

四国の急傾斜地における落石対策研究の最前線

The front line of the research on the rockfall prevention at the steep slope in Shikoku

右城 猛 (うしろ たけし)
(株)第一コンサルタンツ 代表取締役社長

加賀山肇 (かがやま はじめ)
日本プロテクト(株)代表取締役社長

矢田部龍一 (やたべ りゅういち)
愛媛大学大学院理工学研究科 教授

木下尚樹 (きのした なおき)
愛媛大学大学院理工学研究科 助教

1. はじめに

1963年に高知県須崎市の国道56号で落石が貨物自動車の運転助手席を直撃し、助手席の者が死亡した。これが、わが国で最初に道路管理瑕疵が問われることになった「高知落石事件」¹⁾である。

四国は地形が急峻で地質が脆弱であるため斜面崩壊や落石などの地盤災害が多い。

本稿では、四国における落石の特徴、落石の運動の予測に関する研究、落石防護工に関する研究の取り組みについて紹介する。

2. 四国における落石の特徴

四国の道路で、落石危険度が高い斜面を模式的に描くと図-1となる。道路際に切土法面があり、その上の緩斜面に崖錐性堆積物が存在し、さらに上部には切り立った崖がある。上方の崖部が崩壊あるいは崖部から剥離した岩塊が、斜面をバウンドしながら道路まで落下し、そこに運悪く自動車を通りかかったときに事故が発生している。

緩斜面には、地表面に浮き出して不安定そうに見える転石が多数存在するが、意外と安定している。上方の崖部から落下してきて停止したものなので、斜面崩壊等で地形が変化しない限り落石になる可能性は低い。

四国では過去20年間に落石による死亡事故が5件発生している。高知県道東洋安田線の北川村二股(1988年)、国道321号の大月町才角(1988年)、国道11号の鳴門市

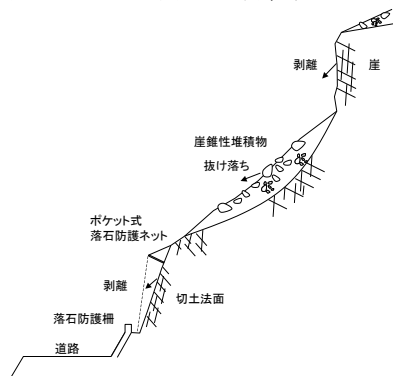


図-1 四国の落石危険斜面の模式図²⁾

北灘(1990年)、高知県道東洋安田線の北川村島(1996年)、国道195号那賀町(2006年)である。斜面はいずれも図-1のような形状をしており、斜面上方の崖部が落石の発生源になっている²⁾。

3. 落石の運動の予測に関する実験的研究

四国では落石の運動機構の解明や運動の予測を目的とした落石実験が積極的に進められてきた。建設省(現・国土交通省)土木研究所と四国技術事務所による高松市牟礼町の切土斜面での実験(1980年)、四国建設コンサルタント(株)による鳴門市の採石場での実験(1983年)、(株)第一コンサルタンツによる四万十市西土佐のヒノキ林内での実験(2001年)、国土交通省四国地方整備局四国技術事務所による愛媛県土居町の自然斜面および切土斜面での実験(2003年)³⁾である。

物理学の教科書では、剛体の運動は、すべり、転がり、飛行に分類されているが、落石の運動は図-2のように衝突と飛行を繰り返すバウンドが主体的である。

図-3は土居町の自然斜面でコンクリートの立方体を落下させたときの軌跡と並進速度、逆算等価摩擦係数を示している。飛行中は重力加速度によって加速されるが、斜面へ衝突すると減速する。減速の程度は、斜面に衝突する入射角に大きく影響される。垂直に近い角度で斜面に衝突すると速度減衰は大きくなる³⁾。

この実験では、落下高42m付近で最大速度20m/sが出現した後、速度が0になっている。落下高42m付近が平坦になっているためである。この地点が急な崖になっていたなら、落石は着地することなく飛行を続けるので速度はさらに伸びたはずである。



図-2 落石の運動⁴⁾

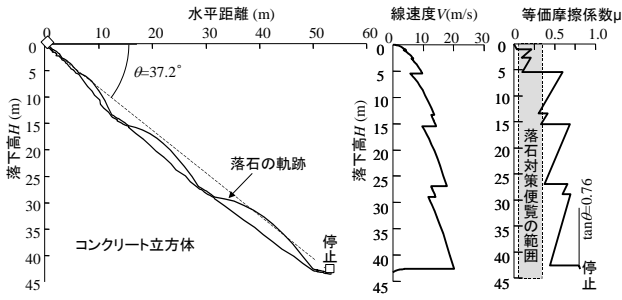


図-3 土居町の自然斜面における落石実験結果⁴⁾

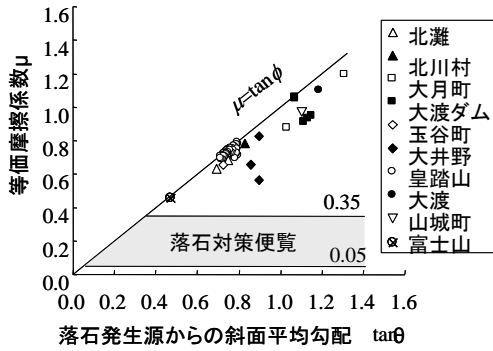


図-4 斜面の平均勾配と等価摩擦係数の関係²⁾

落石をすべり運動と見なし、重力加速度を g 、摩擦係数を μ とすれば、落下高 H の速度 V は式(1)で表される。

$$V = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right)} \dots\dots\dots (1)$$

変形すると、式(2)となる。

$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right) \tan\theta \dots\dots\dots (2)$$

右城は、落石災害斜面の痕跡から落石の速度を推定し、それから逆算された等価摩擦係数 μ と落石発生源から μ を算出した地点までの斜面の平均勾配 $\tan\theta$ の関係を図-4のように整理している。 μ と $\tan\theta$ が等しくなるラインは、落石が停止するラインである。

4. 高性能型落石防護ネットの研究開発

ポケット式落石防護ネットは、斜面に3m間隔で支柱を立ててネットの上部にポケットと呼ばれる開口を設け、そこから入った落石がネットに衝突することで落石の持つエネルギーを吸収させる仕組みになっている。近年では、支柱間隔を最大30mまで拡げて沢地形への設置を可能にすると共に、ワイヤロープを密に配置してネットの剛性を高めた落石防護ネットも開発されているが、さらにエネルギー吸収性能を高め、経済性と安全性に優れた高性能型落石防護ネットの研究開発が望まれていた。

このニーズに応えるため、地盤工学会四国支部を中心とした産官学が連携し、緩衝金具を装着した新しいタイプの落石防護ネット「ロングスパン」を開発した⁵⁾。

4.1 ロングスパンの構造概要と特徴

ロングスパンの構造を図-5、図-6に示す。エネルギー吸収性能や経済性を高めるため以下の工夫をしている。

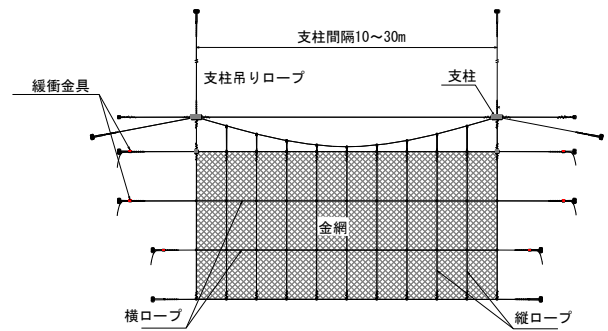


図-5 ロングスパン正面図⁵⁾

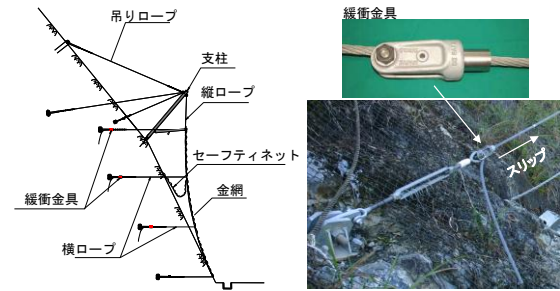


図-6 ロングスパン側面図と緩衝金具⁵⁾

(1) 支柱間隔は最大30m

従来のポケット式落石防護ネットは、支柱を3m間隔で複数個設置しているが、ロングスパンは最大30m離して設置できるので、落石の経路となる沢部を避けて設置することで、落石の直撃を免れることができる。また、背後に大きなポケットを確保できるので、落石がネットを飛び越える恐れがない。

(2) 緩衝金具を装着

従来のポケット式落石防護ネットは、ワイヤロープの伸びとネットの変形で落石の運動エネルギーを吸収する構造になっているが、落石が衝突すると過大な衝撃力が発生し、ロープを破断させたり、ロープを地山に固定するアンカーボルトを破断させたりする恐れがある。

ロングスパンには横ロープに緩衝金具を装着しており、ロープ張力があらかじめ設定した大きさに達すると、その張力を保ったまま金具内をロープがスリップする仕組みにしている。このため、過大な衝撃力が発生することがなく、大きなエネルギーを吸収できる。

4.2 ロングスパンの性能確認実験

ポケット式落石防護ネットが高知県の土木技師・田中忠夫によって考案されたのは、昭和40年代のはじめである。以来、改良が加えられてきたものの実験による検証は行われていない。

そこで、実物大のロングスパンを架設し、コンクリート塊の重錘を衝突させる実験を10回行った⁵⁾。

(1) 実験装置と実験の方法

実験場所は南国市岡豊町の田中工業(株)の資材置き場である。図-7に示すようにH形鋼で作ったレールを斜面に傾斜角45度で設置し、レール下端の前方にロングスパンを架設した。ロングスパンの寸法は、高さは10m、支柱間隔は第1回~第6回までが15m、第7回~第10回

が30mである。縦ロープの間隔は第1回と第2回が従来のポケット式と同じ1.5m, 第3回以降は3mとした。横ロープの間隔は第1回から第7回までが従来のポケット式と同じ5m, 第8回以降は2.5mとした。第3回以降の実験では、横ロープの端部に緩衝金具を装着し、張力が50kNに達した時点で緩衝金具の中を横ロープがスリップする仕組みにした。

実験に用いた重錘は、0.5～2.1tの5種類。0.5t, 0.7t, 1.0tの重錘はガスボンベの中にコンクリートを充填して砲弾形に製作した。2.0tと2.1tの重錘は、0.7tと1.0tの重錘を鉄筋コンクリートで包み込み球形とした。

重錘の底面には車輪を取り付け、落差20mでレール上を降下させ、16.7～19.5m/sの速度でロングスパンのネットに衝突させた。

(2) 実験結果

10回の実験で以下のことが明らかになった⁵⁾。

①重錘をネットに衝突させると大きな衝撃力が発生する。ネットの破損を防ぐには、エネルギーの検討だけでは不

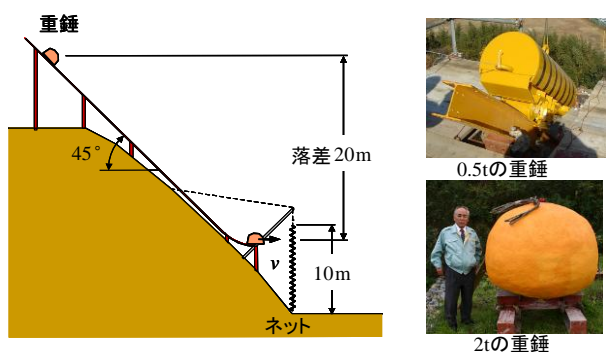


図-7 ロングスパンの重錘衝突実験⁵⁾



図-8 1.0tの重錘を衝突させたときのネットの変形⁵⁾



図-9 2.1tの重錘を速度19.5m/sで衝突させた様子。落石エネルギーは400kJ(第3回目公開実験2008年12月8日)⁵⁾

十分で、衝撃力に対する検討が必要である。緩衝金具を装着せずに行った第2回目の実験で、重錘の運動エネルギーが70kJと小さかったにも関わらずアンカーボルトが破断した。

②重錘が衝突すると、図-8に見られるようにネットは大きく変形する。第1回目の実験によるネットの最大変位量は3.3mであった。変位を抑制するには、横ロープ間隔を狭くすることや、図-6に示したセーフティネットが有効である。

③横ロープに緩衝金具を装着すると、ワイヤロープやアンカーボルトの破断を防止できる。

④ネットに穴が開くことがあった。重錘がネットに衝突した際、重錘の底面に取り付けた車輪が高速回転してネットを切り裂くのが原因であった。

⑤ワイヤロープの端部の固定に「巻き付けグリップ」を使用することがあるが、衝撃に弱い。第7回目の実験の際、メーカーが保証する荷重の約1/2の張力で横ロープが引き抜けた。

⑥落石がネットの裾から道路に転がり出すのを防ぐには、ネットの前方に落石防護柵を設置するか、セーフティネットを取り付けるなどの工夫が必要である。

⑦ロングスパンに2.1tの重錘が速度19.5m/sで衝突しても、金網に塑性変形が残るだけで、ワイヤロープや支柱に損傷は生じないことと、400kJまでのエネルギーを吸収できることを確認できた。横ロープに緩衝金具を取り付けることで、ポケット式落石防護ネットの耐衝撃性能とエネルギー吸収性能を大幅に向上させることができた。

2.3 これまでの成果

ロングスパンは、新技術情報提供システムNETISに登録され、2011年11月時点で21件(14000m²)の施工が完了している。平成22年度の第12回国土技術開発賞では、国土交通大臣表彰である地域貢献技術賞を受賞した。

3. 落石防護柵基礎の合理的設計法に関する研究

落石防護柵基礎の設計では、支柱の降伏荷重を静的に作用させて、転倒や滑動の安定性を照査する手法が採られているが、落石荷重は極めて短い時間だけ作用する衝撃力であるので、このような設計をすると過大になる。

四国地方整備局四国技術事務所では、合理的な設計法の確立を目的に、図-10に示す装置で質量0.47tの重錘を防護柵に衝突させる実験を行っている。実験結果の一例を図-11に示す。この実験から、下記の点が明らかになっている⁶⁾。

①重錘が防護柵に衝突するときの衝撃力波形は、正規分布に似た形をしている。速度が速いほど衝撃力は大きくなる。重錘の衝突速度が同じでも基礎が大きい場合、あるいは基礎底面がアンカーで地盤に固定されていると衝撃力は大きくなる。

②衝撃力による転倒モーメントが基礎自重による抵抗モーメントを超えると、基礎はつま先を中心に回転運動を始める。転倒モーメントが抵抗モーメントより大きい間

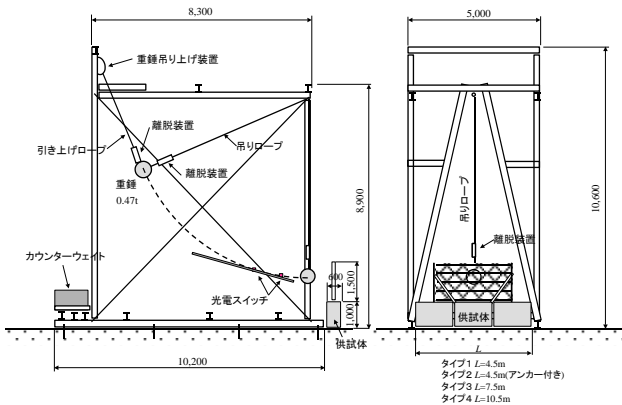


図-10 落石防護柵の重錘衝突実験装置^{4), 6)}

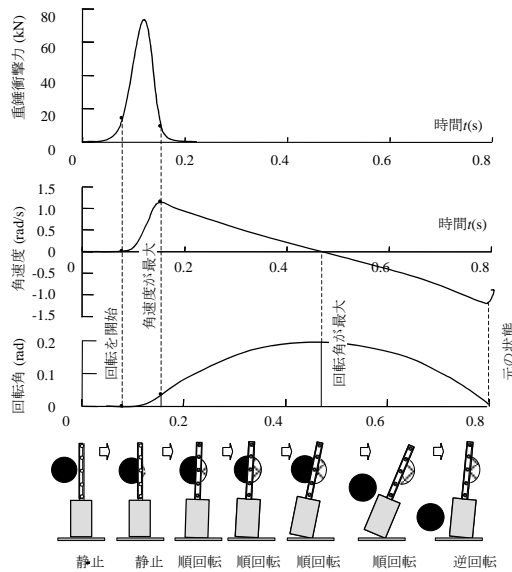


図-11 防護柵基礎の重錘衝突時の応答⁴⁾

は、角速度は加速され増大する。衝撃力が低下して転倒モーメントが抵抗モーメント以下になれば、角速度は減少するが、回転角は角速度が0になるまで増加する。

③重錘から基礎に伝達されたエネルギーが基礎の重心を上昇させる仕事に全て費やされた時点で基礎の回転運動は停止する。基礎に伝達されたエネルギーは、位置エネルギーに変わり、位置エネルギーは、次には逆回りの回転運動エネルギーとなる。

④基礎自重による抵抗モーメントが衝撃力による転倒モーメントより大きい(転倒の安全率が1.0より大)と、基礎は静止を保つ。転倒の安全率が小さいほど基礎の回転角は大きくなるが、基礎の重心が回転中心より前に出なければ逆回転して元の状態に戻るため前方に転倒することはない。

⑤現行の設計では、基礎の有効抵抗長を壁高の4倍としているが、破壊しないだけの強度を有していれば基礎全長が有効に抵抗する。

4. 既設防護柵の性能向上に関する研究

維持管理の時代に入り、既存の施設を有効活用することが、わが国の重要な課題になっている。



図-12 落石防護柵の実験⁷⁾

筆者らは、既存の落石防護柵の柵端金具を、緩衝機能を備えた金具に取替えることで、既設の落石防護柵の耐衝撃性能やエネルギー吸収性能を大幅に向上させるシステムの開発に取り組んでいる。

図-12は、可能吸収エネルギーが40kJ程度の既存防護柵の柵端金具を取替えて、2tの重錘を速度10m/sで衝突させた実験である。支柱は座屈変形したが、100kJの運動エネルギーの重錘を見事に受け止めることができた⁷⁾。

5. あとがき

1963年の高知落石事件を契機に落石対策が積極的に行われてきたが、落石危険箇所が広範囲に存在することに加え、斜面風化による危険箇所の増加で落石対策が追いつかない状況にある。そうした中、少子高齢化、人口減少といった社会構造の変化が急速に進み、落石対策に充当できる予算は益々厳しくなっている。

落石に対する安全性を高めてゆくには、落石の発生域、発生要因を特定する調査技術、落石の落下経路、速度の予測技術、落石の危険度を事故の頻度と影響度の観点から合理的に評価する手法、エネルギー吸収性能や耐衝撃性能に優れたコストパフォーマンスの高い落石防護工の技術開発を積極的に進める以外にない。

参考文献

- 1) 道路管理瑕疵研究会編：道路管理瑕疵判例要旨集，ぎょうせい，pp.189～191，1992.
- 2) 右城猛，筒井秀樹，加賀山肇：落石の運動特性と現行の運動予測法の問題点，第5回地盤と環境に関するシンポジウム，徳島県地盤工学研究会，2009.
- 3) 右城猛，楠本雅博，篠原昌二，木下賢治：落石の運動機構に関する実験的研究，土木学会論文集F，Vol.62.N02，pp377～pp386，2006.
- 4) 地盤災害研究委員会落石対策研究会：落石対策Q&A，地盤工学会四国支部，2009.
- 5) 右城猛，西岡南海男，筒井秀樹，加賀山肇，田中登志夫，矢田部龍一，木下尚樹：エネルギー吸収金具を付けた落石防護ネットの開発，地盤工学会四国支部50周年記念誌「50年の歩み」，地盤工学会四国支部，2009.
- 6) 右城猛，篠原昌二，松山哲也：落石防護柵の重錘衝突実験，第26回日本道路会議論文集，2005.
- 7) 加賀山肇，右城猛，筒井秀樹，田中登志夫：落石防護柵用柵端金具の研究開発，平成22年度技術研究発表会，地盤工学会四国支部，2009.