安定岩盤P-1よりも振幅が大きい。また、P-8もP-10等と同等の振幅を示し明らかに安定岩盤P-1よりも振幅が大きいとともに、直上位の計測点P-9と比べても明らかに振幅が大きい。P-7はP-10等ほどではないが安定岩盤P-1に比べると明らかに振幅が大きい。P-6は、斜面縦断方向の振幅はP-7と同程度であるが斜面走向方向の振幅が大きく、振動の方向がP-7と明らかに異なる。P-3及びP-4はP-10等と同様、明らかに安定岩盤P-1よりも振幅が大きい。P-3と直上位のP-4では振動の方向性が異なる傾向があるとともに、振幅もP-3の方が若干大きい。一方、P-2は安定岩盤P-1に比べてわずかに振幅が大きく、また振動に方向性が見られるが、P-3に比べると振幅は明らかに小さく、振動の方向も異なる。その他のP-5、P-9、P-11及びP-12においては安定岩盤P-1に対して振幅の大きさに明瞭な差はないか、またはわずかに大きい可能性があるが判然としない程度であるとともに、振動の方向性も明瞭でない。



振動計配置 常時微動のパターン1 (P-4・P-3・P-2・P-1)は欠測 パターン2 (P-7・P-6・P-5・P-1) パターン3 (P-10・P-9・P-8・P-1) パターン4 (P-13・P-12・P-11・P-1)

図-6.3.7 常時微動の振動粒子軌跡（水平面）

速度軌跡（縦軸（斜面走向方向）、横軸（斜面縦断方向）とも速度で表示したもの）



振動計配置

パターン1	パターン2	パターン3	パターン4
(P-4・P-3・P-2・P-1)	(P-7・P-6・P-5・P-1)	(P-10・P-9・P-8・P-1)	(P-13・P-12・P-11・P-1)

図-6.3.8 車両走行時の振動粒子軌跡（水平面）

速度軌跡（縦軸（斜面走向方向）、横軸（斜面縦断方向）とも速度で表示したもの）

8) 累積振幅比

各計測点の3成分の振動データから常時微動及び車両走行振動のそれぞれについて累積振幅を計算し、安定岩盤に対する比を求めた累積振幅比を図-6.3.9に示す。累積振幅比の値については常時微動と車両走行振動で異なるが、傾向は類似している。P-5、P-9、P-11は累積振幅比が小さく、次いでP-2が小さい。P-8及びP-12は、常時微動では累積振幅比は小さいが、車両走行振動ではより大きな値となる。P-8とP-12では、P-8の方が車両走行振動の累積振幅比が大きい。一方、P-10及びP-13は累積振幅比が大きく、次いでP-3、P-6、P-4及びP-7が大きい。P-6については、常時微動の場合よりも車両走行振動の方が大きい値となる。

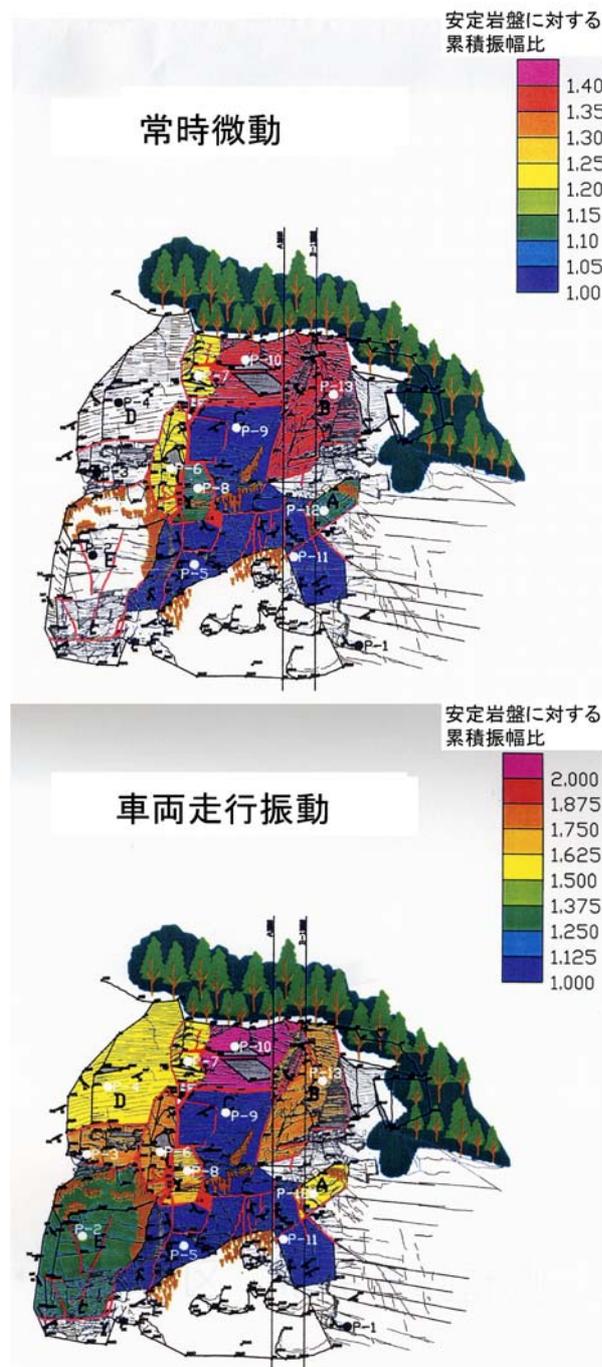


図-6.3.9 常時微動及び車両走行振動の累積振幅比（安定岩盤に対する累積振幅の比）

9) 総合評価

以上の各解析結果をもとに、各計測点について以下のように評価した。

- P-2：常時微動は欠測であるが、車両走行振動では比較的小さい累積振幅比を示す。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においては安定岩盤 P-1 より若干大きい程度の振幅を示す。フーリエスペクトルにおいてはピークはあまり明瞭ではないが安定岩盤 P-1 に比べて 10～30Hz のスペクトルのレベルが若干高い。しかしながらフーリエスペクトル比ではスペクトル比のレベルの高まりも不明瞭になる。したがって、不安定度は大きくなく、P-5、P-9、P-11 に次いで比較的安定なブロックと考えられる。
- P-3：常時微動は欠測であるが、車両走行振動において比較的大きめの累積振幅比を示す。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においては特に車両走行振動において振幅が大きく、不明瞭ながらも振動の方向性が見られる。さらに、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においても比較明瞭なピークが見られる。したがって、不安定なブロックと考えられる。また、振動の方向やフーリエスペクトルの特徴などが直上位の P-4 とは異なることから、明らかに P-4 とは異なるブロックとして振動していると考えられる。P-3 のブロックは写真－6.3.3 に側面の状況を示すように、開口亀裂によって周囲の岩盤から分離しており、上記の結果と調和的である。



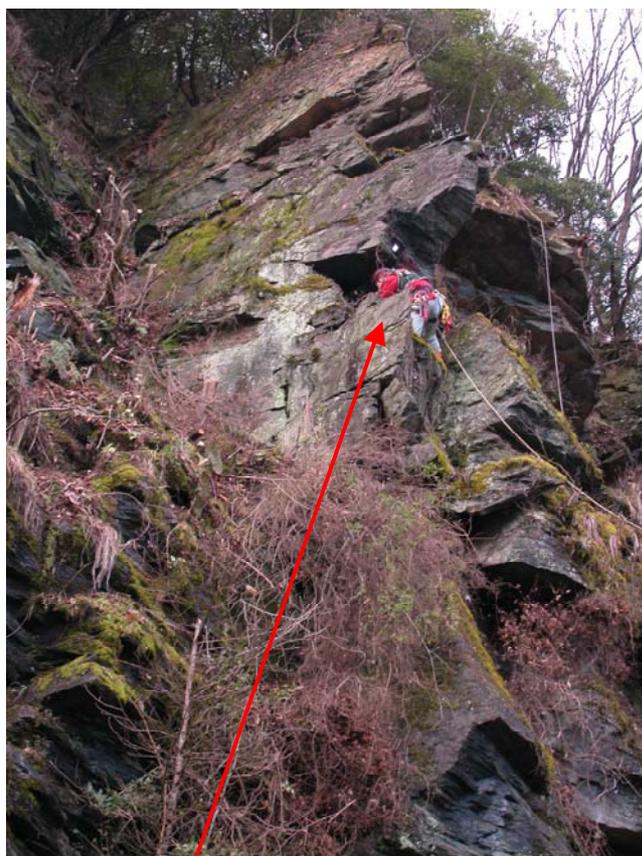
計測点P-3設置ブロック
(側面)

写真－6.3.3 計測点 P-3 を設置した岩盤ブロックの側面

- P-4：常時微動は欠測であるが、車両走行振動において比較的大きめの累積振幅比を示す。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においては特に車両走行振動において振幅が大きく、不明瞭ながらも P-3 と異なる振動の方向性が見られる。さらに、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においても比較明瞭なピークが見られるなど、調和的な結果が得られている。したがって、

不安定なブロックと考えられる。

- P-5：常時微動と車両走行振動の両方において累積振幅比が小さい。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においても振幅が小さく、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においてもレベルが低く、ピークも見られないなど、調和的な結果が得られている。したがって、比較的安定なブロックと考えられる。
- P-6：常時微動と車両走行振動の両方において比較的大きめの累積振幅比を示すが、車両走行振動の方が累積振幅比が相対的に大きくなる。また、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においては、明瞭なピークは見られないものの、安定岩盤 P-1 や P-5、P-9、P-11 等に比べてややレベルが高い。最も特徴的であるのは振動粒子軌跡で、常時微動では安定岩盤 P-1 等と同様に振幅が小さいが、車両走行振動では振幅が大きく、かつ明瞭な方向性（斜面走向方向に振動）を有する。したがって、比較的不安定なブロックと考えられる。また、振動の方向やフーリエスペクトルの特徴などが直上位の P-7 とは異なることから、明らかに P-7 とは異なるブロックとして振動していると考えられる。P-6 のブロックは写真-6.3.4 に側面の状況を示すように、岩盤の板状に突出した部分が開口亀裂によって区切られたものであり、上記の結果と調和的である。



計測点P-6設置ブロック
(側面)

写真-6.3.4 計測点 P-6 を設置した岩盤ブロックの側面

- P-7：常時微動と車両走行振動の両方において比較的大きめの累積振幅比を示す。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においても、特に車両走行振動において、P-10等ほどではないものの安定岩盤P-1に比べて大きい振幅を示す。フーリエスペクトル比ではやや不明瞭になるものの、比を計算する前のフーリエスペクトルにおいてはピークが見られる。したがって、比較的不安定なブロックと考えられる。
- P-8：常時微動においては累積振幅比は比較的小さいが、車両走行振動においては累積振幅比が相対的に大きくなる。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においては車両走行振動において振幅が大きい。フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においては、常時微動ではピークがやや不明瞭であるが、車両走行時にはピークが明瞭になる。これは車両走行振動において累積振幅比が大きくなることと調和的である。これらの結果から、不安定なブロックと考えられる。また、直上位のP-9よりも振幅が大きく、フーリエスペクトルの特徴も異なることなどから、明らかにP-9とは異なるブロックとして振動していると考えられる。P-8のブロックは側面から見ることはできないが、写真-6.2に示すように、正面から見る限りでも周囲の亀裂が開口しており、上記の結果と調和的である。
- P-9：常時微動と車両走行振動の両方において累積振幅比が小さい。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においても振幅が小さく、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においてもレベルが低く、ピークも見られないなど、調和的な結果が得られている。したがって、比較的安定なブロックと考えられる。
- P-10：常時微動と車両走行振動の両方において累積振幅比が大きい。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においては特に車両走行振動において振幅が大きい。さらに、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においても比較的明瞭なピークが見られるなど、調和的な結果が得られている。したがって、不安定なブロックと考えられる。
- P-11：常時微動と車両走行振動の両方において累積振幅比が小さい。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においても振幅が小さく、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においてもレベルが低く、ピークも見られないなど、調和的な結果が得られている。したがって、比較的安定なブロックと考えられる。
- P-12：常時微動では累積振幅比は小さいが、車両走行振動では累積振幅比が相対的に大きくなる。しかしながら、振動波形記録及び振動粒子軌跡においては常時微動と車両走行振動の両方において振幅が小さく、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においてもレベルが低く、ピークも見られない。したがって、P-5、P-9、P-11に次いで比較的安定なブロックと考えられる。
- P-13：常時微動と車両走行振動の両方において累積振幅比が大きい。また、振動波形記録及び振動粒子軌跡においては特に車両走行振動において振幅が大きい。さらに、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比においても比較的明瞭なピークが見られるなど、調和的な結果が得られている。したがって、不安定なブロックと考えられる。P-13のブロックは写真-6.3.5に側面の状況を示すように、背後の亀裂が上部ほどが大きく開口しており、P-13のブロックがかつて斜面前方に向かって転倒型の動きを生じたことにより不安定化したと考えられる。



計測点P-13設置ブロック
(側面)

写真-6.3.5 計測点 P-13 を設置した岩盤ブロックの側面

以上をまとめると、

- P-5、P-9、P-11 は比較的安定
- P-2、P-12 はそれに次いで安定
- P-3、P-4、P-6、P-7、P-8、P-10、P-13 は不安定

と考えられ、不安定岩盤ブロックは概ね計測対象斜面の上半分にあると考えられる。

6-4 対策工（岩盤接着工）の施工前後に計測を行った事例

対策工として岩盤接着工が施工された斜面において、施工前後に計測を行い、岩盤が安定化した状況を振動の変化によって捉えた事例を図-6.4.1及び図-6.4.2に示す。岩盤接着工が施工された範囲の計測点（P-3、P-2、P-6）では、施工前に比べて振幅が安定岩盤並みに小さくなっている一方、岩盤接着工の施工範囲外の計測点（P-4）では依然として振幅が大きい状況が示されている。

このように対策工の施工状況の確認手法として振動計測手法を利用することは、本手法の今後の応用分野の1つとしての可能性がある。

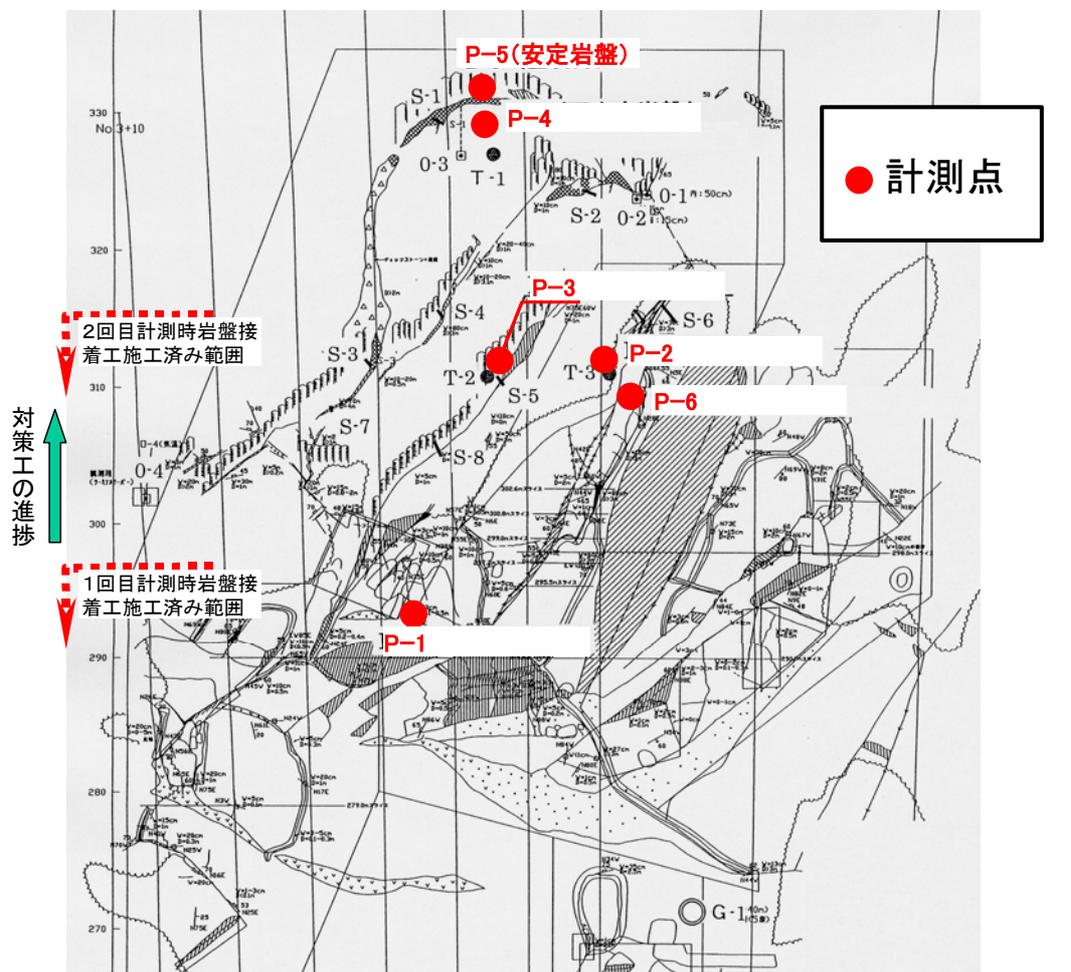


図-6.4.1 対策工（岩盤接着工）の施工前後に計測を行った事例の計測点配置

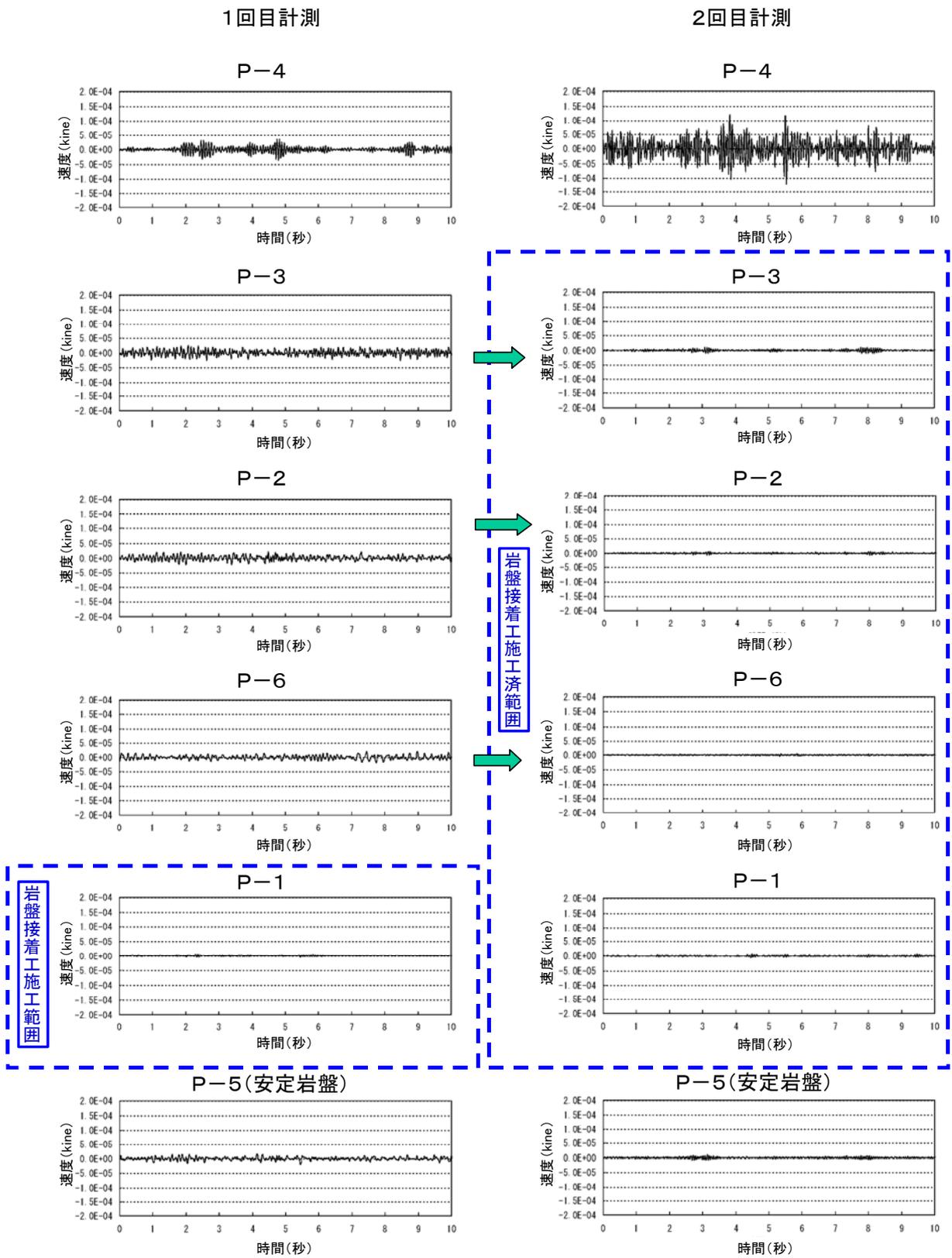


図-6.4.2 対策工（岩盤接着工）の施工前後に計測を行った事例における振動波形の変化

参考文献

本マニュアル（案）において取り上げた事例に関する文献、本手法について紹介した文献、および本マニュアル（案）では事例としては取り上げていないが本手法が適用された事例に関する文献を以下にリストアップする。

千田容嗣・寺田秀樹・辻雅規：「常時微動による岩盤ブロックの安定度評価への適用性の検討」、平成 13 年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 382 - 383、2001. 5

浅井健一・小山内信智・千田容嗣・仲野公章・寺田秀樹・辻雅規・小野田敏：「常時微動による岩盤ブロックの安定度評価への適用性の検討」、第 42 回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 563 - 566、2003. 8

辻雅規・斎藤秀樹・浅井健一・小山内信智・寺田秀樹：「岩盤斜面の安定性評価を目的とした振動測定の実用例」、平成 15 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集、pp. 131 - 132、2003. 10

浅井健一・藤澤和範・小山内信智・辻雅規：「振動計測による岩盤斜面不安定ブロック抽出手法の検討」、平成 16 年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 24 - 25、2004. 5

浅井健一・藤澤和範・小山内信智・辻雅規：「岩盤斜面不安定ブロック抽出への振動計測の実用」、第 43 回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 527 - 530、2004. 8

辻雅規・多田智和「岩盤斜面の安定性評価を目的とした振動測定の実用例」、平成 16 年度地盤工学会四国支部技術研究発表会「四国の地盤災害・地盤環境に関するシンポジウム」、2004. 9.

浅井健一・藤澤和範・小山内信智・西本晴男：「振動計測による岩盤斜面不安定ブロック抽出手法の検討」、土木技術資料、第 47 巻第 4 号、pp. 48 - 53、2005. 4

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4051 July 2007

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754