

「振動特性を利用した落石危険度振動調査法」による調査事例

The Investigation Case by “Rock Fall Risk Vibration Research Method using the Vibration Characteristic”

藤村 尚	Hisashi FUJIMURA	(鳥取大学工学部)
藤井 優	Masaru FUJII	(鳥取県県土整備部)
甲斐 智行	Tomoyuki KAI	(鳥取県日野総合事務所県土整備局)
木谷 啓二	Keiji KITANI	(西谷技術コンサルタント(株))
舞立 剛志	Takashi MAIDACHI	(アサヒコンサルタント(株))

本文は、緒方らが開発した「振動特性を利用した落石危険度振動調査法」を用いた落石調査の事例報告である。調査事例は鳥取県内における2地点である。①調査地点A：人家直近の岩盤斜面における振動調査の事例である。このような地点では、落石による影響度が高いため、危険度の評価を慎重に行う必要があった。このため、従来の目視による危険度評価の妥当性を検証する目的で振動調査を実施した。②調査地点B：浮石状態にある巨石の岩盤接着工法の効果の確認に振動調査を用いた事例である。振動調査によって対策前後の振動特性の変化を比較した。対策工後は、対策前と比較してRMS速度振幅比は低下し、減衰定数は大きくなった。この結果より、岩盤接着工法によって巨石の安定性が向上したことを確認した。

キーワード：現場計測，施工管理，落石振動調査，浮石，転石 (IGC：C02, C07)

1. はじめに

一般に落石調査は、地質技術者が現地踏査（浮石・転石の状態や地質性状など）と地形図や調査ボーリングなどの資料に基づいて項目ごとに点数化を行い、総合点数で評価している。しかし、この手法によれば技術者の経験的判断や主観が入ることなどによって、評価がばらつくことが多い。このようなことから、客観的な判断基準となりうる手法として、旧 JH 試験研究所が「振動特性を利用した落石危険度振動調査法」を提案している¹⁾。本調査法は、主に道路交通振動などの雑振動を振動源として、不安定な浮石部の振動性状と、基盤部の振動性状との相対的な違いから、浮石部の落石危険度を判定する方法である。

本報告では、鳥取県においてこの調査法を利用し、落石あるいは崩壊に対する危険度評価の資料とした2現場についての事例を報告する。

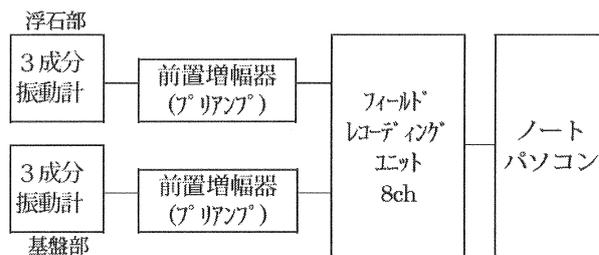


図-1 計測機器構成図



写真-1 振動計および前置増幅器

2. 落石危険度振動調査法の概要

2.1 測定方法

計測機器の構成図を図-1に示す。また、写真-1に振動計および前置増幅器、写真-2にフィールドレコーディングユニット（記録器）およびパソコンを示す。1カ所あたり振動計が2個、前置増幅器（3ch）2台、および記録器1台の構成である。

振動計は、容易に設置できるように直径50mmの円柱形、高さは約150mmとコンパクトなもので、内部に固有周波

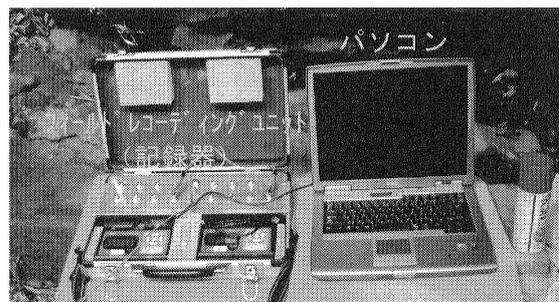
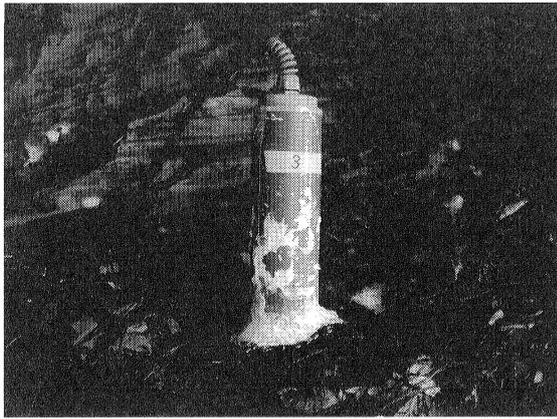


写真-2 フィールドレコーディングユニットおよびパソコン



数 10Hz の振動検知エレメントを 3 成分（水平 2，上下 1）に組み込んだものである。これを、対象とする浮石部（転石部）とその下位の基盤部にそれぞれ 1 カ所ずつ設置する。設置個所が岩盤の場合は振動計を石膏で固定し、土砂の場合はできるだけ締まった個所に締め固めて設置する（写真-3）。振動計の信号は測点近傍で前置増幅器を通してインピーダンス変換を行い、延長ケーブルで測定本部に集めて、記録システムへと導く。前置増幅器は信号増幅のほか、延長ケーブルから混入するノイズを防ぎ、S/N 比を改善させる効果を持つ。本測定の前に予備測定を行って、パソコンの画面上で波形をモニターし、信号が正常か否かを判断した後本測定を行う。

記録システムはフィールドレコーディングユニットとパソコンで構成されたもので、記録スタンバイ状態のときは、パソコン画面で波形をモニターし、画面で良好な記録と確認できた時点でデータを収録する。

写真-3 に振動計の浮石部と基盤部への設置例を示す。

2.2 落石危険度の判定

測定により得られた振動記録の解析項目は、RMS 速度振幅比および周波数分析（卓越周波数，減衰定数，コヒーレンス）である。各項目を簡単に説明する。

RMS 速度振幅比：振幅の浮石部と基盤部との比であり、この値が大きいと浮石部が基盤部より大きな振幅で揺れていて不安定。浮石と基盤が完全に一体（密着）であれば $R=1$ 。RMS (Root Mean Square) は二乗値を平均して平方根するという意味である。

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 / n}{\sum_{i=1}^n X_i^2 / n}} \quad \begin{array}{l} R: \text{RMS 速度振幅比} \\ X: \text{基盤部の振幅値} \\ Y: \text{浮石部の振幅値} \end{array}$$

卓越周波数：揺れの速さを示すもので、卓越周波数が小さいと浮石部がゆっくり（長い周期）で揺れていることになり、不安定となる。

減衰定数：揺れの収まりやすさを示すもので、減衰定数が小さいと一度揺れ始めた浮石部は減衰しにくく、いつまでも揺れていることとなり、不安定。

コヒーレンス：入力と出力間の相関の度合いを示すもので、入力と出力が理想的な線形関係にあるときは 1，完全に無相関であれば 0 となる。測定波形が分析

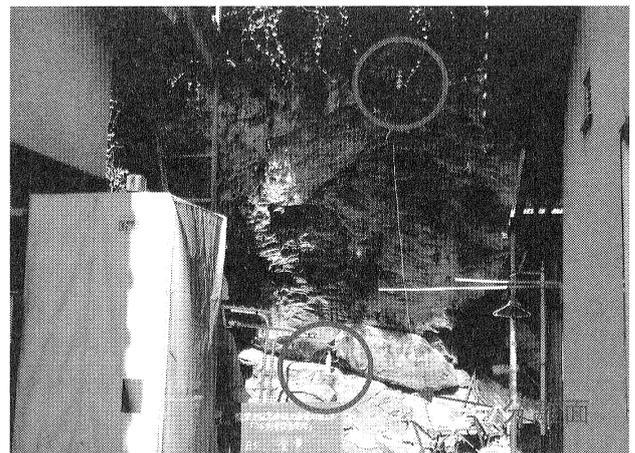


写真-4 振動計の浮石部と基盤部への設置例

に有意かどうかを判断する指標である。

落石危険度の判定は、これらの解析結果を用いた危険度判定図で行う。図-2 および図-3 (RMS 速度振幅比と減衰定数を用いた判定図) は、緒方ほか(2002)¹⁾が模擬実験およびそれを踏まえた現地計測との比較結果を整理して提案した判定図であり、安定・不安定の領域を次のように分類している。

RMS 速度振幅比 ≥ 2 かつ卓越周波数 ≤ 30 : 不安定領域
RMS 速度振幅比 < 2 : 安定領域

RMS 速度振幅比 ≥ 2 かつ減衰定数 ≤ 0.2 : 不安定領域
RMS 速度振幅比 < 2 : 安定領域

危険度はこれらの図に各分析項目の結果をプロットし、判定した。

以下、当調査法を使用した事例を 2 例紹介する。

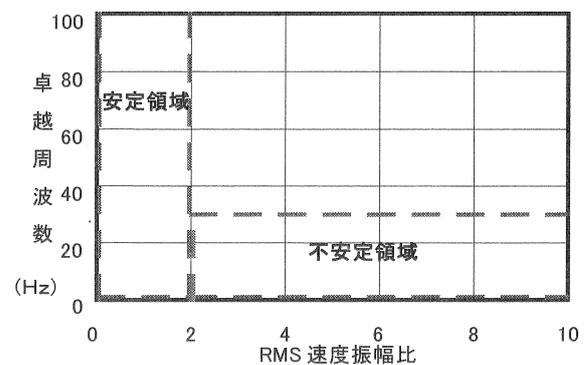


図-2 RMS 速度振幅比と卓越周波数を用いた判定図

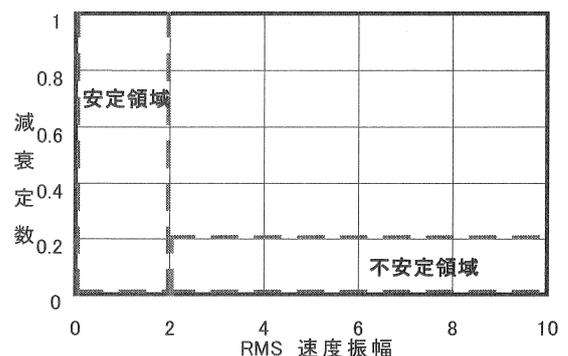


図-3 RMS 速度振幅比と減衰定数を用いた判定図

3. 事例紹介

3.1 調査地点 A

(1) 調査地の概要と調査目的

① 調査地の概要

調査地は、鳥取県中部に位置する海拔 100m 以下の起伏の緩やかな丘陵地の縁辺部に形成された、集落背後の斜面である。

対象斜面は海蝕崖として形成された高さ 5~10m 程度の急崖で、板状節理の発達した新第三紀鮮新世の安山岩からなる。板状節理は一般に横方向に発達しているものの、その傾斜方向は一定ではなく、場所により斜面に対して受け盤や流れ盤を呈する。斜面には、所々で鉛直性の開口亀裂、および断層破碎帯や亀裂密集帯などの劣化部分が選択的に浸食された高角度で狭長な溝状の窪みが発達している。これらが節理とともに岩体の分離面となってブロック化している。各ブロックの大きさは 2~5m 大と巨大である。また、横方向に発達する節理を分離面とする崩落によってオーバーハングを呈する個所も多い。

当該斜面と人家との距離はおおむね 2~5m 程度であり、一部では 1m 以下の個所もある。

② 調査目的

当該斜面は急傾斜地崩壊危険区域に指定されており、平成 16 年度から対策工の調査設計および一部で施工が実施されている。ブロックは 17 ブロックに区分し、危険度の評価は目視観察による点数評価²⁾ (点数が高いほど危険、満点 126 点) を基本とした。今回の調査範囲は、特に民家が密集している個所であり、落石や崩壊による影響度が高いので、危険度の評価はより慎重に行う必要があった。したがって、それらのうち、「不安定」と評価したブロックについては、その評価の妥当性を検証する目的で、振動試験を実施した。

(2) 調査対象

17 ブロックのうち目視観察で「不安定」と評価したブロックは 6 カ所あり、この中でも不安定度合の高い B2、B5 および B11-0 の 3 カ所を、不安定と評価したブロックに対する振動試験の対象とした。B2、B5 は安定した岩盤(基盤岩)とブロックとの境界に圧碎に起因すると思われる亀裂が発達しており、わずかに変動した可能性がある。B11-0 はこのブロックのみ頭部に開口亀裂と段差が認められ、転倒傾向を示す。また、不安定ブロックに対する比較として、「安定」と評価したブロック 1 カ所(B13) についても対象とした。図-4~7 に各ブロックのスケッチと写真を示す。なお、振動源は調査地点から 20~50m 程度離れた道路からの交通振動を利用した。

(3) 調査結果

表-1 に分析結果の一覧表を、図-8~10 に項目ごとの分析結果図を示す。表-1 の X, Y, Z の各方向は、振動計内の振動検知エレメントの方向で、X 方向は斜面の走向方向、Y 方向は斜面の傾斜方向、Z 方向は鉛直方向に合わ

せた。

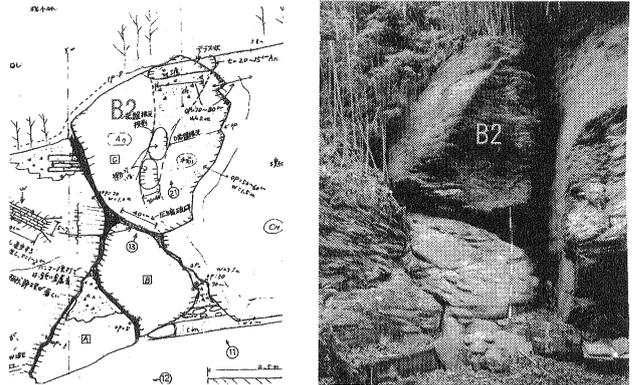


図-4 B2 のスケッチおよび写真

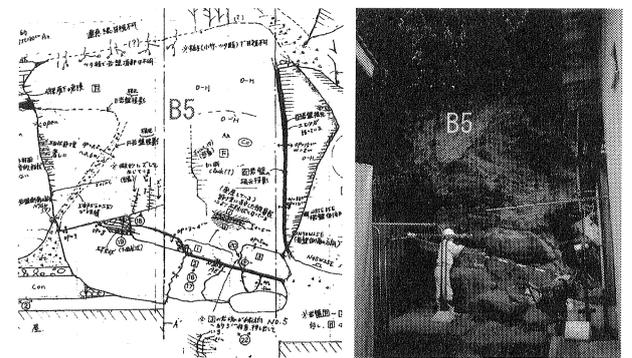


図-5 B5 のスケッチおよび写真

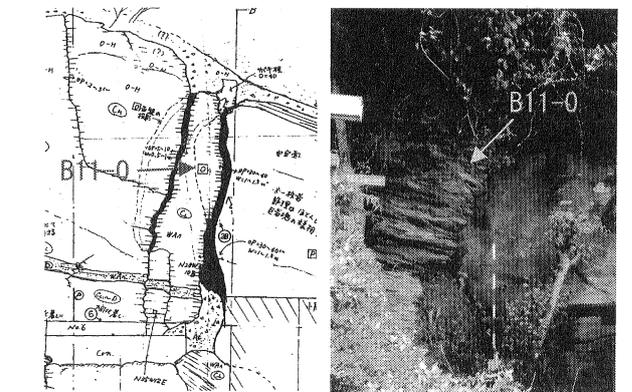


図-6 B11-0 のスケッチおよび写真

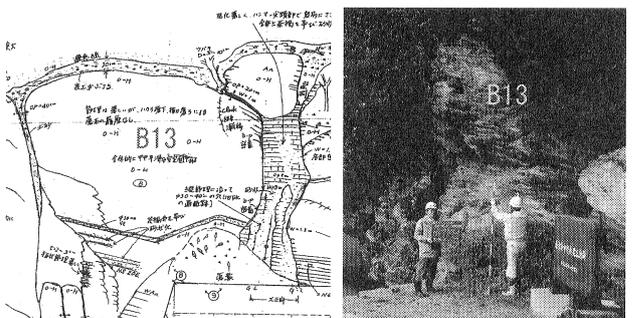


図-7 B13 のスケッチおよび写真

各項目の分析結果の概要は次のとおりである。

RMS 速度振幅比：4カ所の中で B5 のみ基準値とした 2 を超えた。B11-0 と B13 は 1 をわずかに超えた程度である。B2 は 1 より小さく、浮石よりむしろ基盤岩とした岩体の方が相対的に揺れが大きい結果となった。

卓越周波数：B2 および B5 は 3 成分とも卓越周波数が基準値の 30 を下回った。B11-0 は水平成分がわずかに基準値を超えたものの、上下成分は下回った。

減衰定数：B5 のみが基準値の 0.2 を下回っている。他の 3カ所は基準値より大きく、特に、B2 の Y 方向は他に比べて非常に大きな値となった。

以上の分析結果を前掲の図-2 と図-3 にブロック別にプロットしたものが図-11 および図-12 である。各ブロックの状況は次のとおりである。

- B2：いずれの判定図も 3 方向とも安定領域にプロット。
- B5：水平成分が 2 方向とも不安定領域にプロット。
- B11-0：いずれの判定図も 3 方向とも安定領域にプロット。
- B13：いずれの判定図も 3 方向とも安定領域にプロット。

このように、振動調査結果からは B5 のみ不安定であり、目視による不安定ブロック 3カ所のうち B2 と B11-0 の 2カ所は安定であるという、目視結果と矛盾する結果となった。危険度判定は、あくまでも総合的判断で行うものであり、振動調査はそれを補完する一手法としての位置づけであるので¹⁾、これら 2ブロックの総合評価はいずれも「不安定」とし、目視観察を重視した結論とした。下記にその理由をまとめる。

B2 は RMS 速度振幅比が 3 方向とも 1 より小さい。このことは、基盤岩とした岩体の方が相対的に揺れが大きいことを意味しており、この岩体は真の基盤岩から分離している可能性がある（この場合、振動計設置位置に問題が残る）。また、卓越周波数が小さいことは浮石の揺れが大きいことを意味している。一方、目視観察によると、基盤岩とした岩体と明瞭な分離面があり、下側の分離面（傾斜約 15° の流れ盤）に圧砕された形跡があるので、過去にわずかな変動があった可能性がある（写真-5）。

B11-0 は両脇の分離面は開口しておりよく締まった土砂が充填しているので、現状ではこれによって両脇の岩体と一体化しており、基盤岩と大差のない振動傾向（RMS 速度振幅比がおおむね 1）を示しているものと考えられる（写真-5）。また、当ブロックの頭部は両脇の岩体と比較すると数十 cm の落差があり、過去に鉛直方向に変位した可能性がある。卓越周波数の Z 方向（上下方向）が相対的に小さい傾向にあるのは、このことと何らかの関係がある可能性もある。なお、B11-0 についても基盤岩とした岩体が、それ自体も目視確認できない部分で真の基盤岩から分離している疑いもある。

以上のことから、調査結果に疑問が残る B2 および B11-0 については、総合的な判断として「不安定」と評価した。

表-1 分析結果一覧表

岩塊番号	RMS 速度振幅比			卓越周波数 (Hz)			減衰定数		
	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向	X 方向	Y 方向	Z 方向
B2	0.40	0.43	0.71	8.52	12.51	15.63	0.828	1.706	0.789
B5	2.11	2.47	1.66	7.65	9.60	26.85	0.131	0.200	0.650
B11-0	1.17	1.43	1.13	31.15	31.13	18.88	0.669	0.358	0.376
B13	1.14	1.21	1.15	40.38	31.46	29.55	0.754	0.709	0.323

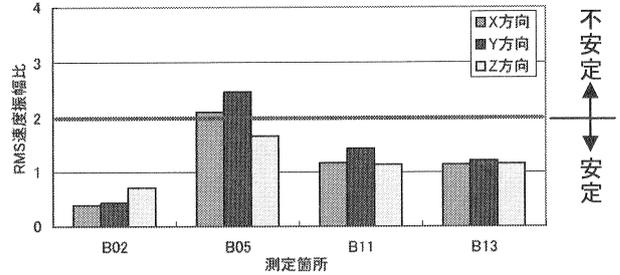


図-8 RMS 速度振幅比の分析結果

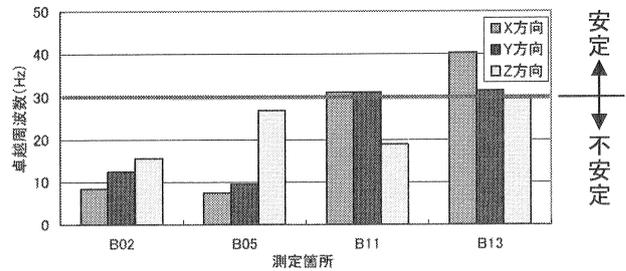


図-9 卓越周波数の分析結果

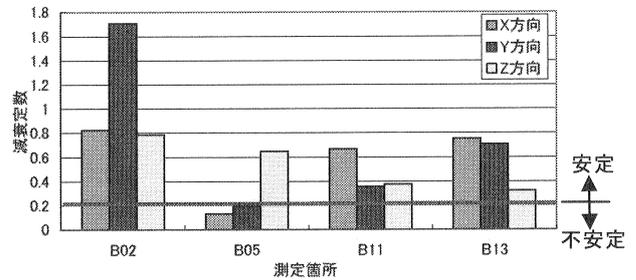
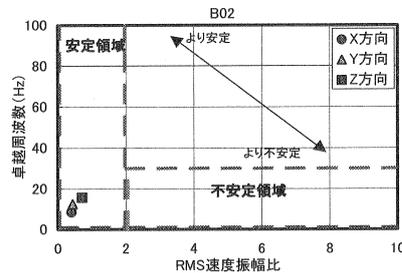
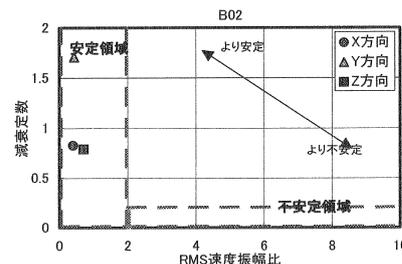


図-10 減衰定数の分析結果



RMS 速度振幅比-卓越周波数の関係



RMS 速度振幅比-減衰定数の関係

図-11 落石危険度判定図 (B2)

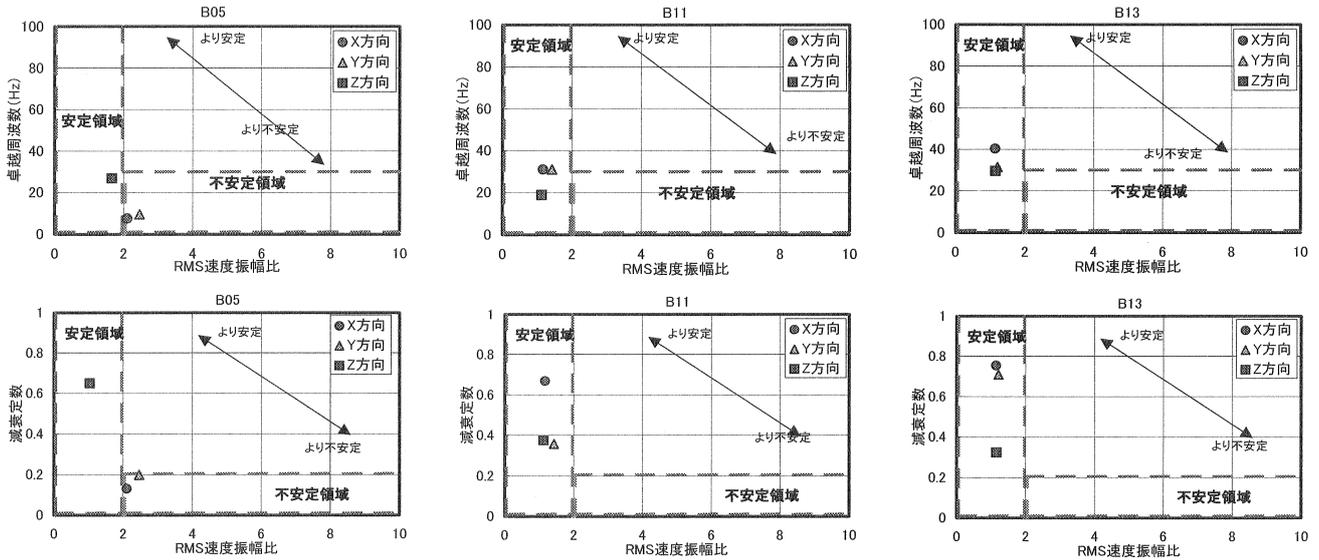


図-12 落石危険度判定図 (B5, B11, B13)

(上段：RMS 速度振幅比-卓越周波数の関係，下段：RMS 速度振幅比-減衰定数の関係)

このように、最終的に危険度判定図にプロットされた結果のみで判断するのではなく、それぞれの項目の分析結果について十分検討するとともに、場合によっては、現地状況を再確認した後に最終評価を行うことが必要と思われる。また、基盤部への振動計の設置位置についても、調査前の現地における十分な調査と議論によって、基盤であることが確実と考えられる位置に設置するよう努める必要がある。

なお、この結果を受けて、対策工としては B2 は根固工、B5 は小割除去工+根固工、B11-0 は岩盤接着工の設計が行われた。

3.2 調査地点 B³⁾

(1) 調査地の概要と調査目的

① 調査地の概要

調査地は、鳥取県南西部の日野郡 日野町に位置している。平成 12 年 10 月の鳥取県西部地震により、滝山神社側面の薄い表土に覆われた岩盤斜面の浮石が落下し、境内の栈橋、遊歩道が損傷した。被災した滝山神社は、毎年 2 万人の観光客が訪れる景勝地であることから、早急な対策が必要となり、景観に配慮した岩盤接着工を施工することとなった。

調査地点の周辺は、古生代末期～ジュラ紀の三郡変成岩類が分布しており、それらを中生代末期～古第三紀の花崗岩が貫いている。被災地は、主にこの花崗岩が分布しており、その大部分は風化を受けマサ状となっていたが、岩盤接着工の施工対象となる岩塊は、硬質な岩相を示し、節理が発達しブロック状となっている。このブロック状の岩塊は、急勾配で自立しており、一部では滝を形成している。

② 調査目的

岩盤接着工は節理面に接着剤を注入し、不安定岩塊を固定する工法である。しかしながら、岩盤接着工では、亀裂中に粘土等が介在することが多く、接着不良部が出来

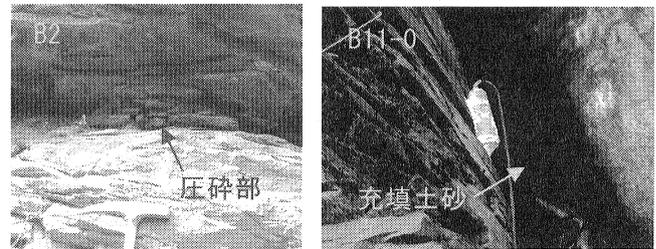


写真-5 B2 分離面の圧砕状況 (左) と B11-0 側部の土砂充填状況 (右)

やすい。このため、施工にあたっては、これらに対しての清掃工を行うと共に、接着不良部が無いことを確認することが課題であった。

接着面の品質管理としては、コアカッターにより接着面からコアを抜き取って引張強度試験を行う事で接着面の強度確認を行う事が可能であるが、岩塊の全体的な固定効果まで確認することは困難である。また、接着部位全域にわたる破壊確認も相当数のサンプリングとなり、作業量の増大となる。さらに、外力を用いた試験では、不安定な岩塊を固定している構造に悪影響を及ぼしかねない。

このため、近隣の道路(40m 程度の離隔)からの雑振動で調査でき、落石への悪影響を伴わない落石振動調査を実施し、その振動特性の比較を行うことで岩盤接着工の対策効果を把握することとした。

(2) 調査対象

目視による落石調査により対策工が必要と考えられる岩塊は、3ヶ所確認され、そのいずれも長軸が 10m 超える巨大な花崗岩の岩塊であった。

それらの岩塊の内の 1 地点(図-15 参照)について報告する。対象となる巨大岩塊は長さ 12m、幅 5m、高さ 10m 程度であった。(写真-6 参照)

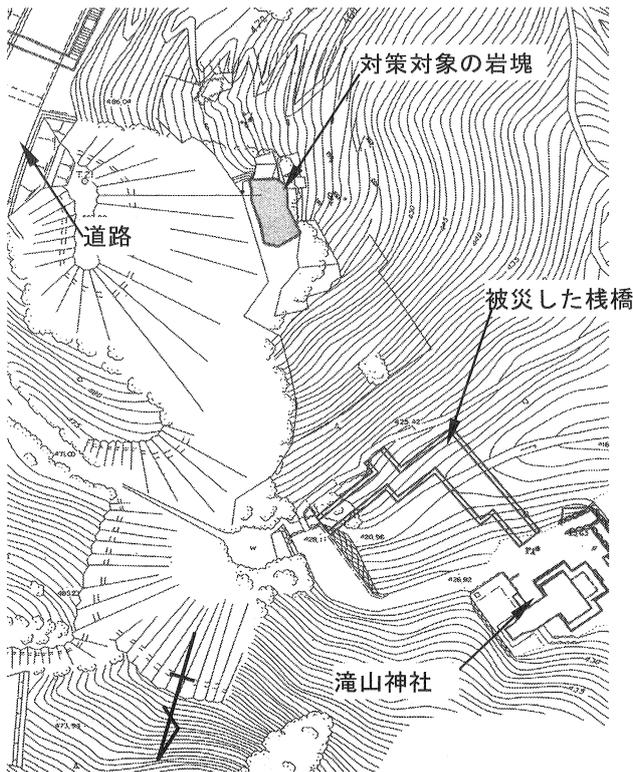


図-15 不安定岩塊の分布状況平面図

この岩塊は、南北方向に細長い形状で、 $40\sim 50^\circ$ 程度で北方に傾斜しており、下部は南端部と中央付近の2箇所突出した岩盤に支えられた形となっているため地表との間に空洞が形成されていた(図-16 参照)。

目視により推定された岩塊の安定性は、長軸方向(Y軸：斜面の傾斜方向)については、傾斜は大きい、北端部分が下位の岩盤で抑止された形となっているため比較的安定していると判断した。

一方、短軸方向(X軸：斜面の傾斜方向と鉛直な方向)については、下位の支点となる岩盤が約 20° で傾斜しており、滑動が生じる可能性が高いと評価した。以上の状況より設計された岩盤接着工は図-17のとおりである。



写真-6 不安定岩塊の状況写真

(3) 調査結果

振動調査は、道路交通の雑振動を振動源として振動を計測した。その際、基盤とその上に載っている岩塊に振動計

対象となる岩塊

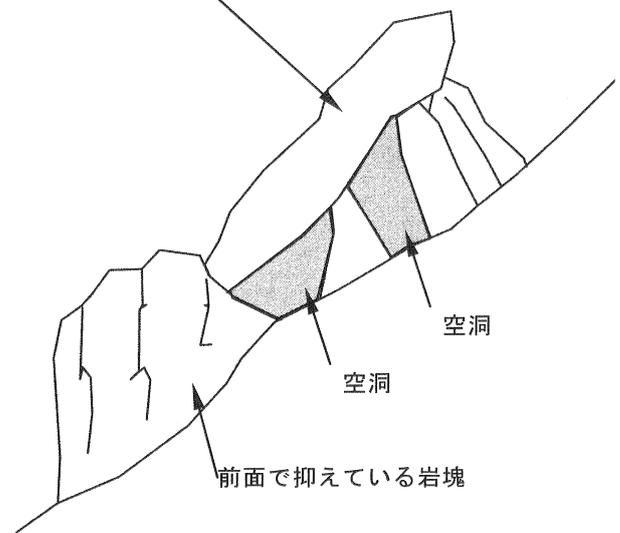


図-16 不安定岩塊の側面図

要対策の岩塊

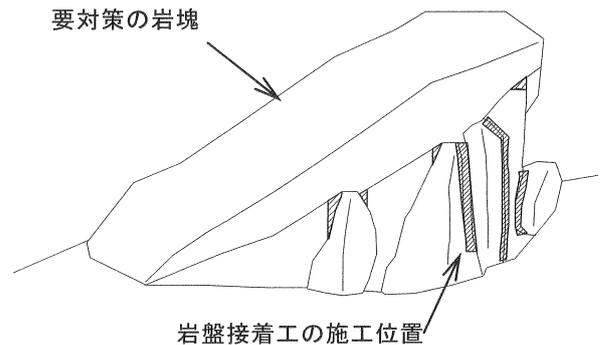


図-17 岩盤接着工実施位置のスケッチ

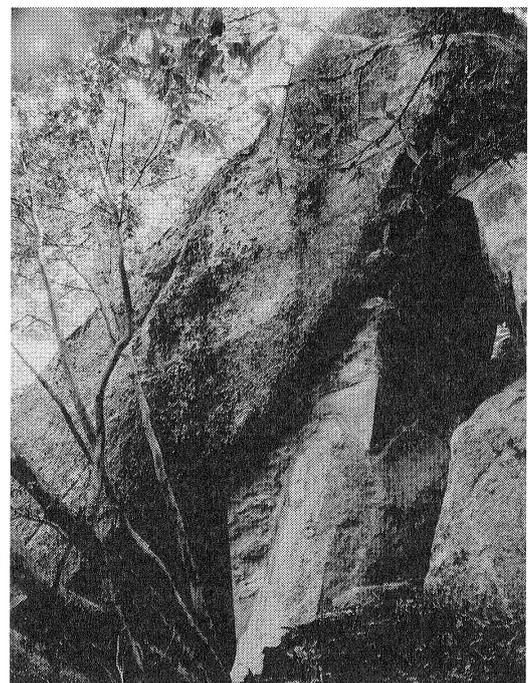


写真-7 対策工施工後の状況(写真)

を設置し、計測された波形の振動特性により安定度を判断した。

図-18に落石振動調査結果の一例を示した。図に示されたとおり、対策工後は、対策前と比較して RMS 速度振幅比は低下し、減衰定数、卓越周波数は大きくなり、より安定性が向上したことが確認された。

ただし、施工後の同一岩塊上における他地点の振動調査結果において、RMS 速度振幅比が僅かに 2 を超える試験結果が一部に認められた。この結果については、施工前と比較して RMS 速度振幅比は低下している傾向が確認できることから、基盤との一体化が進んでいると判断した。

また、他の岩塊における振動調査では、卓越周波数と減衰定数を求めることが出来ないものが多数存在した。これは、不安定岩塊と基盤とで完全に一体化されたことにより、減衰定数が設定出来ず逆解析が行えなかったためと判断した。

た評価を行った。

調査地点 B の事例については、落石振動調査を落石対策工(岩盤接着工)の施工前後で実施し、その振動特性の変化を比較した。対策工後は、対策前と比較して RMS 速度振幅比は低下し、減衰定数は大きくなり、より安定性が向上したことが確認された。

落石調査における目視による危険度判定は、個人の経験や主観により異なる結果となり得る。このため、落石対策工の必要、不必要の判定も技術者の経験にゆだねられる傾向にある。調査者の熟練度や主観に左右されずに落石の安定度を評価することが出来る落石振動調査は、これらの課題を解決するための 1 つの手法となり得る。

ただし、落石振動調査においては現況の安定度を把握するものであり、将来に渡っての落石の安定度を評価する事は出来ない。例として、浸食しやすい土質に埋まる転石やクラックが発達し、浸透水や凍結融解により開口しやすいクラックのある浮石、節理沿いに風化しやすい岩盤等が挙げられる。

これらの様な調査対象について落石振動調査の結果を、そのまま適用することは危険であると想像される。また、落石振動調査については、コスト面や解析面等、解決が必要となる部分が存在することが否めない。

今後、調査データや実験データの蓄積や研究等により、将来の落石の安定度の予測も含め、それらが解決されることを望む。

謝辞

最後に、本報告について快く資料を提供していただいた鳥取県の関係各位に謝意を表するものであります。

参考文献

- 1) 緒方健治, 松山裕幸, 天野浄行: 振動特性を利用した落石危険度判定の一手法, EXTEC 62 号, pp. 40-43, 2002.
- 2) (財)道路保全技術センター: 平成 8 年度道路防災総点検要領(豪雨・豪雪等), pp. 46-63, 1996.
- 3) 藤井 優: 岩盤接着工におけるコスト縮減と品質確認試験の改良について, 治山 Vol. 50 NO. 7, 2005.

(2007 年 6 月 29 日 受付)

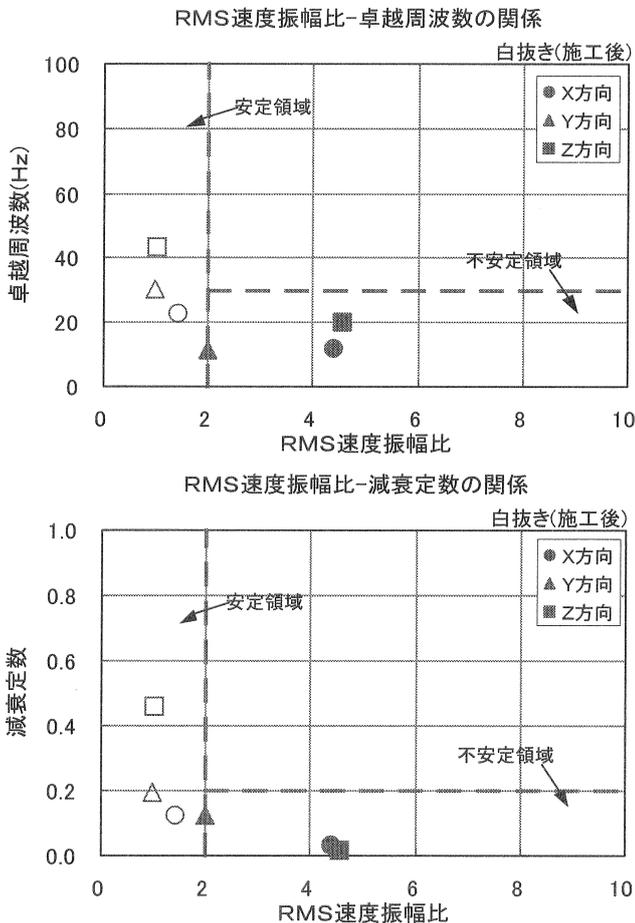


図-18 落石振動調査結果の一例

4. まとめ

調査地点 A の事例については、目視で「不安定」と判定した評価に対する妥当性を検証する目的などで、計 4 カ所において振動調査を行った。その結果、1 カ所を除き「安定領域」にプロットされた。しかし、目視観察の評価との矛盾を検討し、総合評価では目視観察を重視し