

エネルギー吸収金具を付けた落石防護ネットの開発

(株)第一コンサルタント 右城 猛, 西岡南海男

(株)ロイヤルコンサルタント 筒井 秀樹

日本プロテクト(株) 加賀山 肇

田中工業(株) 田中登志夫

愛媛大学大学院理工学研究科 矢田部龍一, 木下尚樹

1. まえがき

わが国は国土の75%が山地で占められており、地形が急峻で地質が脆弱なことから斜面崩壊や落石などの山地災害が毎年多発している。

四国においては、図1のような地形が見られる場所で落石事故がたびたび発生している。山側が切り立って幅員に余裕がない山岳道路であって、道路より数10~100m上方の崖部が崩壊またはそこ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てきて、通行中の車両を直撃するのである。

こうしたことから四国の道路では、落石対策として、切土法面だけでなく上部斜面からの落石もキャッチできるポケット式落石防護ネットを採用するケースが多い。

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、ポケット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²⁾が、これよりもさらにエネルギー吸収性能を高め、経済性と信頼性に優れたポケット式落石防護ネットの開発が強く望まれている。

このようなニーズに応えるため高知県の斜面防災工事専門会社、建設コンサルタント会社、地盤工学会四国支部落石対策研究委員会(委員長: 矢田部龍一)、愛媛大学防災情報研究センターが連携し、信頼性とコストパフォーマンスに優れ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ので紹介する。

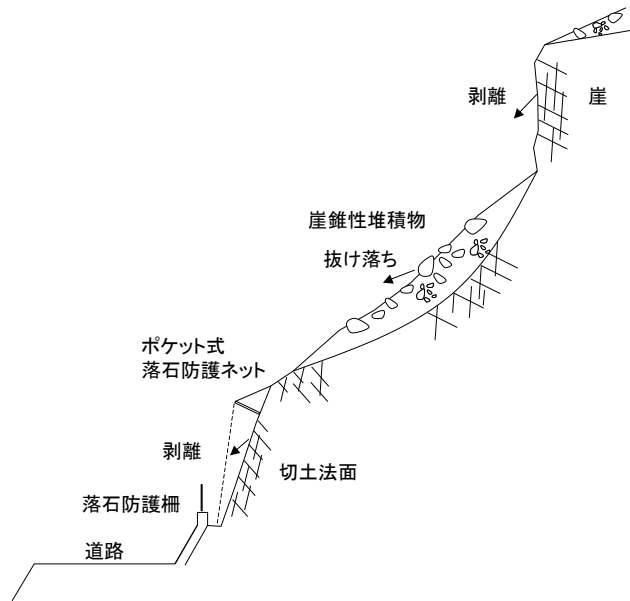


図1 四国の落石危険斜面の模式図¹⁾

2. 落石防護ネット・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2に示す。ロングスパンとは、著者らが研究開発した落石防護ネットの商品名称である。エネルギー吸収性能や経済性を高めるために以下に述べるような様々な工夫をしている^{3)~6)}。

(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位置は両端のみである。支柱を落石の経路となる沢部を避けるなど地形の状況に応じて、10~30mの間隔で設置することができる。このため、落石が支柱を直撃したり防護ネットを飛び越えたりする恐れがない。

(2) エネルギー吸収装置を装着

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金網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、これだけでは大きなエネルギーを吸収することはできない。また、落石が衝突した時には図3のような衝撃力が発生し、ワイヤロープが破断したり、ワイヤロープを地山に固定しているアンカーボルトが破断したりする恐れがある。

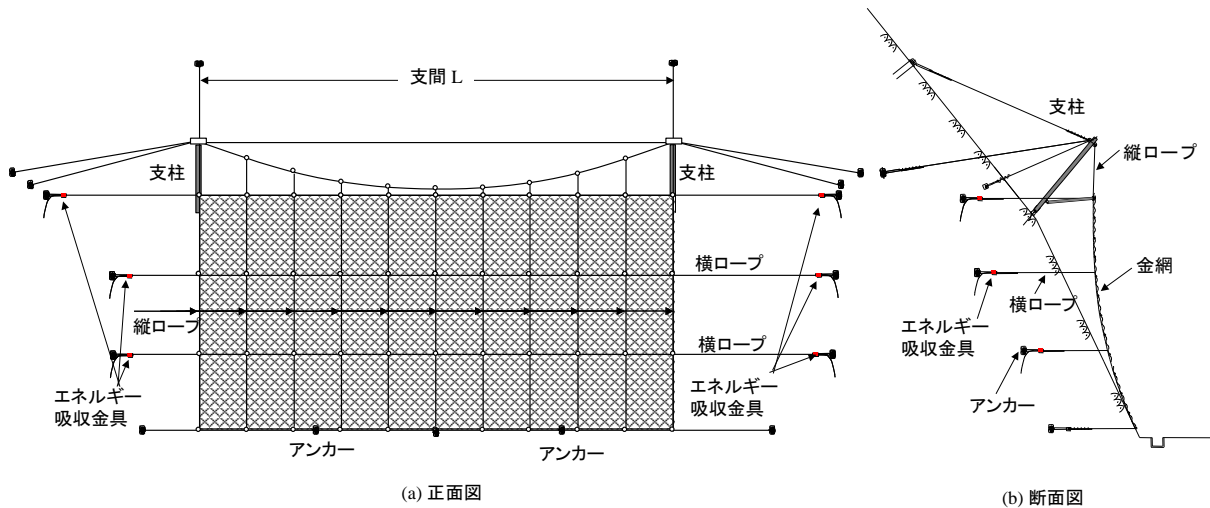


図2 ロングスパンの構造

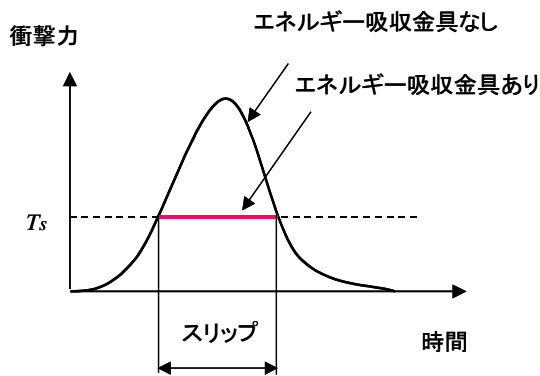


図3 ワイヤロープに作用する衝撃力



写真1 エネルギー吸収金具

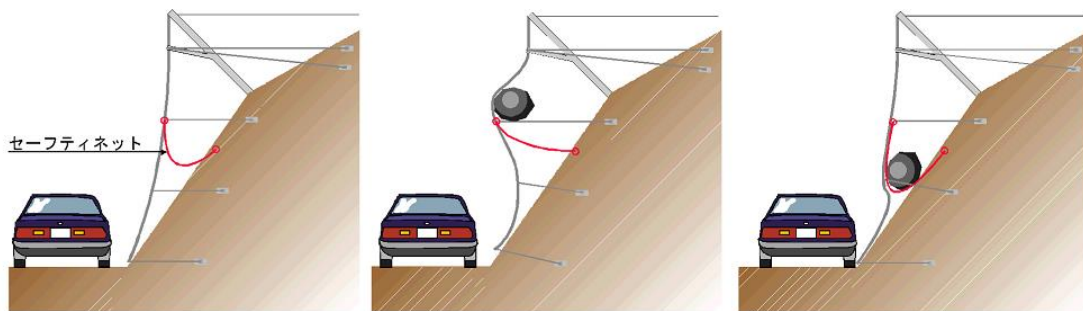


図4 セーフティネット

ロングスパンには、金沢大学名誉教授の吉田博 博士によって研究開発されたエネルギー吸収金具を写真1に示すように横ロープに取り付けてある。ワイヤロープの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で金具内をワイヤロープがスリップするので、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仕組みになっている。

(4) セーフティネットを装着

従来のポケット式落石防護ネットでは、落石がネットに衝突した際に道路側に大きく変形して建築限界を侵したり、ネットの裾から道路にこぼれ出したりして車両の通行に支障を及ぼしていた。ロングスパンでは、図4に示すようにネットと背面の地山との間にハンモックのような「セーフティネット」を取り付け、落石をキャッチすると共に、ネットの過大な変形を抑制できる構造にしている。

3. 性能確認実験

(1) 実験の目的

ポケット式落石防護ネットが高知県の土木技師の田中忠夫氏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、改良が加えられているものの実物大実験による安全性の検証は行われていない。

そこで、落石の衝突によるネットの変形、ワイヤロープの張力、エネルギー吸収金具の性能などを明らかにすることを目的に、実物大のロングスパンに重錘を衝突させる実験を行った。

(2) 実験装置と実験の方法

これまでに表 1 に示すように 10 回の実験を実施した。このうちの 3 回は公開実験とした。公開実験には全国からたくさんの研究者や技術者、それにマスコミ関係者に参加していただいた。第 1 回目の公開実験への参加者数は 300 名を超えるほどであった。

実験場所は南国市岡豊町小蓮の田中工業（株）の資材置き場である。写真 2、図 6 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。

表 1 ロングスパンの重錘衝突実験

No	実験日	支間	縦ロープ間隔	横ロープ間隔	エネルギー吸収金具	重錘質量	重錘エネルギー	実験結果
1	2007.12.20	15m	1.5m	5m	なし	0.5t	70kJ	金網は塑性変形するが損傷なし
2		15m	1.5m	5m	なし	0.5t	70kJ	アンカーボルトが破断
3	2008.4.16	15m	3m	5m	有り	0.7t	100kJ	金網は塑性変形するが損傷なし
4		15m	3m	5m	有り	0.7t	100kJ	金網は塑性変形するが損傷なし
5	2008.5.27	15m	3m	5m	有り	0.7t	100kJ	金網に小さな穴が開く
6	(第 1 回公開実験)	15m	3m	5m	有り	1.0t	150kJ	破網
7	2008.10.10 (第 2 回公開実験)	30m	3m	5m	有り	2.0t	380kJ	横ロープが巻き付けグリップから引き抜け 支柱基礎地盤が破壊、小さな破網
8	2008.10.29	30m	3m	2.5m	有り	2.0t	380kJ	金網に小さな穴が開く ネットの裾から重錘が転がり出す
9	2008.11.4	30m	3m	2.5m	有り	2.1t	400kJ	金網は塑性変形するが損傷なし
10	2008.12.8 (第 3 回公開実験)	30m	3m	2.5m	有り	2.1t	400kJ	金網は塑性変形するが損傷なし



写真 2 実験装置

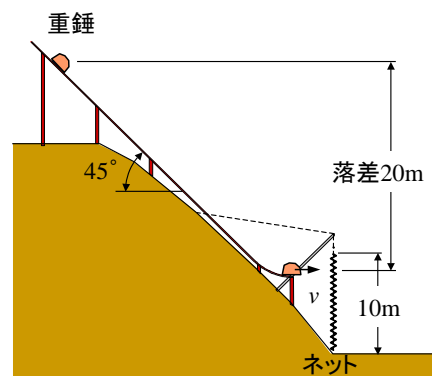


図 6 実験装置



0.5 t

0.7 t

1.0 t

2.0 t

2.1 t

写真 3 実験に用いた重錘



(a) 約 300 名の技術者や研究者が全国から参加

(b) 1.0t の重錘を衝突させたときのネットの変形

写真 4 第 1 回目の公開実験 (2008 年 5 月 27 日)

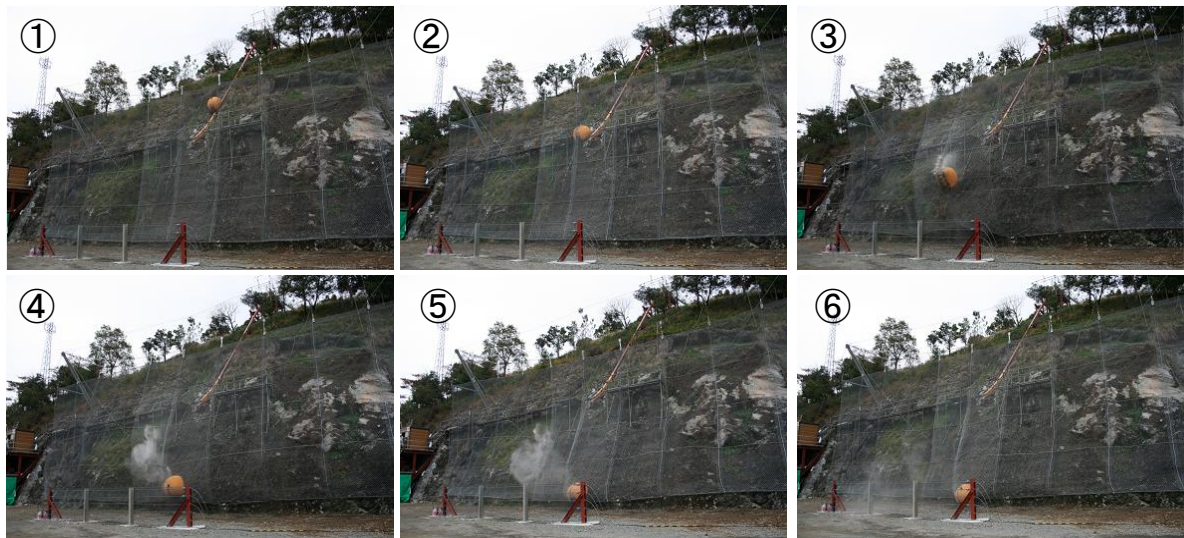


写真 5 第 3 回目の公開実験 (2008 年 12 月 8 日)

ロングスパンの寸法は、全ての実験で高さは 10m であるが、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落石防護ネットと同じ 1.5m であるが第 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落石防護ネットと同じ 5m であるが、第 8 回以降は 2.5m とした。

第 3 回以降の実験では、横ロープの端部にはエネルギー吸収金具を取り付け、張力が 50kN に達した時点でエネルギー吸収金具の中を横ロープがスリップしてエネルギーを吸収する仕組みにした。

実験に用いた重錘は、写真 3 に示す 5 種類である。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製作したもので砲弾型をしている。2.0t と 2.1t の重錘は、0.7t と 1.0t の重錘をそれぞれ鉄筋コンクリート塊の中に埋め込んで製作した。重錘の底面には車輪を取り付けてある。重錘を落差 20m で、レール上を滑走させて落下させ、ロングスパンに衝突させた。衝突速度は 16.7～19.5m/s である。

(3) 計測方法

重錘の加速度は、重錘の重心位置に埋め込んだ加速度計で計測した。衝突時の重錘の速度は、レールの先端付近に 1.0m 間隔に設置した赤外線センサーを重錘が通過する時間を計測することで算出した。ワイヤロープの張力は、ロープ端部のターンバックルに貼り付けた歪みゲージ (60Ω) より測定した。重錘衝突時のネットの変位は、特殊な変位測定装置と側面からのビデオ撮影から算出した。ロングスパンに持ち込まれる重錘の運動エネルギー E は、赤外線センサー通過時間から算出した速度 v を用いて、 $E=1/2mv^2$ として算出した。

(4) 実験結果

実験結果を表 1 に示す。10 回の実験によって以下のことが明らかになった。

- ① 重錘が衝突すると非常に大きな衝撃力が発生する。防護ネットの破損を防ぐには、エネルギーに対する検討だけでは不十分であり、衝撃力に対する検討が必要である。エネルギー吸収金具を取り付けずに行った第2回目の実験では、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、**写真 4 (b)**に見られるように防護ネットが大きく変形する。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 4**に示したセーフティネットが有効である。
- ③ 横ロープにエネルギー吸収金具を取り付けると、ワイヤロープやアンカーボルトの破断を防止することができる。
- ④ 重錘の衝突で金網に穴が開くことがあった。これは重錘が金網に衝突した際に回転して重錘の底面に取り付けてある車輪が金網を引っ掻くのが原因であった。重錘に**写真 3 (右端)**に見られるような工夫をすると、金網に穴が開く問題は解消された。
- ⑤ 落石防護ネットの施工では、ワイヤロープの端部を固定するときに「巻き付けグリップ」を使用することがあるが、「巻き付けグリップ」は落石防護ネットのように衝撃力を受ける構造物には適さないと考えられる。第7回目の実験に「巻き付けグリップ」を使用して行ったところ、メーカーが保証している荷重の約 1/2 の張力で横ロープが引き抜けた。
- ⑥ 重錘が防護ネットに衝突すると、両端の支柱には軸方向力とせん断力が発生する。第7回目の実験の際に片方の支柱が斜面にめり込んだ。支柱を設置していた斜面の岩盤が風化して土砂化していて支持力が不足したためであった。
- ⑦ 重錘をポケットの中へ取り込んでも、ネットの裾から外へ転がり出す。落石が道路に転がり出すのを防ぐには、落石防護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対策が必要である。
- ⑧ 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。横ロープにエネルギー吸収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飛躍的に向上させることが可能であることが実証できた。

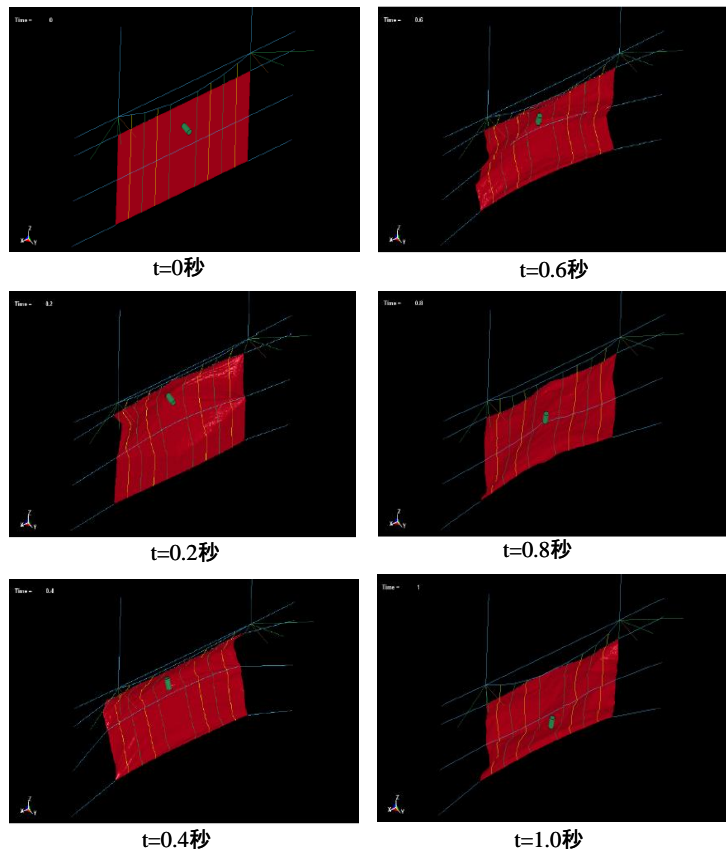


図6 LS-DYNAによる解析結果の一例

4. 数値シミュレーション解析

落石が防護ネットの中央以外に衝突する場合や、複数の落石が同時に衝突する場合など実験と異なった条件に対する安全性は確認できていない。こうしたことから、現在は、非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA を利用して重錘衝突実験の数値シミュレーション解析を行っている。**図 6**に解析結果の一例を示す。

防護ネットの材料特性や境界条件等を適切にモデル化することにより実験結果を精度良く再現できるようになりつつある。これにより実験と異なった条件で施工した場合でも解析によって安全性を確実に評価できるようになる。



(a) 森林基幹道河口落合線工事 (香美市物部)



(b) 国道 195 号防災工事 (香美市物部)



(c) 造成地のり面落石対策 (須崎市)



(d) 国道 319 号防災工事 (四国中央市)



(e) 安倉林地荒廃防止工事 (北川村)

写真 6 施工されたロングスパン

5. これまでの成果

現在、ロングスパンは、新技術情報提供システム NETIS に登録されている。なお、NETIS は、民間企業が開発した有用な新技術を公共工事に積極的に活用していくために国土交通省が導入した制度である。

2009 年 7 月時点でロングスパンは 7 件の施工が完了している。その内のいくつかを写真 6 に紹介する。写真 6 (a) は発破作業による岩塊飛散防止網としてロングスパンを使用したもので、崩落してきた直径 1.7m の岩塊を見事に受け止めた。

6. あとがき

実験を繰り返すうちに、これまで妥当と考えられていた理論や性能に様々な問題があることが明らかになった。10 回に及ぶ実験を重ねながら問題点を一つ一つ解決していった結果、400kJ のエネルギーを持つ落石を受け止めることができる落石防護ネット・ロングスパンを開発することができた。公開実験に参加された方々からは貴重なアイデアをいろいろと頂いた。ロングスパンの研究開発に際しては、高知県の「頑張る企業総合支援事業費補助金」、社団法人四国建設弘済会の「建設技術開発助成金」³⁾を受けている。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 右城猛, 西岡南海男, 筒井秀樹, 田中登志夫: エネルギー吸収金具を付けた落石防護ネットの開発, 第 3 回南海地震四国地域学術シンポジウム, 土木学会四国支部, 2008.12
- 2) カーテンネット CN 工法カタログ: 東京製綱株式会社
- 3) 木下尚樹, 筒井秀樹: 地震時・豪雨時落石対策ロングスパンポケット式ロックネットの開発, 第 12 回建設事業の技術開発に関する助成事業成果報告集, 社団法人四国建設弘済会, 2009.7.
- 4) 矢田部龍一: 落石防護ネットの開発への取り組み, 大学発産業界行シーズ(研究成果)探訪, 月刊愛媛ジャーナル, 2009.7.
- 5) 加賀山肇, 右城猛, 筒井秀樹: 緩衝金具を付けた落石防護ネットの開発, 第 28 回日本道路会議, 日本道路協会, 2009.10.
- 6) 落石対策技術研究会: ロングスパンポケット式落石防護網工法 計画・設計・施工マニュアル, 2009.4