

1

3次元落石シミュレーションを用いた安全かつ効率的な落石対策工

近藤光広

KONDO Mitsuhiro

基礎地盤コンサルタンツ株式会社
中部支社/設計部/課長代理



1—はじめに

岐阜県御嵩町の次月地区は、未風化の花崗岩が山腹に多く露出している。当地区ではこの露岩を鬼岩と呼び、温泉宿泊施設もある景勝地となっている。次月地区を通る国道21号線は、土岐市と美濃加茂・可児市を繋ぐ重要な路線であり交通量も多い。この国道に沿った斜面でも巨大な未風化花崗岩が多く見られ、道路防災上の危険性が指摘されていた。

落下する岩塊が巨大な場合、一般的な対策工としては、石を現位置で固定する落石予防工が選定される。しかし予防工を実施する場合、景観の良い巨石ほどアンカー等で大規模に固定する必要があるが、景観を著しく損ねる可能性があった。また、不安定な巨石を現位置で固定する工事は危険性が高く、大規模な仮設を必要とし、対策費用が高価になると予測された。現地の状況を写真1～5に示す。

本稿では、これらの問題を解決するため3次元落石シミュレーション解析を実施し、地形を反映した落石経路と速度減衰を推定することで、高エネルギー吸収柵を効率的に配置し、予防工を大幅に減らすとともに、景勝地としての景観も維持できた事例を紹介する。



■写真1—斜面全景



■写真2—斜面下の道路状況



■写真3—最大浮石の状況



■写真4—斜面中の浮石状況1



■写真5—斜面中の浮石状況2

2—現場状況

当箇所は図1に示すように谷地形を呈する斜面であり、大きな落石供給源は2つの尾根に見られる大規模な露岩であるが、斜面上部には小規模な露岩も点在している。

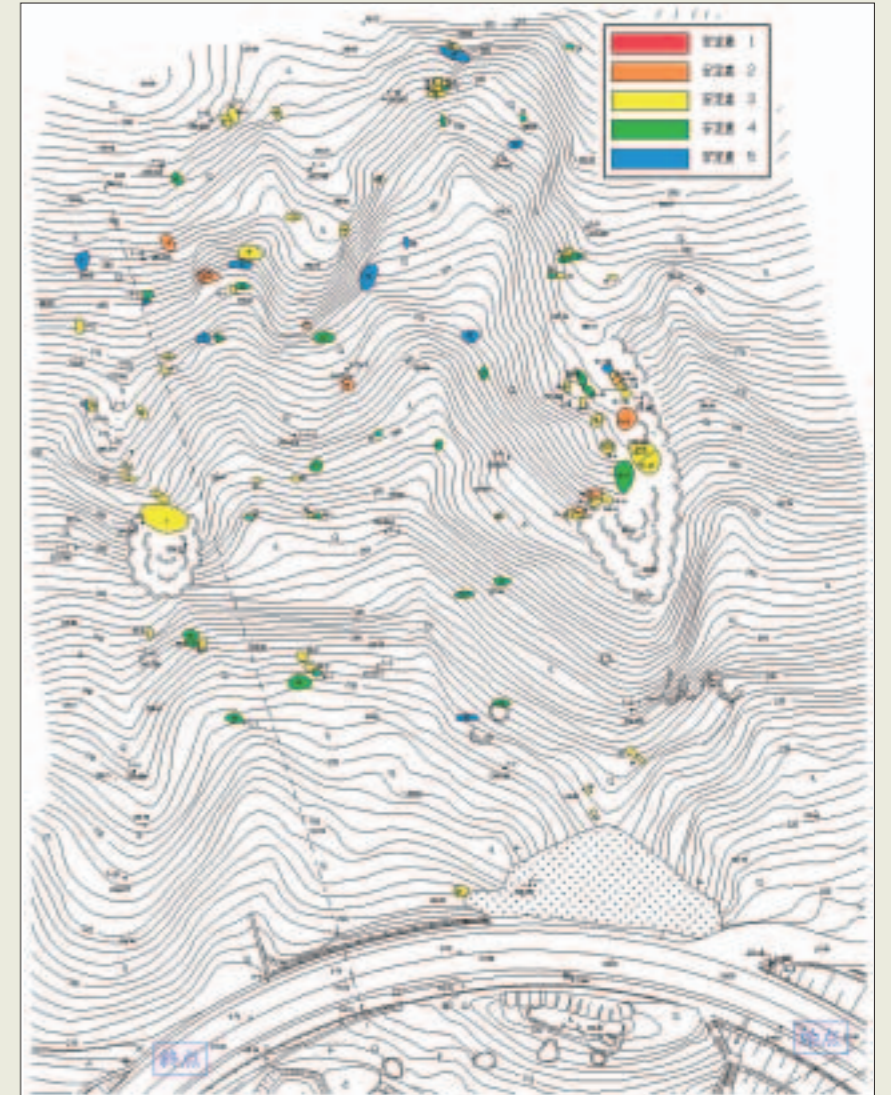
斜面の勾配は道路までの平均勾配で30°程度であり、斜面上部で約35°の急斜面であるが、道路近傍ほど緩やかな斜面となり、末端付近では約17°の緩勾配となる。

斜面は全体に崖錐が堆積しており、斜面末端の緩勾配部には多くの転石が見られ、中には大きく割れている転石もあることから、上部からの落石が末端部で停止したものと推測される。最大の石は終点側尾根に見られる浮石で、4.5×4.5×5.3mの巨石である。

3—3次元落石シミュレーション解析

近年ではパソコンの能力向上に伴い、多くの落石シミュレーション手法が開発・提案されており、その調査研究資料（『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—日本道路協会 平成14年4月）が出版されている。落石シミュレーションは、基本的に落石形状を反映せず単純な質点として考える質点系と、落石の形状を反映する非質点系の手法があり、各手法でも数種類の方法が試みられている。

非質点系にも個別要素法（DEM）や不連続変形法（DDA）等があるが、今回の落石シミュレーション解析は不連続変形法DDA（Discontinuous Deformation Analysis）を用いて行った。シミュレーションで使用する設定主要パラメータについて、前述の調査研究資料に記載される一般値と今回の採用値を表1に示す。



■図1—対策箇所平面図

今回の解析の「摩擦角」は斜面平均勾配から安息角相当として30°を設定し、「粘性係数」は当地の樹木植生が密では無いことから一般値範囲の安全側として0.2を使用した。また「速度エネルギー比」は2次元シミュレーションを実施し、落石が斜面末端付近に停止している現在の状況を再現できる値として0.2を採用している。

3次元シミュレーション解析は、乱数による試行で確率的に解を求め



■写真6—斜面下方の停止した落石

るモンテカルロ手法を用い、200回の試行計算を実施した。また解析に用いる浮石・転石は、標高と谷筋から10エリアに区分し、各エリアで最

■表1—設定主要パラメータ表

設定パラメータ	一般値	採用値	摘要
速度エネルギー比 γ	0.2~0.7	0.2 ²⁾	崖錐斜面
摩擦角 ϕ	30°	30°	平均斜面勾配
粘性係数	0.2~0.3	0.2 ³⁾	樹木植生有り

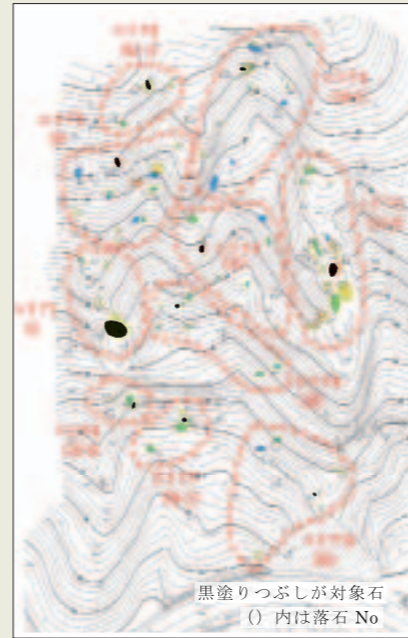
■表2—3次元落石シミュレーション結果

落石 エリア	落石 No.	形状 (m×m×m)	試行回数	道路到達 回数	道路到達 確率(%)	落石速度 (m/s)	跳躍高 (m)
1	1	4.5×4.5×5.3	200	45	22.5	5.6	0.62
2	8	2.5×2.0×1.8	200	9	4.5	4.5	0.46
3	16	2.0×3.0×2.0	200	28	14.0	6.1	0.46
4	18-1	2.5×2.4×1.8	200	3	1.5	4.9	0.53
5	19-2	5.0×2.0×5.0	200	15	7.5	5.8	0.86
6	35-2	0.8×1.3×1.0	200	22	11.0	6.0	0.52
7	39-2	2.0×1.4×1.6	200	1	0.5	3.9	0.48
8	42-1	2.5×2.5×1.0	200	6	3.0	5.0	0.38
9	45	1.4×2.0×1.0	200	13	6.5	5.1	0.36
10	56	1.2×1.6×0.7	200	51	25.5	6.0	0.55

*落石速度は最適防護工位置での速度

■表3—主要落石の落下エネルギー

落石 NO.	落石径			落石 速度 (m/s)	落石の 質量 m (kN)	落石の エネルギー E (kJ)
	横幅 (m)	高さ (m)	奥行 (m)			
1	4.50	4.50	5.30	5.6	1674.27	2947
19-1左	4.00	3.50	3.50	5.8	764.40	1443
19-2	5.00	5.00	2.00	5.8	780.00	1473
19-5	4.00	6.40	2.70	5.8	1078.27	2036
19-18	3.20	4.00	3.80	5.8	758.78	1433
33	4.00	4.00	4.00	5.1	998.40	1457



■図2—落石エリア区分

大の石を代表落石として評価している。図2に区分したエリアと解析に使用した浮石・転石の位置を示す。

表2は各エリアで算出された速度と跳躍量の結果である。ただし落石速度・跳躍量は道路沿いの法面を落ちる際に増加する部分は考慮せず、末端付近の緩傾斜部で発生する最大値を取っている。

この結果から当斜面における落石は、どのエリアから落下しても末端緩斜面付近で概ね6m/s以下の速度となり、最大跳躍量も50cm程度であることが予測された。この結果を用い、解析を実施しない他の石については、その石が属するエリアの解析で得られた落石速度によってエネルギー計算を実施した。表3に当箇所全域の中でも特に落石エネルギーが大きい上位6

個(115個中)を示す。

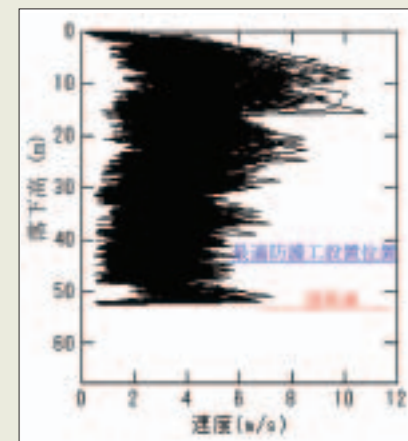
また、各エリアからの落石軌跡図の重複図を図4に示すが、当斜面の落石は大部分が2本の谷筋に集約し、特に道路から25~30m付近は軌跡が最も集約するとともに、落石速度も低い部分となる。

以上の結果から防護工を設置する場合には、図3に示す最適防護工位置が最も効率的と判断できる。

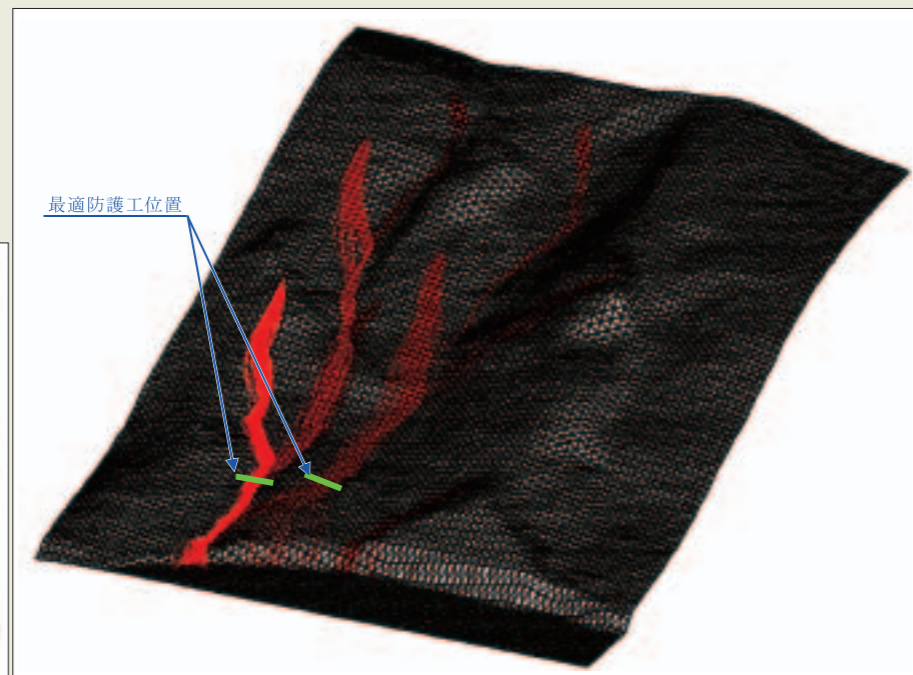
4—対策工の選定

近年、落石防護工は従来防護工法より大きな落石エネルギーを吸収できる高エネルギー吸収柵が多数開

発されている。この利用により予防工を大幅に減らすことは可能である



■図3—落石No.1の落下高・速度関係図



■図4—各エリアからの落石軌跡重複図

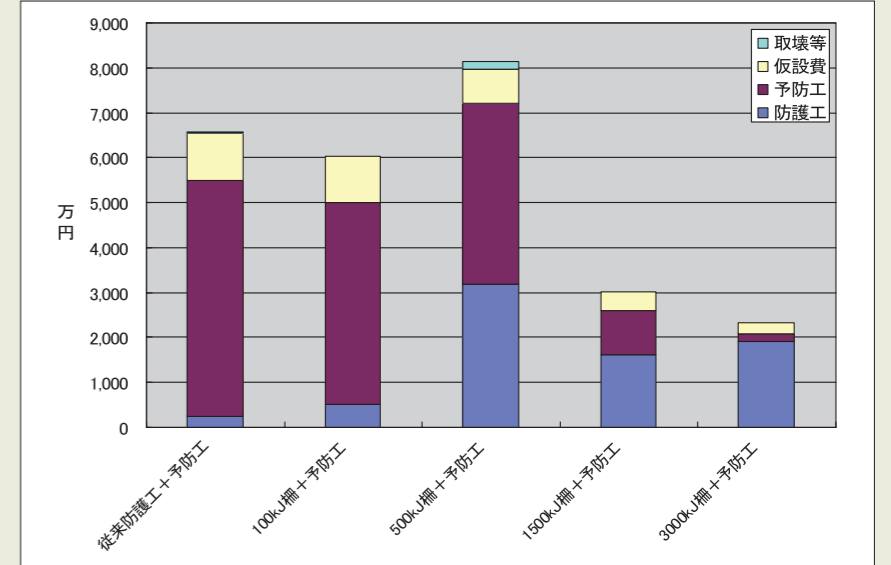
が、防護工は概ね可能吸収エネルギーに比例して高価となるため、「防護工+予防工」の組合せで経済性を評価する必要がある。そこで防護工の可能吸収エネルギーが小さい順に図5で示す5案を挙げて各案における経済性を評価した。

その結果、最大級の防護工である3,000kJ級の高エネルギー吸収柵を設置した場合が最も経済的となった。これは最大級の落石でも3,000kJ以下の落石エネルギーのため、予防工がほとんど必要無くなることと、防護工を落石経路が収束する位置へ限定的に設置することで延長を短く設定できるためである。設置完了した柵を写真7に示す。

5—おわりに

3次元落石シミュレーションを実施することで、施工性・経済性に有利な対策工を立案できた。また、景観に対しても当初予測した図6~7の景観シミュレーションに近い、走行車両に圧迫感が無く目立たない景観であることが確認できた。

シミュレーション技術の向上と高



■図5—対策工経済性比較グラフ

<参考文献>

- 1)「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—」日本道路協会 平成14年4月
- 2)「落石防護施設の設置に関する調査研究報告書」高速道路調査会 昭和49年2月
- 3)「落石調査データによる落石シミュレーションと新しい対策工法」講習会資料 平成10年9月24日

エネルギー吸収柵の登場で、落石対策は多様化が進んでおり、既往技術では実現が困難であった景観性にも今後は配慮が必要と考えられる。



■図6—バーチャルシミュレーション始点側道路景観



■写真8—設置完了後始点側道路からの景観



■図7—バーチャルシミュレーション終点側道路景観



■写真9—設置完了後終点側道路からの景観



■写真7—高エネルギー吸収柵設置完了後状況