

WG2 研究テーマ：斜面上転石の危険度評価方法に関する研究

目次

1. 研究目的.....	- 2 -
2. 落石の発生形態.....	- 2 -
3. 既往の研究（転石型落石の落石危険度評価に関する研究）	- 4 -
3.1 振動計測に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法 ^{1), 2), 3), 6)}	- 4 -
3.2 振動を利用した転石の危険度評価.....	- 9 -
4. 模擬剛体を用いた打撃試験による振動特性の把握.....	- 10 -
4.1 打撃計測手法.....	- 10 -
4.2 模擬剛体（供試体）	- 13 -
4.3 模擬剛体による打撃試験結果.....	- 22 -
5. 実斜面における剥離型落石の振動特性の把握.....	- 31 -
5.1 現場概要.....	- 31 -
5.2 打撃試験概要.....	- 32 -
5.3 実斜面における打撃試験結果および考察.....	- 33 -
6. まとめ.....	- 36 -
6.1 研究成果.....	- 36 -
6.2 今後の課題・展望.....	- 37 -
参考文献.....	- 38 -

1. 研究目的

道路の維持・安全管理を行う上で重要な視点は、道路沿い急崖斜面に散在する転石の中で不安定な転石を的確に抽出した上で、転石が落下する可能性や落石によって被災する道路構造物ならびに周辺環境に与える影響等から危険度を評価し、危険度に応じた迅速な対策を施すことである。往年の研究成果により転石型落石に関しては一定の危険度評価手法^{1), 2), 3), 4), 5), 6), 7)}が確立され対策されてきたが、剥離型落石に関するものは未だ少ない。そこで本章では、剥離型落石を再現した模擬剛体を打撃した際に得られる振動特性に着目し、危険度評価を行うための定量的な指標を見出す。また、実現場で剥離型落石を打撃し、模擬剛体打撃時に得られた振動特性の知見が利活用可能であるかの検証を行う。上記より、従来の定性的な点検手法を改善し、定量的な判定基準を加えた、簡易かつ効果的な転石の危険度評価手法の提案を行うものである。

2. 落石の発生形態

落石の発生形態⁸⁾は、以下の3つに分類することができる。これらは発生機構や素因・誘因も異なるため、上記分類を行うことは、落石が発生する可能性の想定や落石対策を検討するための前提となる。

①転石型落石（抜落型落石）、②剥離型落石（浮石型落石）、③その他の落石

【転石型落石（抜落型落石）】

転石型落石の発生形態は、図 2-1 に示すとおり 2 つのタイプに大別できる。

- (a) : 段丘・火山碎屑物等の斜面基質が、礫を含む締固めの緩い土砂であるタイプ
(b)・(c)・(d) : 基岩の風化や風化生成物質の移動により、岩盤上に表土や崖錐等の土砂が存在するタイプ

転石型落石は、土砂中の礫のみが運動を開始する場合と、土砂の崩壊に伴って落石が発生する場合がある。すなわち、マトリックスが表面流や地下水によって浸食され、落石発生源となる岩塊が地表面に浮き出し、遂には平衡状態を失うことで抜け落ちる落石形態である。図内 (a) に示す礫を含む土砂斜面は、一般に傾斜の緩い斜面を形成するため、抜け出し直後に飛跳運動をすることは稀である。一方、図内 (b)・(c)・(d) は、抜け出し直後に飛跳運動をする。

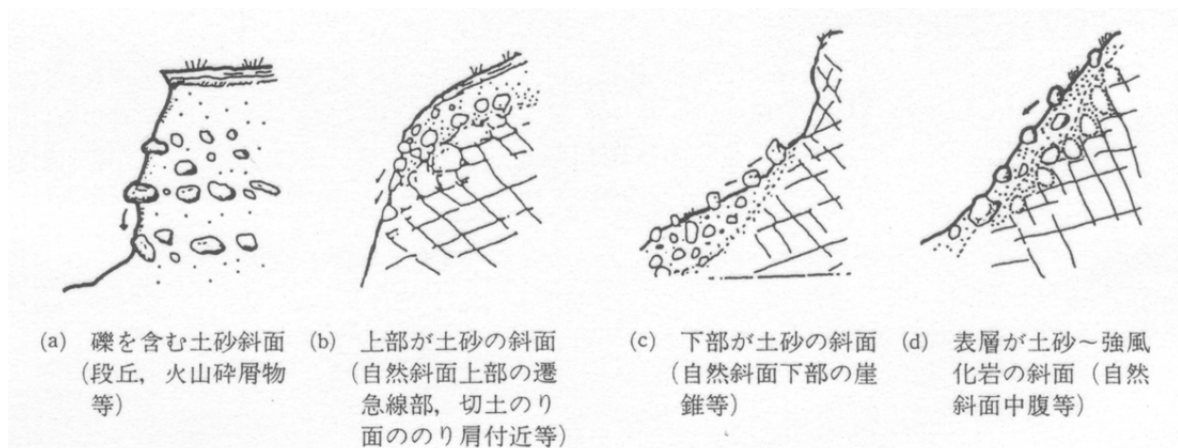


図 2-1 転石型落石の発生形態

【剥離型落石（浮石型落石）】

剥離型落石の発生形態は、主に岩盤斜面上で発生する。図 2-2 に示すとおり発生規模は小さいが、発生機構は岩盤崩壊と同一である場合が多い。

- (a)：板状の浮石が形成され易いが、節理・層理・片理・硬軟層といった境界の不連続面方向が単一でなく、複数存在する場合が多い。
- (b)：不連続面が概ね水平である場合は、不連続面間における軟弱層の浸食程度の差異によってオーバーハングが形成される結果、落石となる。
- (c)：不連続面が高角度に入っている場合は、オーバーハングやトップリングによる落石が発生する。
- (d)：新第三紀以降の軟岩等で構成される不連続面の発達していない斜面において、地表面が風化することで肌落ちし、落石となる。

剥離型落石は最初から岩目が無くとも、新たな引張亀裂（テンションクラック）が発生して剥離することもあり、第三紀層等、比較的新しい年代の地層や火山岩類によく見られる。

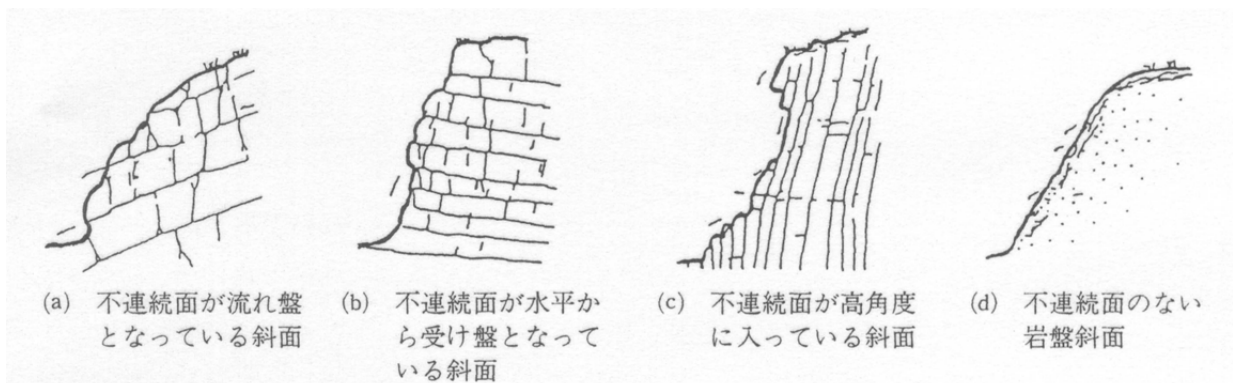


図 2-2 剥離型落石（浮石型落石）の発生形態

【その他の落石】

図 2-3 に示す発生形態は、以下のような場合に見られる。これらは特殊なケースであるが、落石の発生原因の一つであると考えられている。

- ・風化花崗岩地帯において、風化・浸食に強い岩塊が風化により残存して、トア（岩塔）地形を形成し、これが崩落して落石となる。
- ・凝灰角礫岩地帯において、浸食を免れた礫が不安定な状態で残存した部分が落石となる。



風化・浸食で残留した
尾根上の巨礫等

図 2-3 その他の落石の発生形態

3. 既往の研究（転石型落石の落石危険度評価に関する研究）

3.1 振動計測に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法^{1), 2), 3), 6)}

深田らは定量的な落石危険度評価方法を確立するためには、転石の振動特性を把握すること、そして転石型落石の力学的な発生メカニズムを考慮することの重要性を説き、振動を利用した転石の根入れ深さを推定した上で力学的安定度を計算し、落石危険度を評価する手法を提案している。

（1）振動を利用した転石の根入れ深さの推定方法

深田ほかは、図 3-1 に示す地盤中に根入れを有する転石を模擬した剛体を作製し、剛体の形状寸法・重量・地盤固さ・根入れ深さ等の条件を変えて、ハンマー打撃時に計測した加速度波形から固有振動数を算定した。

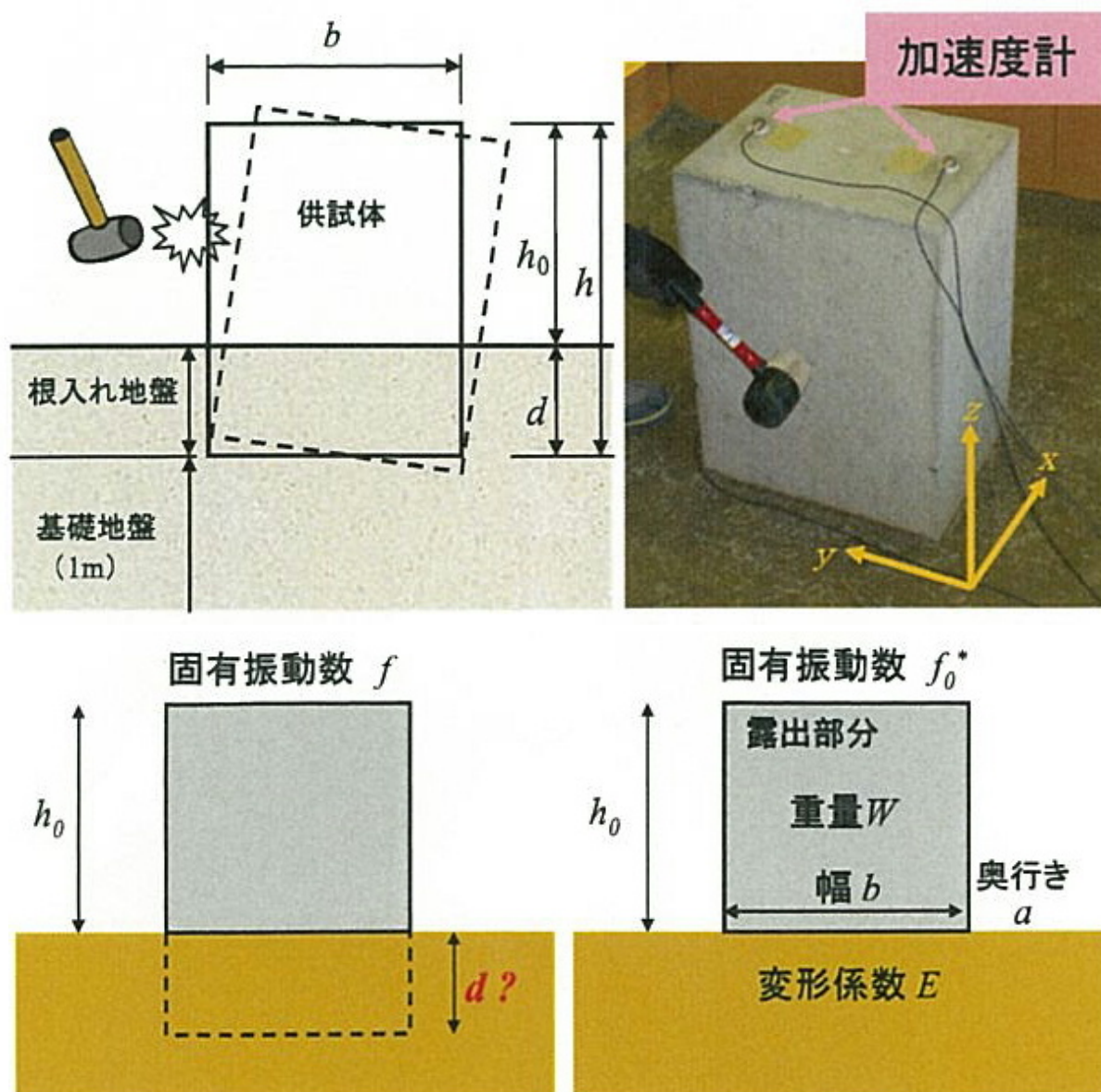


図 3-1 転石を模擬した剛体に関する振動計測実験

また、転石や地盤をモデル化した三次元有限要素法による固有値解析から、式 3-1～式 3-4 に示す転石の根入れ深さを推定する方法を考案し、更に式 3-5 にて、根入れ深さを X 方向及び Y 方向の 2 方向からの平均値として求めることを提案している。また、これら推定式より求まる根入れ深さが、 $\pm 5\text{cm}$ 程度の誤差

で推定できることを検証している。

$$d = 0.396 \frac{f}{f_0^*} - 0.394 \quad (3-1)$$

$$f_0^* = 0.719Q_1 \cdot Q_2 + 0.745 \quad (3-2)$$

$$Q_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EAg}{B(1-\nu^2)I_p W}} \quad (3-3)$$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{(b/h_0)^2}{(b/h_0)^2 + 1}} \quad (3-4)$$

$$\bar{d} = \frac{d_x + d_y}{2} \quad (3-5)$$

ここに、

- d : 根入れ深さの推定長 (m)
- f : 転石の実測固有振動数 (Hz)
- f_0^* : 転石（露出部分）を根入れ深さをゼロとみなした場合の固有振動数 (Hz)
- Q_1 : 地盤をバネとみなしたときの転石（露出部分）の基本振動数 (Hz)
- Q_2 : 転石（露出部分）の形状から決まる特性値
- E : 転石まわりの地盤の変形係数 (kN/m²)
- A : 転石（露出部分）の底面積 (m²)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- B : 転石（露出部分）の短辺長さ (m)
- ν : 地盤のポアソン比
- I_p : 形状係数 ($I_p = 0.3053 \ln(L/B) + 0.5564$)
- L : 転石（露出部分）の長辺長さ (m)
- W : 転石（露出部分）の重量 (kN)
- b : 転石の打撃方向の幅 (m)
- h_0 : 転石（露出部分）の高さ (m)
- \bar{d} : 平均根入れ深さ (m)
- d_x : X 方向打撃の固有振動数から算定される根入れ深さ (m)
- d_y : Y 方向打撃の固有振動数から算定される根入れ深さ (m)

(2) 力学的安定度に基づく落石危険度の定義

深田らは落石危険度について、斜面における滑動及び転倒に対する転石の力学的安定度を用いて定義している。

《滑動に対する安定度》

滑動に対する安定度は、根入れ地盤の破壊に対する安全率として考えることができ、図 3-2 に示すとおり、滑動力は地盤の主働土圧と転石自重の斜面方向成分、抵抗力は地盤の受働土圧と転石底面および側面の摩擦力和粘着力の合力となる。

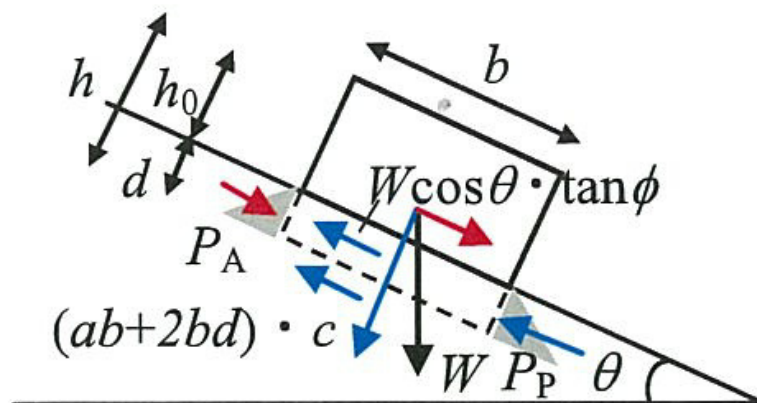


図 3-2 転石の滑動に対する安定度

ここで転石の地中部側面の摩擦力については、摩擦係数と土圧係数のいずれも 1 より小さい 2 つの係数の積であることと、根入れ深さが大きくないことを考えれば、粘着力等の他の抵抗力と比べて小さな値となる。そのため安全側の評価であることに加え、計算の簡便性も考慮してこれを無視することとし、滑動に対する安定度： F_s を次項式 3-6 で定義する。

《転倒に対する安定度》

転倒に対する安定度は、図 3-3 に示すように支点まわりのモーメントで考える。転倒モーメントは転石自重の斜面方向成分によるもの、抵抗モーメントは転石自重の斜面直角方向成分によるものと転石上部の地盤の受働土圧によるものとの合計となる。

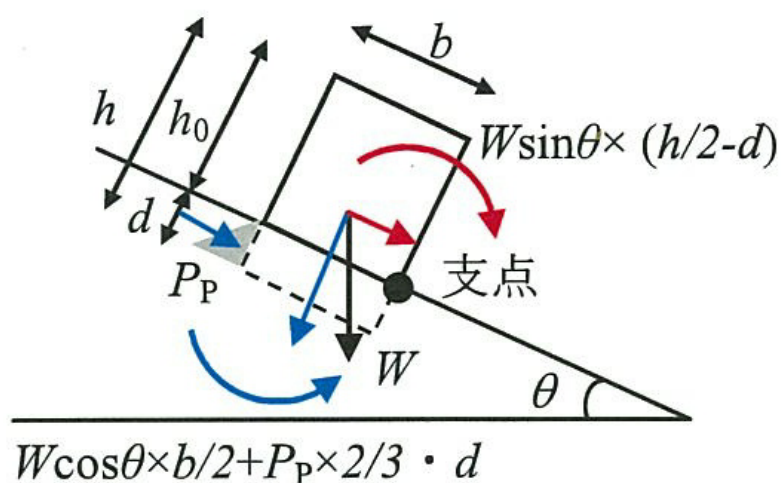


図 3-3 転石の転倒に対する安定度

なお、滑動に対する安定度と同様に、安全側の評価となることと、計算の簡便性を考慮して、転石の底面及び地中部側面の摩擦力による抵抗モーメントは無視する。したがって、転倒に対する安定度： F_R を式 3-7 で定義する。

また、式 3-6 および式 3-7 における根入れ地盤の主働土圧と受働土圧は、せん断抵抗力と粘着力がある場合のランキン土圧として、それぞれ式 3-8、式 3-9 で与える。

$$F_S = \frac{P_P + W \cos \theta \cdot \tan \varphi + (ab + 2bd) \cdot c}{P_A + W \sin \theta} \quad (3-6)$$

$$F_R = \frac{W \cos \theta \times b/2 + P_P \times (2/3) \cdot d}{W \sin \theta \times (h/2 - d)} \quad (3-7)$$

$$P_A = \left[\frac{1}{2} \gamma d^2 \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2cd \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \times a \quad (3-8)$$

$$: P_P = \left[\frac{1}{2} \gamma d^2 \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2cd \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \times a \quad (3-9)$$

ここに、

- F_S : 斜面上転石の滑動に対する安定度
- P_A : 根入れ地盤の主働土圧 (kN)
- P_P : 根入れ地盤の受働土圧 (kN)
- W : 転石の重量 (kN)
- θ : 斜面勾配 (°)
- φ : 地盤のせん断抵抗角 (°)
- a : 転石の斜面走向方向の奥行き (m)
- b : 転石の斜面傾斜方向の幅 (m)
- d : 転石の根入れ深さ (m)
- c : 地盤の粘着力 (kN/m²)
- F_R : 斜面上転石の転倒に対する安定度
- h : 転石の高さ (m $h=h_0+d$)
- h_0 : 転石の露出部分の高さ (m)
- γ : 地盤の単位体積重量 (kN/m³)

(3) 斜面における地盤の変形係数

地盤の変形係数は、急斜面においても測定できる方法として簡易貫入試験による N_d 値によって評価する。一般的に N_d 値と N 値には、 $N_d = (1 \sim 3) N$ の関係がある。

ここで根入れ深さの推定式である式 3-1 において、重要な f_0^* が分母にあり、この f_0^* が式 3-3 において地盤の変形係数を含む Q_I と関係していることから、根入れ深さを過大に算出しないためには、 Q_I を大きく

見積もる方が良い。したがって、 $N=N_d$ とし、変形係数とN値の一般的な関係である $E=700N$ (kN/m²) を用い、これを動的な歪みレベルに対応した2倍相当値として、式3-10により地盤の変形係数を算出している。

なお、今回対象とする転石の露出高が最大でも1m程度であり、根入れ深さがその半分の50cm程度（根入れ比：0.5以上）あれば十分に安定であると考え、地盤の評価は深さ50cmの位置の N_d 値で行うこととした。

また、地盤の粘着力： c とN値の関係は、斜面の概略安定計算に用いられる $c=N/16$ (kgf/cm²)= $6N$ (kN/m²) として、式3-11により評価する。

$$E = 2 \times 700N_d = 1,400N_d \quad (3-10)$$

$$c = 6N_d \quad (3-11)$$

(4) 転石露出部分の形状近似

提案する方法で根入れ深さを推定するためには、まず転石の露出部分の形状を把握する必要がある。図3-4に示すように、転石の露出部分の外形寸法を、傾斜に添った斜面走向方向の寸法： a 、斜面方向寸法： b 、斜面直角方向高さ： h_0 の直方体に近似する。ただし、その重量は直方体に内接する楕円球体の半分として式3-12により求める。

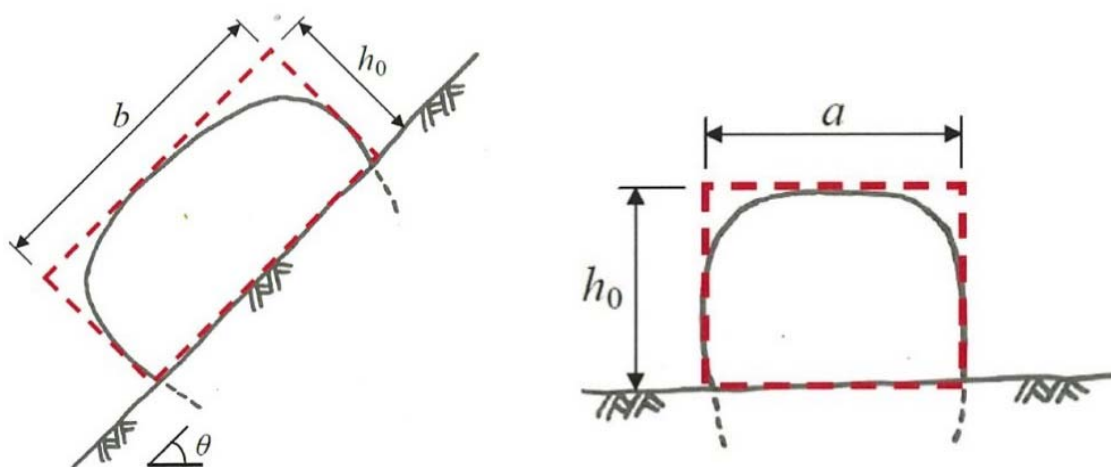


図 3-4 転石の形状近似

$$W = \gamma_{ROCK} \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot h_0 \times \frac{1}{2} = 0.52 \cdot \gamma_{ROCK} \cdot a \cdot b \cdot h_0 \quad (3-12)$$

ここに、

- γ_{ROCK} : 転石の単位体積重量 (kN/m³)
- a : 転石の斜面走向方向の奥行き (m)
- b : 転石の斜面傾斜方向の幅 (m)
- h_0 : 転石の露出部分の高さ (m)

3.2 振動を利用した転石の危険度評価

岩塊に生じた振動を捉え、そのときの加速度や振動数等のパラメータを評価する手法は、岩塊に損傷を与えずに定量的な危険度評価ができることから、物理モデルを用いた転石メカニズムの解明^{4),7),9)}等と共に転石における研究対象とされてきた。1980年代には、奥園らによって、転石周辺をかけやで打撃した時の加速度を評価する手法¹⁰⁾が提案されており、2000年代に入ると、計測機や記録・解析装置(コンピュータ)が小型かつ安価になったため、緒方らによって解析によって得られるパラメータを用いた評価法¹¹⁾も提案された。このときの振動源には、自動車や列車が通過した際の常時微動を用いるものと、転石やその付近の地盤を直接打撃した際の振動を用いるものに分けられる。常時微動を用いる評価法は、高速道路総合技術研究所や土木研究所によって、「落石危険度振動調査法」^{12),13)}として実用化されてきた。具体的には、転石部と基盤部の2つの振動波形からRMS(2乗平均平方根)速度振幅比を計算し、1質点1自由度系モデルの周波数応答曲線の理論曲線から卓越周波数と減衰定数を同定する。これらのパラメータを

図 3-5 に示すチャート上に図示し、図に示す不安定領域に分布する転石を不安定と判定するものである。

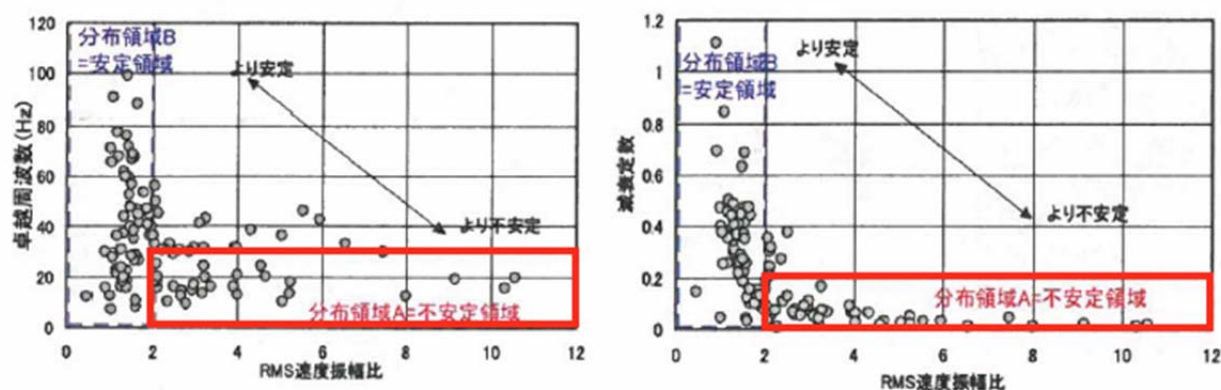


図 3-5 RMS 速度振幅比と卓越周波数、減衰定数による判定¹³⁾

しかしながら、この調査法が測定対象とする常時微動は、専門技術者が専用機械を使用して測定や解析を行う必要があるなど、高コストであるため実施事例の報告は限られている。実現場の斜面管理の現状に照らせば、精微な判定方法ではなくとも、従来の方より精度が高く、何よりも現地での実施が容易である判定方法の開発が望まれる。

4. 模擬剛体を用いた打撃試験による振動特性の把握

4.1 打撃計測手法

(1) 計測システム

本研究で採用する計測法は、深田らが提案する『振動計測に基づく斜面上転石の落石危険度評価方法』である。深田らは、定量的な落石危険度評価方法を確認するためには、転石の振動特性を把握すること、そして転石型落石の力学的な発生メカニズムを考慮することの重要性を説き、振動を利用した転石の根入れ深さを推定した上で力学的安定度を計算し、落石危険度を評価する手法を提案している。下記に述べる評価手法は「転石型落石」に採用していた評価手法であり、本研究では「剥離型落石」にも適用が可能であるかの検証を行う。

転石型落石に対する振動計測手法概要図を図 4-1 に示す。本研究では下記計測手法を用いて、各条件下において模擬剛体を打撃した際に得られる加速度スペクトル及び固有振動数に着目し、剥離型落石の振動特性に関する考察を行った。

- ① 加速度計を設置した根入れを有する斜面上転石をゴムハンマーで打撃し、得られる加速度波形を AD 変換器を介して PC に記録する。
- ② 加速度波形をフーリエ変換し、加速度スペクトルと固有振動数を得る。加速度スペクトルが最大となる卓越振動数をその転石が持つ固有振動数とみなし、転石の根入長推定や転倒・滑動等の安定計算を行う。

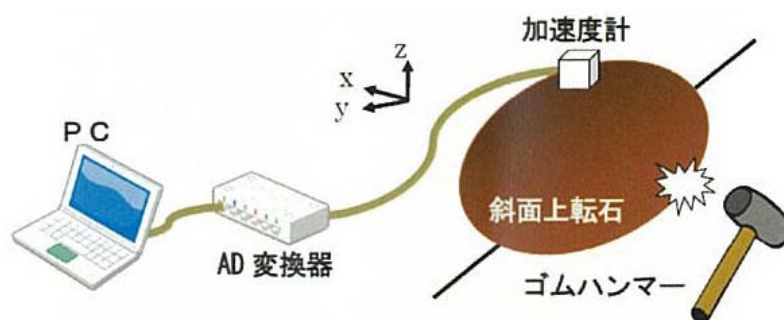


図 4-1 斜面上転石の振動計測イメージ



図 4-2 斜面における転石の振動計測状況

※ 振動計測機器は、作業条件が必ずしも良好でない急傾斜地等でも使用性に優れている必要がある。そのため、プリアンプ内蔵の機器を採用し、シンプルかつコンパクトなシステム構成となっている。

(2) 落石打撃によって得られる固有振動数および加速度について

一般に、打撃方向に対して、動きにくい（安定した）岩盤を打撃する場合は、固有振動数および加速度が大きくなる。これは打撃時に発生した波が減衰することなく反発するためである。一方、動き易い（不安定化した）岩盤を打撃する場合は、打撃する落石も打撃方向へ移動するため、打撃時に発生した波が減衰し、固有振動数及び加速度は小さくなる。また、加速度は加速度計と打撃箇所が近いほど大きく、遠方に進むにつれて小さく取得される。

深田らは得られる最大固有振動数について、経験則から 100Hz 以上の場合を大きい、100Hz 以下の場合を小さいとしている。また、加速度については得られる値が元々小さいため大小の境を設けていない。本業務でも深田らの見解を基準に評価を行う。

したがって、個々の落石を打撃することによって得られる固有振動数及び加速度を評価する際に、以下の前提を定義する。

《固有振動数について》

- ・固有振動数：大 → 打撃方向に対して移動しにくい
- ・固有振動数：小 → 打撃方向に対して移動しやすい

《加速度について》

- ・加速度：大 → 打撃箇所から近い
- ・加速度：小 → 打撃箇所から遠い

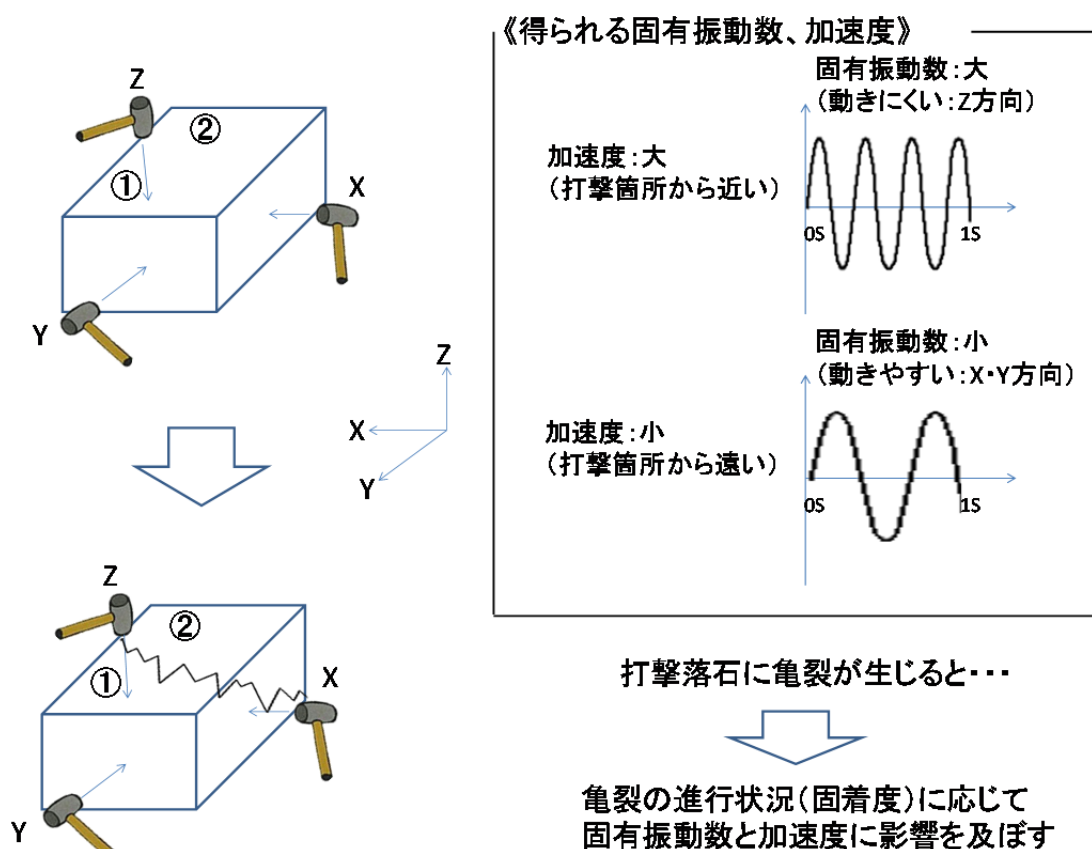


図 4-3 落石打撃によって得られる固有振動数および加速度

落石打撃時の最大固有振動数および最大加速度スペクトルは、図 4-4 に示す解析ソフト（Wave Stocker Ver 2.61）を用いて取得する。図内拡大箇所では、加速度 ch 毎、かつ X・Y・Z 方向毎に取得した加速度波形をフーリエ変換した最大固有振動数および最大加速度スペクトルが把握できるようになっている。図内拡大図右側には、縦軸に最大加速度、横軸に最大固有振動数が両対数軸でプロットされる。拡大図左側には、波形にピークが認められる箇所の最大固有振動数と最大加速度スペクトルを加速度順に上位 10 位まで記載される仕組みとなっている。また、三軸方向を容易に把握するため、それぞれ X 方向（青）、Y 方向（赤）、Z 方向（緑）で色別されている。

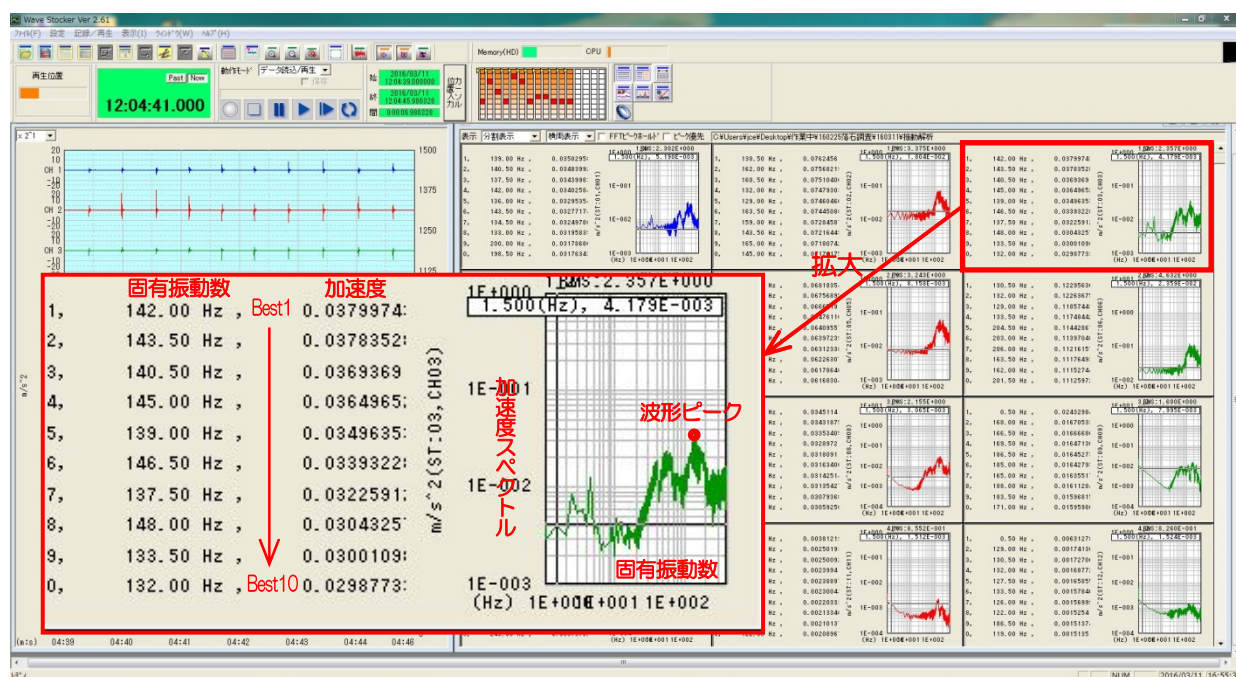


図 4-4 解析ソフト（Wave Stocker Ver 2.61）画面

4.2 模擬剛体（供試体）

（1）模擬剛体作成方法

模擬剛体は軽量で加工が容易な石膏とし、形状寸法は $W:L:H=20\text{cm}\times40\text{cm}\times30\text{cm}$ 、重量約 18kg、密度 0.75t/m^3 である一般的な風化岩相当の直方体とした。

- ① 模擬剛体を作成するため、図 4-5 に示すコンパネを用いて $W:L:H=20\text{cm}\times40\text{cm}\times30\text{cm}$ の寸法の型枠を事前に作成する。コンパネとはコンジットパネルの略語であり、表面に防水加工を施した合板のことをいう。型枠内に水を投入した際の木材への浸透や型枠外への漏水を防ぐため、コンパネの防水加工面を型枠の内側とし、型枠材間に生じる隙間は図 4-6 に示すシリコン製のペースト状シール材で充填する。また、石膏の硬化による体積膨張で型枠が変形するのを防ぐため、長辺側の型枠側面には別途補強材を設けた。



図 4-5 模擬剛体の作成に必要なコンパネ製型枠



図 4-6 シリコン製シール材（充填材）

- ② 型枠内に予め水を張り，石膏：水=18kg：17kgの割合（質量比=1：1）で石膏を投入する。この際の密度は， $0.75 \text{ (t/m}^3\text{)}$ となった。図 4-7 に示すように，均一な模擬剛体を作成するために攪拌すると同時に，石膏内の気泡を取り除くためランマーを用いて側方から振動を与えた。攪拌が完了したら，表面に浮かび上がった気泡をヘラで取り除いて2～3日乾燥させ，石膏の硬化が十分に進行したことを確認した後に脱型する。



図 4-7 模擬剛体作成時の攪拌状況



図 4-8 脱型後の模擬剛体

- ③ 図 4-9 示すように、作成した模擬剛体の上面に打撃箇所を明確にするため、5cm×5cm 間隔のメッシュを配置し、その格子点を赤色で着色した。模擬剛体打撃面の各格子点は、図 4-10 に示すように模擬剛体の短辺方向を X 軸、長辺方向を Y 軸、高さ方向を Z 軸とし、X 方向に A～D 列、Y 方向に 1～8 列を設け、各点を A-1～D-8 と定義し、これを打撃点とした。また、図-3.3 に示すように、長辺に並行な中心線上の中心部・両端部に加速度計の設置点①～③を設けた。

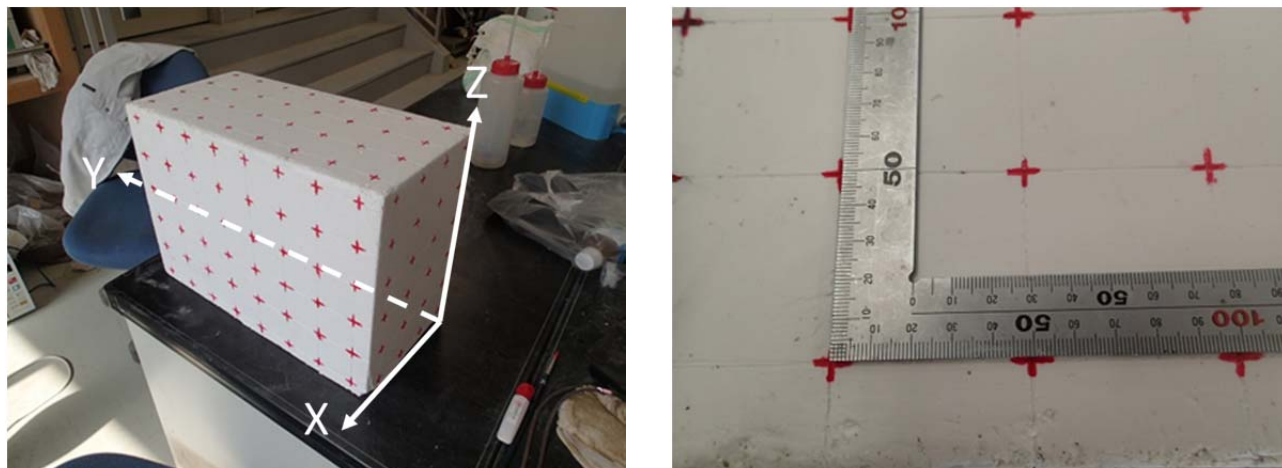


図 4-9 模擬剛体の格子点配置状況

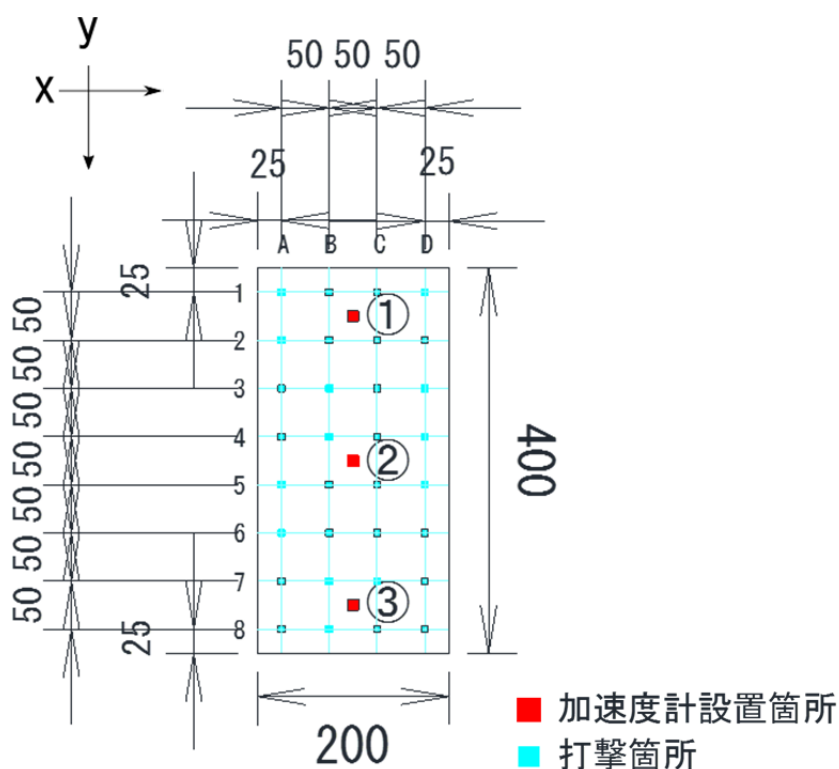


図 4-10 模擬剛体打撃面の打撃点ならびに加速度計設置位置図

- ④ 模擬剛体に加速度計を取り付ける際には、図 4-11 に示す加速度計の X 軸, Y 軸, Z 軸が模擬剛体に設定した各座標軸と合致するように留意する。加速度計はそれぞれ、「加速度計①～③」と呼称する。加速度計を模擬剛体に確実に接着させるため、接着剤としてエポキシ樹脂製のパテを用いた。

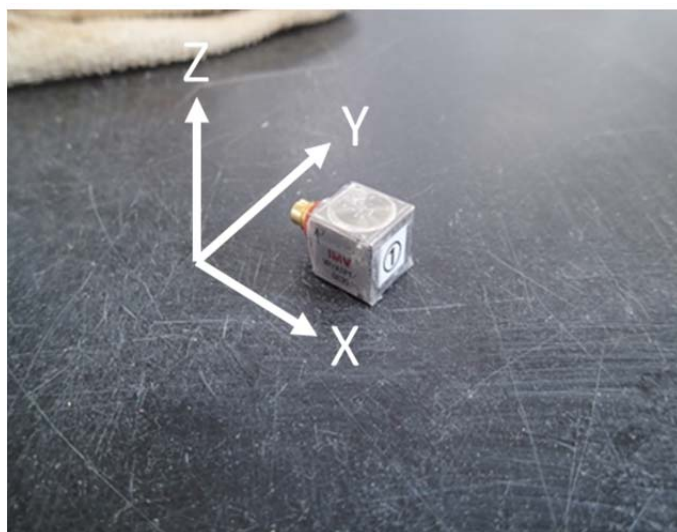


図 4-11 加速度計に設定されている座標系



図 4-12 模擬剛体との接着に用いたエポキシ樹脂製パテ

- ⑤ 模擬剛体の据え付けについては注意を要する。当該打撃試験では据付面に対して法線方向（Z 方向打撃）を行い、打撃時に発生した振動を計測する。硬質の床や机、あるいは不陸のある地盤の上に模擬剛体を据え付けた場合、模擬剛体が打撃と共に動き、安定した波形が得られない。したがって、図 4-13 に示すように据付面に敷き砂をして不陸を解消した。



図 4-13 模擬剛体設置箇所の敷き砂状況

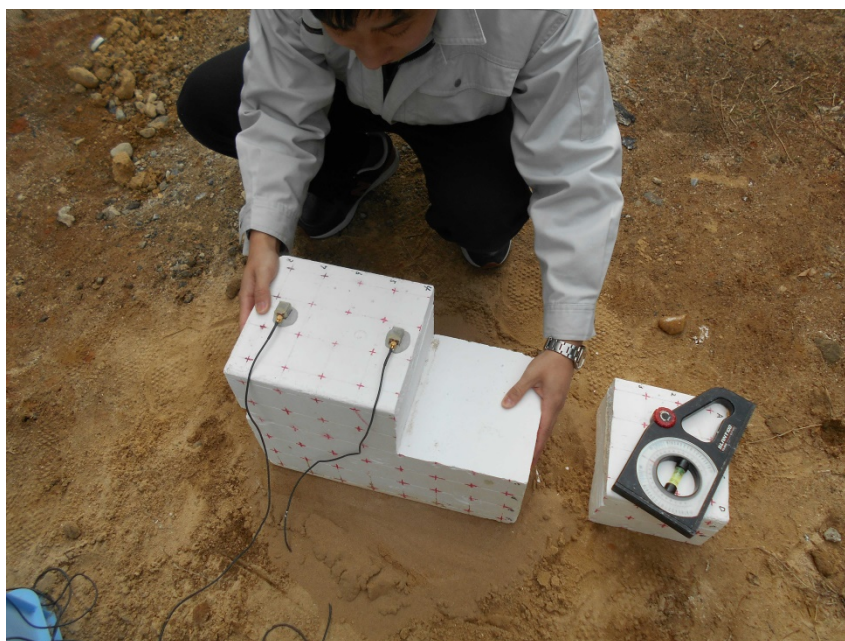


図 4-14 模擬剛体据付状況

(2) 打撃試験で用いた模擬剛体の仕様

「安定した基岩」と「不安定な剥離部」を有する転石を再現するため、(1) の工程で作成された模擬剛体に切り込み加工を施し、3TYPE のパターンにて打撃試験を行った。

また、図 4-15 に示す通り模擬剛体天端面に 3 つの加速度計を設置し、打撃点は天端面に設けた格子交点 (@5cm) と、各 TYPE に応じて設定した側面の 1～2 箇所とした。

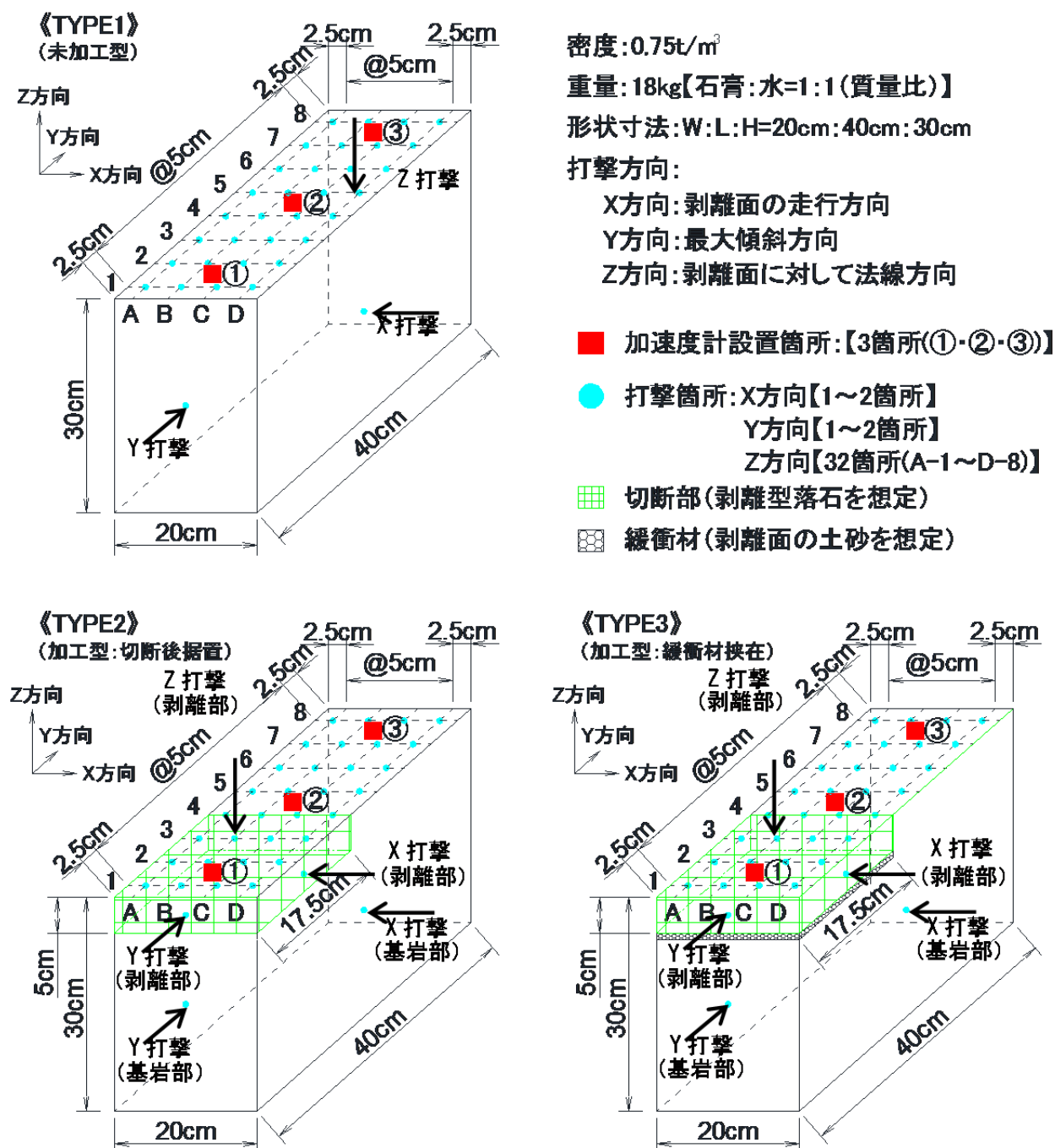


図 4-15 打撃試験に用いた模擬剛体仕様図-1

図内 TYPE1 を標準供試体（未加工）とし、TYPE2・3 では模擬剛体に切込を入れて分離させ、基岩上にある剥離岩盤を再現した。TYPE2 では分離した剥離岩盤が基岩に静置した状態を、TYPE3 では剥離面に緩衝材を敷くことで TYPE2 と比べて打撃時に発生する振動を吸収し易い状態を再現した。なお、緩衝材の材質は非常に軟らかいスポンジで打撃時の振動を相当に吸収できる素材であり、厚さは約 5cm とした。

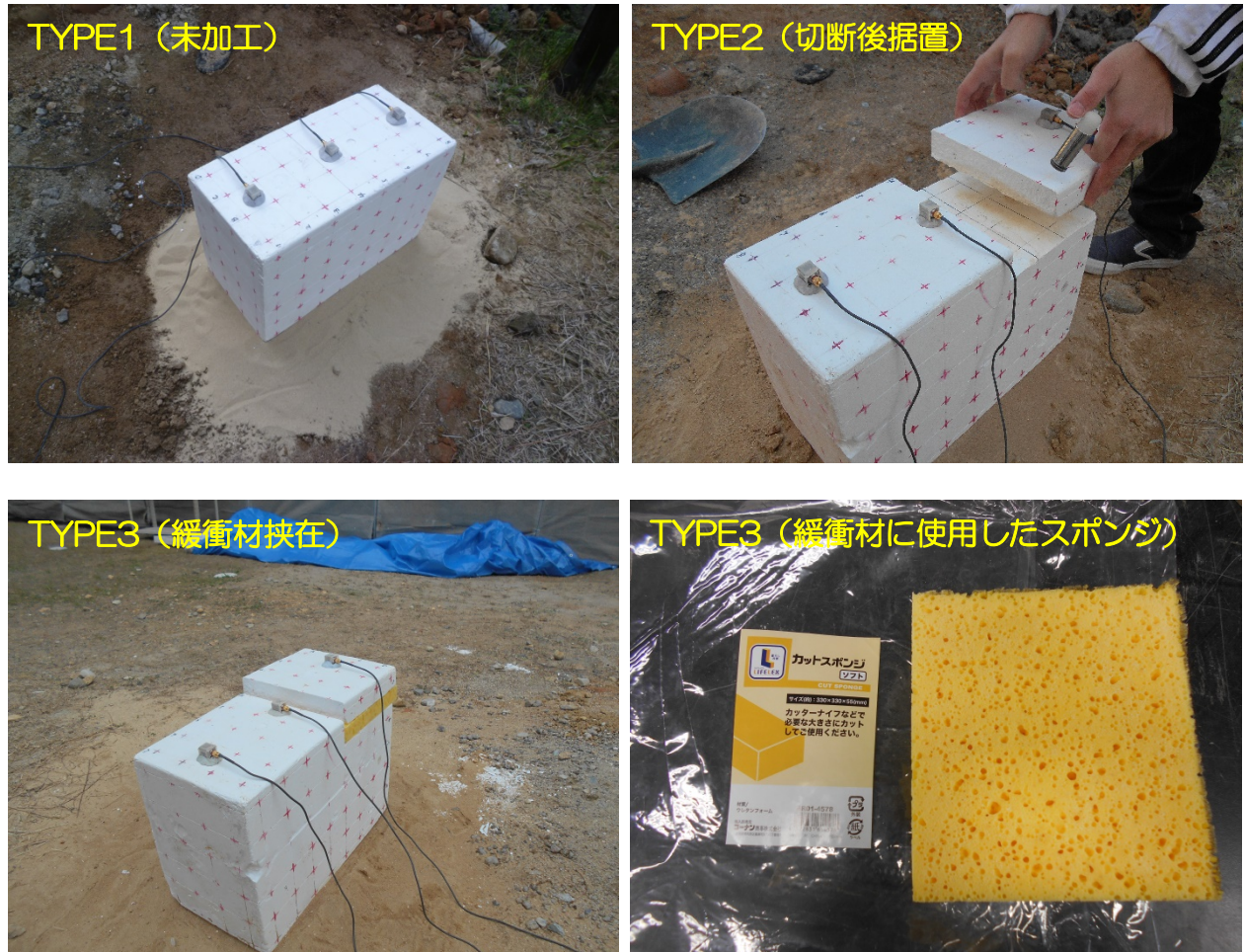
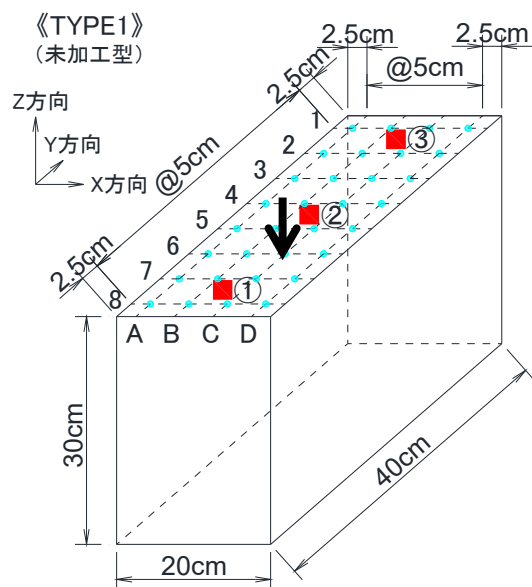


図 4-16 打撃試験に用いた模擬剛体外観-1 (TYPE1・2・3)

また、基岩に発生した剥離岩盤の亀裂進行現象を再現するため、(1)の工程で作成された模擬剛体に水平方向(Y方向)に切り込み加工を施し、TYPE4及びTYPE5の2パターンを追加して打撃試験を行った。

また、図 4-17 に示す通り模擬剛体天端面に3つの加速度計を設置し、打撃点は天端面に設けた格子交点(@5cm)とした。



密度:0.75t/m³

重量:18kg【石膏:水=1:1(質量比)】

形状寸法:W:L:H=20cm:40cm:30cm

打撃方向:

X方向:剥離面の走行方向

Y方向:最大傾斜方向

Z方向:剥離面に対して法線方向

■ 加速度計設置箇所:【3箇所(①-②-③)】

● 打撃箇所:X方向【1~2箇所】

Y方向【1~2箇所】

Z方向【32箇所(A-1~D-8)】

■ 切断部(剥離型落石を想定)

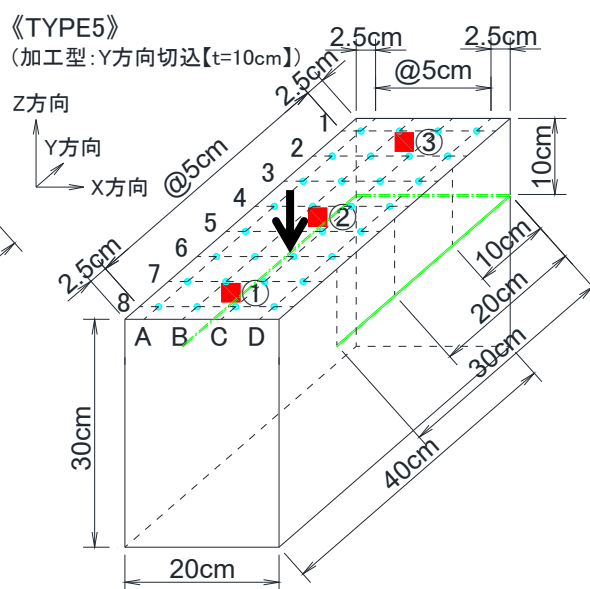
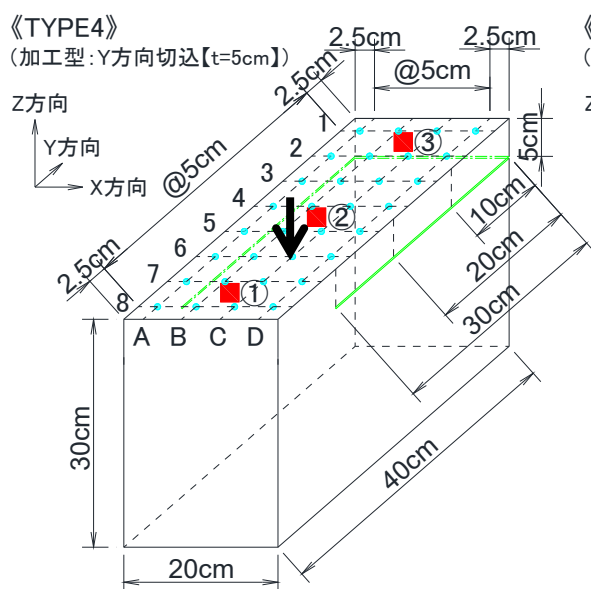


図 4-17 打撃試験に用いた模擬剛体仕様図-2

TYPE4・TYPE5 両タイプにおいて、供試体据付前に予め据付面を少し掘削し、加速度計を設置している。これは供試体を打撃した際に発生する固有振動数が供試体を通じて地中にどのように伝達するかを把握する狙いがある。供試体据付後は Y 方向へ 10cm づつ切れ込みを入れる毎に打撃計測試験を行い、計測後に切れ込みを延長するという繰り返し作業を行い、切れ込みが 30cm となるまでの 3 パターンの打撃計測を行った。

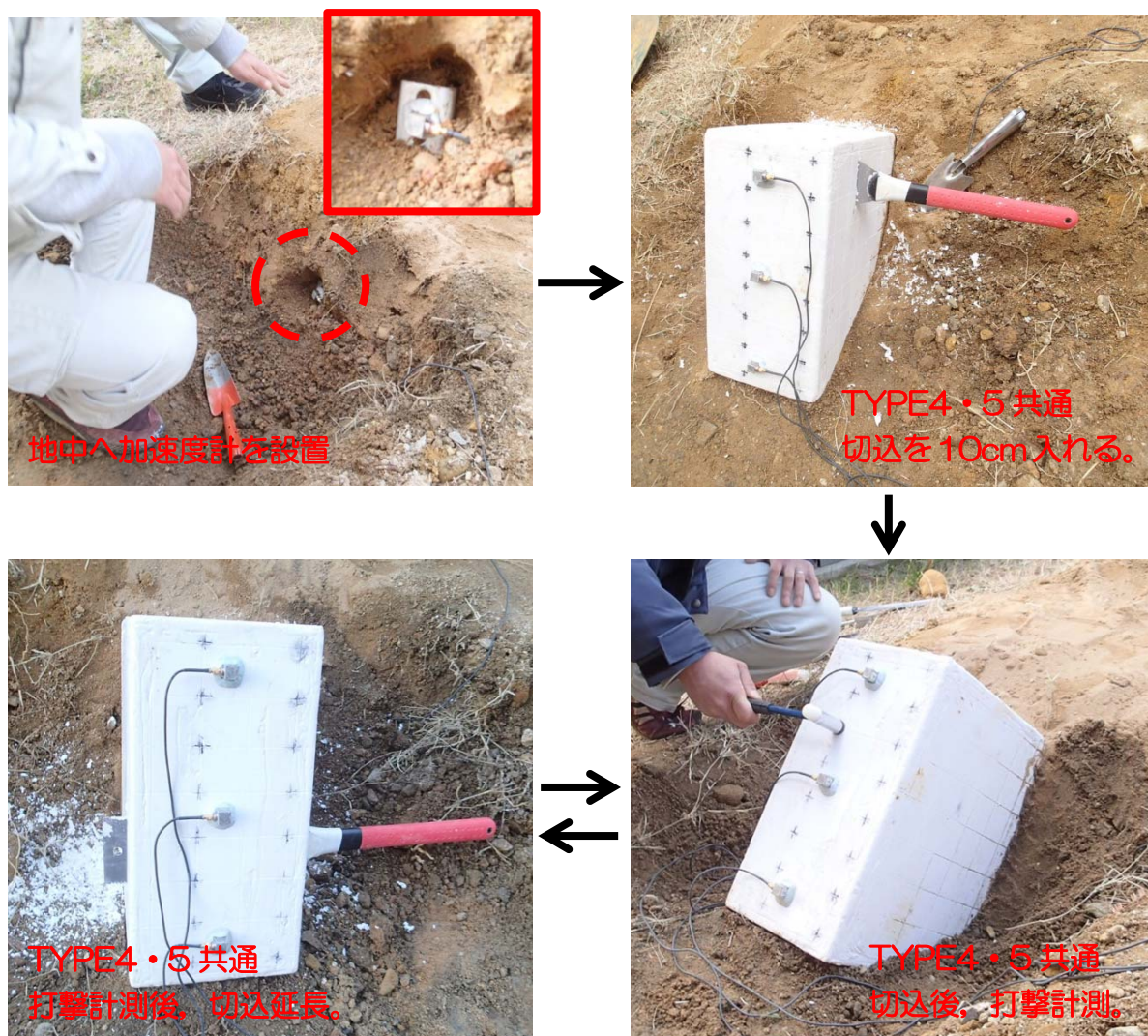


図 4-18 打撃試験に用いた模擬剛体外観-2 (TYPE4・5)

4.3 模擬剛体による打撃試験結果

(1) 打撃力の違いに関する検討

図 4-19 に TYPE1 を用いて、各面中央部を三軸方向へ強弱をつけて打撃（以後、X・Y・Z 打撃）した際に打撃方向と同方向にて（ex.X 打撃時に X 方向で検出される加速度波形にフーリエ変換を行う）得られた加速度スペクトルおよび固有振動数を加速度計毎に示す。固有振動数は打撃に強弱をつけても概ね同等の値を示すのに対し、加速度スペクトルは強打撃の方が大きくなる。打撃力は点検者毎に異なること、また同点検者でも同じ力で打撃し続けることは難しいことから、打撃力に影響を受ける項目は評価指標として適さない。したがって転石の振動特性は、打撃力の影響を受けない固有振動数で評価すべきと考える。また固有振動数は X・Y 打撃で 20～40Hz、Z 打撃で 75Hz 前後が得られた。これは打撃方向に対する模擬剛体背面の状況に起因し、本条件下においては、模擬剛体の固有振動数が 20～40Hz、模擬剛体が背面の地盤との反発により発生した固有振動数が 75Hz 前後であったと考えられる。

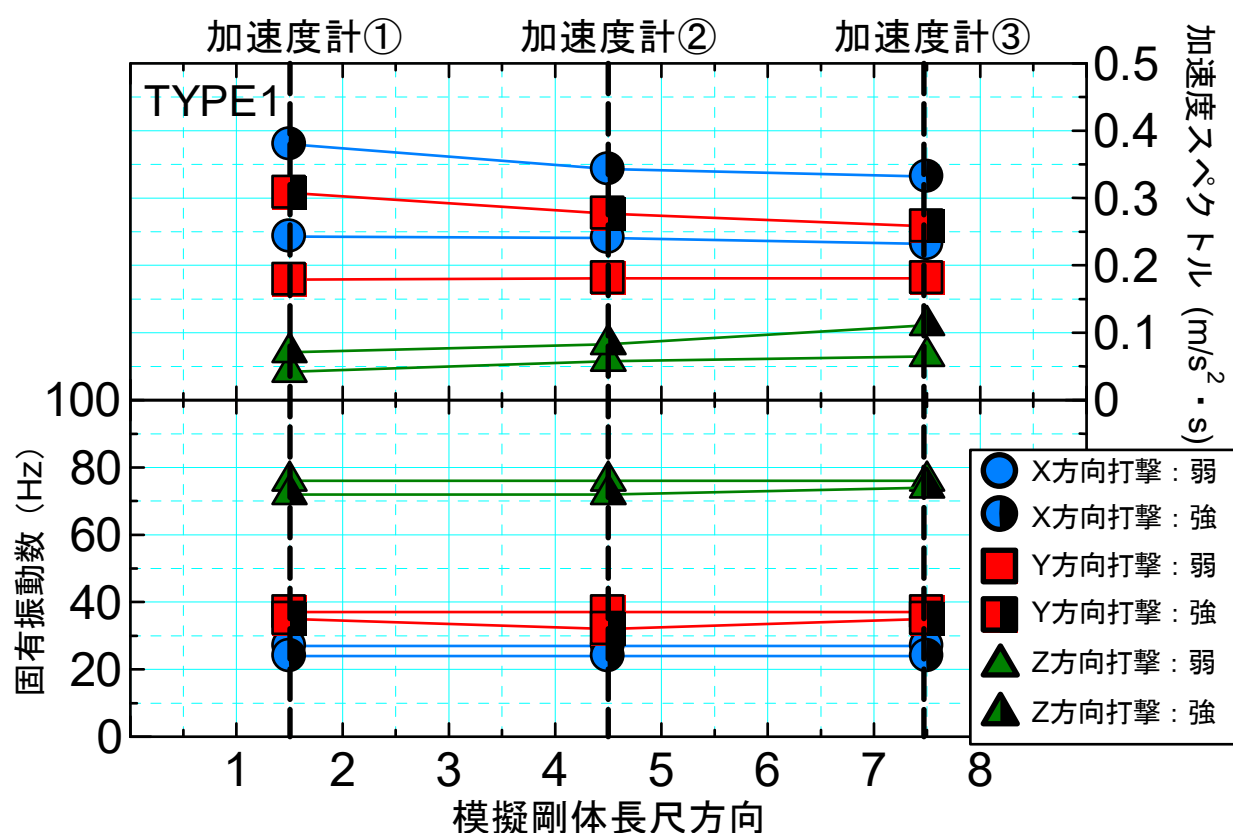


図 4-19 打撃力変化による固有振動数・加速度スペクトル (TYPE1)

(2) 打撃方向に関する検討

図 4-20 は TYPE2, 図 4-21 は TYPE3 を用いて, 剥離部・基岩部を三軸方向へそれぞれ打撃した際に得られた固有振動数を示す。両図より X・Y 打撃では 20~30Hz を示すことから図 4-19 に示す TYPE1 との差は認められないが, Z 打撃では X・Y 打撃のような一定値を示さない。X・Y 打撃の場合, 剥離部・基岩部と別々の箇所を打撃しているにも関わらず, 材質が同一で異なる形状寸法の剛体を打撃したものと認識されるため, 同等の固有振動数が得られると考える。一方, Z 打撃の場合は, 剥離部打撃時に打撃方向対して模擬剛体背面に基岩及び地盤が存在することから, 地盤条件や嵌合状態に応じて取得される固有振動数に変化が生じる。したがって, 剥離岩落石の危険度評価をする際には, Z 方向に打撃して得られる固有振動数に着目することが有効であると考えられる。

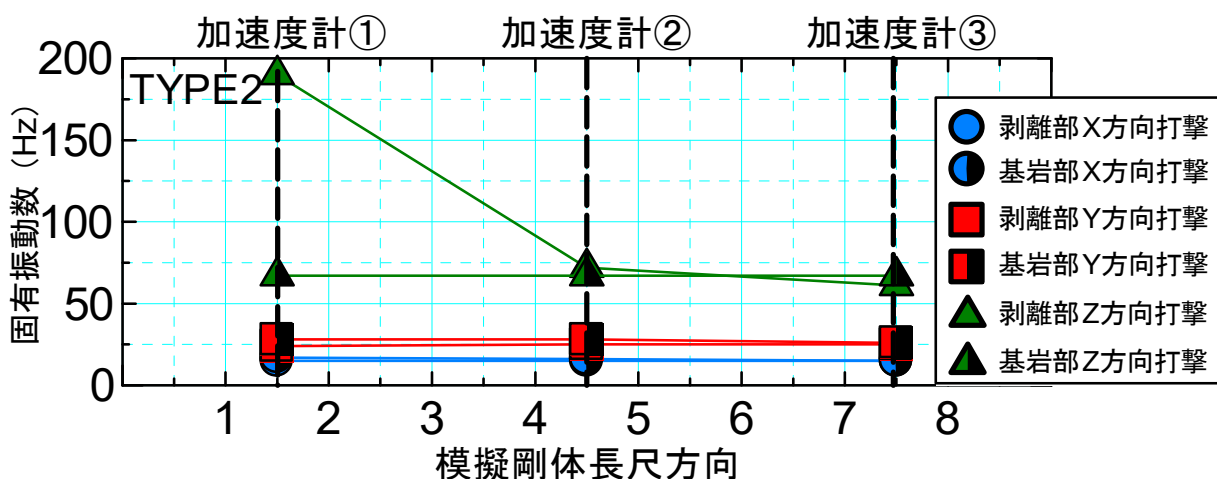


図 4-20 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE2)

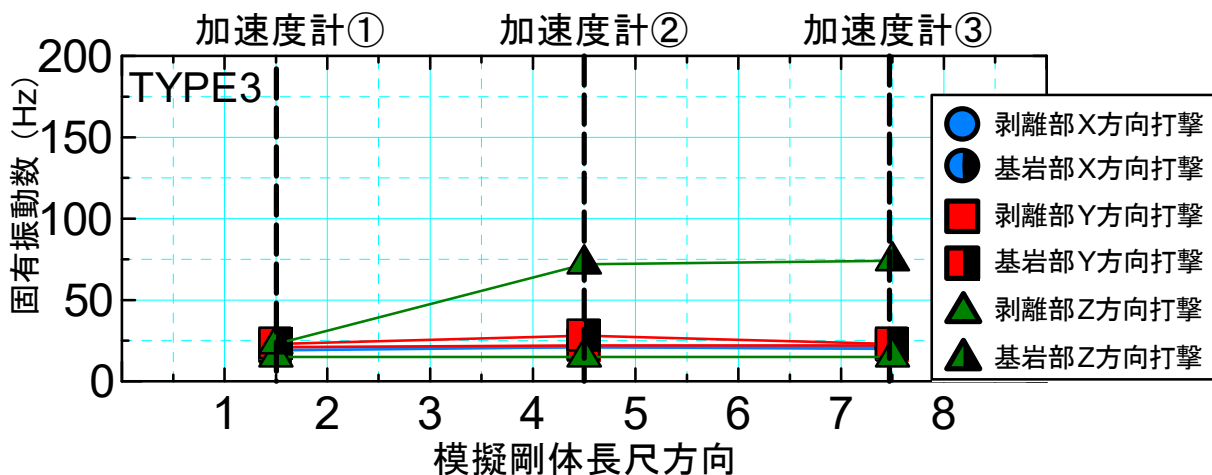


図 4-21 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE3)

(3) 剥離部の不安定評価に関する検討

図 4-22～図 4-24 には、模擬剛体上面に格子状に打撃点を配置し、各 Z 打撃箇所を得られた固有振動数を設置した加速度計毎に示した。ここでは代表的な B 列 (B-1～B-8) で得られた固有振動数を表記する。

TYPE1 において各加速度計で取得される固有振動数は 60～100Hz である。取得される振動数に多少の幅があるのは、模擬剛体作製時に攪拌ムラが生じ必ずしも均一な剛体でないことや、打撃面の微細な凹凸に起因しており、本計測手法の精度限界と考える。ただし後述の通り、異なる静置状態の岩塊を打撃した場合は、精度限界による幅を超越した傾向の振動数を得られることから、実現場における複雑な条件下においても、本計測手法は適用できると考える。

TYPE2 は基岩部を切断し、剥離岩盤を剥離面に静置した状態である。基岩部を打撃しても固有振動数に有意な差は認められないが、剥離部を打撃すると、打撃時に剥離面で基岩と反発するために加速度計①で大きな固有振動数を得られると考える。

TYPE3 は剥離面に緩衝材を挟在させた状態である。基岩部を打撃した際に加速度計②・③では TYPE1 同様の固有振動数が得られるのに対して、剥離部に設置した加速度計①では 20Hz と非常に小さい値を示す。これは打撃時に発生する振動が緩衝材によって吸収され剥離部に伝達していないことを意味する。上記は剥離部を打撃した際に、いずれの加速度計で取得される固有振動数が概ね 20Hz であることから明瞭で、本条件における剥離岩盤は、基岩部とほとんど嵌合していない分離した（基岩とは独立した）状態であることがわかる。これらより打撃した際に取得できる固有振動数から、剥離岩盤の基岩に対する嵌合状態を推測できる可能性が示された。

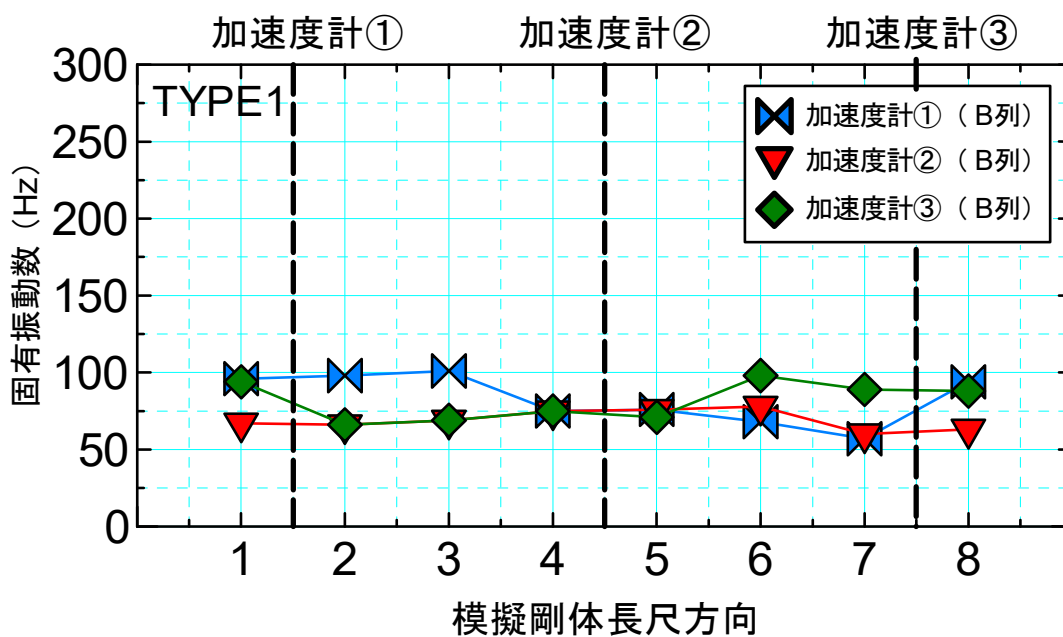


図 4-22 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE1)

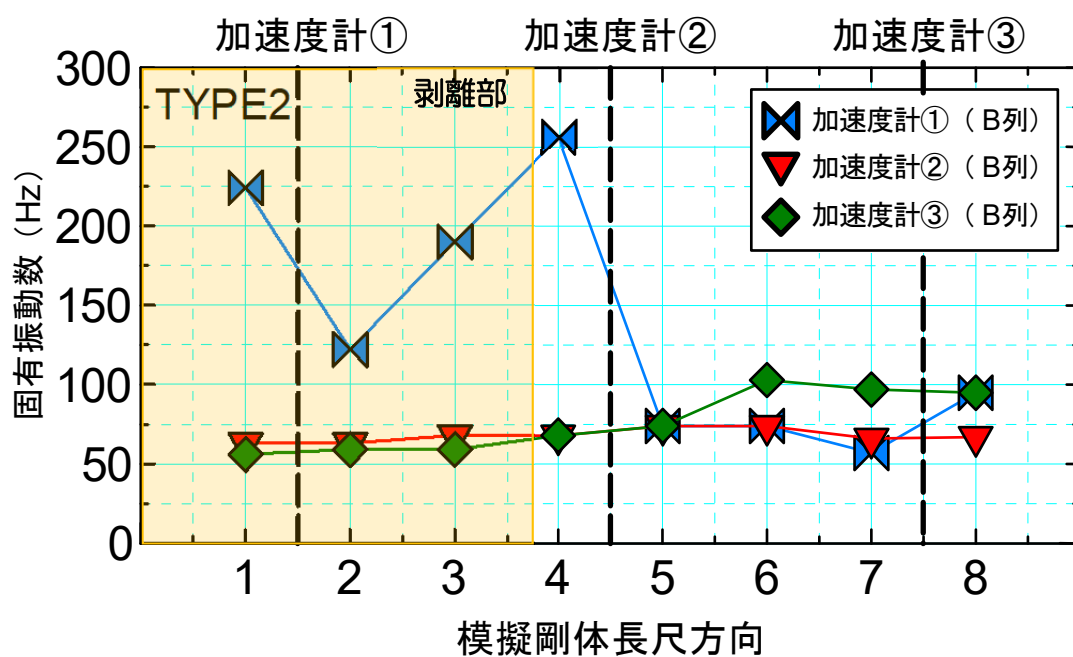


図 4-23 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE2)

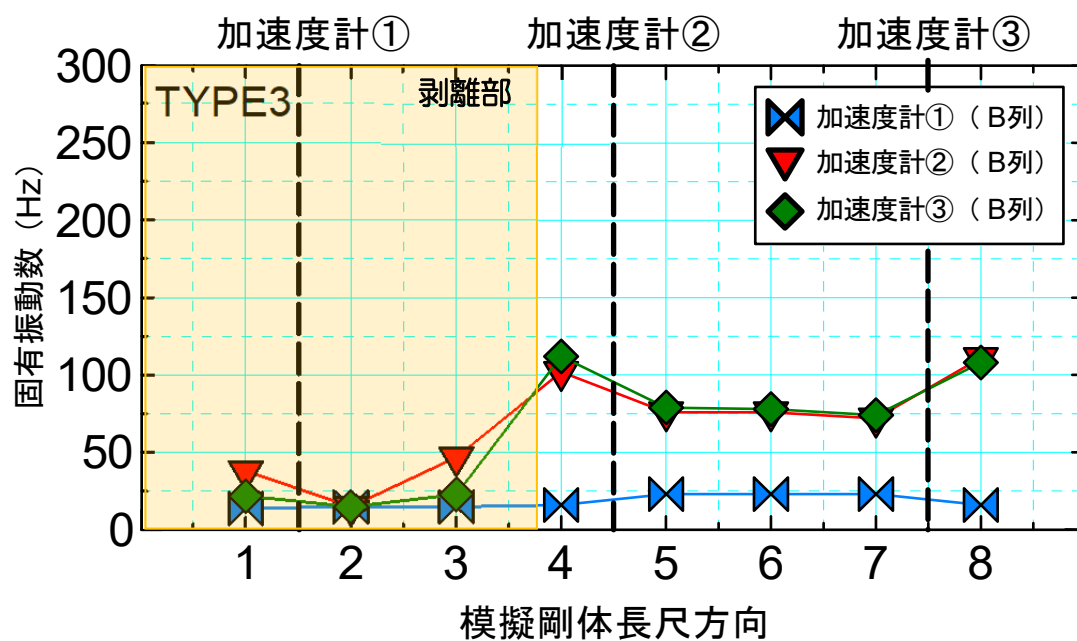


図 4-24 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE3)

(4) 剥離部の亀裂進行に関する検討

図 4-25～図 4-31 には、模擬剛体上面に格子状に打撃点を配置し、各 Z 打撃箇所を得られた固有振動数を設置した加速度計毎に示した。ここでは代表的な C 列 (C-1～C-8) で得られた固有振動数を表記する。

TYPE1 において各加速度計で取得される固有振動数は 100～140Hz であった。各打撃点で打撃した際に各加速度計で得られる固有振動数は、ほぼ同等と言える。取得される振動数に多少の幅があるのは、模擬剛体作製時に攪拌ムラが生じ必ずしも均一な剛体でないことや、打撃面の微細な凹凸に起因しており、本計測手法の精度限界と考える。また、図 4-22 で示した打撃試験の際は今回と同じ TYPE1 の打撃計測を行ったにもかかわらず、60～100Hz と今回の打撃計測結果と固有振動数の取得値に多少差が生じた。これは、供試体の据付角度や据え付ける地盤状況に応じて異なるものと考ええる。

したがって、地盤条件や据付条件を統一した上で供試体の加工を行い、供試体に与えられた変化が固有振動数に与える影響を把握することが肝要である。

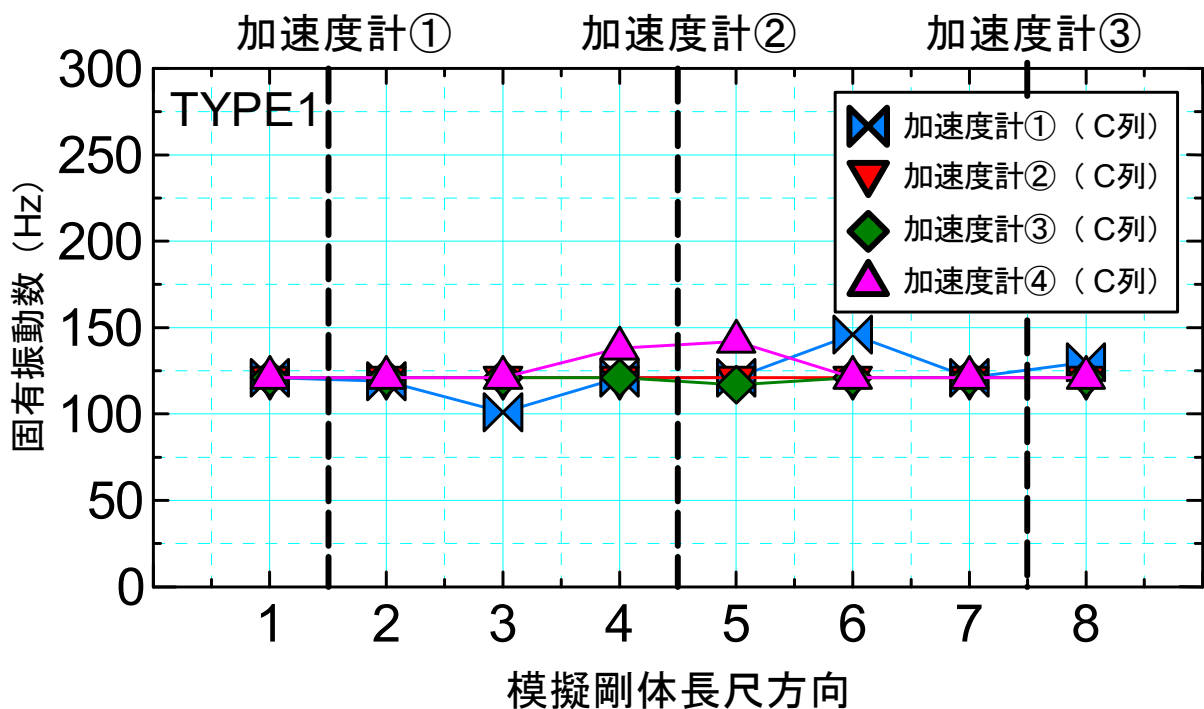


図 4-25 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE1)

TYPE4 は基岩部を Y 方向に 10cm づつ切断して剥離岩盤の亀裂を進行させている。加速度計③はどの工程においても切込が通過した剥離岩盤上にあるため、未加工型（TYPE1）よりも高い固有振動数を取得することがわかる。切込長が深くなるほど取得できる固有振動数は大きくなる傾向があるが、線形性があるとはまでは言い切れない。加速度計①・②については、切込が自身直下を通過するまでは未加工型と同等の固有振動数が計測されるが、切込が通過する（亀裂が進行する）と未加工型よりも著しく大きな固有振動数を計測することがわかる。

また、供試体に切込が入った状態における打撃箇所に応じた加速度計の変化は以下の傾向があると考えられる。

- ・ 基岩部を打撃した場合
 - 剥離部に取り付けた加速度計（②・③）のみが高い固有振動数が計測される。
- ・ 剥離部を打撃した場合
 - 剥離部を打撃することから、剥離部・基岩部を問わず高い固有振動数が計測される。

これらより、基岩部と剥離部にそれぞれ加速度計を設置して打撃計測を行えば、供試体に入れる切込の通過、即ち剥離岩盤の亀裂の進行性は把握できることが言える。

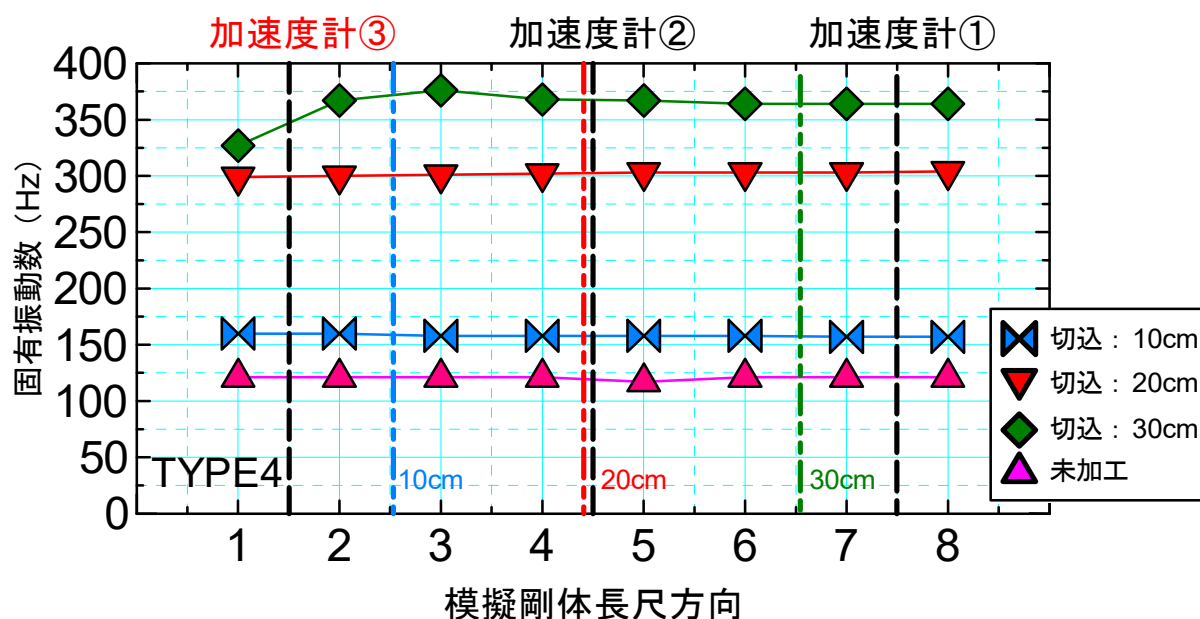


図 4-26 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係（TYPE4・加速度計③）

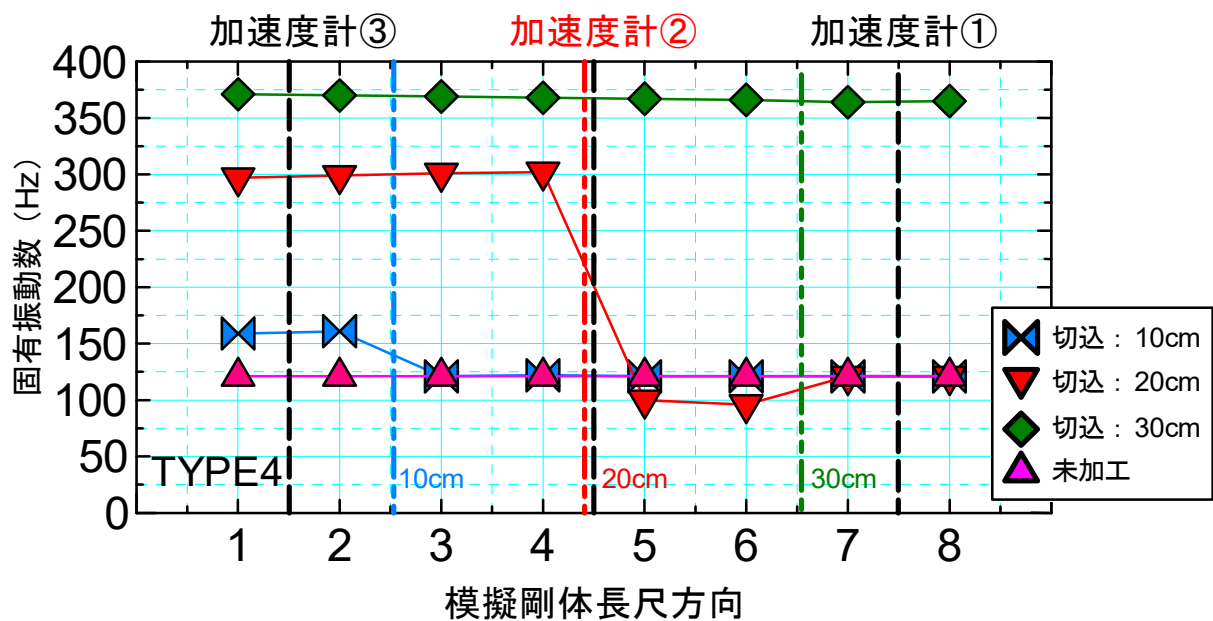


図 4-27 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE4・加速度計②)

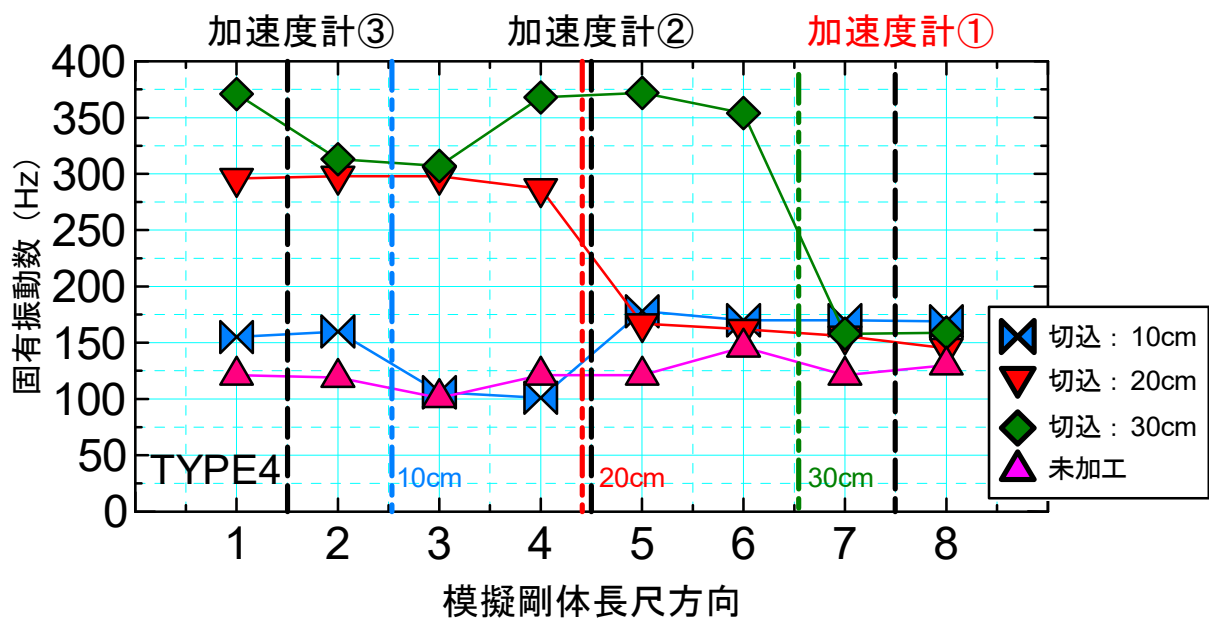


図 4-28 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE4・加速度計①)

TYPE5 は TYPE4 と同様に基岩部を Y 方向に 10cm づつ切断して剥離岩盤の亀裂を進行させている。TYPE4 との差は切込位置の Z 方向への深さであり、TYPE4 は 5cm, TYPE5 は 10cm である。したがって、切込長を大きくする（亀裂が進行する）と TYPE5 の方が TYPE4 よりも大きいサイズの剥離岩盤が形成されるという条件としている。

加速度計③はどの工程においても切込が通過した剥離岩盤上にあるため、未加工型（TYPE1）よりも高い固有振動数を取得することがわかる。切込長 10cm～20cm 区間では切込長が深くなるほど取得できる固有振動数は大きくなる傾向があるが、切込長：30cm で得られる固有振動数は切込長：10cm の固有振動数より 20Hz 程度大きいだけの結果となった。切込長：20cm の場合が 370～380Hz を計測出来ていることを鑑みると、切込長：30cm の打撃計測時に得られる固有振動数は加速度計の計測可能範囲（400Hz 迄）をオーバーしていた可能性も考えられる。あくまで推測の域を超えないが、加速度計の計測可能範囲がもっと大きい加速度計を設置していたら、計測結果が異なっており、TYPE4 時にも述べた切込長と固有振動数の線形性等が認められたかもしれない。加速度計①・②についても、TYPE4 の打撃計測結果と同様に切込が自身直下を通過するまでは未加工型と同等の固有振動数が計測されるが、切込が通過する（亀裂が進行する）と未加工型よりも著しく大きな固有振動数を計測することがわかる。

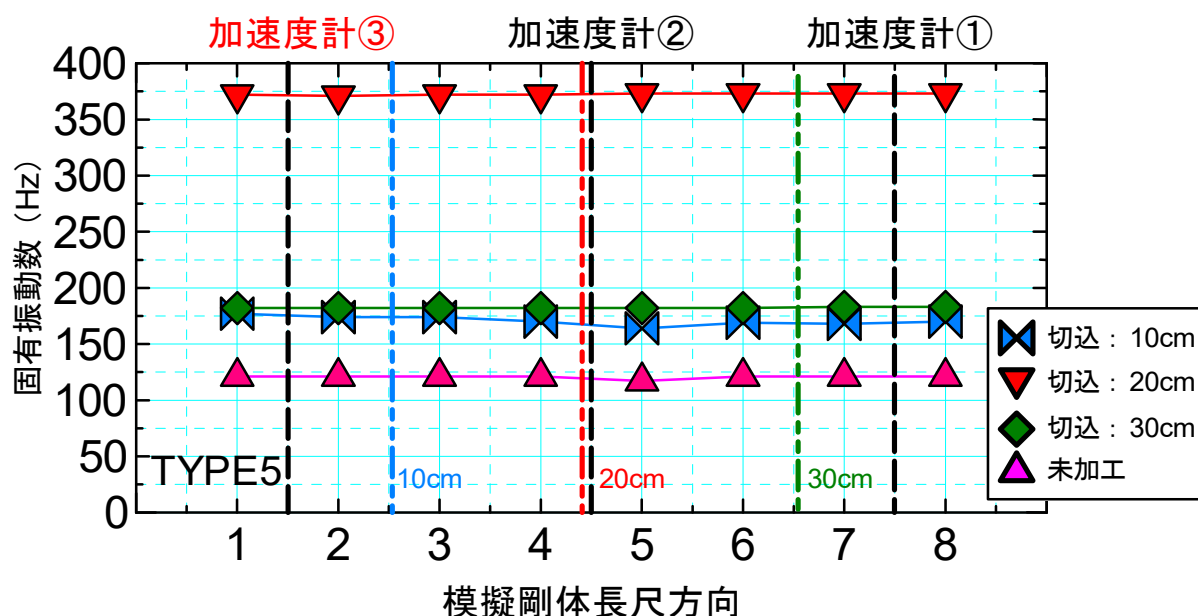


図 4-29 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係（TYPE5・加速度計③）

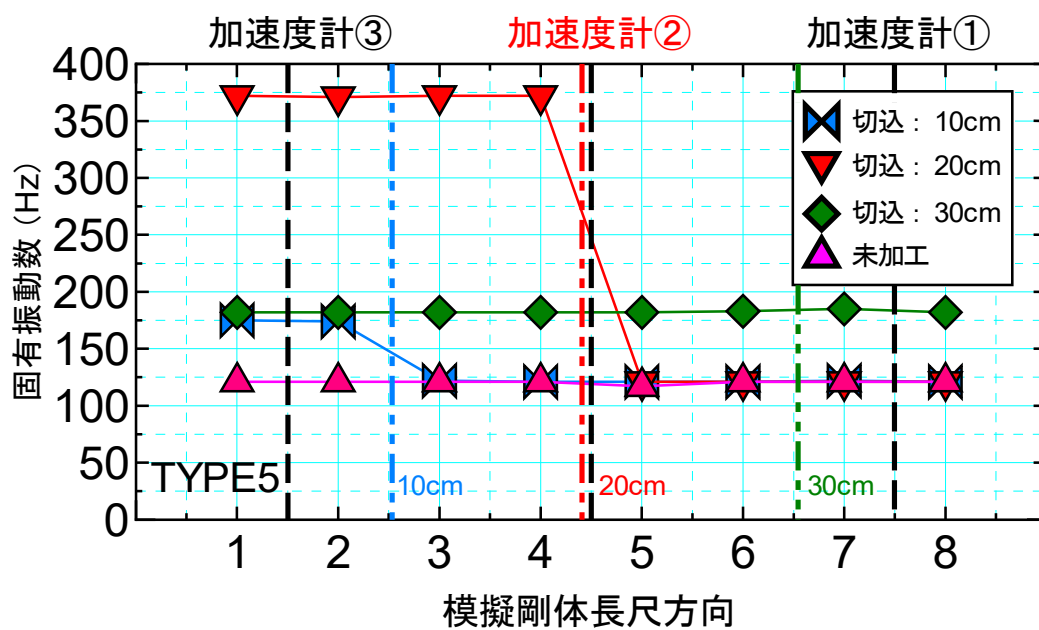


図 4-30 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE5・加速度計②)

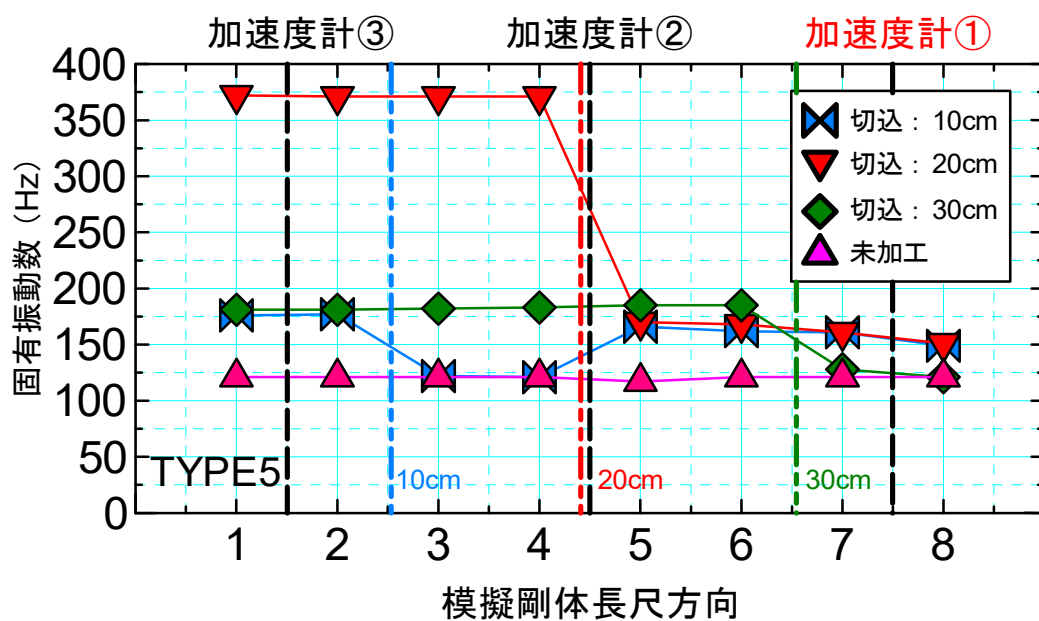


図 4-31 固有振動数～模擬剛体長尺方向関係 (TYPE5・加速度計①)

5. 実斜面における剥離型落石の振動特性の把握

5.1 現場概要

図 5-1 に示す当該現場は市道沿いの斜面であり、新生代-第三紀-中新世-瑞浪層群に属する凝灰質砂岩が主に分布する。風化に伴い形成された露岩面は幅：25m×高さ：20m の規模であり、過去には豪雨後に斜面頭部の小岩塊が落石したことが報告されている。斜面中腹に縦方向の亀裂が発達し、今後も固着力を失った小岩塊が剥離面より分離して市道へ剥離落石する可能性が懸念された。

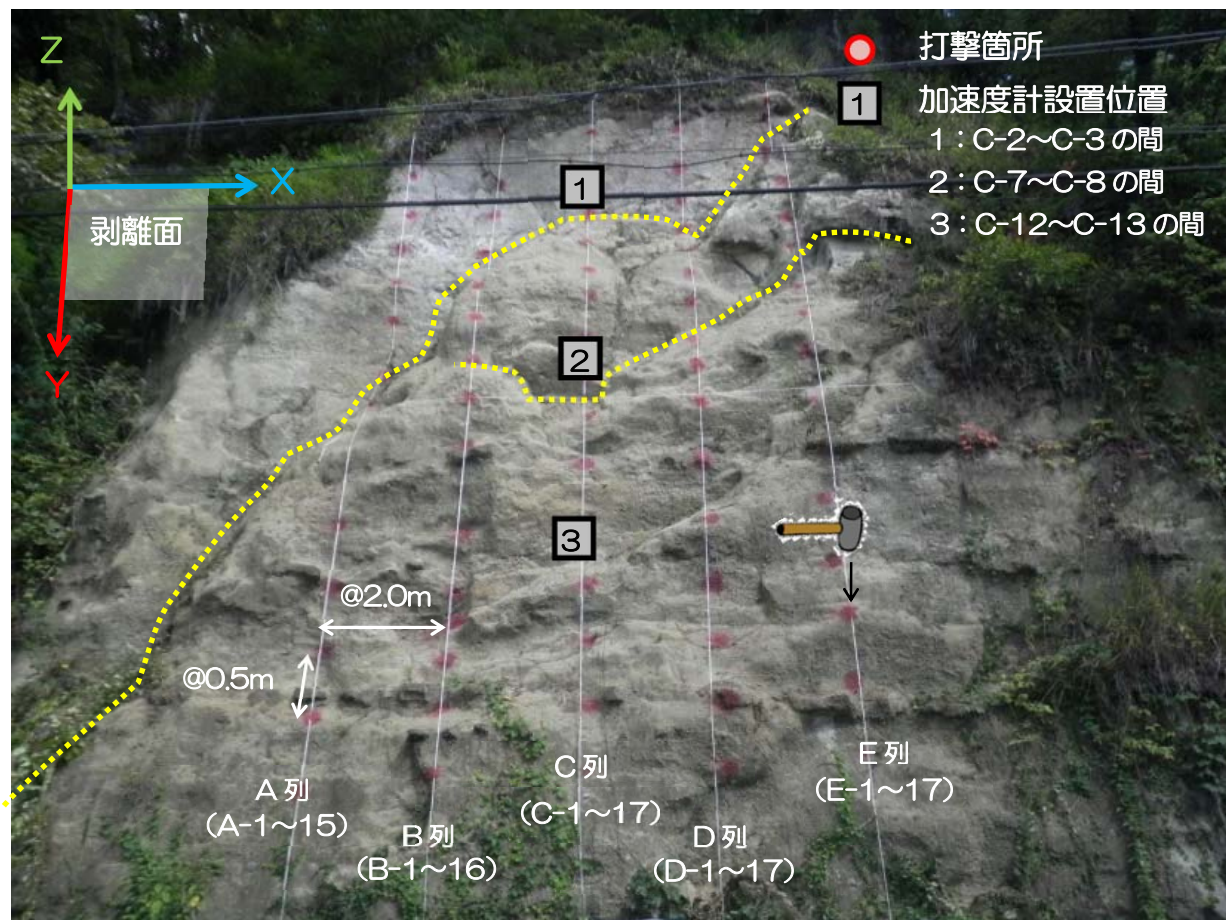


図 5-1 検証斜面現場全景

5.2 打撃試験概要

図 5-2 に対象斜面の軸方向の設定、加速度計の設置箇所、ならびに打撃箇所について示す。

- ① 現地踏査の結果より、斜面内亀裂上位に露出している面を基岩と見なし、この面を剥離面と決定した。
剥離面に対して法線方向を Z 軸、最大傾斜方向を Y 軸、剥離面の走向方向を X 軸と設定した。
- ② 打撃箇所は図内赤丸の箇所であり、格子状配列（縦：0.5m ピッチ、横：2.0m ピッチ）で打撃し、計測箇所名は列と行で構成した。箇所数は斜面形状に合わせたため、列毎に異なる。また、打撃方向はいずれの打撃も Z 方向となるように打撃した。
- ③ 加速度計は斜面主側線に相当する C 列上に 3 つ取付けた。



5.3 実斜面における打撃試験結果および考察

図 5-3 に対象斜面の各打撃箇所を Z 打撃して得られた固有振動数を設置した加速度計毎に示す。ここでは代表的な C 列 (C-1～C-17) で得られた固有振動数を表記する。

加速度計①については、C-1～C-2 は 250Hz 以上と大きい固有振動数を示すのに対して、C-3～C-17 では概ね 100Hz 以下となる。これは剥離岩塊が基岩との間に C-3～C-17 区間まで剥離面を有した分離状態にあるため、打撃振動が変化して加速度計②・③に伝達するためと考える。C-9～C-12 区間が 130～150Hz と他区間に比べて少々高い値を示すのは、基岩とは亀裂で隔てられているものの嵌合状態がよいためと考えられる。

加速度計②については、C-1～C-3 区間では 100Hz 以下、C-4～C-9 区間では 300Hz 以上、C-10～C-17 区間では 100～150Hz の固有振動数を示す。これは加速度計②を設置した C-4～C-9 区間は打撃時に剥離面で基岩と反発しているためと考えられ、剥離面の密着度は低いと考える。また、現地より剥離岩塊 C-8～C-9 区間に横方向の亀裂が確認できるが、この近辺で C-8 のみ 76Hz と極端に低い固有振動数を示すことを鑑みると、この亀裂は節理に沿って基岩部まで卓越している可能性が示唆される。

加速度計③については、C-1～C-10 区間では 100Hz 以下、C-11～C-17 区間では 280Hz 以上の固有振動数を示す。これは剥離岩塊の中でも C-11～C-17 区間では亀裂が少なく一体化しているものの、C-1～C-3 の基岩部、C-4～C-10 区間の岩塊とは亀裂で隔て分離していることを示すと考えられる。

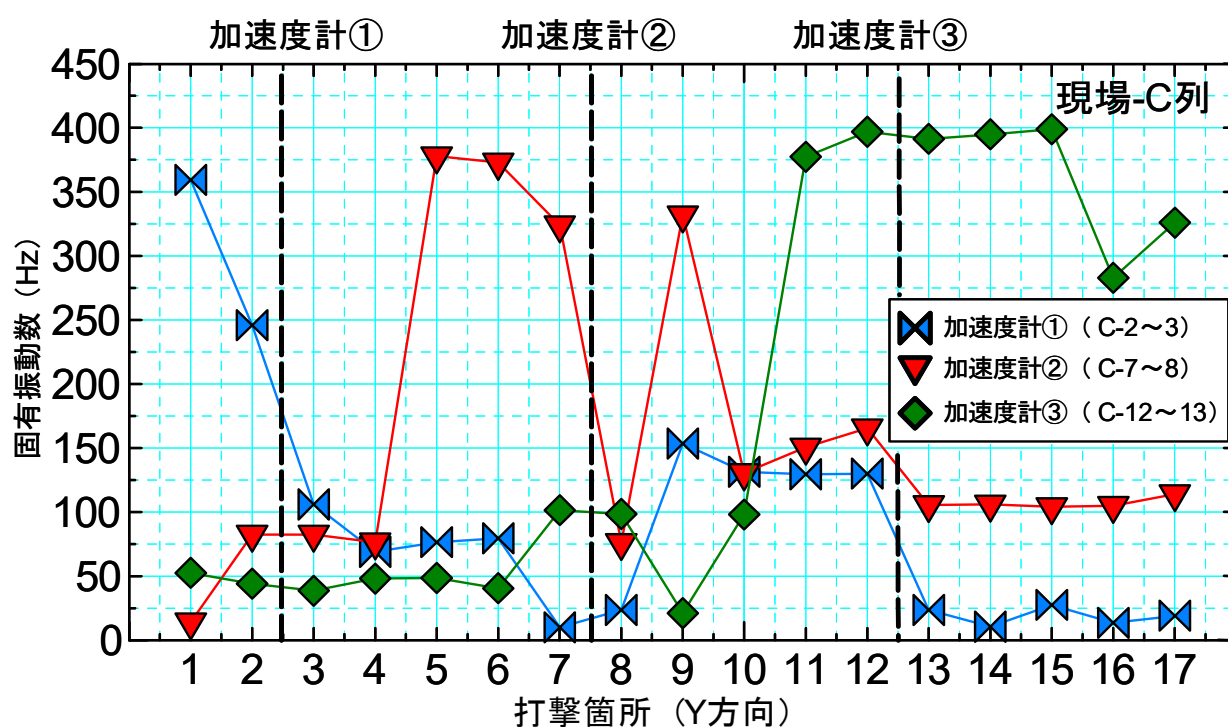
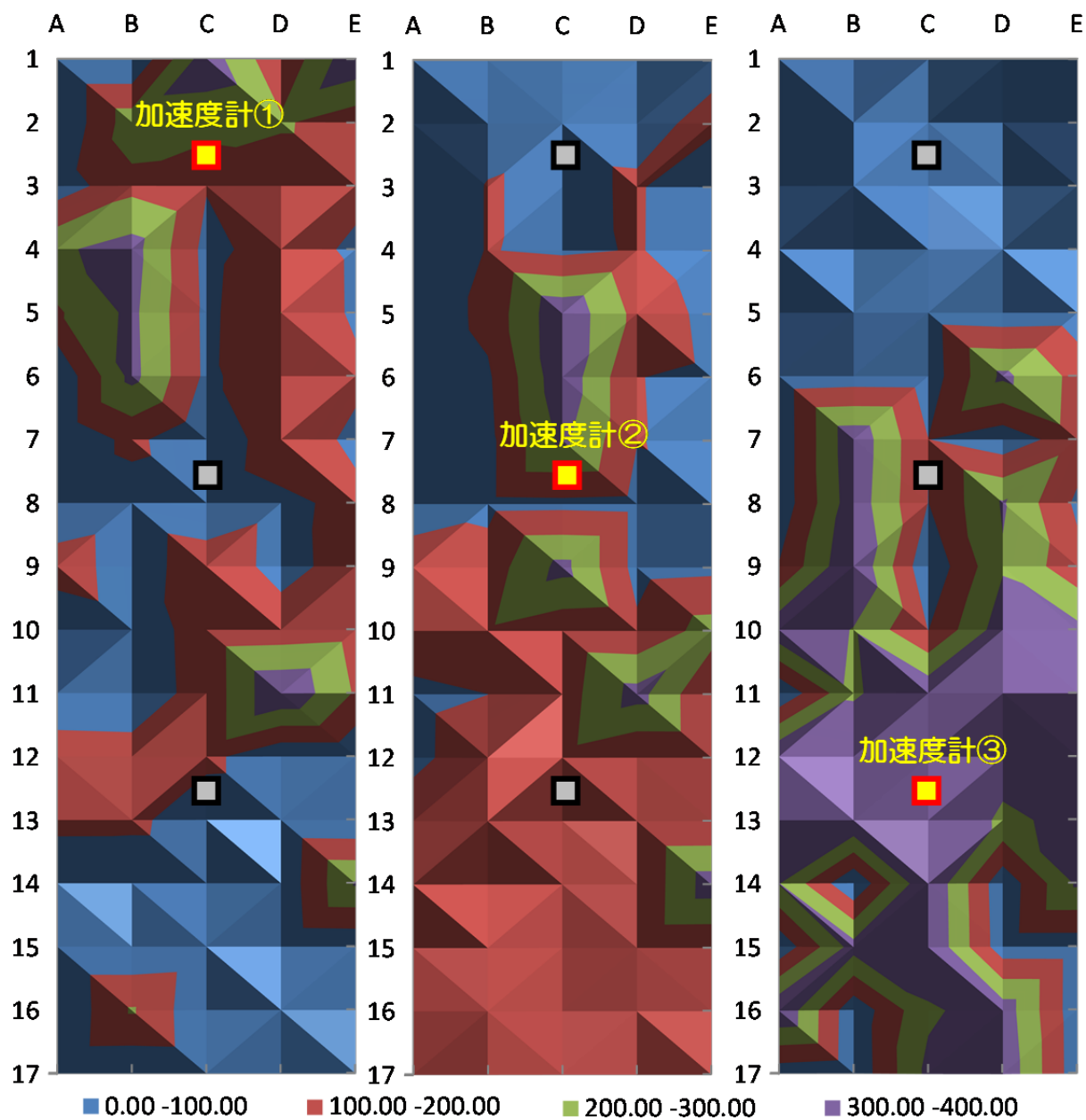


図 5-3 固有振動数～打撃箇所 (Y 方向) 関係

各打撃箇所で打撃時に得られた固有振動数を等高線図にしたものを図 5-4 に示す。代表断面の C 列のみならず、前述の考察が概ね当てはまることがいえる。



これより当該斜面は、図 5-5 に示すような危険度ゾーニングが可能である。

A 区間：基岩であり、落石の可能性は低く安定度が高いと考えられる区間。

B 区間：剥離岩塊の中でも、基岩との密着度も低く、C 区間の剥離岩塊とも横方向の亀裂で隔てられており、当該現場で最も不安定な岩塊と考えられる。剥離型落石となる可能性が最も高い区間。

C 区間：基岩とは亀裂で隔てられているため、剥離岩塊に属する。ただし剥離面における基岩との密着度は高く、落石する可能性は低いと考えられる区間。

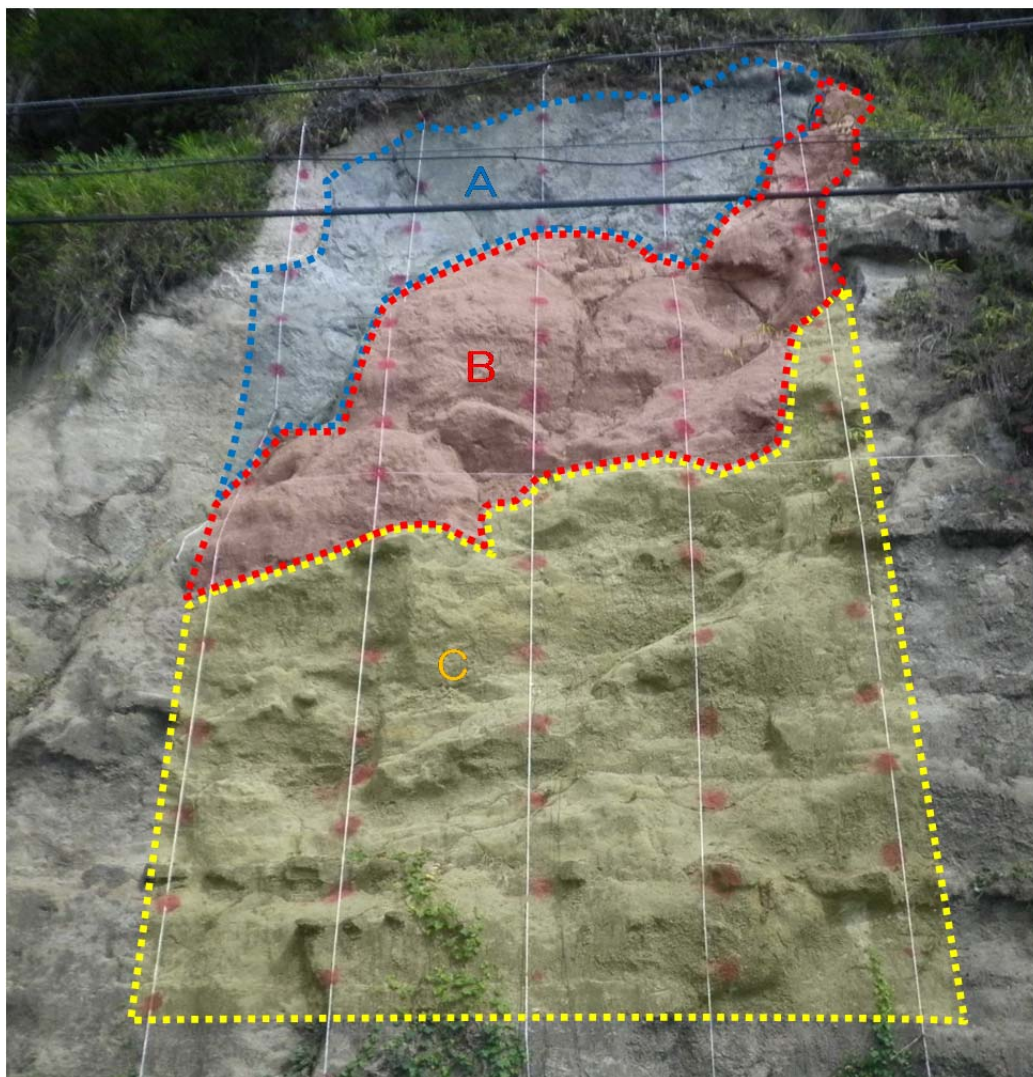


図 5-5 剥離型落石の落石危険度ゾーニング例

したがって、従来は対策工として落石の可能性が懸念される箇所一帯を処置するケースが多いが、B・C 区間全ての剥離岩塊を除去する、あるいはロープネットで覆うような対象範囲全体の工法ではなく、B 区間のみの岩塊除去工や、亀裂をモルタル等で充填する岩塊接着工を採用する方が、安価で工期も短縮できることから、当該斜面においては最適な対策工であるといえる。

6. まとめ

6.1 研究成果

本研究で得られた成果を以下に述べる。

(1) 模擬剛体を用いた打撃実験に関するまとめ

- ① 剥離型落石の危険度を評価する際の定量的な指標は、打撃力の影響を受けない固有振動数が適する。
 - ・最大固有振動数は、打撃の強弱に影響せず剛体の構成物質によって決まる。
 - ・加速度スペクトルは、打撃の強弱に影響を受け、強く打撃するほど大きい値を示す。
 - ② 打撃方向については、剥離面の法線方向（Z 方向）に打撃するのが剥離部・基岩部の嵌合状態等を把握し易い。
 - ・剥離面の法線方向（Z 方向）：模擬剛体+設置地盤を合わせた固有振動数を示す。
 - ・剥離面の水平方向（X・Y 方向）：模擬剛体自身の固有振動数を示す。
 - ③ 固有振動数は基岩に対する剥離部の嵌合状態により異なる挙動を示し、不安定な剥離箇所を特定するのに有効である。
 - ・切込を行っていない（亀裂が生じていない）一様な模擬剛体
 - 最大固有振動数：剛体のマテリアルに依存する。
 - ・切込（亀裂が生じた）を行い、基岩部と剥離部が分離している模擬剛体
 - 分離部を打撃すると基岩部から逸脱した固有振動数を計測できる。

ただし、剥離部の嵌合状態によって固有振動数の逸脱さは変化する。
 - ④ 打撃方向に対して法線方向に剥離岩盤の亀裂が進行する場合、
 - ・計測される最大固有振動数から、亀裂の進行程度を把握することができる。
 - ・亀裂（切込）が深くなるほど、剥離部で取得できる最大固有振動数は大きくなる。
 - ⑤ 加速度計を基岩部および剥離部にそれぞれ取付けで打撃試験を行った場合、
 - ・基岩部打撃時には、基岩部に設置した加速度計では低い最大固有振動数、剥離部に設置した加速度計では高い最大固有振動数を計測できる。
 - ・剥離部打撃時には、加速度計を取り付ける箇所を問わず、いずれも高い最大固有振動数を計測できる。
- ※ 本打撃試験はあくまで風化岩相当の模擬剛体による打撃結果である。硬質な地質構造を持つ岩塊や、密実な岩塊においては打撃時に大きく反発することから、検討すべき固有振動数の基礎値は本結果の 60～100Hz より大きくなると推察される。ただし、異なる静置状態の岩塊を打撃した場合は、本結果と同様に著しく異なる傾向の振動数を得られると考えられ、材質が異なる模擬剛体でも打撃実験を行い、データの蓄積ならびに検証を行うことが望ましい。

(2) 実斜面における打撃試験に関するまとめ

- ① 模擬剛体で得られた知見を実現場で適用することは十分可能であり、現地では確認できない亀裂の進行具合を打撃試験によって把握できる可能性がある。
- ② 打撃試験で得られる固有振動数は剥離型落石の嵌合状態に応じて変化することから、落石危険度ゾーニングをすることが可能である。
- ③ ①・②から、従来よりも安価で短い工期で済む効率的な対策工を選定できる可能性がある。

6.2 今後の課題・展望

本研究で得られた成果から今後の課題ならびに展望を以下に述べる。

- ① 剥離型落石の落石危険度を評価する手法として、本研究で提案する打撃によって得られる振動特性(固有振動数)に着目することの有効性が示唆された。現在、落石の危険度評価は「落石対策便覧(日本道路協会, H29.12)」に記載されている手法によって評価されているが、当該手法は点検者が判断に悩むような箇所にも補完する手法として位置づけられると危険度評価の向上に繋がると考える。
- ② ①については、打撃対象落石の単体亀裂の有無に関する固有振動数の数値の大小傾向までしか把握できていないことが現状の課題の一つである。複数亀裂がある場合の固有振動数の挙動把握や、剥離面密着度と固有振動数の定量的な関係に関する更なる知見等、模擬剛体による打撃試験を重ねデータの蓄積ならびに検証を重ねる必要がある。
- ③ 本研究で提案した打撃計測の最大の課題は計測時の安全面である。手法の性格から落石が発生する可能性の高い箇所へ点検者が加速度計を取り付けに行かねばならないが、点検者が危険箇所へ赴くことはやむを得ないとする。これを解消するには、例えば赤外性サーモグラフィーやレーザーによる岩盤計測等が挙げられるが、過去に実績事例もなく新しい取り組みとなるため、現状において落石の危険度評価手法は、落石対策便覧に記載されている現行法+判断に困る箇所への打撃計測での補完という手法が最良の選択であるとする。

参考文献

- 1) 深田隆弘・橋元洋典・澁谷 啓：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，pp.I_337_344，2012.
- 2) 深田隆弘，森 泰樹，澁谷 啓：線路への影響評価に基づく落石リスクマップの作成手法，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.68，No.1，pp.199-212，2012.
- 3) 深田隆弘・谷口達彦・澁谷 啓：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.140-151，2013.
- 4) 村上幸利，箭内寛治：転落型落石の発生機構に関する基礎的研究，土質工学会論文報告集，Vol.27，No.1，pp.109-116，1987.
- 5) 谷口達彦：根入れ深さに着目した斜面上転石の安定性の評価に関する研究，修士論文，神戸大学工学研究科市民工学専攻，2013.
- 6) 深田隆弘：鉄道沿線の斜面管理における転石型落石の健全度判定方法に関する研究，博士論文，神戸大学工学研究科市民工学専攻，2013.
- 7) 村上幸利，箭内寛治：転落型落石の危険度評価法について，土質工学会論文報告集，Vol.28，No.3，pp.197-203，1988.
- 8) (社)日本道路協会：落石対策便覧，pp.4-8，1983.
- 9) 渡辺哲生，沖村 考，鳥居宣之，吉田正樹，佐々木直広：模型実験による落石崩壊メカニズムに関する研究，第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.2147-2148，2003.
- 10) 奥園 誠之，岩竹喜久磨，池田和彦，酒井紀士夫：振動による落石危険度判定，応用地質学会論文集，Vol.21，No.3，pp.9-12，1980.
- 11) 緒方健治，松山裕幸，天野淨行：振動特性を利用した落石危険度の判定，土木学会論文集，No.749/VI-61，pp.123-135，2003.
- 12) 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：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），土木研究所資料，第 4051 号，2007.
- 13) 上半文昭，太田岳洋，石原朋和，布川 修，斎藤秀樹，深田隆弘：非接触振動計測による岩塊崩落危険度の定量評価手法の検討，鉄道総研報告，Vol.26，No.8，pp.47-52，2012.