

落石シミュレーションによる富士山落石災害の合理的な落石対策

馬 貴臣^{1*}・佐野貴洋²・飯田温²・本多美仁³・本多豊⁴・増田三男⁴

¹岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²静岡県交通基盤部 (〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町9番6号)

³富士設計株式会社 (〒418-0022 静岡県富士宮市小泉468-1)

⁴応用地質株式会社 中部支社 (〒463-8541 名古屋守山区瀬古東二丁目907番地)

*E-mail: magc@gifu-u.ac.jp

2009年7月に13日、富士山富士宮口新5合目で落石災害が発生し、1名の方が亡くなられた。災害後、災害となった落石の運動エネルギーに関しては様々な推定が報道された。調査により、今回の落石は比高差約400mの上方から落下したと判明され、これまでに極めて稀な高い落下高さと長距離を落下する特徴がある。合理的な対策を実施するため、落石発生源及び転石の分布状況等に関する詳細な現地調査、現地調査結果に踏まえた落石シミュレーション、現地状況及びシミュレーション結果に踏まえた落石対策設計などを実施した。本文は、調査、解析及び設計から構成された合理的な落石対策を検討した。最後に、施工完了した対策工状況を紹介した。

Key Words : rockfall, rockfall disasters, rockfall simulation, DDA, rockfall countermeasure, Fujiyama

1. はじめに

近年、落石シミュレーションによる落石対策を実施することは多く認められつつある。なお、要対策斜面と落石は、斜面地質・地形、斜面植生状態及び転石・浮石の形状・大きさ・分布状況などが極複雑である。また、多くの落石シミュレーションが開発され、開発途中のものもあれば、実務に使われているものもある。合理的な落石対策を実施するため、どのような調査を実施すればよい、どのような手法を使えばよいかは、いつも施設管理者及び調査担当者を悩ませる。合理的な落石対策は、一般的に、適切かつ正確な落石調査により、調査対象斜面の落石現象をより正確に把握することが望まれる。また、落石挙動の評価は、経験的な手法であるか、力学的な手法を使っているか、力学的な手法であっても、落石挙動を正確に表現できるか否か、すなわち、手法の理論と導入しているパラメータは検証されているか否か、適切かつ正確に手法を扱っているかは重要であろう。

2009年7月13日に、富士山富士宮口新5合目で落石災害が発生し、落石が駐車場に駐車中のキャンピングカーに直撃し、登山待機中の1名の方が亡くなられた。落石は、直径約1.2m、体積約0.4m³で、落下高さは400mに達する。落下した斜面は、勾配25～30°の崖錐斜面で、転石と浮

石が広範囲に分布している。また、災害落石は既存落石防護柵を完全に破って突き抜く形で駐車場に到達した。落石対策の基本方針としては発生源対策であるが、落石供給源の広範囲分布及び国家重要観光地であることを考慮し、待ち受け対策を強化することは合理的であると推察した。待ち受け落石対策の落石挙動の評価は、落石対策便覧によって行うことは一般的である¹⁾。しかしながら、落石の大きさと落下高さと共に、落石挙動の評価に一般に使われている落石対策便覧の経験式の適用範囲を大幅超過した。落石対策便覧の適用範囲に関しては、落石対策を必要とするような現場条件により、落石対策便覧に示された経験則を適用することが必ずしも適当ではないと指摘されている²⁾。そこで、合理的な待ち受け対策を実施するため、落石発生源及び転石の分布状況等に関する詳細な現地調査、現地調査結果に踏まえた落石シミュレーション、現地状況及びシミュレーション結果に踏まえた落石対策設計などを実施した。本文は、調査、解析及び設計から構成された合理的な落石対策を検討し、最後に、施工完了した対策工を紹介する。

2. 落石調査

落石調査は、災害落石、既往落石、斜面に点在している転石及び落石発生源に対して実施する。これらにより、当調査地の落石特徴を判明し、落石シミュレーション及び落石対策のための基礎データを収集整理する。図-1に落石シミュレーションによる落石調査対策の流れを示す。落石調査を実施する際、このような全体像を念頭におくことは重要であろう。場合によって、落石シミュレーション及び落石対策設計に必要な情報が調査されていない場合もあれば、必要のない調査を行われた場合もある。

図-1に示すように、落石の現地調査は概ね4項目が必要である。今回の調査斜面は、災害落石のルート沿いには植生があるが、落石の落下に抵抗できる樹木はないことから、植生調査項目は省略される。また、落石シミュレーションの実施には、植生の影響も考慮しない。以下に各調査項目の調査結果及びこれによる富士山落石の特徴を取りまとめる。

(1) 斜面の地質・地形

落石調査結果及び落石検討断面は図-2に取りまとめ、文献¹⁾から加筆したものである。調査地は、第四紀成層火山からなり、道路からの比高1,000m以上を有する大規模斜面である。落石斜面は、南向き斜面に位置し、落石被害箇所の駐車場の標高は約2,400mで、落石発生源は標高約2,800mの急崖である。斜面の傾斜は20°～30°であり、駐車場から山頂へ向かう方向に細長い沢地形が分布する。この沢地形の幅は下方斜面では100m程度であり、上方斜面では50m程度となっている。また、沢地形の上方斜面は細長い馬蹄形の崖に取り囲まれている³⁾。

落石発生源付近の地質¹⁾は、第四紀完新世の成層火山の噴出物からなり、スコリア堆積物と玄武岩質の溶岩から構成される。玄武岩質溶岩の馬蹄形急崖岩相から、落石発生源は割れ目が少なく塊状を呈する堅硬で緻密な灰

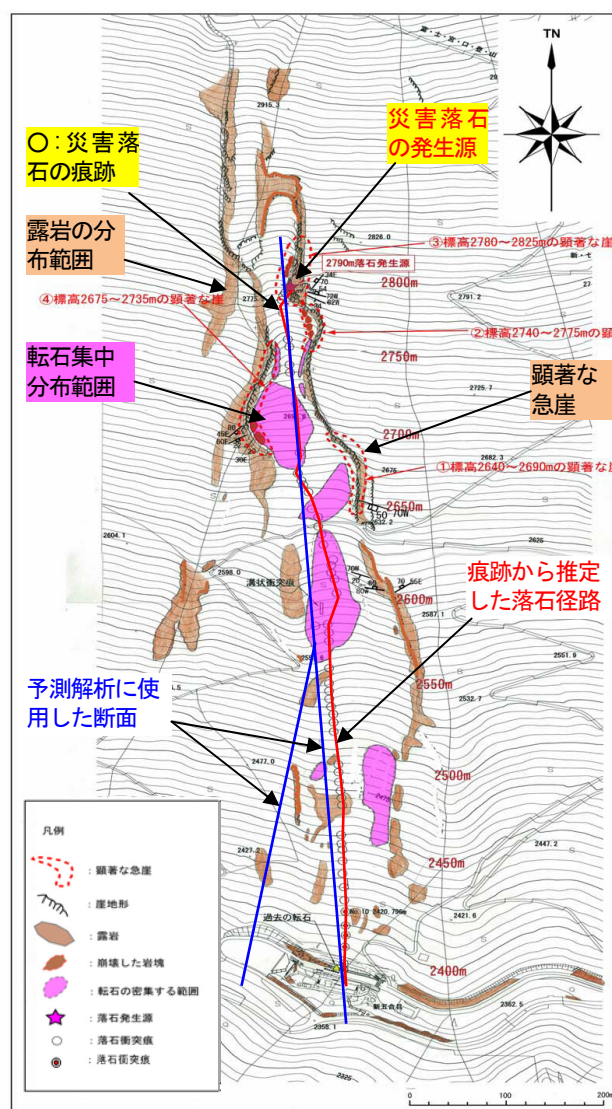


図-2 落石調査結果図及び落石検討平面図³⁾

色塊状溶岩と角礫状のクリンカーに区分される。また、スコリア堆積物は、調査地周辺の斜面全域の表層を覆っている。

(2) 災害落石及び既往落石

図-3に災害落石、発生源及び痕跡の写真を示す。落石径路沿いには多くの落石痕跡が確認され、これをもって発生源を辿り着き、特定することができた。また、駐車場に到達する最終段階では、植生、斜面及び路面に残った痕跡、既設落石防柵の突き破る場所などを確定することができた。これらの痕跡により図-4に示すような落石軌跡を取りまとめることができ、落石速度を推定することができた。

a) 防護柵を突破った後の落石速度と運動エネルギー

防護柵を突き破った落石は水平に飛び出したと仮定し、キャンピングカーとの衝突によるエネルギーロスは無視できることから、着地点の位置から、落石が柵を突破った直後の速度は下記のように推定できる。

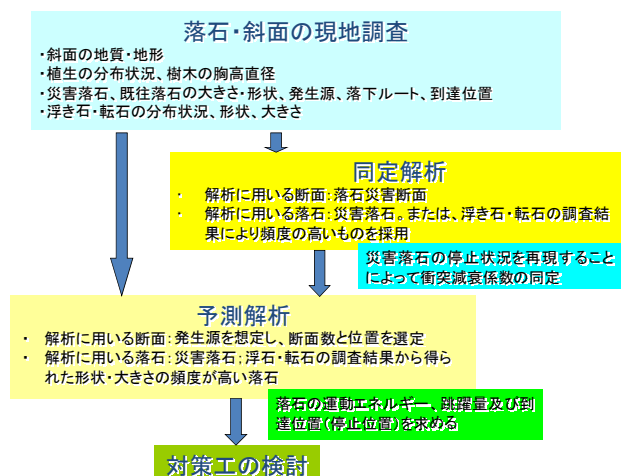


図-1 落石シミュレーションによる落石調査対策の流れ

落石が防護柵を突き破った後地面に衝突までの飛翔時間は、

$$t = \sqrt{\frac{2Y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 5.19}{9.8}} = 1.03s \quad (1)$$

と算出できる。落石が柵を突破した直後の速度は、

$$v_1 = \frac{X}{t} = \frac{10.78}{1.03} = 10.48m/s \quad (2)$$

となる。この時の落石の運動エネルギー：

$$E_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2} \times 1.03 \times 10.48^2 = 56.6kJ \quad (3)$$

b) 防護柵に衝突する前の落石エネルギーと速度

既設防護柵の吸収エネルギーを100kJ (E₂) と推定されると、防護柵に衝突する前の落石運動エネルギーは

$$E = E_1 + E_2 = 56.6 + 100 = 156.6kJ \quad (4)$$

となる。防護柵に衝突する前の落石速度は

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 156.6}{1.03}} = 17.4m/s \quad (5)$$

と推定することができる。



図-3 災害落石、発生源及び痕跡の写真

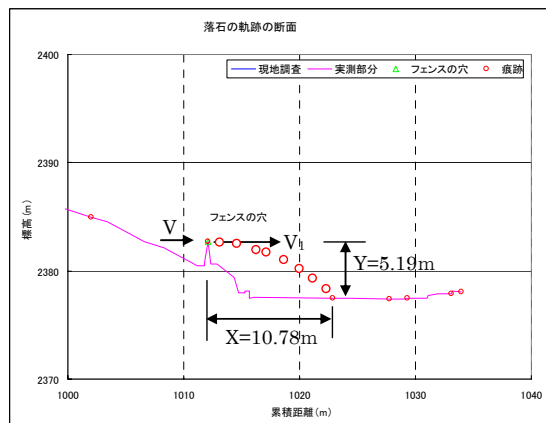


図-4 災害落石の軌跡

(3) 浮石・転石状況

図-5に転石の写真を示す。調査は、標高を25m毎に区切り、その範囲に存在する長径50cm以上のすべての転石について、長辺、中間辺、短辺の長さを調査した。また、駐車場に直接面する、標高2,425m以下については、今回の落石経路の位置する沢地形の外側であっても調査し、駐車場の位置する標高付近に、どの程度落石が到達しているか調査した。

図-2に転石・浮石、急崖などの分布状況を、図-6に転石の長辺の大きさによる標高毎の分布を示す。転石は急崖直下に最も集中分布し、移動距離が短く、大きさも比較的大きい(図-5)。長径50cm以上の転石は2081個であり、崖の直下にあるものを除くと1619個である。図-6は、転石の特徴を明確するため、縦軸を異なる範囲で示している。図-6から、斜面上の転石分布特徴が明確である。大きい転石ほど、数が少なく、斜面上部に分布する。一方、斜面下部になるほど、標高2650m以下は殆ど長径1m以下の転石となっている。1m以下の転石でも、斜面下部になるほど、標高2750m付近の180個(標高25m毎)から標高2400m付近の20個までに激減している。これらの分布状況から、今回の災害落石は極めて稀なケースであると推察できる。



図-5 転石の写真

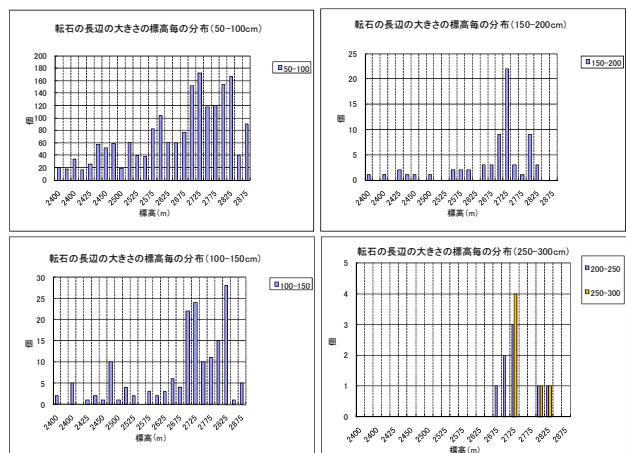


図-6 転石の長辺の大きさによる標高毎の分布 (1619 個)

3. 落石挙動の評価

「はじめに」に記述したように、合理的な落石対策は落石挙動をより正確に評価できる手法を用いる、また、適切に取り扱うことは必要である。ここで、合理的な手法の必要条件を考察してみる。必要条件の1つとしては、図-1に示すような検討流れで実施できることであろう。すなわち、①災害落石を再現して、調査地を代表できるパラメータを同定することと、②同定されたパラメータを用いて同定解析に使用した断面と落石と異なる条件に対して落石挙動を予測することである。ここに、①を満たす手法は多く存在するだろう、①から②まで展開することは大変重要な難題である。以下に、この難題を考察した上、実際に実施した同定解析と予測解析の結果を取りまとめる。

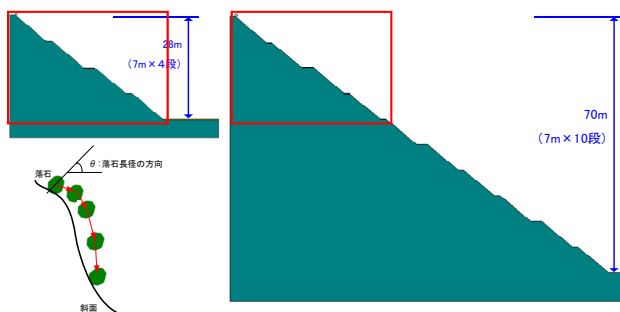
(1) 落石シミュレーション手法

落石シミュレーション手法は、馬らによる開発した不連続変形法（略称DDA）⁴⁾を用いた。この手法は、落石の運動エネルギー損失を摩擦による損失、衝突による損失及び植生による損失の3種類に分類し、最も損失の大きい衝突による損失については、衝突減衰係数を導入している。実際の切土法面で実施した落石実験に適用することにより、この係数の妥当性が検証されている。以下には、この手法を用いて、前述した同定解析から予測解析

に展開する際の難題を考察してみる。

ここでは、図-7に示す数値実験⁵⁾を想定した。高さの異なる2つの切土法面を想定し、左側法面は高さ28m（4×7m）で、右側法面は高さ70m（10×7m）である。解析は、各モデルについて落石の初期条件（長径方向）を変えて100回実施する。ここでは、低い法面を同定解析、高い法面を予測解析と想定する場合、図中の赤線で囲んでいる範囲内の落石挙動は差異が大きければ、前述の難題を解くことができないと言えるだろう。この数値実験を構想したのは、①今回の災害落石の落下高さが異例に高く、馬らが開発した手法はこれまでにこれほど高い斜面に適用したことがないこと、②実際の切土法面の落石実験が実施されており、低い法面の正解が分かっているからである。

図-8に数値実験の結果⁵⁾を示す。図中、落石軌跡、落石速度の平均値と標準偏差、落石跳躍量の平均値と標準偏差を示した。図に示すように、2モデルの速度平均値の差は1.8%以下、跳躍量平均値の差は4.4%以下であり、極めて小さな値を示す。これにより、同範囲内における同定解析と予測解析の結果は良好な一致性を示す。ここに、低いモデルの解析結果は正解であれば、高いモデルの下部における落石挙動は信頼性できると推察できる。ここでは、低い法面の解析結果は実法面の落石実験結果を再現している⁴⁾ことから、高い法面の数値実験で得られた法面下部における落石挙動は信頼性の高い値と考えられる。



解析は落石長径の方向にバラツキを与えて、100回実施

図-7 予測解析の可能性を検討するための数値実験⁵⁾

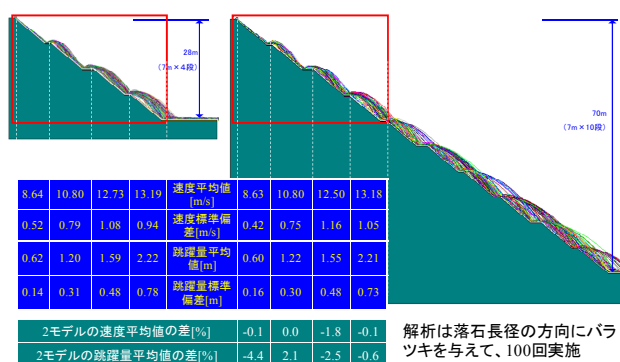


図-8 数値実験の結果⁵⁾

(2) 富士山災害落石の再現解析

図-9に再現解析に用いた解析モデルを示す。図に示すように、解析には、災害落石を図化して使用した。また、再現解析は、実際に確認した落石径路沿いの断面を用いた。解析は衝突減衰係数に0～1の1様乱数を与え、200回実施した。図-10に200回再現解析で得られた落石軌跡、落石の速度と水平距離の関係、落石跳躍量と水平距離との解析を示す。以下にこれをもって整理した擁壁付近に

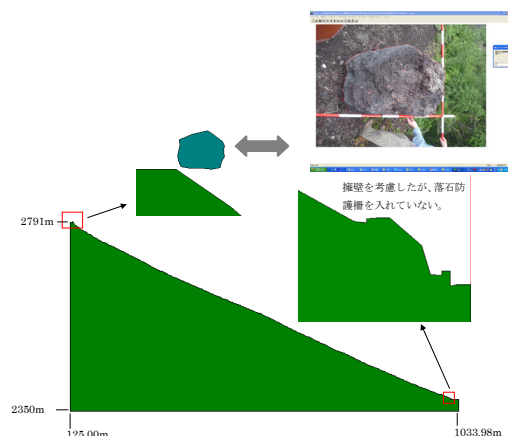


図-9 再現解析の解析モデル

おける落石速度と衝突減衰係数の関係を用いて、再現解析結果を考察する。

図-11に擁壁付近における落石速度と衝突減衰係数の関係を示す。

- a) 衝突減衰係数が小さいほど、擁壁付近における落石速度は大きくなる。
- b) 図中、赤線は防護柵に衝突する前の速度値(17.4m/s)を示す。これにより、衝突減衰係数は0.25以上と考えられる。
- c) 衝突減衰係数の上限値は既往資料⁹⁾から0.8と設定し

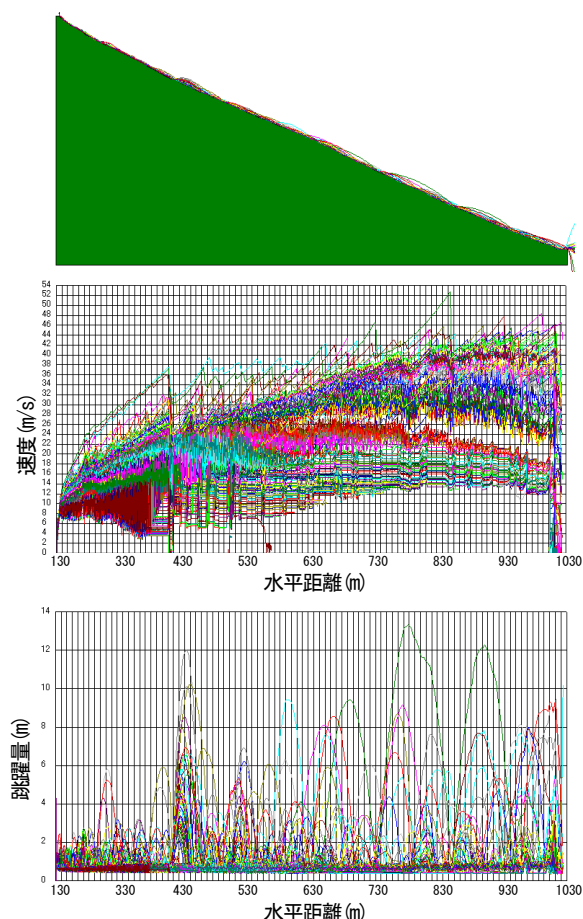


図-10 再現解析で得られた落石軌跡、落石速度と水平距離の関係、落石跳躍量と水平距離(200回)

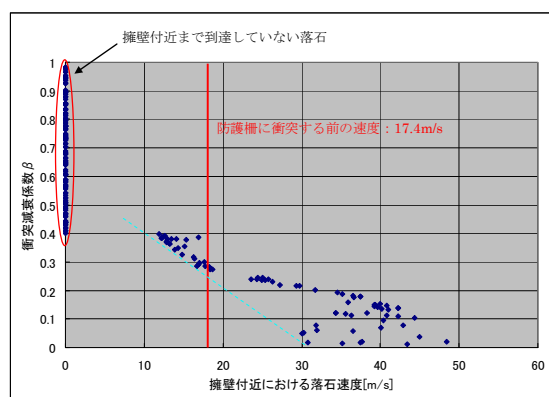


図-11 再現解析で得られた擁壁付近における落石速度と衝突減衰係数の関係

た。

上記より、衝突減衰係数0.25～0.8の解析は災害落石及び転石の分布状況を再現することができると判定した。

(3) 落石対策工設計のための予測解析

予測解析は、災害落石径路と2つの直線断面(図-2)の3断面、災害落石と頻度の高い落石の2種類落石を組み合わせた6解析モデルを実施した。各モデルに対して、衝突減衰係数に0.25～0.8の1様乱数を与え、200回実施した。これらの解析結果を用いて、落石対策工の設置位置を検討し、対策工設計のための落石の速度と跳躍量を求めた。

図-12に頻度の高い落石を用いた解析モデルを示す。頻度の高い落石とは、転石の大きさと形状を統計処理し、大きさと形状の頻度が最も高いものである³⁾。図-13に解析結果例を示す。落石速度は、斜面下部になるほど、大きくなり、バラツキも大きくなるが、標高約2,530m以降は、ほぼ一定となる。また、跳躍量も斜面の下部になるほど、バラツキが大きくなるが、速度と同様に、大きな変動がない。このことから、落石対策は、2,400～2,530mの間では、必要となる対策工規模が殆ど変わらないと考えられ、施工性から、斜面下部の方が有利である。災害落石を用いた予測解析は、頻度の高い落石よりやや大きい落石速度とやや小さい跳躍量を得たが、落石挙動と落下距離との関係は頻度の高い落石とほぼ同様な傾向が見られた。

(4) 落石対策工設計

予測解析から得られた落石の速度と跳躍量の分布及び落石対策検討位置における統計処理結果を用いて、斜面下部の地層状況及び景観などを総合考慮し、災害となった駐車場を利用し、エネルギー吸収能力と環境に配慮できる補強土防護擁壁工を採用した⁷⁾。図-14に富士山富士宮口新5合目における施工完了した落石対策工の写真を示す。対策工は、殆ど違和感がなく、富士山の山色及び既存対策工と良好な調和を示す。

4. まとめ

2009年7月に富士山富士宮口新5合目で発生した落石災害に対して実施した合理的な落石調査、落石シミュレーションによる落石挙動評価、自然調和を考慮した対策工設計をステップ毎に記述した。落石シミュレーションによる合理的な落石対策の条件と実際の流れを検討した。また、高さの異なる斜面を用いた数値実験を実施し、本文に用いた落石シミュレーション手法は、再現解析から予測解析まで正確に展開できることを検証した。

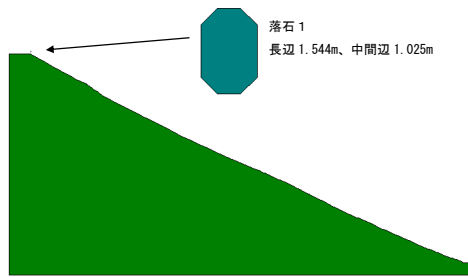


図-12 頻度の高い落石を用いた予測解析モデル

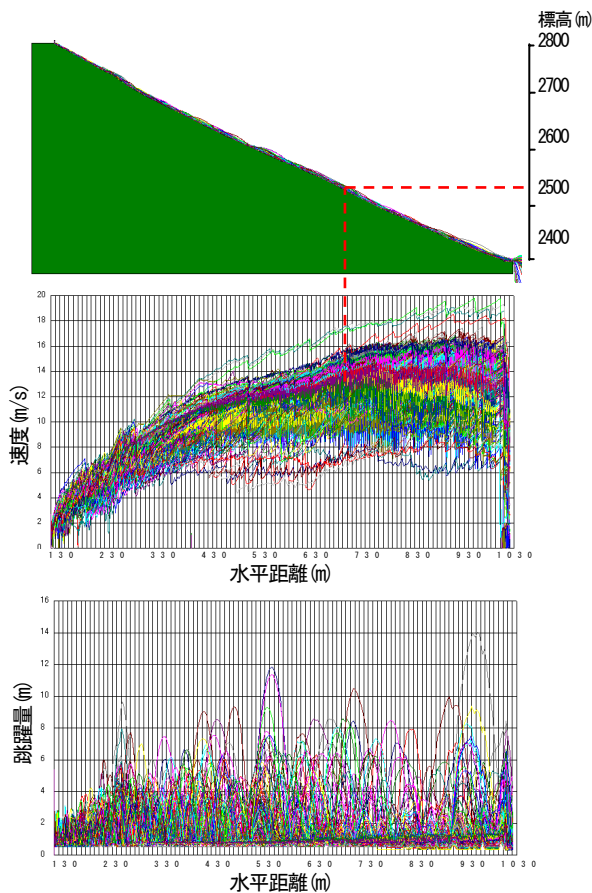


図-13 解析結果例 (頻度の高い落石, 直線断面)



図-14 新しく建設された補強土防護擁壁工の写真
(側面から, 2010年7月)

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，岩波書店，pp.10-20，2000.
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料－落石シミュレーション手法の調査研究資料，丸善，pp.1-2，2002.
- 3) 佐野 貴洋，飯田 温，本多 美仁，岡野 肇，本多 豊：富士山の大規模斜面における落石調査例，地盤工学会中部支部第19回 調査・設計・施工技術報告会，pp.56-63，2010年6月.
- 4) 馬 貴臣，松山 裕幸，西山 哲，大西 有三：落石シミュレーションのための解析手法の研究，土木学会論文集，Vol.63 No.3，pp.913-922，2007年9月.
- 5) 馬貴臣：DDAによる不連続性岩盤及び人工構造物の崩壊挙動の予測と評価，第17回不連続性岩盤解析実用化研究会，pp.82-113，2003年4月.
- 6) G.C. Ma, A. Nakanishi, S. Ueno, S. Mishima, S. Nishiyama, and Y. Ohnishi: Study on the applicability of rock fall simulation by using DDA, *Proc. of 3rd ARMS*, Kyoto, Japan, pp.1233-1238, 2004..
- 7) 福田 育広，伊藤修二，岸大二郎，馬貴臣，辻慎一郎：補強土技術を応用した斜面災害対策工の設計法と施工例，地盤工学会中部支部第19回 調査・設計・施工技術報告会，pp.38-43，2010年6月.

PRACTICAL ROCKFALL COUNTERMEASURE FOR FUJIYAMA ROCKFALL DISASTER BY USING ROCKFALL SIMULATION

Guichen MA, Takahiro SANO, Atsushi IIDA, Yoshihito HONDA,
Yutaka HONDA and Mitsuo MASUDA

On July 13 2009, roockfall disaster had occurred in Fujiyama and one person died by the disaster. Various estimates for the kinetic energy of the rockfall were reported after the disaster. By the survey, we have found the rock fall was falling from about 400m upward of the slope, the falling height and falling distance were extremely big. In order to implement the practical rockfall countermeasure, we have carried out the practical rockfall simulation and designed the rational rockfall countermeasure based on the detailed site investigations. In this paper, we studied the retional rockfall countermeasure by discused the site investigetion, analyses and design. Finally, introduced the countermeasure completed.