

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。

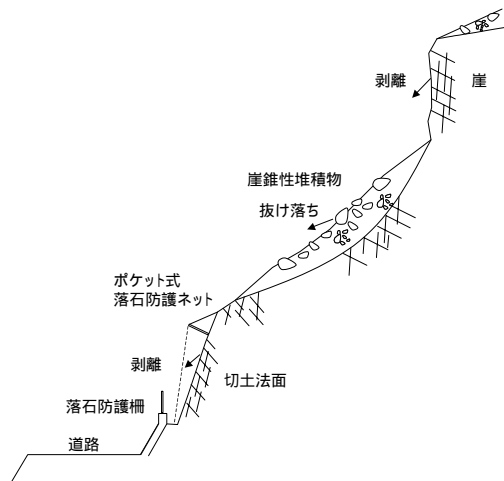


図-1 四国の落石危険斜面の模式図²⁾

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)、国道321号の大月町才角(1988)、国道11号の鳴門市北灘(1990)、高知県道東洋安田線の北川村島(1996)、国道195号那賀町(2006)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。

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)⁴⁾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⁴⁾。

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



図-2 落石の運動³⁾

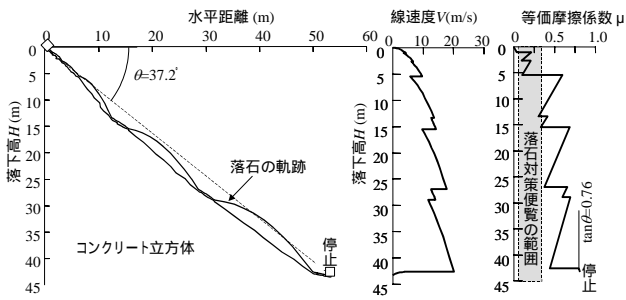


図 - 2 土居町の自然斜面における落石実験結果⁴⁾

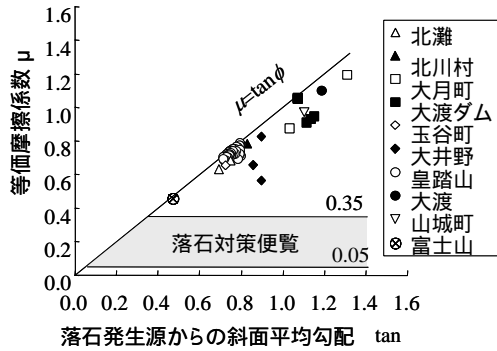


図 - 4 斜面の平均勾配と等価摩擦係数の関係²⁾

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大きくなるはずである。

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 の関係を図 - 4 のように整理している。 μ と \tan 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 まで広げて沢地形への設置を可能にすると共に、ワイヤローブ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²⁾。

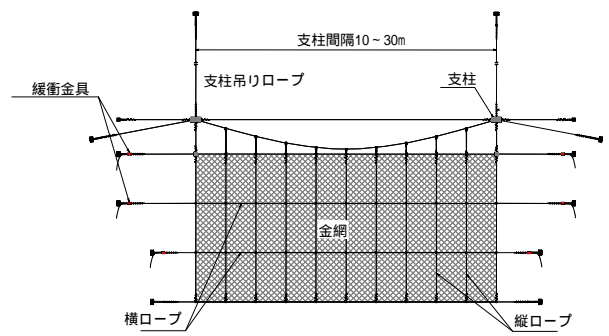


図 - 5 ロングスパン正面図²⁾

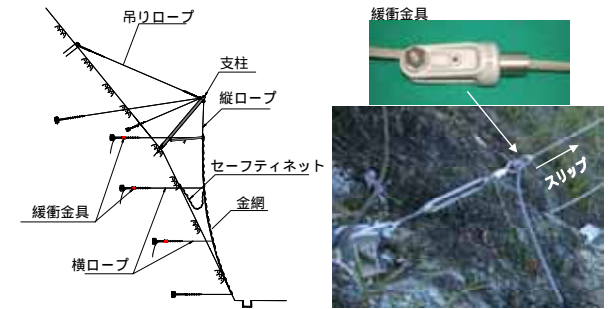


図 - 6 ロングスパン側面図と緩衝金具²⁾

2.1 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。

(1) 支柱の位置は両端のみ

従来のポケット式落石防護ネットは、3m 間隔で複数個の支柱を設置しているが、ロングスパンの支柱は両端のみである。落石の経路となる沢部を避けるなど地形に応じて、10~30m の間隔で設置でき、落石が支柱を直撃したりネットを飛び越えたりする恐れがない。

(2) 緩衝金具を装着

従来のポケット式落石防護ネットは、ワイヤローブ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、ローブを破断させたり、ローブ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ブに緩衝金具を装着してあり、ローブ張力があらかじめ設定したある大きさに達すると、その張力を保ったまま金具内をローブがスリップする仕組みにしているため、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。

2.2 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²⁾。

(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。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。

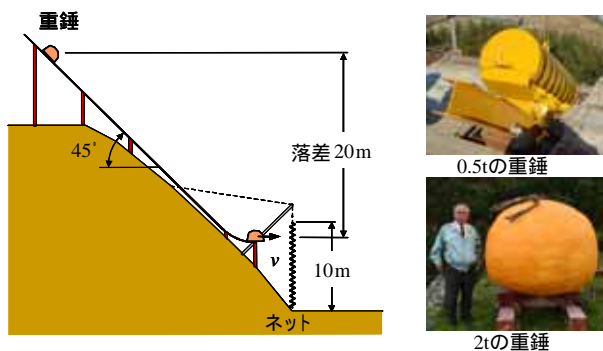


図 - 7 ロングスパンの重錘衝突実験²⁾



図 - 8 1.0t の重錘を衝突させたときのネットの変形²⁾



図 - 9 2.1t の重錘を速度 19.5m/s で衝突。落石エネルギーは 400kJ (第 3 回目公開実験 2008 年 12 月 8 日)²⁾

(4) 実験結果

10 回の実験で以下のことが明らかになった²⁾。

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。

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。

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。

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。

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。

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。

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⁵⁾。

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

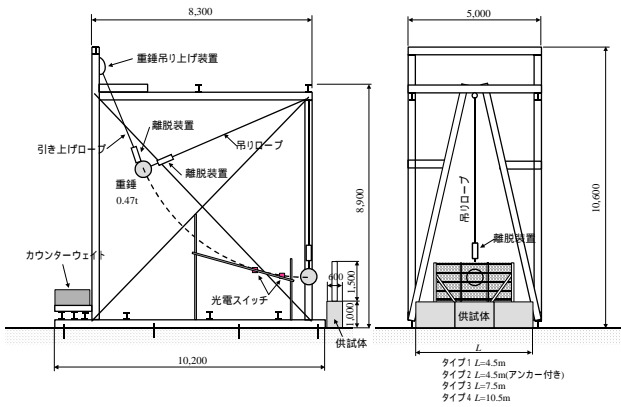


図 - 10 落石防護柵の重錘衝突実験装置^{3),5)}

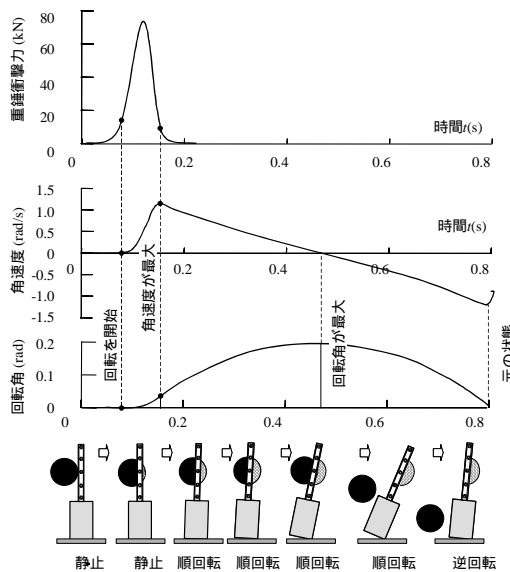


図 - 11 防護柵基礎の重錘衝突時の応答³⁾

衝撃力は大きくなる。

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。

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。

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から前に出なけ



図 - 12 落石防護柵の実験⁶⁾

れば逆回転して元の状態に戻るなので、前方に転倒することはない。

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。

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⁶⁾。

5. あとがき

地盤工学会四国支部では、常設委員会である「地盤災害研究委員会」の中に、16名で構成する「落石対策研究会」(委員長 矢田部龍一)を2007年に設け、落石の運動機構解明や新しい落石防護工開発に関する研究を精力的に行っている。2009年12月に、それらの成果を「落石対策Q&A」(A5版, 211頁)として発刊した。

四国では、東南海・南海地震に備えた対策が進められているが、意外と見過ごされているのが落石対策である。落石で道路が塞がれば、地震後の避難、救急活動に支障を及ぼすことになる。

今後とも、強靱で高性能な落石防護工の開発、合理的な落石対策技術の研究を進める予定である。

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，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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。

(原稿受理 2011.1.1)