



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

深田, 隆弘
谷口, 達彦
澁谷, 啓

(Citation)

土木学会論文集C (地圏工学), 69(1):140-151

(Issue Date)

2013

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2013 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003317>



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

深田 隆弘¹・谷口 達彦²・澁谷 啓³

¹学生会員 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-4-20)

E-mail: takahiro-fukata@westjr.co.jp

²学生会員 神戸大学大学院 博士課程前期課程 市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: 119t131t@stu.kobe-u.ac.jp

³フェロー会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: sshibuya@kobe-u.ac.jp

発生源における落石危険度評価方法は、これまで斜面を管理する機関や事業者などにより研究・改良が進められてきた。しかしながら落石の発生メカニズムが十分に解明されていないこともあり、過去の落石事例の統計分析等に基づく経験的な評価方法が現在でもその主流となっている。鉄道の現場においても客観的・定量的な落石危険度評価のニーズがあり、これに応えるために転石タイプの落石について新しい危険度評価方法を検討した。提案する方法は振動計測により斜面上転石の根入れ状態を推定し、それを基に力学的安定度を直接的に算定するものである。なお提案方法を鉄道沿線の実斜面において適用し、その有用性を確認した。

Key Words : rockfall risk degree, boulder, in-soil penetration depth, measuring of the vibration

1. はじめに

落石は様々な要因が複雑に絡み合っ発生する事象であり、予知・予測をすることが困難な災害である¹⁾²⁾。

そこで鉄道事業者は落石注意箇所の検査を定期的に行うとともに、その検査結果に応じた必要な措置を講じることで落石災害の被害を最小限に抑えるよう努力している。

落石の危険度評価は、発生源における発生危険度と落下した岩塊が線路まで到達するかどうかの影響度を総合して評価することが肝要である。

後者の危険度である線路への影響度の評価について筆者らは、数値地形モデルを活用して斜面の傾斜区分などを行い、既存の斜面点検記録や落石災害履歴などの情報と面的に重ね合わせることによって広範な鉄道沿線斜面から落石注意箇所を効果的・効率的に抽出する方法を整理している³⁾⁴⁾。また抽出した注意箇所において不安定岩塊が落下した場合、線路まで到達するかどうかの影響度を落石シミュレーションによる到達確率で定量的に評価するとともに、斜面勾配、落石径、急崖の有無とその数および位置などの斜面パラメータに基づいて類型化した到達確率の簡易判定図を作成した⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

一方、前者の発生源における落石危険度の評価は、鉄

道沿線の斜面管理の実務を行っている現場では、既存のマニュアルや標準⁷⁾⁸⁾などを参照し、採点法による評価・判定を行っている。このような採点法による方法は、危険度評価を簡易に行うことができるという点でメリットがあるものの、定性的な評価項目が多く現場技術者が評価基準を理解できないものがあつたり、技術者の経験等により判定にばらつきが生じたりする場合がある。

したがって、多数存在する注意箇所の不安定岩塊を合理的かつ効率的な方法で検査したい、言い換えれば定量的な指標を基準とした客観的な評価方法もあわせて持つておきたいという現場の要求に十分に答えていないのが現状である。

そこで、まずこれまでの落石危険度評価に関する研究が主として過去の落石事例の統計分析などに基づく採点法であり、現在においても評価方法の主流であることをレビューする。そして次に、このような落石危険度評価方法の研究・検討の中で、定量的な危険度評価方法を確立するためには落石の発生機構を考慮する必要があり、特に転石タイプの危険度評価のためにはその根入れ状態に着目することが重要であるに至ったことを述べる。また最近の振動を利用した落石危険度評価方法についても言及する。

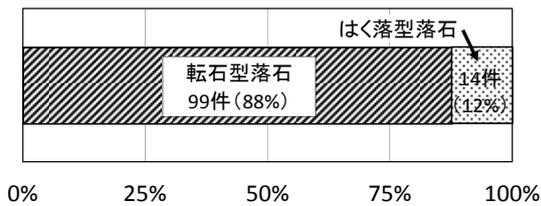


図-1 落石の形態(転石型・はく落型)別の発生件数(2005-2009)

そして本論文の主題として、筆者らが提案した振動を利用した根入れ深さの推定方法⁹⁾を活用して、斜面上転石の力学的安定度を直接算定する新しい落石危険度評価方法について検討する。

なお、西日本旅客鉄道株式会社管内(西日本地区2府16県, 51線区, 線路延長約5000km)において、2005年から09年までに発生源を特定できた落石災害113件のうち、転石タイプの落石は図-1のとおり99件発生している。割合にして約88%と多くを占めていることから、本論文では転石型落石を主対象とした危険度評価方法について検討する。

2. 落石危険度評価方法に関するこれまでの研究

(1) 統計的方法(採点法)

落石は、いくつもの素因(例えば、地形や地質の条件など)や誘因(例えば、表流水による浸食、凍結融解、積雪、立木や植生の影響、地震動、岩石や土砂の経年風化など)が複雑に絡み合っただけで自然発生的に生じる現象である。このため落石の発生メカニズムなどは、まだその多くが解明されていないのが現状である¹²⁾。

このような背景から、発生源における落石危険度評価に関する研究は、災害事例の分析に基づく統計的な評価方法が出发点となっている。そして人命に関わる重大な落石災害を契機に、道路や鉄道の管理を行う各機関が、有識者による委員会形式による検討を重ねて落石に対する危険度評価の技術基準を整備してきた経緯がある^{10),11)}。

具体的には、地形や地質、湧水や集水の状況、降雨量や気候の地域性、立木や植生などの地被状況などの評価項目について、点数を定めたいわゆる採点法による評価基準^{例えば12),13),14),15),16)}が策定された。その後、採点基準の適正化や専門技術者の判断基準を取り入れることを目的として数量化理論に基づく方法^{例えば17),18),19)}などが精力的に研究されてきた。そして現在、道路や鉄道で使われている落石危険度評価方法(落石対策便覧²⁰⁾、道路防災点検の手引き²¹⁾、落石対策技術マニュアル⁷⁾、鉄道構造物等維持管理標準・同解説⁸⁾)にもこの統計的方法(採点法)が継承され、実務における主流となっている。

しかしながら統計的方法は危険度評価を簡易に行う方法としてはもちろん有効であるが、落石とその素因や誘因の関係が複雑であること、地形・地質条件に関し地域特性を持つわが国で全国を網羅した評価基準を決めることが困難であることなどから、現場技術者が評価基準を十分に理解した上で合理的な危険度評価を行いたいというニーズには十分に答えられているとは言い難い。

(2) 落石発生機構に着目した村上, 箭内の研究

村上, 箭内は、統計的方法による落石危険度評価に関する研究^{17),18)}を進める一方で、早くから落石発生の可能性を表した定量的な指標が実務的には必要であることを指摘している^{22),23)}。そこでまず落石発生機構を究明していくための第一歩として、単純化した2次元的な模型実験を行い、斜面勾配、斜面土質、転石の根入れ深さ、雨水および地震動などの因子が転落型落石(原文の引用であることから「転落型落石」と表記するが、「転石型落石」と同義である。以下同様。)に及ぼす影響を調べた。

これによると、根入れ角 $\theta = \cos^{-1}[(r-h)/r]$ (転石の半径 r , 根入れ深さ h)を用いて、落石発生の臨界傾斜角を滑動および転倒に対する安定計算からそれぞれ求め、これを実験結果と比較・検証した。その結果、転落型落石は地盤と転石の間に働く摩擦力と粘着力、斜面傾斜角、転石の根入れ深さが素因となること、誘因としては水平振動が最も大きく影響すること、落石発生時の運動形態としては主として転倒運動であるが部分的に滑動運動が複雑に絡み合う複合的なものであることなどを指摘するとともに、転石上部における地盤との離部の発達およびそこへの雨水侵入や斜面浸食による転石と地盤の接触面積の減少が落石の危険性を増加させると考察した。

すなわち転落型落石の発生が、転石周辺の斜面傾斜角、転石と地盤の間に作用する摩擦力と粘着力、転石の大きさを表す半径、転石の単位体積重量、転石の根入れ角などの力学的要因に支配されることを示し、転石の根入れ深さ z と臨界根入れ深さ $z_0 = r(1 - \cos \theta_0)$ (θ_0 : 落石発生の臨界根入れ角)から決定される $\Psi = z/z_0$ が落石の安定度すなわち危険度を表す指標として有効であることを示唆している。

このように村上, 箭内の研究の先駆性は、これまでの地形・地質的要因と力学的要因を取り入れた数量化法による分析に加えて、落石の発生機構を考慮した力学的安定性に言及し、落石危険度を定量評価する手法として転石の根入れ深さを把握することが重要であることに着目したことである。

(3) 振動を利用した落石危険度評価

1980年代には道路や鉄道系の技術研究機関が、岩塊の振動特性と安定性との関係を検討し始めた^{24),25)}。

日本道路公団試験研究所（現高速道路総合技術研究所）は、斜面上の不安定な岩塊と基盤となる地盤にそれぞれ速度振動計を設置し、自動車等の雑振動を振動源として岩塊と地盤の2つの微動を計測し、RMS速度振幅比、卓越振動数、減衰定数を算出し、そしてRMS速度振幅比が2以上で、かつ卓越振動数30Hz未満または減衰定数0.2未満となるものを不安定な岩塊と判定する方法²⁶⁾を開発した。

また独立行政法人土木研究所は、岩盤斜面において岩塊と基盤岩の振動速度波形を計測し、卓越振動数、速度振幅比、振動軌跡などに基づいて安定性を評価し、不安定な岩塊ブロックを抽出する方法²⁷⁾を提案している。

これらの方法は落石危険度振動調査法と岩盤斜面不安定ブロック抽出手法として実用化され、現在も改良が進められている²⁸⁾ものの、専門技術者による測定と解析が必要となるなど、実施事例の報告は多くない。

3. 振動を利用した転石の根入れ深さの推定方法

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が重要であることを述べた。そこで、振動を利用して転石の根入れ深さを把握し、力学的安定度を計算することで落石危険度を定量的に評価することができないかと考えた。

筆者らは既に、転石を地盤中に根入れを有する剛体に模擬し、剛体の大きさ、重量、地盤固さ、根入れ深さなどの条件を変えて、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する基礎的な実験(図-2)を行った。また転石や地盤をモデル化した3次元有限要素法による固有値解析から、式(1)~(4)のとおり転石の根入れ深さを推定する方法を考案し、さらにこれを2方向からの平均値として式(5)により求めた。そして当該モデルに関しては、根入れ深さの推定長を±5cm程度の誤差で推定できることを実証した^{9,29)}。

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

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

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

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

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

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) (図-3 参照)

Q_1 : 地盤をばね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(図-2に示す供試体底面の短辺方向)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(図-2に示す供試体底面の長辺方向)打撃の固有振動数から算定される根入れ深さ (m)

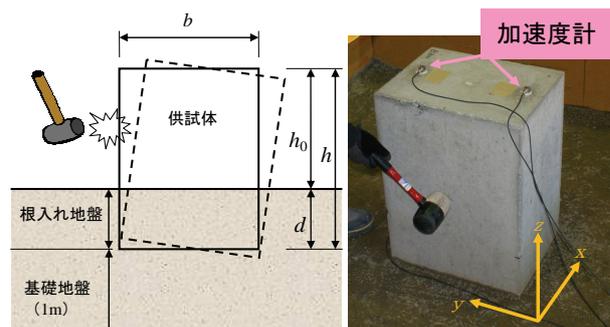


図-2 転石を模擬した剛体に関する振動計測実験

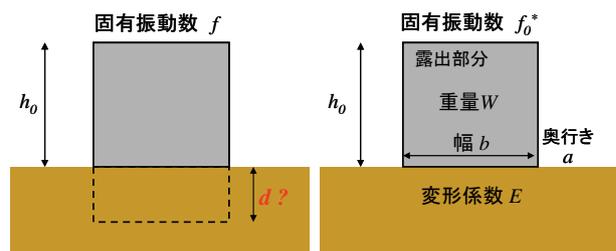


図-3 根入れ深さをゼロとみなした場合の固有振動数

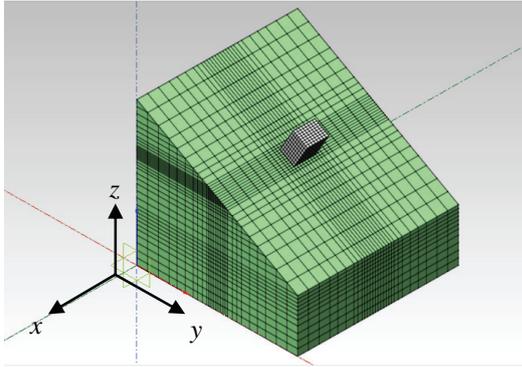


図4 傾斜地盤における解析モデル (3次元有限要素法)

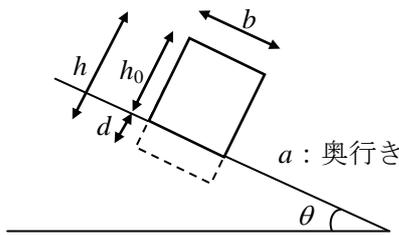


図5 傾斜地盤における解析モデルの諸元

表-1 傾斜地盤における解析ケース

解析ケース	モデル寸法 (m)			根入れ比 d/h_0	傾斜角度 (°) θ
	a	b	h		
CASE-1	0.4	0.3	0.5	0, 1/3, 1	0°, 30°, 45°
CASE-2	0.5	0.4	0.3	0, 1/3, 1	0°, 30°, 45°

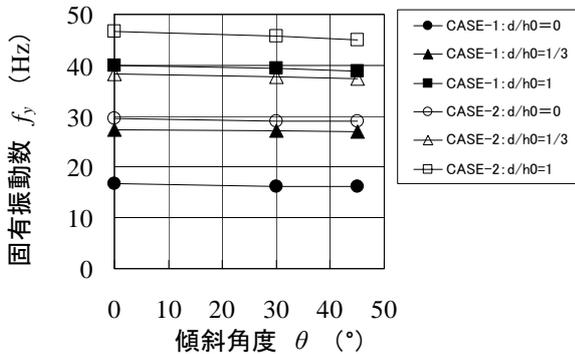


図6 傾斜地盤における固有値解析結果

4. 斜面における転石の振動と力学的安定度に基づく落石危険度の提案

(1) 傾斜地盤における転石の振動

第3章で述べた水平地盤における固有値解析 (3次元有限要素法) を傾斜地盤に適用し、斜面における転石の固有振動数を求める。図-4に傾斜地盤における解析モデルの一例を示す。解析条件は水平地盤で行ったものと同様^{9,29)}とし、解析ケースは図-5に示す諸元を用いて、

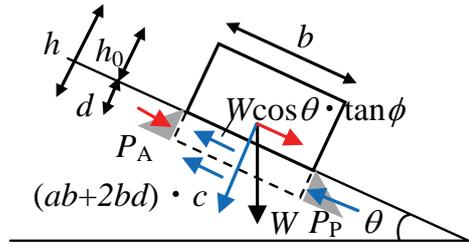


図-7 転石の滑動に対する安定度

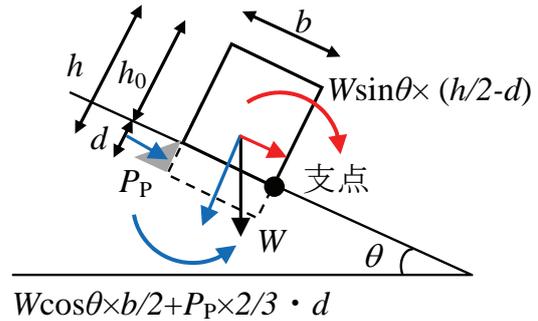


図-8 転石の転倒に対する安定度

表-1のとおり2ケース、18とおりの (寸法2とおりの根入れ比3とおりの傾斜角度3とおりの) とする。

傾斜地盤における固有値解析結果を、横軸に傾斜角度 θ 、縦軸に傾斜方向の固有振動数 f_y をとり、図-6に示す。この図から固有振動数は、いずれのケースにおいても傾斜の影響を受けずにほぼ一定の値となっていることが分かる。

(2) 力学的安定度に基づく落石危険度

次に斜面における滑動および転倒に対する転石の力学的安定度を用いて、落石危険度を定義する。ここで転石のモデル化については、転石を円柱体に近似した村上、箭内^{22,23)}の研究のほか、直方体に近似した沖村ら^{30,31)}の研究も参考にしている。

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-7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と粘着力の合力となる。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、粘着力など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 を式(6)により定義する。

一方、転倒に対する安定度は、図-8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。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、転石の底面およ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(7)により定義する。

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

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

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

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

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 ($^\circ$)

ϕ : 地盤のせん断抵抗角 ($^\circ$)

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)

5. 実斜面における適用と検証

(1) 調査斜面と転石

本論文で提案する落石危険度評価方法を実斜面に適用し、その有用性について検証する。そのため斜面途中に不安定な岩塊が多数存在する斜面 A, B の 2 箇所を調査

斜面として選定した。なおテストフィールドであるため、線路際の落石止柵や斜面途中の簡易柵などの落石対策がすでに行われている場所である。図-9 および図-10 にそれぞれ斜面 A および B の代表断面を示す。

斜面はいずれも線路左側の傾斜勾配が約 40° と一定の直線斜面である。ただし転石周辺には局所的に傾斜勾配が大きくなっているところも存在している。

それぞれの斜面で簡易貫入試験を 3 箇所ずつ実施しており、その概略の位置および N_d 値をあわせて図示する。表層 50cm 程度までは N_d 値が 1~5 程度、それ以深で 10~30 程度となっている。

またどちらも斜面上方の露岩を発生源とする転石が斜面途中に多数存在しており、斜面 A から 12 個、斜面 B から 10 個を調査対象転石として選定した。写真-1 と写真-2 に、それぞれ斜面 A, B に存在する転石の一例を示す。岩種は流紋岩質の溶結凝灰岩で、硬質で角ばった形状をした転石が多く見られる。

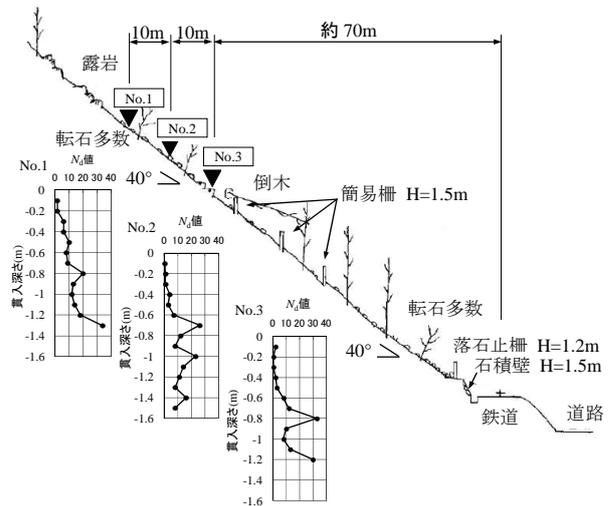


図-9 斜面Aの概要

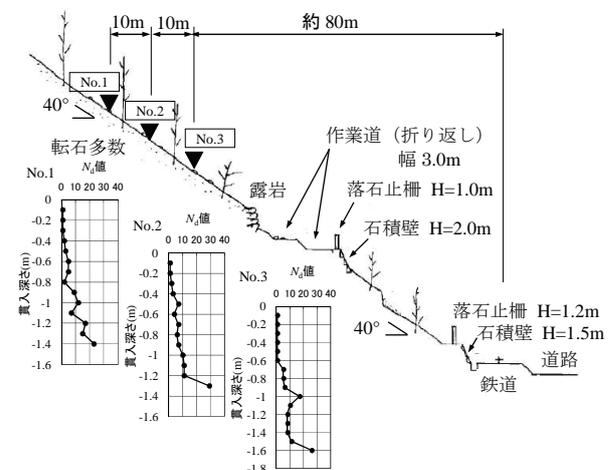


図-10 斜面Bの概要

(2) 振動計測方法

振動計測機器は、接道条件や作業条件が必ずしも良好でない鉄道沿線の急傾斜地などでも使用性に優れている必要がある。そこで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している³³⁾。振動計測のイメージは図-11に示すように、転石に加速度計を固定し、ゴムハンマーで打撃した時の加速度波形をAD変換してパソコンに記録する。また計測は写真-3のとおり、ゴムハンマーによる加振を行う者とパソコンを操作する者の2名で行う。そして計測した加速度波形を高速フーリエ変換し、フーリエスペクトルが最大となる卓越振動数を転石の固有振動数として算定する⁹⁾²⁹⁾。

なお転石の大きさによっては大きな加振力を必要とする場合も考えられるが、1辺が2m程度の転石であればゴムハンマーによっても十分な加振力が与えられ、固有振動数を特定できることを現地で確認している。

(3) 斜面における地盤の変形係数の評価

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 値により評価する。 N_d 値と N 値には、一般的に $N_d = (1 \sim 3) N$ の関係がある³⁴⁾。

ここで根入れ深さの推定式(4)において重要な f_0^* が分母にあり、この f_0^* が式(3)において地盤の変形係数を含む Q_1 (式(1))と関係していることから、根入れ深さを過大に算定しないためには Q_1 を大きく見積もる方がよい。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/m^2)³⁴⁾を用い、これを動的なひずみレベルに対応した2倍相当値⁹⁾²⁹⁾として、式(10)により地盤の変形係数を求めることとする。なお今回対象とする転石の露出高さが最大でも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³⁵⁾は、斜面の概略安定計算に用いられる $c = N/16$ (kgf/cm^2) ($= 6N$ (kN/m^2))として、式(11)により評価することとする。

$$E = 2 \times 700N_d = 1400N_d \quad (10)$$

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

(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⁹⁾²⁹⁾。

このため図-12に示すように転石の露出部分の外形寸法を、傾斜に沿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こととする。ただしその重量は、直方体に内接するだ円球体の半分として式(12)により求める。



写真-1 斜面Aの転石の例 (A-9, A-10)



写真-2 斜面Bの転石の例 (B-7)

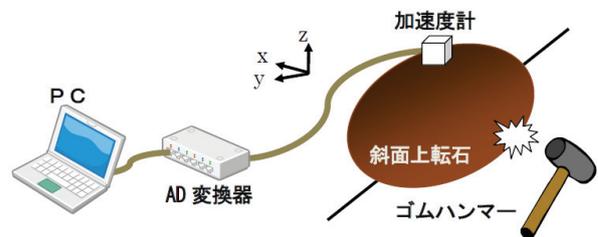


図-11 斜面上転石の振動計測イメージ



写真-3 斜面における転石の振動計測状況

これは本章(3)でも述べたように、根入れ深さを過大に算定しないためにも Q_1 (式(1)) を大きく見積もるようにするためであり、結果として根入れ深さを安全側に推定することができる。

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

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)

(5) 振動計測に基づく根入れ深さの推定

表-2 に調査転石の番号、図-12 の表記にしたがった転石の寸法、転石まわりの斜面傾斜角、振動計測の結果得られる転石の固有振動数 (f_x : 斜面走向方向の固有振動数, f_y : 斜面傾斜方向の固有振動数) を整理する。振動計測は 2009 年 10 月と 2011 年 11 月の 2 回実施している。

転石 A-3 は根入れ 0 であったため、2011 年調査時には落下して発見できなかった。そのため A-12 を新たに調査転石とした。また転石 B-9 は倒木のため 2011 年の計測をすることができなかった。また固有振動数の経年比較では顕著な差異が見られないことから、2 年程度の経年では転石の不安定化は大きく進展しなかったと考えられる。さらにこの振動計測結果に基づき、式(1)~(5)による根入れ深さの推定長 (d_x : 斜面走向方向の固有振動数から算定される根入れ深さ, d_y : 斜面傾斜方向の固有振動数から算定される根入れ深さ) とその平均長を算出した結果も表-2 にあわせて示す。

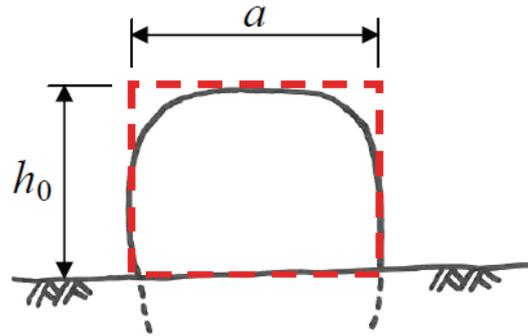
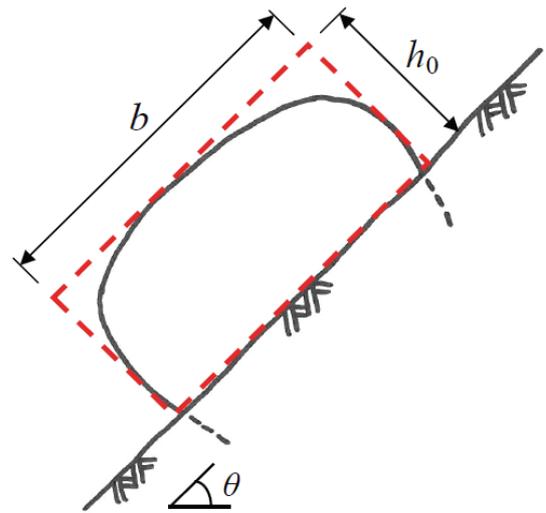


図-12 転石の形状近似

表-2 鉄道沿線斜面での転石の振動計測および根入れ深さの推定

転石番号	寸法 (m)			斜面傾斜 (°)	固有振動数 (Hz) 2009年計測		固有振動数 (Hz) 2011年計測		根入れ深さの推定長 (m) 2009年計測データ			根入れ深さの推定長 (m) 2011年計測データ			根入れ深さ平均長 (m) ((1)+(2))/2
	a	b	h ₀		f _x	f _y	f _x	f _y	d _x	d _y	平均(1)	d _x	d _y	平均(2)	
A-1	1.0	2.1	0.4	45	26.5	22.5	28.3	22.5	0.11	0.01	0.06	0.14	0.01	0.08	0.07
A-2	1.5	2.4	1.1	45	56.3	56.6	57.4	57.5	1.88	1.65	1.76	1.92	1.68	1.80	1.78
A-3	1.0	1.1	0.4	45	10.0	10.2	落下のため計測不可		-0.23	-0.23	-0.23	落下のため計測不可		-0.23	
A-4	0.5	0.6	0.4	45	32.3	30.5	32.0	30.5	0.02	-0.02	0.00	0.01	-0.02	0.00	0.00
A-5	1.2	0.9	0.8	40	26.0	26.0	26.5	27.8	0.77	0.89	0.83	0.79	0.98	0.89	0.86
A-6	2.8	2.6	0.5	40	27.4	23.2	27.5	23.1	0.92	0.72	0.82	0.93	0.72	0.82	0.82
A-7	1.4	2.3	0.9	40	22.5	19.0	22.4	19.0	0.95	0.64	0.79	0.94	0.64	0.79	0.79
A-8	2.0	1.6	1.1	40	29.0	23.7	28.1	23.5	1.44	1.18	1.31	1.38	1.17	1.27	1.29
A-9	1.2	0.7	0.8	40	34.4	29.1	39.3	20.5	1.05	1.12	1.09	1.26	0.67	0.97	1.03
A-10	0.8	1.2	0.4	40	23.5	23.0	23.5	22.9	0.30	0.25	0.27	0.30	0.24	0.27	0.27
A-11	0.8	1.4	0.7	43	25.2	29.9	25.4	29.5	0.77	0.79	0.78	0.78	0.77	0.78	0.78
A-12	1.0	1.1	0.7	45	2009は調査対象外		29.8	74.5	2009は調査対象外			1.56	1.38	1.47	1.47
B-1	0.8	1.8	0.9	48	25.0	29.6	24.0	28.6	1.12	0.98	1.05	1.06	0.93	1.00	1.03
B-2	0.6	0.8	0.3	45	32.0	28.6	31.1	27.0	0.30	0.20	0.25	0.29	0.17	0.23	0.24
B-3	0.6	0.6	0.4	45	25.9	18.9	26.7	20.5	0.25	0.08	0.17	0.27	0.12	0.20	0.18
B-4	0.7	0.3	0.3	43	25.0	29.4	21.0	22.2	0.03	0.25	0.14	-0.04	0.09	0.03	0.09
B-5	1.5	2.1	1.1	43	25.9	22.5	25.4	22.2	0.80	0.56	0.68	0.78	0.55	0.66	0.67
B-6	0.8	0.5	0.4	43	18.9	14.0	16.8	12.7	-0.09	-0.14	-0.12	-0.13	-0.16	-0.15	-0.13
B-7	1.0	2.1	0.7	43	26.6	31.9	27.0	31.3	0.49	0.53	0.51	0.50	0.51	0.51	0.51
B-8	1.0	1.8	0.7	43	66.9	78.8	63.9	80.1	1.76	1.86	1.81	1.67	1.89	1.78	1.79
B-9	1.0	1.0	0.6	40	27.0	26.4	倒木のため計測不可		0.28	0.27	0.28	倒木のため計測不可		0.28	
B-10	0.8	0.9	0.4	40	34.6	34.2	34.2	39.8	0.24	0.22	0.23	0.24	0.32	0.28	0.26

表-3 提案方法と落石危険度振動調査法²⁹⁾による転石の危険度評価

転石 番号	根入れ深さ 平均長 (m) (注1)	根入れ比 d/h_0	安定度 (注2)		落石危険度 判定 【提案方法】	落石危険度振動調査法 (既存手法) による判定						提案方法と 既存手法の 比較		
			滑動 F_S	転倒 F_R		RMS速度振幅比		卓越振動数		減衰定数			判定	
						x方向	y方向	x方向	y方向	x方向	y方向			
A-1	0.07	0.17	0.98	6.41	不安定 (滑動)									
A-2	1.78	1.62	3.70	(注3)	安定									
A-3	0.00	0.00	0.58	2.75	不安定 (滑動)	5.98	5.35	14.3	16.5	0.021	0.028	不安定	○	
A-4	0.00	0.00	0.51	1.70	不安定 (滑動)	2.79	2.36	38.6	35.3	0.067	0.141	不安定	○	
A-5	0.86	1.07	5.06	(注3)	安定	3.11	1.60	29.0	30.7	0.106	0.219	不安定	※	
A-6	0.82	1.64	3.15	(注3)	安定									
A-7	0.79	0.88	2.56	35.45	安定									
A-8	1.29	1.17	3.52	(注3)	安定	1.70	2.70	29.7	25.0	0.139	0.076	不安定	※	
A-9	1.03	1.28	7.07	(注3)	安定									
A-10	0.27	0.68	3.26	15.17	安定	3.85	1.76	23.3	24.1	0.086	0.128	不安定	△	
A-11	0.78	1.11	4.38	(注3)	安定	2.57	0.97	26.8	28.0	0.036	0.059	不安定	※	
A-12	1.47	2.09	8.04	(注3)	安定									
B-1	1.03	1.14	3.68	(注3)	安定									
B-2	0.24	0.80	4.50	25.85	安定	1.60	1.97	32.5	27.8	0.300	0.106	安定	○	
B-3	0.18	0.45	3.21	4.62	安定	4.76	3.87	25.6	22.5	0.046	0.042	不安定	△	
B-4	0.09	0.29	3.32	2.65	安定	3.40	3.11	22.2	22.1	0.040	0.046	不安定	△	
B-5	0.67	0.61	1.86	6.77	安定									
B-6	0.00	0.00	0.62	1.34	不安定 (滑動)									
B-7	0.51	0.72	2.39	14.58	安定	1.30	0.80	26.4	28.8	0.178	0.656	安定	○	
B-8	1.79	2.56	7.83	(注3)	安定									
B-9	0.28	0.46	2.47	5.00	安定	0.37	0.58	14.6	19.0	0.676	0.701	安定	○	
B-10	0.26	0.64	3.54	11.61	安定									

【安定度算定の前提】

- (注1) 根入れ深さの平均長がマイナスとなる場合は、根入れ深さをゼロとする。
- (注2) 安定度の算定式(6)~(8)において、転石の単位体積重量 $\gamma_{\text{rock}} = 26 \text{ kN/m}^3$ 、せん断抵抗角 $\phi = 30^\circ$ とする。
- (注3) 転倒に関する安定度の式(7)において、 $h/2 - d < 0$ の場合、すなわち根入れ深さが露出高さよりも大きい場合には計算上 $F_R < 0$ となるが、この場合は転石の重心位置が地盤中にあることになるので、転石は安定であるとみなす。

(6) 力学的安定度に基づく落石危険度評価の提案

次に式(5)により算定した根入れ深さの平均長を用いて、斜面における転石の滑動および転倒の安定度を式(6), (7)により算定する。この結果を表-3に示す。

ここで不安定な転石の候補と考えられる根入れ深さが50cm未満となった転石をピックアップ(表-3の赤色着色)してみると、A-1, A-3, A-4, A-10, B-2, B-3, B-4, B-6, B-9, B-10の10個である。2011年調査時に落下していた転石A-3は、根入れ深さがゼロと算定され、不安定な転石であったことが示された。

次に根入れ深さのみで危険度を評価するのではなく、転石の根入れ比 d/h_0 で見ると、A-1, A-3, A-4, B-6などが根入れ比0.25未満(表中赤色着色)となっている。

さらに斜面における力学的安定度が例えば1.2未満となるものを不安定と考えれば、滑動に対して不安定なものA-1, A-3, A-4, B-6(表中赤色着色)であった。また転倒に対しては、比較的露出高さの低い転石を選んだため、安定度が1.2未満となるものはなかった。

以上のように根入れ深さ、根入れ比、滑動および転倒に対する安定度などを算定することにより、落石危険度を定量的に評価することができる。一方で、例えば根入れ比 d/h_0 が0.25以下となるものを不安定な転石として1次スクリーニングすることにより、広範な鉄道沿線斜面から詳細調査が必要となる転石を絞り込むことができるなど、現場において効率的な危険度評価方法とすることも期待できる。

表-4 根入れ深さの推定長と実測の比較

転石 番号	根入れ深さ			推定長と 実測平均長 の差(m)
	推定長(m)	実測長(m)	平均長(m)	
A-1	0.07	0.20~0.25	0.23	-0.16
A-3	0	0	0	0
A-4	0	0~0.25	0.13	-0.13
A-10	0.27	0.10~0.40	0.25	0.02
B-3	0.18	0.10~0.15	0.13	0.05
B-4	0.09	0.10	0.10	-0.01
B-6	0	0~0.10	0.05	-0.05
B-10	0.26	0.20~0.30	0.25	0.01

(7) 提案方法の検証

本論文で提案する落石危険度評価方法(以下「提案方法」という。)の有効性を検証するために、根入れ深さの現地確認(転石8個)を行うとともに、落石危険度振動調査法(以下「既存手法」という。)による判定結果(転石11個)との比較を行う。

調査転石のうち根入れ深さの平均長が50cm未満と判定されたものを中心に、実際に掘削して根入れ部の状況を確認した。根入れ深さを確認した転石、振動計測に基づく根入れ深さの推定長、そして根入れ深さの実測長とその平均長を表-4に示す。

また、転石の根入れ深さの確認状況の写真は付録に示す。地中の根入れ部を明確にするために、スプレーで露出部と地表面の境界を明示した後に、根入れ部の掘削を行った。

実際の転石は根入れ部の形状が複雑であるため、根入れ深さが一定値とならない場合も多く、実測長にもばらつきがある。しかしながら実測した根入れ深さの平均的な値は、提案方法に基づく根入れ深さの推定長と合致し、安全側もしくは最大でも+5cm程度の差である。

次に提案方法と既存手法による危険度評価結果の比較について述べる。提案方法と既存手法の判定が一致したものは、既存手法で判定した転石 11 個のうち 5 個である。その判定内容は、A-3：不安定、A-4：不安定、B-2：安定、B-7：安定、B-9：安定（表-3、提案方法と既存手法の比較欄の記号「○」）である。

提案方法と既存手法が異なる判定をしたものは、残りの 6 個で、既存手法ではこれら 6 個の転石をすべて不安定と判定している。この 6 個のうち、提案方法による推定で根入れ深さが 50cm 未満となったものは、A-10：推定長 27cm、B-3：同 18cm、B-4：9cm の 3 個（表-3、記号「△」）である。提案方法と既存手法で異なる判定をしているが、これらの転石については根入れ深さが小さく、揺れやすい転石であったといえる。しかしながら根入れ深さが小さく揺れやすい転石であったとしても、斜面における力学的な安定度を計算すると、滑動および転倒に対する安定度は大きく、すなわち落石危険度の小さい転石であるということが出来る。なお、転石 A-10、B-3、B-4 については、表-4 で示したように実際に根入れ部の掘削を行って根入れ深さを実測しており、提案方法による根入れ深さの平均推定長と実測平均長はほぼ一致していることを確認している。

さらに提案方法と既存手法で異なる判定をした残る 3 個の A-5、A-8、A-11（表-3、記号「※」）について述べる。これらの転石に関する既存手法の計測データ（表-3）を詳しく見てみると、RMS 速度振幅比が x 方向または y 方向いずれかで 2 未満（判定基準では安定）となっているものがあり、卓越振動数も 25.0~30.7Hz の値を示しており、判定基準の 30Hz に近い値となっている。すなわちこの 3 個の転石は、既存手法による判定でも安定領域と不安定領域の境界に位置する転石であるといえる。また転石 A-5、A-8、A-11 は表-2 の寸法のとおり、底面の 2 辺 (a , b) に比べ露出高さ (h_0) は小さく、扁平で安定した形状をしている。（外観写真は付録参照）

以上のことから、提案方法と既存手法で異なる判定結果となったものもあるが、既存手法による評価は根入れ深さの小さい揺れやすい転石を判別しており、転石の形状、根入れ深さや斜面の傾斜を考慮した安定度までを判定することは難しいと考えられる。最終的に落石発生につながる不安定さを評価する指標としては、滑動や転倒に対する力学的な安定度が有力であり、これを算定できる提案方法の有用性が示されたものと考えている。

6. 結論

本研究で得られた知見を結論として以下にまとめる。

- (1) 発生源における落石危険度の評価方法は、落石の発生メカニズムが十分に解明されていないこともあり、現在においても危険度評価の方法は過去の落石事例の統計分析等に基づく経験的なものとなっている。そこで転石型落石を対象として、転石の根入れ状態に着目するとともに、斜面における力学的安定度と関係づけた客観的・定量的な評価方法を検討した。
- (2) 提案する落石危険度評価方法は、加振時の振動計測から固有振動数を特定し、転石の根入れ深さをまず推定する。根入れ深さが分かると斜面上転石の全体形状が把握できるので、転石の滑動や転倒の力学的な安定度 F_S や F_R などを基に落石危険度を評価することができる。また根入れ比 dh_0 を指標として、広範な鉄道沿線斜面から不安定な転石の 1 次スクリーニングに利用することなども考えられる。
- (3) 提案方法を、鉄道沿線の実斜面における転石の危険度評価に適用した。そして危険度が高いと判断した転石の根入れ部を実際に掘削した結果、転石の平均的な根入れ深さを推定できることが分かった。また既存の危険度調査法との比較を行った結果、提案方法の有用性を確認することができた。
- (4) 定量的な落石危険度評価方法が確立されていない現状において、取り扱いが容易な機器を使用して振動を計測し、そこから転石の根入れ深さを推定、斜面における安定度を算定する本方法は、落石発生メカニズムに基づいた危険度評価方法の第一歩となると考えている。

7. おわりに

本論文で提案した新しい落石危険度評価方法は、鉄道のみならず、道路などの他の分野においても適用可能である。今後複雑な形状を有する実転石の形状近似方法などを工夫するとともに、従前の採点法などで行われてきた危険度評価結果との照合事例を蓄積していくことで、本提案方法の有効性をさらに高めていくこととしたい。

謝辞：本論文の作成にあたり、公益社団法人鉄道総合技術研究所防災技術部の杉山部長、ならびに布川主任研究員に有益な助言をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

付録

鉄道沿線斜面における調査転石の写真 (根入れ確認, 外観)



A-10 掘削前



A-10 掘削後



A-10 根入れ確認状況



B-3 掘削前



B-3 掘削後



B-3 根入れ確認状況



B-4 掘削前



B-4 掘削後



B-4 根入れ確認状況



B-10 掘削前



B-10 掘削後



B-10 根入れ確認状況



A-5 外観



A-8 外観



A-11 外観

参考文献

- 1) 池田和彦, 小橋澄治: 地形・地質からみた落石の傾向と発生予測, 施工技術, 第6巻, 第8号, pp.17-21, 1982.
- 2) 箭内寛治: 落石の調査と対策, 地質と調査, 第3号, pp.38-45, 1987.3.
- 3) 深田隆弘, 森 泰樹, 棚野 博: 10m-DEMを活用した鉄道斜面における落石注意箇所抽出の試み, 第46回地盤工学研究発表会(松山), pp.1793-1794, 2010.8.
- 4) 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.
- 5) 深田隆弘, 森 泰樹, 棚野 博, 藤田浩司: 鉄道沿線における落石ハザードマップの試作, 第66回土木学会年次学術講演会(松山), pp.645-646, 2011.9.
- 6) 深田隆弘, 谷口達彦, 澁谷 啓: 落石の線路への影響度の簡易判定図, 第67回土木学会年次学術講演会(名古屋), pp.643-644, 2012.9.
- 7) 鉄道総合技術研究所: 落石対策マニュアル, pp.31-39, 1999.3.
- 8) 国土交通省鉄道局: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編 盛土・切土), pp.116-127, 2007.1.
- 9) 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(応用力学論文集 Vol.15), pp.I-337-I-344, 2012.9.
- 10) 野口達雄: 鉄道沿線岩石斜面の安定性評価に関する研究, 鉄道総研報告, 特別第51号, pp.7-9, 2002.3.
- 11) 大西有三, 西山 哲: 岩盤崩壊と落石問題に関する現状と課題, Journal of the Japan Landslide Society, Vol.39, No.1, pp.1-2, 2002.6.
- 12) 小橋澄治: 切取り面採点表の再検討と落石管理の考え方, 鉄道土木, Vol.15, No.6, pp.39-43, 1973.6.
- 13) 日本鉄道施設協会: 土木建造物取替の考え方(日本国有鉄道施設局土木課編), pp.740-748, 1974.8.
- 14) 日本鉄道施設協会: 落石対策の手引(日本国有鉄道施設局土木課編), pp.16-28, 1978.3.
- 15) 高速道路調査会: 落石防護施設の設置に関する調査研究報告書, pp.61-70, 1974.2.
- 16) 日本道路協会: 落石対策便覧, pp.57-75, 1983.7.
- 17) 村上幸利, 箭内寛治: 数量化法による転落型落石の危険度評価, 土木学会論文集, 第406号/III-11, pp.223-231, 1989.6.
- 18) 村上幸利, 箭内寛治: 数量化法に基づく転落型落石の危険度評価基準について, 土木学会論文集, 第415号/IV-12(報告), pp.155-161, 1990.3.
- 19) 野口達雄, 岡田勝也, 杉山友康, 木谷日出男, 土田泰弘: 鉄道沿線の軟岩斜面の安定性評価手法, 土木学会論文集, No.742/VI-60, pp.149-158, 2003.9.
- 20) 日本道路協会: 落石対策便覧, pp.300-303, 2000.6.
- 21) 道路保全技術センター: 道路防災点検の手引き(豪雨・豪雪等), pp.35-39, 2007.9.
- 22) 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, 1987.3.
- 23) 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, 1988.9.
- 24) 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, 21巻3号, pp.9-12, 1980.3.
- 25) 熊谷兼雄, 木谷日出男, 吉岡 修: 振動計測による浮石危険度判定のための基礎実験, 鉄道技術研究所速報, pp.1-17, 1983.10.
- 26) 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.
- 27) 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, 2007.7.
- 28) 竹本将, 藤原 優, 横田聖哉, 三塚 隆, 甲斐国臣, 岡本栄: 落石危険度振動調査法を用いた現地調査および判定システムの開発ー落石の危険度を現地で判定するシステムの開発ー, 土木学会第65回年次学術講演会(札幌), pp.75-76, 2010.9.
- 29) 深田隆弘, 上半文昭, 馬 貴臣, 斉藤秀樹: 転石を模擬した地盤中に根入れを有する剛体の振動特性に関する実験と解析, 第47回地盤工学研究発表会(八戸), pp.1783-1784, 2012.7.
- 30) 沖村 孝, 鳥居宣之, 萩原貞宏, 吉田正樹: 道路斜面における落石危険度評価手法の一提案, 地すべり, 第39巻, 第1号, pp.22-29, 2002.
- 31) 沖村 孝, 鳥居宣之, 吉田正樹, 渡辺哲生, 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(秋田), pp.2147-2148, 2003.7.
- 32) 地盤工学会: 地盤工学数式入門, pp.134-135, 2001.5.
- 33) 深田隆弘, 泉並良二, 森 泰樹: 斜面上転石の振動計測を目的としたシステム構築と計測結果に関する考察, 第65回土木学会年次学術講演会(札幌), pp.77-78, 2010.9.
- 34) 地盤工学会: 設計用地盤定数の決め方ー土質編ー, p.23およびp.80, 2007.12.
- 35) 地盤工学会: N 値と $c \cdot \phi$ の活用法, p.132, 2005.10.

(2012.8.1受付)

A PROPOSAL OF ESTIMATION METHOD FOR ROCKFALL RISK DEGREE BASED ON VIBRATION MEASUREMENT OF THE BOULDER

Takahiro FUKATA, Tatsuhiko TANIGUCHI and Satoru SHIBUYA

Estimating the rockfall risk degree of boulders on slope has been intensively challenged by the agencies and business owners, such as railway companies. In the current practice, some experiential methods based on the statistical analysis of the past rockfall incidents are widely used, since the outbreak mechanism of rockfall is still not fully understood. In this study, an estimation method of the risk assessment for the boulder-type rockfall is proposed in order to meet the railway companies' needs for evaluating the rockfall risk in an objective/quantitative manner. The proposed method will enable us to reveal the in-soil penetration depth of the boulder on slope by vibration measurement and calculate the dynamic stability directly. By applying the proposed method to the field slope along the railway, the validity of this method has been confirmed.