

地形・岩質の特徴が落石発生機構に及ぼす影響について

高山国道事務所 増田 仁 正会員 ○田近真悟
岐阜国道事務所 正会員 小幡敏幸
岐阜大学 国際会員 沢田和秀 国際会員 八嶋 厚
中央復建コンサルタンツ(株) 国際会員 國眼 定

1. はじめに

高山国道事務所が管理する国道41号は急峻な山岳道路である。この山岳道路沿いに分布する地質は、主に日本最古の変成岩である「飛騨片麻岩」と、県内のほぼ三分の一を占める「濃飛流紋岩」から構成される。両者は形成年代や形成過程が異なるものの、一度落石が発生すると大きな災害の要因となる共通点を持つ。

平成25年7月7日には飛騨市神岡町で飛騨片麻岩による落石が、11月27日には下呂市門原町で濃飛流紋岩による落石が発生した。これらの落石現象を詳細に検討することにより、地形・地質の特徴から落石発生機構の差異を推定した。その結果、山岳を形成する地形・岩質の違いにより落石の発生機構が大きく異なることが判明した。また環境条件・岩質を踏まえた落石の数値解析を行うことで、落石対策便覧の適用条件について確認できた。これらを踏まえ、本報では、今後の高標高部における落石対策の課題を考察する。

2. 落石発生箇所と岩質の特徴

平成25年に高山国道事務所が管理する国道41号沿いで2つの落石が発生した。一つは神岡町船津（ふなづ）地区、もう一つは下呂市門原（かどはら）地区の落石である。これらはいずれも国道に落下したものの、幸運にも大きな人的被害には至らなかった。ただし、落下した石の大きさはいずれも径1m以上で、非常に大きなエネルギーをもって落下した。また斜面途中で落ち残った落石も多く見られ、万が一道路へ落下した場合には通行中の車両をはじめ、迂回路がないため周辺交通に多大な影響を与えることが懸念された。

岐阜県の地質分布図と対象とする2件の落石箇所を図-1に示す。神岡町船津地区には飛騨片麻岩および船津花崗岩が、下呂市門原地区には濃飛流紋岩の分布が見られる。

飛騨片麻岩類はその生成過程から船津花崗岩とともに岩片は非常に硬いことが特徴である。

濃飛流紋岩は、火山噴出物が積み重なってできた県内に広く分布する岩質である。この溶結凝灰岩の分布域では柱状節理が多く見られ、落石災害の構成要素であり岩石そのものが非常に硬質で割れにくい性質を有している。

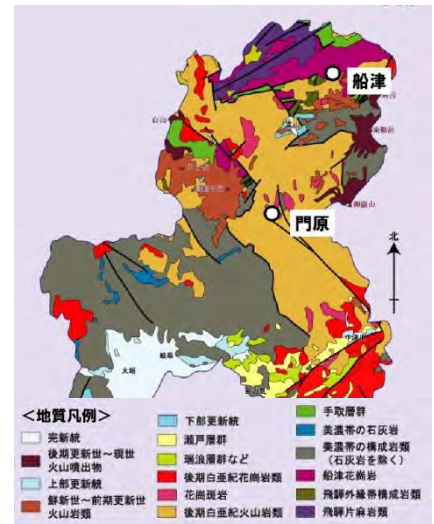


図-1 岐阜県の地質図¹⁾と落石箇所

3. 落石発生の概要

3.1 神岡町船津地区

神岡町船津地区では、平成25年7月7日に道路から比高400mもの高所から落石が発生し、そのまま割れずに約700m先の道路へ到達した（図-2）。落石経路の途中には、神岡鉄道跡地の幅30mの平地が存在していたが、それを跳躍して乗り越え、道路へ達したものである。

落石の大きさは、2.0m×1.5m×1.5mであり、斜面上部には、その抜け跡が明瞭に残っている。落石の発生源には、土砂や角礫状となった飛騨片麻岩の露頭が見られた。特徴的なことは、斜面を700mも転がり落

Rockfall mechanism based on geographical and geological conditions : H. Masuda and S.Tadika(Takayama Office of National Highways,MLIT),T.Obata(Gifu Office of National Highways,MLIT), K. Sawada and A.Yashima (Gifu University)and S. Kokugan(Chuo Fukken Consultants,Co.Ltd)

ちてきた落石が途中で割れずに道路へ達したことである。これは飛騨片麻岩が非常に硬質で割れにくい性質であることを示唆するものであり、岩質の特徴と合致する。

崩落した岩石でシュミットロックハンマにより一軸圧縮試験を求めたところ、 $qu=53.2MN/m^2$ であり、コンクリートの約3倍の強さを有していることが確認された。写真-1は落石現場から採取した岩石サンプルである。



写真-1 落石現場から採取した岩石サンプル

この落石の軌跡を再現することを目指して、落石シミュレーションを実施し、反発係数などの逆解析を行い、当地の落石に関する到達の可能性検討や落石エネルギーの予測を行った。



図-2 船津地区の落石経路 (断面図)

3.2 下呂市門原地区

下呂市門原地区では、平成25年11月27日に路肩に崩落石が認められた。この上部斜面を見ると、既存の落石防護柵に垂円形の2つの岩塊 (概径 2m×2.5m×3m : 40t, 2m×1.2m×3m : 20t) が、不安定な状態で停止していた (図-3)。

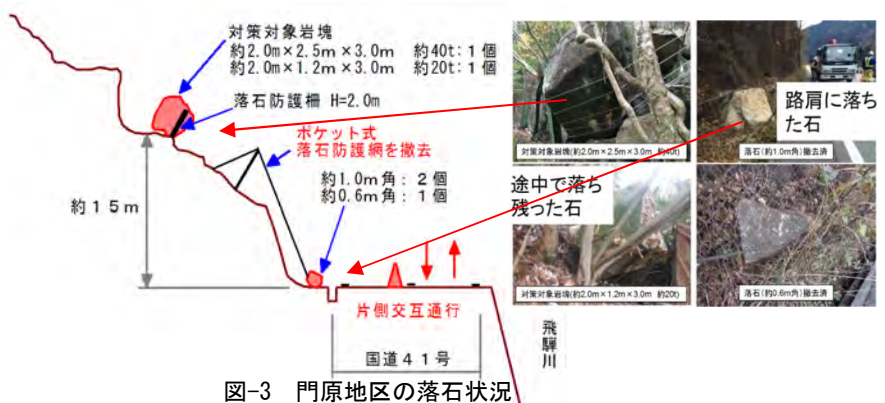


図-3 門原地区の落石状況

今回、不安定岩塊を早期に撤去するために国道41号を通行止めし、岩塊を道路上にワイヤーで引き落とした後小割りしての撤去作業を行った。この作業に当たり、動画及び静止画像を用いた落石の軌跡と、岩塊に設置した加速度計のデータ (図-4) を用いて落石エネルギーの予測を行った。

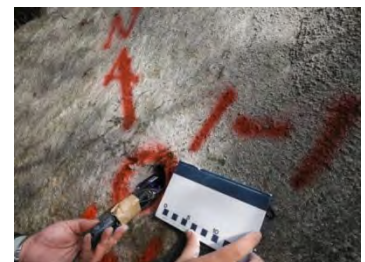
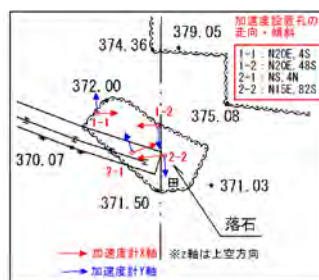


図-4 加速度計設置状況

4. 落石発生機構の推定

2つの落石箇所について、基盤地質の特徴や地形、現在までの浸食・崩壊などを考慮し、落石が発生した原因について推定した。

4.1 神岡町船津地区の落石機構の推定

現地踏査の結果、以下のように推定した(図-5)。

- ①降雨により流水・地下水が発生源背後に集まり、土砂部でパイピング現象を伴う崩壊が発生した。
- ②①の崩壊に伴い、その下部にある岩塊（飛騨片麻岩のブロック（2m×1.5m×1.5m））が崩落した。
- ③崩落した岩塊は飛騨片麻岩であり非常に硬質で、滑落途中で割れず斜面を転がった。



図-5 船津地区の落石原因の推定

4.2 下呂市門原地区の落石機構の推定

資料調査と現地踏査の結果、以下のように推定した(図-6)。

- ①濃飛流紋岩の鉛直節理の発生・進行によって抜け落ちが発生し、岩塊が分離した。
- ②分離した岩塊の根の部分は、永年の節理の進行や浸食により角礫状となった。
- ③キャップロックとなる根の角礫が自重を支えられなくなり、転倒した。

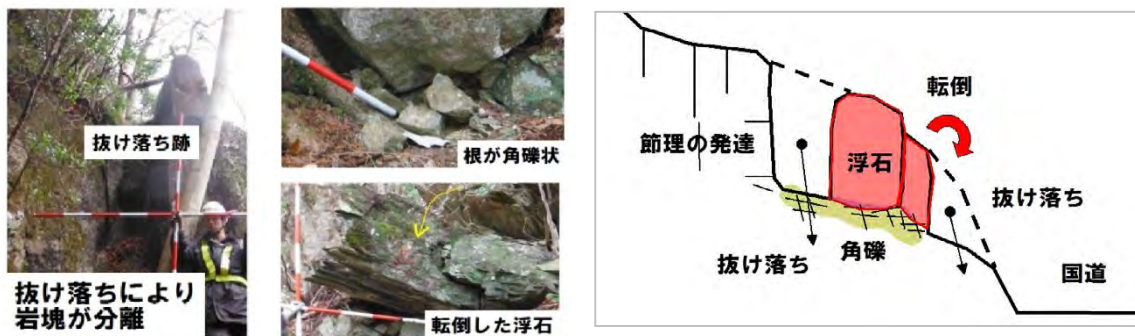


図-6 門原地区の落石原因の推定

5. 落石エネルギーに基づいた考察

船津地区では、崩落した軌跡をもとに落石シミュレーションを実施し、逆解析を行うことで、浮石や転石などの道路への到達可能性や道路へ達したときのエネルギーなどを求めた。

門原地区では、落石防護柵に寄りかかる2つの落石に加速度計を設置し、崩落時の挙動を解析した。

5.1 神岡町船津地区の落石シミュレーション

(1) 落石シミュレーション実施の必要性

船津地区において発生した落石の軌跡を確認した上で、斜面を落下する際の反発係数などを逆算し、「落下過程でどのようなエネルギーや速度が生じたか」、「斜面の規模や落石の大きさ、などによりどのような運動形態をとるか」を推定するために落石シミュレーションを実施した。落石の発生源が非常に高標高部（道路から400m程度上方）であることや、10tもの大きさの石が割れずに落ちてきたことなどから、落石対策便覧²⁾で示される跳躍高さや落石速度などと実現象が異なると予想され、これをシミュレーションで確認することとした。また、斜面には多くの不安定岩塊や転石が残存しており、これらが将来落下する危険性が高いため、この落下形態やエネルギーなどをシミュレーションで予測することも目的の一つである。

(2) 落石シミュレーションの実施方法と条件

落石対策便覧に関する参考資料³⁾に示されている質点系の落石シミュレーションを実施した。質点系のシミュレーションは、上記文献で紹介される以下①～⑥の6つの手法のうち、トロント大学の手法を用いた*。

- ①吉田らの手法・②古賀らの手法・③右城らの手法・④梶谷・小村らの手法・⑤コロラド州の手法 (CRSP)・⑥トロント大学の手法 (Rocfall)

※上記文献³⁾では、トロント大学の手法について、「下呂地区の実験結果との検証精度が高く (同文献 P370)、加えて適切なパラメータを設定することにより再現性が高い結果を得ることができた (同文献 P404)」と記載されており、当該現場の性質を反映できるものと考えた。

落石の条件としては、現地調査結果から得られた落石経路、石の重さ、落石の軌跡 (衝突位置と軌跡)、停止位置、などがあり、これら諸数値をもとにして地目別の反発係数を逆算した。反発係数を求めた地目は、露岩地、ガレ場、崖錐層、軌道敷とした。

(3) 落石発生箇所と逆算結果

以下の条件について地目毎の反発係数をトライアルにより決定し、シミュレーションを実施したところ、以下の反発係数 (表-1) を用いることで今回の落石の軌跡を再現できた (図-8 参照)。反発係数は、Stevens,1988⁴⁾の実験値 (表-2) を基準とし、地目別に変化させながら、実際の落石の軌跡と対応させた。以下の①～⑤は再現の条件である。①石重量 10 t、②発生高さ 780m (道路標高 400mの 380m 上方)、③断面形状 : LP (レーザープロファイラ) データより地形断面図作成、④途中の衝突痕 : 途中で礫に衝突し、樹木へ 2 箇所衝突を再現 (樹木の衝撃抵抗力を 10kJ と仮定*)、⑤軌道敷での衝突および停止 : 軌道敷で 3 回バウンドし道路際で停止

表-1 今回の逆算で得られた地目別反発係数

地目	垂直方法反発係数	接線方向反発係数
植生のある土壌	0.50	0.80
植生のある崖錐層	0.73	0.80
崖錐層	0.41	0.72
ガレ場	0.85	0.90
新鮮な硬質岩	0.95	0.99

表-2 Stevens(1988)による地目別反発係数の実験値

地目	垂直方法反発係数	接線方向反発係数
植生のある土壌	0.30～0.65	0.70～0.90
植生のある崖錐層	0.32～0.80	0.70～0.90
崖錐層	0.32～0.50	0.70～0.85
露出した基岩	0.35～0.75	0.80～0.95
アスファルト	0.40～0.85	0.80～0.99
新鮮な硬質岩	0.53～0.95	0.90～0.99

※樹木の衝撃吸収力は、鈴木ら⁵⁾による樹木の衝撃エネルギー吸収能の提案式(1)に現地の灌木の直径 $d=0.2m$ および幹高さ $L=5m$ を代入し、 $E_s=10kJ$ を得た。

$$E_s = 52.8 \times d^2 L \quad (kJ) \dots \dots \dots (1)$$

(4) 落下過程における速度や跳躍量算出結果 (図-9)

求められた最大速度は約 50m/s と算出された。落石対策便覧では、「高さ 40m を超えると、落石速度は一定値に達する傾向がある」とされており、最大でも 25m/s となっているが、今回のような高標高部では、それを大きく上回る速度となる可能性が高いと推定される。

求められた最大跳躍高さは約 9m となった。落石対策

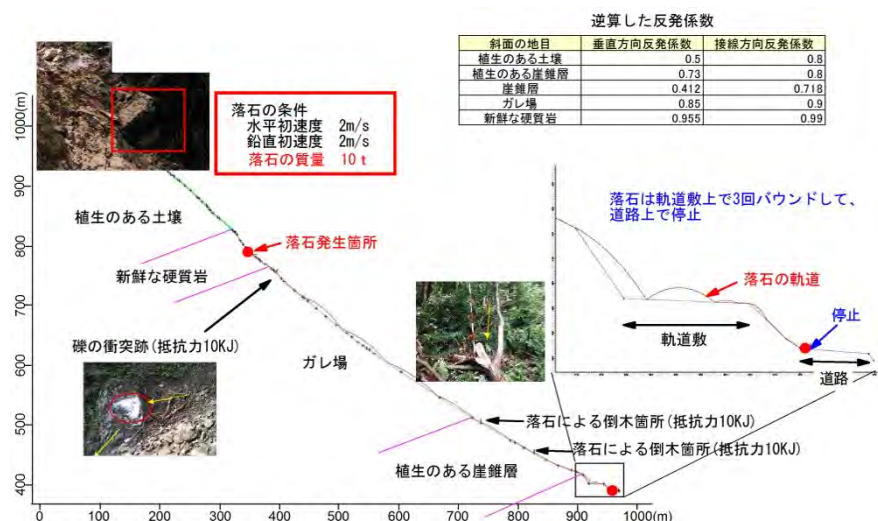


図-8 船津地区の落石シミュレーションの条件と逆算モデル図

便覧では、「凹凸の少ない斜面では跳躍量は2mを超えることは少ないが、凹凸の多い斜面では4~5mに達するものもある」とされている。

上記より、速度、跳躍高さとも落石対策便覧に示される最大速度および跳躍高さの上限の2倍以上を超えており、同便覧で扱える対象を大きく超えている現場であったものと考えられる。

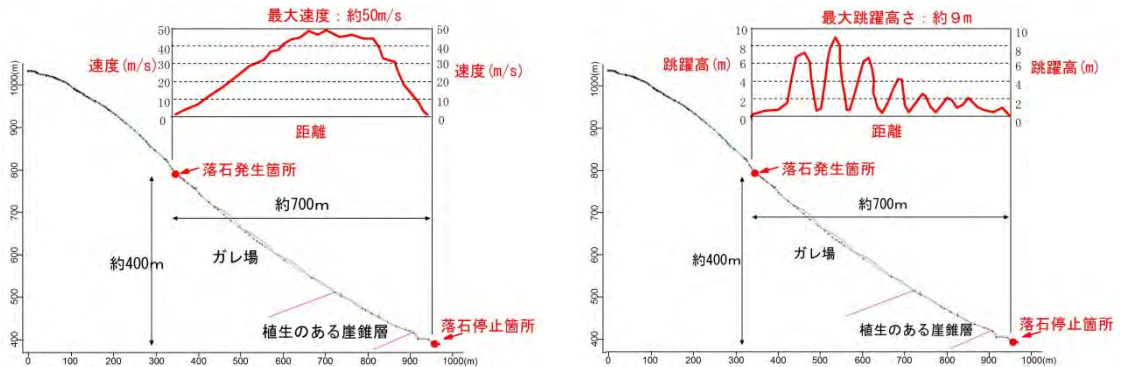


図-9 逆算による船津地区の速度分布（左）と跳躍高さ分布（右）

(5) 逆算した反発係数を用いた浮石の落石シミュレーションと考察

逆算した地目ごとの反発係数を用いて、船津地区周辺にある高標高部の浮石や転石などの落石エネルギーや到達距離などを予測した。この結果以下の事項がわかった。

① 落石の大きさにより到達距離が変わり、一辺が50cm以下の落石は斜面途中で停止する（図-10）。今回の落石は高標高部にあり、飛騨片麻岩のような硬質で割れにくい岩盤からなる落石は、斜面下まで達する可能性の高い50cm以上のものを抽出し、その対策を講じることが今後必要である。

② 径1mを超す落石のほとんどは道路へ到達し、最大となる落石エネルギーは42,000kJと非常に大きい。そのため対策にロックシェッド（耐用エネルギー1,000kJ）や高エネルギー吸収柵（耐用エネルギー3,000kJ）などを用いても耐えられないことがわかった（図-11）。

岩質が硬く、規模の大きな浮石・転石は、割れずに下まで落ちてくることが予想され、そのエネルギーは既存の対策工では対応できない。このため、周辺の高標高部で岩質が硬くて径の大きな落石源を調べるとともに、発生源対策を講じる必要がある。

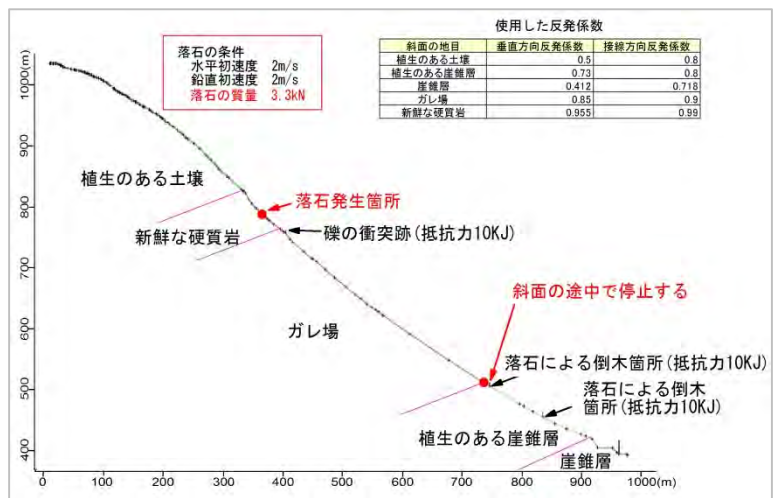


図-10 一辺50cmの礫を落下させた場合の軌跡図

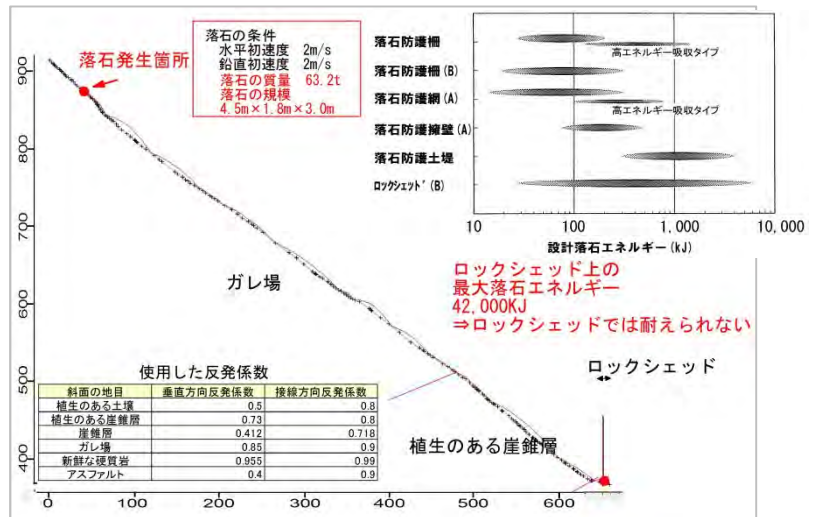


図-11 別地区で巨礫が落下した場合のエネルギー算出結果

5.2 下呂市門原の落石解析

門原地区では、事前に落石のエネルギーや衝撃力を推定し、安全に撤去できるための施工計画を立案した。実際の落石撤去時には、落とす岩塊に加速度計を設置し、回転、転がり、移動などの現象を分析した。ここで示す事前検討結果と、実際の挙動による解析の結果を比較することで、予測と実際の対比を試みた。

(1) 事前の解析・設計検討

- ① 巨大岩塊の道路までの落石エネルギー： $E=7821\text{kJ}$
 落石対策便覧 P19 に基づく計算（表-3）

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right) m \cdot g \cdot H \dots\dots\dots (2)$$

$$E = (1+0.1) \times (1-0.25/\tan 50^\circ) \times 60\text{t} \times 10\text{m/s}^2 \times 15\text{m}$$

$$= 0.869 \times 600 \times 15.0$$

$$= \underline{7,821(\text{kJ})}$$

- ② 巨大岩塊が道路に与える落石衝撃力： $P_h=7180\text{kN}$
 落石対策便覧 P187 に基づく計算（表-4）

$$P = 2.108 \cdot (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \cdot \alpha \dots\dots\dots (3)$$

$$P = 2.108 \times (60\text{ t} \times 10\text{ m/s}^2)^{2/3} \times (1000\text{kN/m}^2)^{2/5} \times$$

$$(9.44\text{m})^{3/5} \times 1.22$$

$$= 11,174(\text{kN})$$

同便覧 P188 斜面角度による補正式を用いて

$$P_h = P \cos \theta = 11,174 \times \cos 50^\circ$$

$$= \underline{7,180(\text{kN})}$$

- ③ 道路面における緩衝材の検討：落石衝撃力を吸収できる土のう厚さ

落石対策便覧 P189 ロックシェッドにおける緩衝材の作用面に与える力： $q=1,760\text{kN/m}^2$

衝撃力の作用面積 A：緩衝材の厚さを 2m とすると、土のう頂部から道路面まで 45° で荷重が分散すると考えると、 $A=2.0\text{m} \times 2 \times 1.0\text{m} = 4.0\text{m}^2$ となる。衝撃力により道路面へ与える反力 q は、

$$q = P_h \div A = 7,180\text{kN} \div 4.0\text{m}^2 = \underline{1,760(\text{kN/m}^2)}$$

道路面の地耐力は明確ではないが、道路面が片切道路であることから、道路直下は岩盤であると仮定し、 $q_a=2,000\text{kN/m}^2$ 程度有しているものとすれば、 $q_a > q$ となり、安定するものと考えられる。

以上より、道路の下に敷く土のうは、巨大岩塊の衝撃力を吸収するためには、厚さ 2 m 以上が必要であることとなったことから、高さ方向に 3 段設けることとした。

(2) 画像解析・加速度計解析結果

落下時の動画からの画像解析および岩塊に設置した加速度計による解析結果より、以下の事項が判明した。

- ① ワイヤーで引っ張る時点から落下までの動画撮影結果より時系列で画像を抽出した。この結果、図-12 のように岩塊の落下はワイヤーによる引張→すべり→転がり→衝突という 4 つのモードで構成されることがわかった。
- ② 実際の落石エネルギーの算定結果
 実際の落石の運動エネルギー E_k は、落石重量と落下速度の積により得られる ($E_k=1/2 \times m \times v^2$)。動画からの解析より、落石の落下平均速度： $v=6.3\text{m/s}$ (斜距離 $L=15.2\text{m}$ 、転がり始めてから衝突までの時間 $s=2.4\text{sec}$ より $v=15.2/2.4=6.3\text{m/s}$) となり、この速度と、岩塊よりサンプリングした単位体積重量： $\gamma=26.52\text{kN/m}^3$ 、落石の大きさ $V_0=15.0\text{m}^3$ から、落石運動エネルギー E_k は、7,894(kJ) を得た。
- ③ 予め 2 個の巨礫に 2 つずつ埋設した加速度計 (XYZ 成分) で得られたデータから、ワイヤーによる引張り→すべり→転がり (衝突と跳躍を繰り返す) →土のうに衝突、という挙動を加速度から把握することができた。図-13 には、代表的な 2-1 の加速度計 (Y 成分) の分析結果を示す。
- ④ 図-13 では、ワイヤーによる引張り移動した当初はすべり挙動をとり、その後転がり運動をし、大きく

表-3 門原地区落石エネルギー算出のためのパラメーター一覧

記号	パラメータ	決定値	決定根拠
E	落石エネルギー		
β	回転エネルギー係数	0.1	便覧P19より
μ	斜面の等価摩擦係数	0.25	0.05~0.35間で斜面の地目や立木による。崖錐斜面で立木ない場合は0.25(便覧P18)
θ	斜面勾配	50°	現況値
m	落石の重量	60t	40t+20t合算値
g	重力加速度	10m/s^2	
h	落石の落下高さ	15m	現況値

表-4 門原地区岩塊衝撃力算出のためのパラメーター一覧

記号	パラメータ	決定値	決定根拠
P	落石衝撃力		
m	落石の重量	60t	40t+20t合算値
g	重力加速度	10m/s^2	
λ	ラーメの定数	1000kN/m^2	実験値では砂層厚と落石径の場合は左値に近い(便覧P188)
H	換算落下高さ	9.44m	斜面を考慮した換算落下高
α	衝撃材の割増係数	1.22	$\sqrt{(T/D)}$, T:砂厚, D:落石径
θ	斜面勾配	50°	現況値

2度の衝突と跳躍した後に土のうに衝突したものと推定できる。これは、動画で確認した挙動と整合する。

⑤図-13 に示す加速度計で得られたデータから、長楕円形の岩塊は、短軸では転がりを、長軸では衝突と跳躍をしたものと推定される。

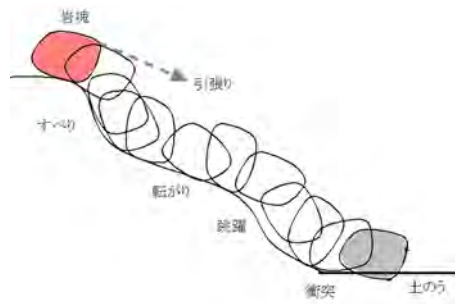


図-12 門原地区の岩塊の落下モード

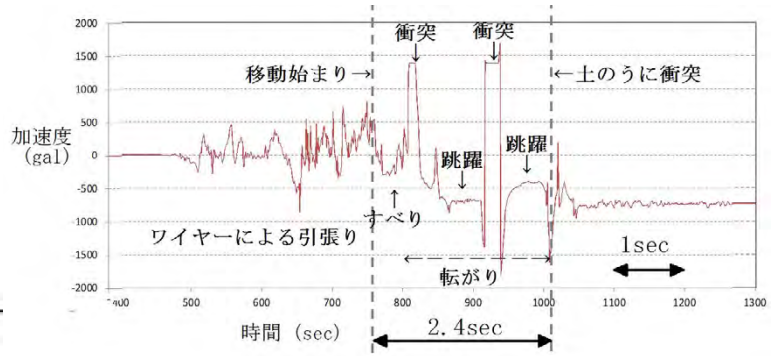


図-13 加速度計2-1の解析結果

(3) 予測と検証結果

- ①岩塊の落石エネルギーについては、5.2 で示した事前検討結果 ($E=7821\text{kJ}$) と現地で発生したと推定される結果 ($E_k=7894\text{kJ}$) とはほぼ同じであり、整合する。
- ②予想推定衝撃力に対して必要な砂の厚さは2mであり、実際には土のうを3段設置したところ、落石後は、上から2段目(厚さ約1.5m)までが破裂し、3段目は健全であったことから、事前検討によって設置した土のうは安全側の設計であり、妥当であったと考えられる。図-14 には土のうに衝突後の様子を示す。一部が土のうにめり込んでいることが見て取れる。



図-14 土のうへの衝突後の様子

(4) 既存の落石防護柵の評価

門原地区で発生した落石は、礫径は3m規模と大きいものの、その直下に既存の落石防護柵があったため、道路まで到達しない結果となった。この検証を行うため、既存施設の有無による違いを、落石シミュレーションによって評価した。

直下に落石防護柵があった場合、防護柵の可能吸収エネルギー(100kJ)より小さな落石エネルギー(80kJ)しか生じていないことが判明した。この理由は、落石源と対策工の距離が2.5mしか離れていないためであり、落石対策の基本概念として、発生源に近い箇所に比較的簡易な柵などの施設を設けることの必要性を示している。

図-15 には、岩塊の直下に落石防護柵がない場合とある場合(今回)の落石の軌跡図を示す。落石重量は約40tと非常に大きいものの、防護柵の位置が落石発生源に近接するため、非常に小さい衝突エネルギーとなり、落石が停止したことを裏付けている。一方、落石防護柵がない場合の検討では、道路に衝突するときには3,000kJ(3MJ)を超えるエネルギーで達していたものと推定されたため、通行車両があり、防護柵がない場合には大きな災害となった可能性が高い。



図-15 落石防護柵がある場合とない場合の施設効果検証結果

6. 対策について

今回検討対象とした落石災害2件について、落石発生機構および解析結果に基づき、現時点では以下のような対応策を実施している。

6.1 船津地区落石

- ・高標高部において、発生した落石と条件が酷似した箇所で一辺 50 cm を超す落石源をくまなく調べ、飛騨片麻岩に特有の落石の危険度を評価し、最も危険な箇所では緊急対策工事(発生源対策)を実施した。その結果、危険と評価される浮石数は、周辺に 96 ブロック、5,000 個を超え、総体積 14,000m³ が存在することが明らかとなった。
- ・発生源から道路までの落下高さは 100～500m であり、調査の結果、落石対策便覧で表現できる落石の挙動とは異なった。また、通常対策工のエネルギー吸収能力の範囲を超えている。
- ・特に危険度が高いと評価される浮石(図-16 に示す危険度 1)は 5 ブロック、個数で 329 個存在しており、これらに対し、緊急対策を講じた。
- ・これら緊急対策箇所を含め中長期的視野に立ち、トンネルやルート見直しなどの計画を行っている⁹⁾。







発生源の危険度	転石	浮石	安定性の評価
危険度 1	 木で停止	 完全に分離	近い将来必ず滑落すると考えられるもの
危険度 2	 急崖上で停止、または完全露出	 下部の浸食が進行	時期は予測できないが、いずれ滑落すると考えられるもの
危険度 3	 下部がやや緩傾斜または2/3以上が露出	 不安定な形状	滑落する可能性が大きいもの

図-16 転石・浮石の危険度(落石対策便覧P53に一部加筆)

6.2 門原地区落石

- ・節理沿いに生じるブロック化の箇所について、対象斜面で現地踏査を実施し、今回落石のあった条件と酷似する箇所の抽出を行うとともに、対策工計画を立案中である。
- ・濃液流紋岩の分布は非常に広範囲であり、全てを現地確認するのは困難であることから、予察的調査として、空中写真や航空レーザ計測を用いて高精度の危険度判定と現地調査を併行する予定である。

7. おわりに

今回生じた2件の落石は、道路際の落石災害としては共通している。しかしながら、地質が異なることにより発生のメカニズムが異なることや、発生比高が大きく異なることで落石の挙動にも大きな違いが見られることがわかった。落石跡だけを見るのではなく、俯瞰的に検討することの重要性を認識するとともに、既往の指針(落石対策便覧)の適用限界を知ることができた。今後は、落石における初動防止・発生源対策を用いることにより、落石発生後ではなく、「予測」して予防保全の観点で管理を行いたい。

参考文献

- 1) 岐阜の地学・よもやま話, <http://chigaku.ed.gifu-u.ac.jp/chigakuhp/html/KYO/chisitsu/gifunochigaku/>
- 2) 落石対策便覧, 日本道路協会, H12.6
- 3) 落石対策便覧に関する参考資料, 日本道路協会, H14.4
- 4) Warren D, Stevens, (1988), "ROCFALL: A TOOL FOR PROBABLISTIC ANALYSYS, DESIGN OF REMEDIAL MEASURES AND PREDICTION OF ROCKFALLS", A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science Gratitude Department of Civil Engineering University of Toronto .
- 5) 鈴木浩之・水山高久 (1987): 樹木の衝撃エネルギー吸収能, 砂防学会研究発表会
- 6) 例えば、中部地方整備局 道路部, 平成 25 年度第 3 回中部防災技術専門委員会資料, H25.10