

# 落石安定度調査のための小型加振機を用いた模擬岩塊の振動特性調査

中日本高速道路株式会社 正会員 ○石井 智大  
名古屋大学大学院 学生会員 佐竹 孝曜  
第二建設株式会社 宇賀田 登  
岐阜大学 正会員 沢田 和秀

## 1. はじめに

落石は、発生源が数多く存在し、地形、地質、気象条件など様々な要因が複雑に絡み合って発生するため、予知・予測が難しい。地質技術者による現地踏査では、落石の候補となる岩塊が抽出され、それらの岩塊の安定度を物理的な項目の点数化によって評価する方法が広く利用されている。一方、それらを補足するものとしていくつか提案されている定量評価できる方法では、対象の岩塊の振動特性（卓越周波数など）を調査する。その中で、落石危険度振動調査法<sup>1)</sup>では、雑振動または強制振動を振動源として、岩塊の振動特性を把握するが、危険な斜面上で適切に振動を与えることは困難である。そこで、不安定な岩塊に小型の起振装置を設置し、対象の岩塊に効果的な振動を与えることで、対象岩塊の振動を効率的に増幅させる方法を提案する。本研究では、岩塊に振動を与え、その振動特性を把握する既往研究<sup>2)</sup>との比較により、提案手法の確からしさを確認し、また、不安定な転石を想定した実験により、小型加振機を用いて振動させた岩塊の振動特性について考察した。

## 2. 既往研究との比較実験

### 2.1 実験概要

提案する計測方法の確からしさを確認するために、深田らによる実験結果<sup>3)</sup>との比較を試みた。図-1に示すコンクリート製の供試体 A と B の 2 種類を作成し、ゴムハンマーによる打撃および小型加振機（WaveMaker05：旭製作所製）による振動に対する計測を行った。写真-1のように砂地盤上に供試体を設置し、供試体の上面に加速度計（AS-GA：共和電業製）を取り付け、座標軸を供試体底面の短辺（0.30m）方向（x）、長辺（0.40m）方向（y）とした。加振機については、供試体の上面中央で固定できるようにした。また、計測時のサンプリング周波数は 1000Hz とした。

なお、深田らは、実験結果を 3次元有限要素法による固有値解析で再現しており、本実験と並行して同様の解析手法による振動特性の調査も行ったが、本稿では実験についてのみ述べる。

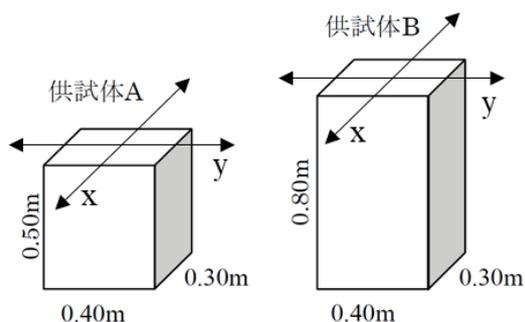


図-1 供試体寸法及び計測方向



写真-1 供試体 A における実験風景

Study of vibration characteristics of dummy rock using small vibrator for rock stability assessment: Ishii Tomohiro (Central Nippon Expressway Company Limited), Satake Koyo (Nagoya University), Ugata Noboru (Daini Corporation) and Sawada Kazuhide (Gifu University)

## 2.2 実験結果

供試体 A における実験結果の一部を図-2 に示す。ここでは、供試体側面中央部をゴムハンマーで打撃したケースと、100 秒間で周波数を 1 から 100Hz に一定速度の変化で周波数スイープ加振したケースについて、x および y 方向に振動を与えた結果を示す。スペクトル解析には、SPECTRAL ANALYZER SPCANA Ver4.92 を用い、本稿で示す FFT 結果のグラフ 1 つひとつは 8192 個の加速度データに対して FFT を行っている。グラフの横軸は 0 から 100Hz までの周波数、縦軸はフーリエスペクトル (m/s<sup>2</sup>\*s) を示す。また、赤色が CH1 で x 方向、青色が CH2 で y 方向の計測された振動を表す。加振機におけるグラフの上の数値は、加振機のおおよその周波数帯変化を表す。

打撃の場合、x 方向では約 20Hz、y 方向では約 24Hz の卓越周波数が見られた。一方、加振機の場合、x 方向では約 22Hz、y 方向では約 20Hz の卓越周波数が見られ、打撃の場合と概ね同じピークとなった。なお、ほとんどのケースで見られる 60Hz のスパイク型の卓越周波数は、交流電源の周波数による影響であり、供試体とは無関係であると考えられるため無視する。

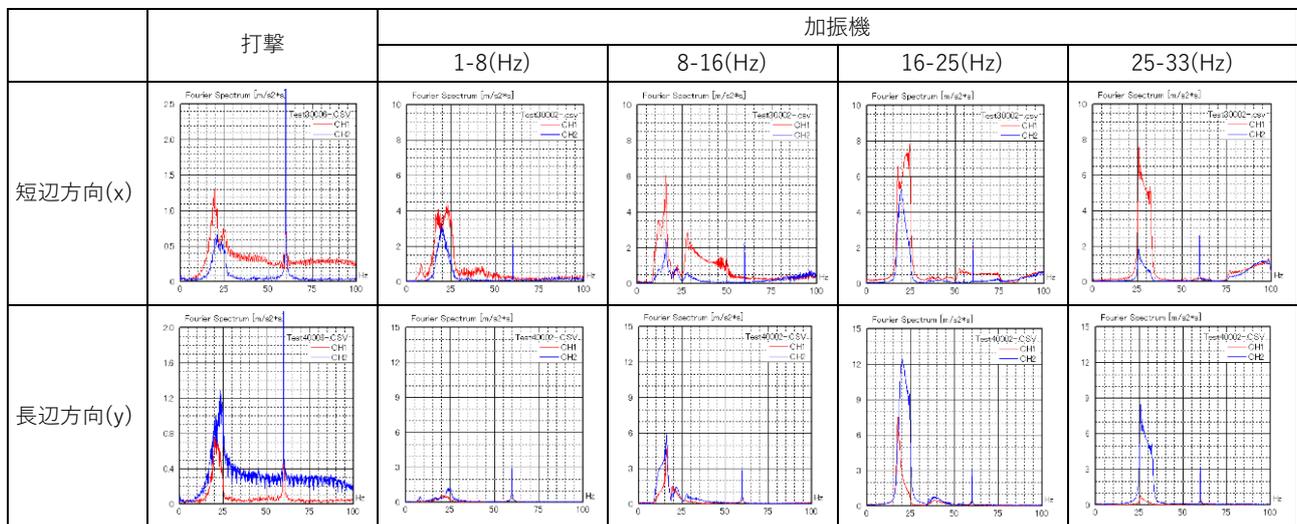


図-2 供試体 A における実験結果の一部

次に、供試体 A における深田らの実験結果を図-3 に示す。ここでは、ゴムハンマーでの打撃を行い、測定記録された加速度波形と FFT 処理により算定された固有振動数がプロットされている。なお、深田らは地盤の固さを 3 種用意しているが、ここでは地盤種別の軟と中のみ示しており、地盤反力係数の値はそれぞれ  $kv_{30}=47.6, 79.1\text{MN/m}^3$  となっている。また、根入れ比は、 $d/h_0$  ( $d$ : 根入れ長,  $h_0$ : 露出高さ) で表されるが、本実験では、根入れを考慮した実験を行っていないため、根入れ比が 0 の部分について比較する。

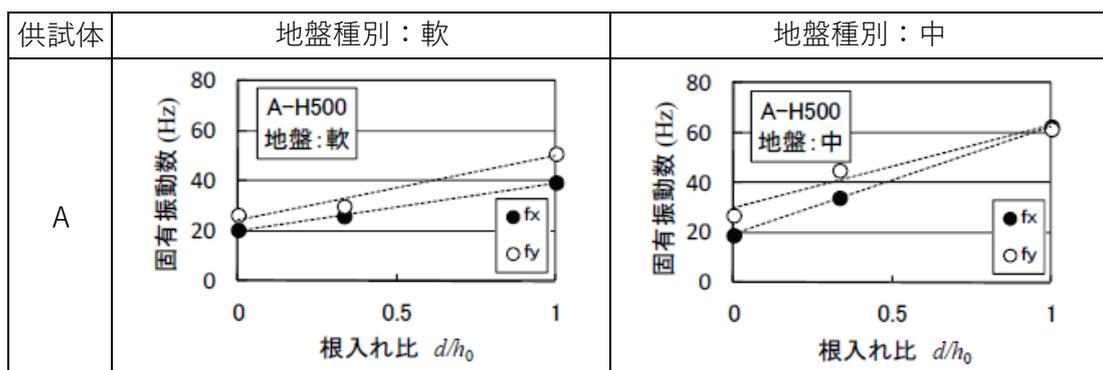


図-3 深田らによる実験結果

深田らによる実験と本実験の固有振動数(卓越周波数)の数値をまとめたものを表-1に示す。本実験では、深田らの実験と同様の地盤条件を再現することはできていないが、打撃および加振機によるケースでおおよそ同じ卓越周波数を得られていることがわかる。

表-1 深田らによる実験と本実験の卓越周波数

供試体	方向	深田らの実験		本実験		
		地盤:軟	地盤:中	雑振動	打撃	加振機
A	x	約20Hz	約19Hz	-	約20Hz	約22Hz
	y	約26Hz	約26Hz		約24Hz	約20Hz
B	x	約12Hz	約12Hz	-	約14Hz	約12Hz
	y	約17Hz	約18Hz		約22Hz	約20Hz

また、加振機による実験結果において、1~8Hzで加振しているのにもかかわらず、加振周波数帯に含まれない周波数帯で僅かなピークが見られる。この原因を探るため、1, 2, 3, ..., 30Hzのみの周波数で供試体Aについて加振する実験を行った。結果の一部を図-4に示す。

加振周波数の倍数にのみスパイク型の卓越周波数が見られ、中でも約20Hz付近にピークが見られる。この高調波の発生原因が電気機器によるものなのか振動モードによるものなのかはわからないが、この性質を用いることで効率的な加振方法に繋がるのではないかと考える。例えば、1Hz, 2Hzといった低周波数のみでの加振をあらかじめ計測することで、対象岩塊の卓越周波数がある程度絞り込める可能性がある。

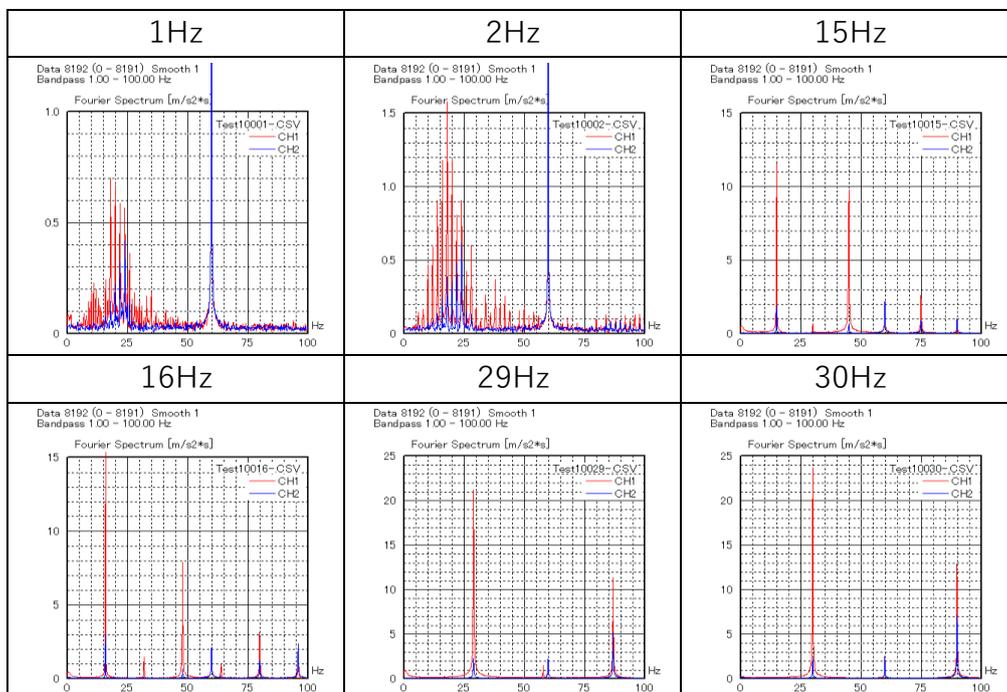


図-4 ある周波数ごとの加振

### 3. コンクリートブロック実験

#### 3.1 実験概要

ある岩塊の卓越周波数の変化を調査するために、コンクリートブロック供試体 A について測定条件を変えた実験を行った (図-5)。斜面については、作製した木枠内に市販の砂を入れ、木の板を用いて人工的に転圧をおこなった。以下に条件を示す。

- ・ 振動の与え方 (雑振動, 打撃, 加振機)
- ・ 斜面の傾斜角度 (0, 10, 20 度)
- ・ 傾斜方向 (A : 長辺傾斜方向, B 短辺傾斜方向)
- ・ 加振方向 (短辺方向, 長辺方向)
- ・ 加振機の加振力 (小, 中, 大)
- ・ 固定条件 (固定あり, 固定なし)

なお、加振力の小, 中, 大は、振動コンソールに表示される 1Hz 加振時の出力電流の大きさの調節により区別し、それぞれ 0.2, 1.2, 2.8 A である。また、固定について、供試体をラチェット式ベルトで締め、写真-2 の方向で固定した。加振時間については、既往研究との比較実験の際に、加振時間による卓越周波数への影響は見られなかったため、今回の実験では、スイープ速度を約 1Hz/s として、1~50Hz で周波数スイープ加振している。

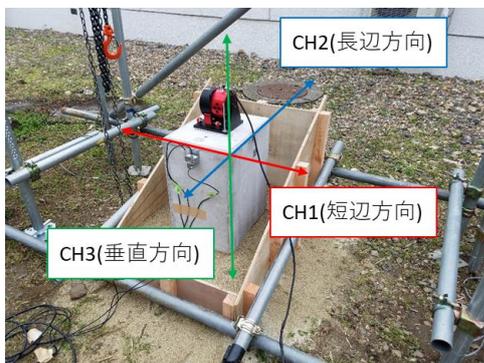


図-5 試験モデルと加速度計取付方向



写真-2 実験ケース例  
(傾斜角 10 度, 傾斜方向 A, 長辺方向加振, 固定あり)

#### 3.2 実験結果

実験結果の一部を図-6 に示す。卓越周波数を読み取れるグラフを選択し、その箇所を赤色の逆三角形で示している。また、卓越周波数をまとめたものを表-2 に示す。数字の色は図-5 に対応し、赤字、青字、緑字はそれぞれ CH1 (短辺方向), CH2 (長辺方向), CH3 (垂直方向) で計測された FFT 結果から卓越周波数を読み取った数値を示す。表の「-」は読み取れない場合を示し、斜線は供試体の滑動により実験を行っていない。

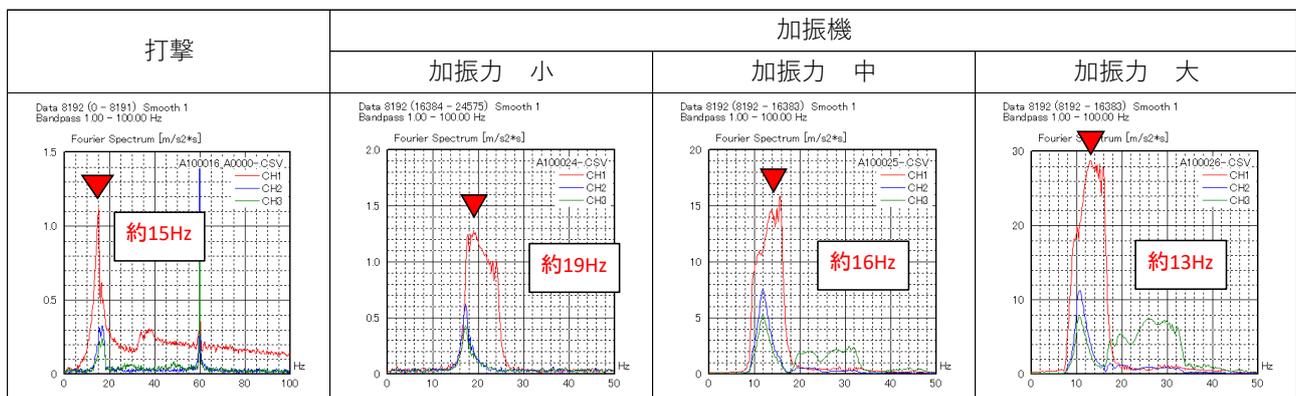


図-6 FFT 結果例 (傾斜角 10 度, 傾斜方向 A, 短辺方向加振, 固定なし)

表-2 卓越周波数まとめ (赤字：CH1, 青字：CH2, 緑字：CH3)

卓越周波数(Hz)			雑振動	打撃		加振機					
方向	角度	固定		短辺方向	長辺方向	短辺方向			長辺方向		
						加振力小	加振力中	加振力大	加振力小	加振力中	加振力大
	0度		2,16,18	15	18,18	18	14	14	21	16	14
		○	18,24	23	20,20	24	22	18	22	18	14
A	10度		1,18	15	16	19	16	13	20	14	13
		○	20	22	19	23	21	18	20	16	13
	20度		12	12	9	26	16	14	-	14	13
		○	12,21	20,29	10	33	24	19	-	14	13
B	10度		11,18	8	15	14	14	12	17	14	12
		○	12	11	23	12	14	13	25	20	18
	20度		6,17	5	15	/	/	/	/	/	/
		○	-	12	19	12	14	13	19	16	16

- ・ 加振方向：当然，加振方向の加速度成分が大きく表れるが，それと垂直方向の成分においても卓越周波数を確認できることがある。実際の岩塊の振動挙動は未知であるため，打撃等の加振を行う場合には様々な方向や位置を試した方が良いと考えられる。
- ・ 傾斜角度：全体的に見れば，傾斜角度が大きくなるほど卓越周波数が低く表れる傾向がある。しかし，深田らが行った固有値解析<sup>3)</sup>では，傾斜の影響を受けずにほぼ一定の固有振動数を示している。本実験では，人工的に斜面を作製したため，斜面の凹凸及び締固め度合い等の要因により，傾斜角度が大きくなるほど，供試体と地面の接合性が悪く，抵抗力が低い状態となり，このような結果になったと考える。
- ・ 傾斜方向：長辺傾斜方向に比べ短辺傾斜方向の方が低い卓越周波数が見られた。これは，傾斜角 0 度におけるチャンネルごとの卓越周波数を比較すれば当然のことである。
- ・ 傾斜角度と傾斜方向：図-7 は，傾斜方向と加振方向を加味したチャンネル分けによる卓越周波数を示している。直線の傾きから，傾斜角度を大きくしたときの傾斜方向の卓越周波数の低下の程度は，それと垂直方向に比べ大きい。また，傾斜方向を変えた場合でも，傾斜方向およびそれと垂直方向の傾斜角度に対する卓越周波数の変化の程度はそれぞれ一定である。
- ・ 固定の有無：模擬岩塊を固定した状態の方が高い卓越周波数を得られることを確認した (図-8)。また，固定の方向が一定であるため，傾斜方向によってチャンネルごとの卓越周波数の増加量に差が出ている。
- ・ 固定の有無と加振力：図-8 は加振力ごとの卓越周波数を示す。これより，固定ありと固定なしのどちらの場合においても，加振力を大きくしたときの卓越周波数の低下の程度はほぼ一定である。
- ・ 加振力：加振力が大きくなるほど卓越周波数が低くなることを確認され，加振によってより不安定状態になっていると考えられるが，これは地盤による影響が大きいと考えられる。
- ・ 振動の与え方：雑振動や打撃による振動測定に比べ，加振機を用いた場合には卓越周波数が数 Hz 低く表れることがある。これは模擬岩塊がより不安定な (抵抗力が低い) 状態になったと考えられる。

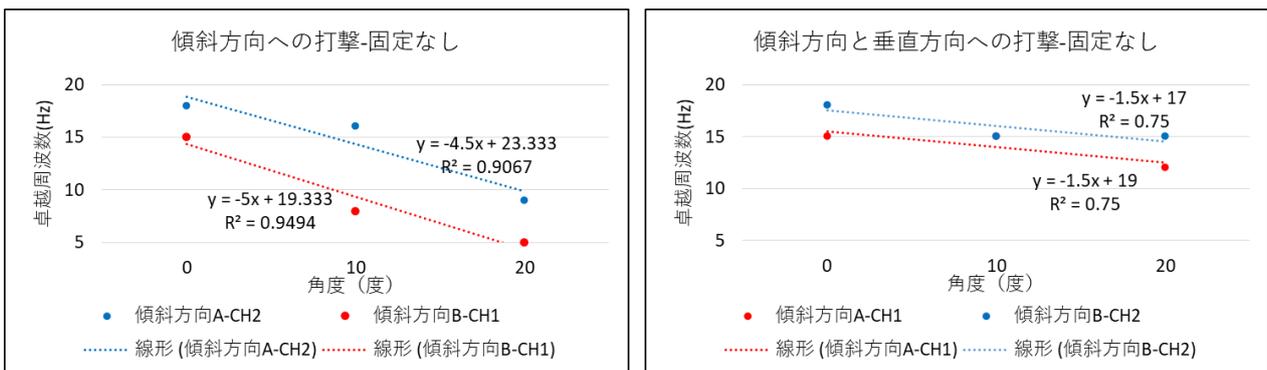


図-7 傾斜方向と加振方向を加味した傾斜角度ごとの卓越周波数

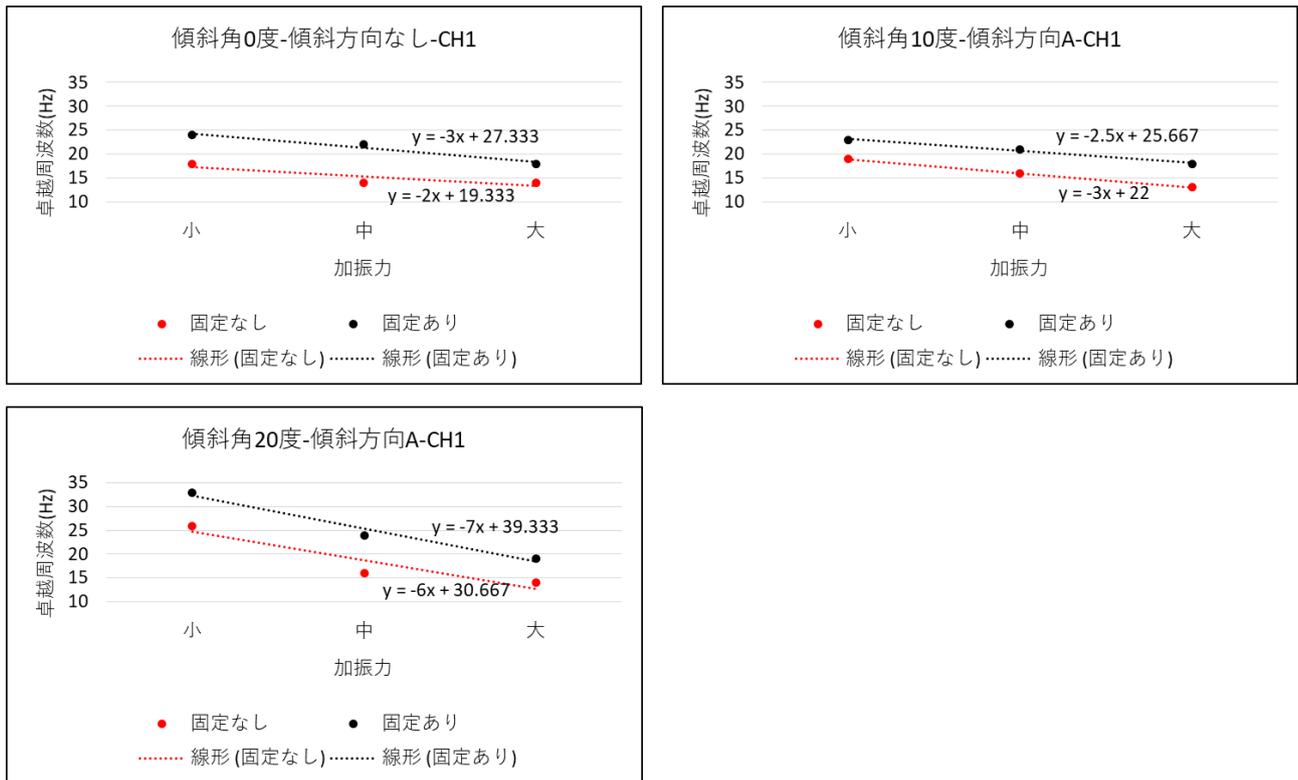


図-8 加振力ごとの卓越周波数（傾斜方向 A-CH1）

#### 4. おわりに

##### 4.1 本研究のまとめ

落石安定度評価において、調査対象の岩塊を定量評価できる既存の手法を適用し、効果的に振動を与える小型加振機を用いた実験を行った。既往研究および既存の手法と比較して、加振機による計測で同様の卓越周波数を得られた。また、加振機を用いた時の特性を以下に述べる。1. ある周波数のみで加振すると、加振周波数の倍数にのみスパイク型の卓越周波数が見られ、その中でも固有振動数付近にピークが見られる。2. 雑振動や打撃による振動測定に比べ、加振機を用いる場合には、卓越周波数が数 Hz 低く表れることがある。3. 加振機の加振力が大きいほど、卓越周波数は低く表れる。4. 安定状態と不安定状態のどちらの場合においても、加振力を大きくした時の卓越周波数の低下の程度は同様である。

##### 4.2 今後の課題

実験では振動特性が顕著に表れるように、模擬岩塊に直接小型加振機を設置し、振動の入力に周波数スイープを用いたが、実際の現場における振動入力波形や加振力などの加振方法について、今後さらに検討する必要がある。また、現在用いている小型加振機がどの程度の岩塊の大きさまで対応できるかについて、加振力やエネルギーなどの観点から詳細な調査が必要である。

#### 5. 参考文献

- 1) 日本道路公団試験研究所 (2002): 落石危険度振動調査法, 調査マニュアル(案)
- 2) 深田隆弘・橋元洋典・澁谷啓 (2012): 転石を模擬した剛体の振動特性による根入れ深さの推定方法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2(応用力学論文集 Vol.15), I\_337-I\_334
- 3) 深田隆弘・谷口達彦・澁谷啓(2013): 振動計測に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法の提案, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.1, pp.140-151