

# 高エネルギー吸収型落石防護ネット「ロングスパン工法」の開発

株式会社 第一コンサルタンツ 国際会員 右城 猛  
株式会社 ニップロ 正会員 加賀山 肇  
愛媛大学大学院理工学研究科 正会員 木下 尚樹  
愛媛大学防災情報研究センター 正会員 矢田部龍一

## 1. まえがき

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

落石対策がわが国で本格的に行われるようになったのは、「高知国道56号落石事件」<sup>1)</sup>からである。1963年、高知県中土佐町の国道56号を走行中の軽トラックに落石が直撃、助手席の同乗者が死亡した。道路管理者の管理瑕疵が問われた最初の落石事故であった。当時の国道56号は、安和海岸沿いに走っている現在の一般県道320号久礼須崎線であり、高知県土木部が管理していた。

この事件をきっかけに、安和海岸沿いでは1965年から1969年にかけて本格的な落石対策工事が行われた。そのとき、高知県の土木技師・田中忠夫氏によって考案されたのがミニポケット式ロックネットであった。落石の恐れがある斜面全体を金網で覆うとコストがかさむ。道路の切土のり面のみを金網で覆い、その金網の上部を地山から持ち上げて開口を設けておけば、上方から落下してきた落石を受け止めることができる。

現在、標準型ポケット式落石防護ネット工法が全国的に多用されている。この工法の原型になっているのがミニポケット式ロックネットである。

標準型ポケット式落石防護網ネット工法は、斜面に3m間隔で立てた支柱によりネットの上部にポケット状の開口部を設け、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。しかしながら、この工法は、沢地形があると支柱を設置できない。また、可能吸収エネルギーが50~100kJと小さく、落石がネットを突破して道路に飛び出す事例も散見されている。

筆者らは、四国の地形特性に適応した落石防護ネットの技術開発に取り組んでいる。2009年には「ロングスパン工法」として商品化され、2019年の段階で四国、中国、九州、近畿、関東において総面積71,400m<sup>2</sup>に及ぶ施工実績をいただいている。

ロングスパン工法の技術開発については、地盤工学会四国支部「50年のあゆみ」<sup>2)</sup>に「エネルギー吸収金具を付けた落石防護ネットの開発」と題する論文が掲載されている。

本稿では、ロングスパン工法の概要と特徴、2018年に行った性能確認実験、最近の10年間におけるロングスパン工法に関する話題などについて紹介する。性能確認実験は、2017年12月改訂の落石対策便覧<sup>3)</sup>に新しく明記された性能照査方法に基づいて実施したものである。

## 2. ロングスパン工法の概要と特徴

ロングスパン工法の概観を写真1に示す。ロングスパン工法は、エネルギー吸収性能やコストパフォーマンスを高めるため次の3つの工夫をしている。

### (1) 工夫その1：支柱間隔のワイド化

標準型ポケット式落石防護ネットの支柱は3m間隔で設置される。一方、ロングスパン工法の支柱は18~30m間隔で設置することができる。このため、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支柱を設置することで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被害を軽減することが可能である。

## (2) 工夫その2：横ロープに緩衝装置を装着

標準型ポケット式落石防護ネットは、金網の変形やワイヤロープの伸びにより落石の運動エネルギーを吸収する構造になっているため、大きなエネルギーを吸収することができない。そのうえ、落石の衝撃力で金網が破網したり、ワイヤロープや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ことがある。

ロングスパン工法は、横ロープに緩衝装置を取り付けている。落石の衝突により横ロープの張力が設定値に達するとワイヤロープがスリップする仕組みになっている(図1)ため、衝撃を緩和して効率良く落石のエネルギーを吸収することができる。

## (3) 工夫その3：使用部材の規格アップ

ロングスパン工法の可能吸収エネルギーは400 kJであり、標準型ポケット式落石防護ネットの約4倍になる。そのため、支柱やアンカーボルト、ワイヤロープなど主要部材の規格をアップしている。例えば、支柱はH-100×100 mmに対してH-200×200 mm、アンカーボルトはD32(M30)×1000 mmに対してD38(M36)×1500 mm、ワイヤロープは3×7G/Oφ16 mmに対して7×7AZ/Oφ18 mmなどといったものである。本工法における主要部材の限界状態は、実物規模の性能確認実験によって検証している。

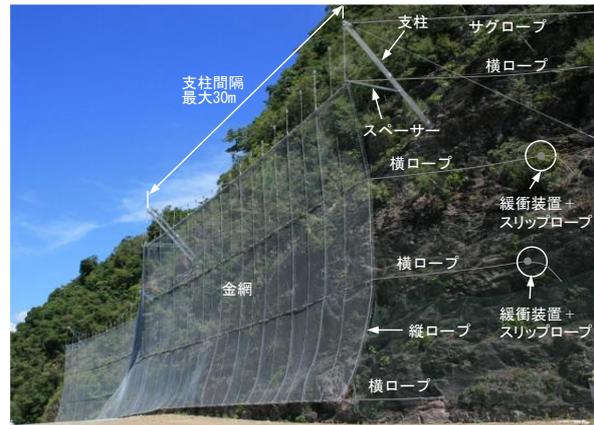


写真1 ロングスパン工法の概観

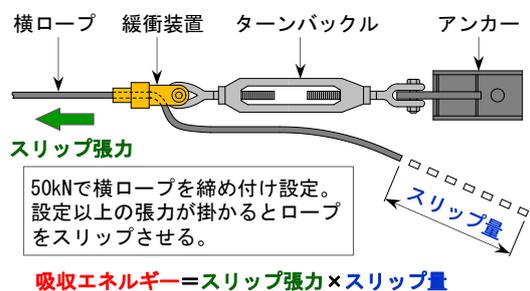


図1 緩衝装置の機構

## 3. 性能確認実験

### (1) 実験の目的

ロングスパン工法の技術開発は、2007年12月から2008年12月の1年間で行われた。合計10回に及ぶ実物規模の重錘衝突実験を繰り返し、400 kJのエネルギー吸収性能を検証した。ところが、2017年12月に落石対策便覧(日本道路協会)が改訂され、実物実験による性能照査方法が新しく明記された。このことを受けて、改めてロングスパン工法の性能確認実験を行った。実験は、CASE-1(2018年6月6日)、CASE-2(2018年7月18日)の2回に分けて実施した。

### (2) 実験方法と実験装置

実験は斜面滑走(レール)式で行った。重錘の落下高さは23 m、車輪を取り付けた重錘を45°勾配の斜面に設置したモノレール用のレール上を滑走させて、阻止面へ衝突させる方法であ

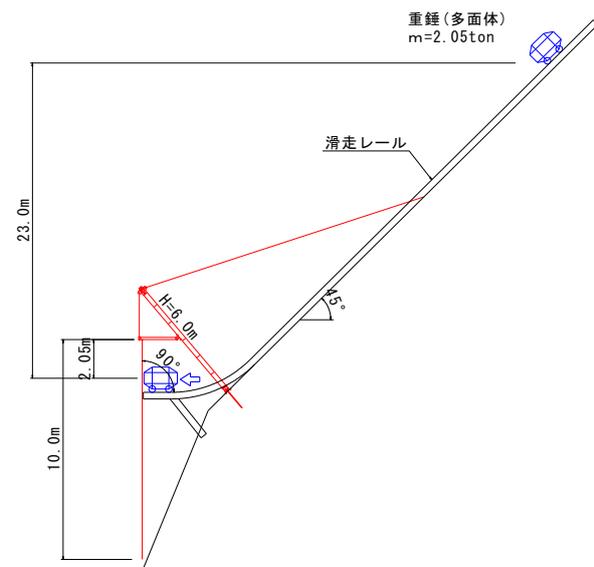


図2 実験装置 (斜面滑走式)



写真2 実験装置の概観



写真3 実験に使用した重錘

る(図2, 写真2)。重錘の衝突位置は支柱間の中央, 阻止面天端から 2.05 m 下側, 阻止面への入射角度は  $0^\circ$  (阻止面に垂直) である。重錘はコンクリート多面体(密度  $2390 \text{ kg/m}^3$ ), 質量は 2.05 t と 2.10 t である(写真3, 表1)。供試体の形状寸法を図3, 表2に示す。支柱は H 型鋼(H-200×200×8×12-5955)を加工をしたもの, 金網は線形  $\phi 5 \text{ mm} \times 50 \times 50$ , 横ロープ・吊りロープは  $7 \times 7 \text{ G/O } \phi 18 \text{ mm}$ , 縦ロープは  $3 \times 7 \text{ G/O } \phi 18 \text{ mm}$  を使用した。図3に示す④~⑦, ⑫~⑮に計8個の緩衝装置(図1)を取り付けている。

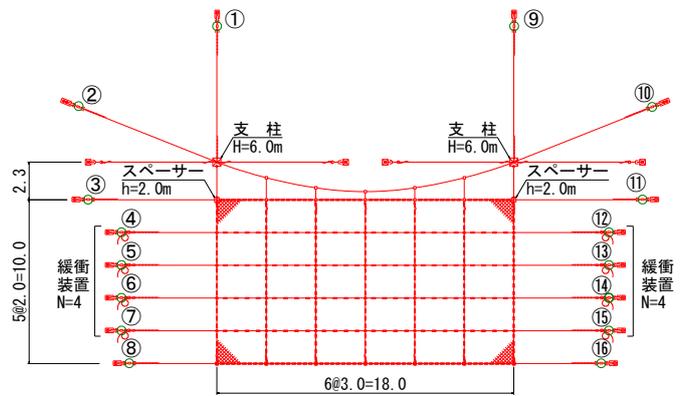


図3 実験供試体の概要図

表1 実験条件

実験方式		斜面滑走(レール)式
重錘	形状	多面体
	質量	2.05 t, 2.10 t
	寸法	1.64 m×0.84 m×0.73 m
	材質	コンクリート + 鋼材
	密度	$2390 \text{ kg/m}^3$

表2 実験供試体

型式	LSP-5.0 型
延長	18 m
高さ	10 m
支柱本数	2 本
支柱間隔	18 m
緩衝装置	8 基

### (3) 計測方法

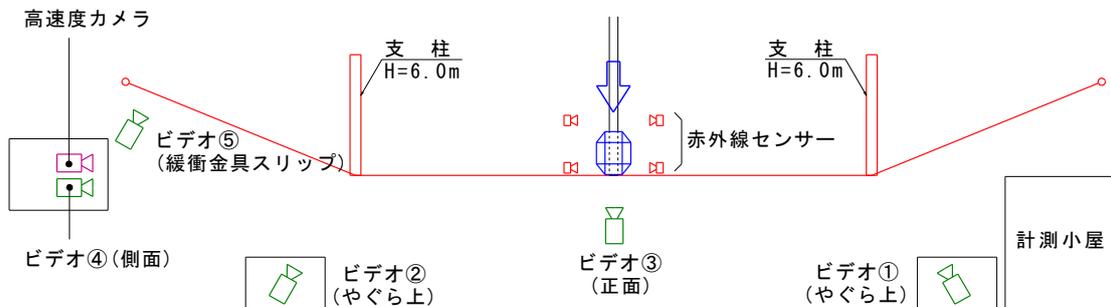


図4 計測器の平面配置図

### 1) 重錘の衝突速度

重錘の速度は、重錘が阻止面に衝突する寸前の1 m 区間を通過する時間を赤外線センサー(図4)によって計測して算出した。

### 2) 阻止面の水平変位

重錘衝突時の阻止面の水平変位は、供試体の側面から撮影した衝突前後のビデオ映像によって解析した(図4)。

### 3) ワイヤロープの張力

ワイヤロープの張力は、図3の①～⑬に設置したアンカーボルトに接続するターンバックルに貼り付けた歪みゲージ(60 Ω)によってサンプリング周期 50 μs で計測した。

### 4) 阻止面天端・支柱先端高の変位

重錘衝突後の阻止面天端高ならびに支柱先端高の変位は、衝突前後の比高差を光波測距儀によって測定した。

## (4) 実験結果

### 1) 捕捉状況

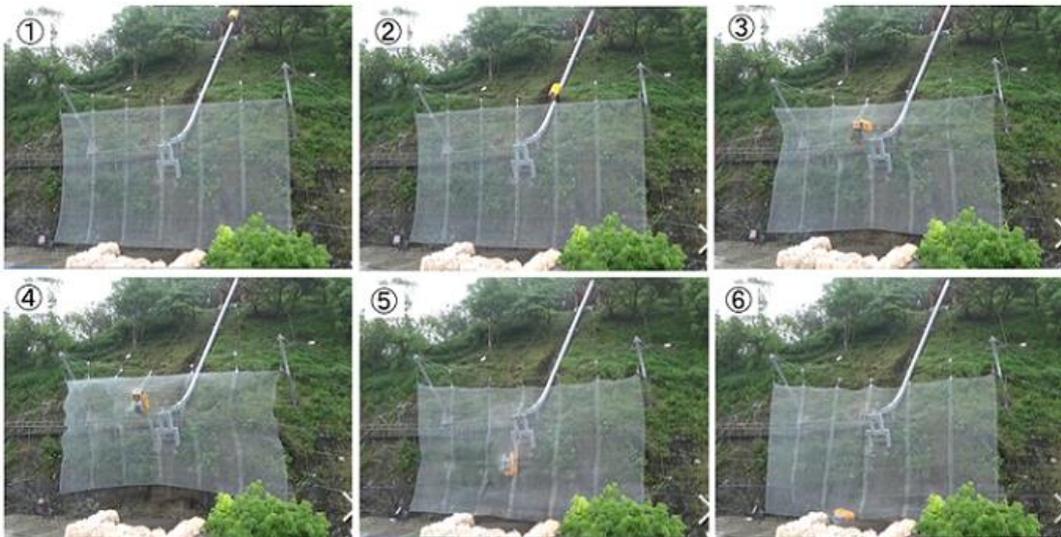


写真4 捕捉状況 (正面)

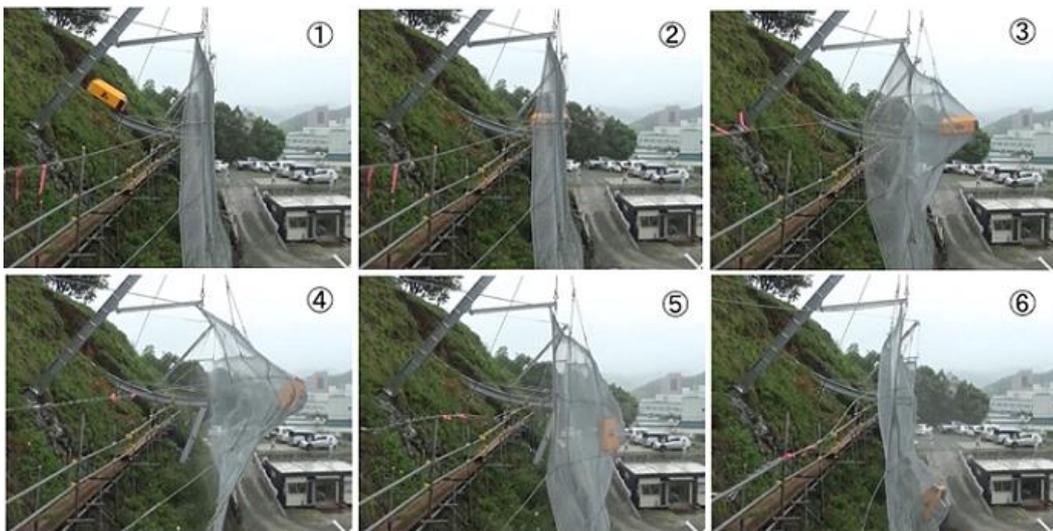


写真5 捕捉状況 (側面)

重錘衝突部付近の阻止面と縦ロープに残留変形が確認できるが、全体的に大きな損傷もなく重錘を捕捉している。重錘が衝突すると、阻止面は全体が変形して振動を伴いながらエネルギーを吸収することが実証された。写真4に正面から、写真5に側面からみた捕捉状況を示す。最大変形時の状況は、正面、側面共に④の分割画像である。

## 2) 重錘の衝突エネルギー

重錘の衝突エネルギーは、赤外線センサーによって計測した通過時間から算出した衝突速度と重錘質量の関係から式1により求めた。その結果を表3に示す。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \text{ ----- 式1}$$

ここに、 $E$ ：重錘の衝突エネルギー(kJ),  $m$ ：重錘の質量(t),  $v$ ：重錘の衝突速度(m/s)

表3 重錘の衝突速度とエネルギー

実験 CASE	重錘の質量： $m$	衝突速度： $v$	衝突エネルギー： $E$
CASE-1	2.05 t	20.0 m/s	410 kJ
CASE-2	2.10 t	20.2 m/s	428 kJ

## 3) 阻止面の水平変位



写真6 阻止面の水平変位 (CASE-1)



写真7 阻止面の水平変位 (CASE-2)

阻止面の水平変位は、ビデオ映像ならびに高速度カメラの画像から解析した。その結果、重錘衝突位置での最大水平変位は実験 CASE-1 で3.7m(写真6)、実験 CASE-2 で3.2m(写真7)を観測した。

#### 4) ワイヤロープの張力

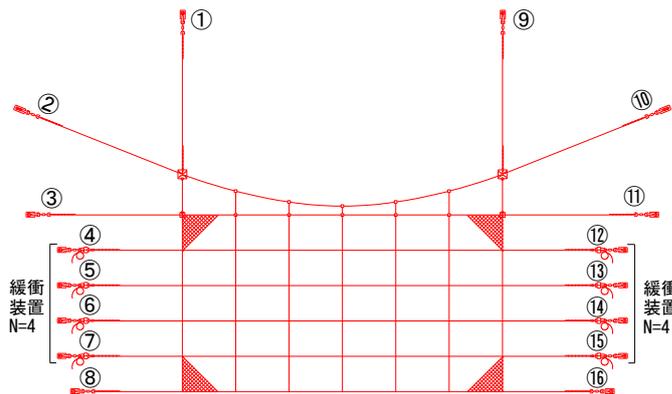


図5 ワイヤロープ張力の測定位置

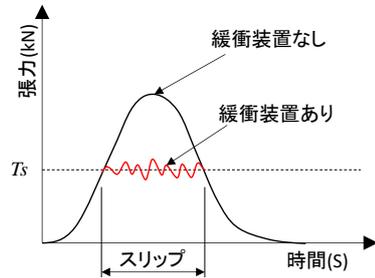


図6 ワイヤロープに作用する張力

表4 ワイヤロープ張力とスリップ量の計測結果

測定点	張力(kN)		スリップ量(mm)		測定点	張力(kN)		スリップ量(mm)	
	CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2		CASE-1	CASE-2	CASE-1	CASE-2
①	欠測	103	—	—	⑨	欠測	101	—	—
②	103	108	—	—	⑩	117	104	—	—
③	欠測	92	—	—	⑪	75	93	—	—
④	86	87	1425	160	⑫	欠測	85	100	500
⑤	85	73	1100	455	⑬	89	78	70	110
⑥	82	65	200	40	⑭	78	64	100	75
⑦	71	75	100	105	⑮	77	71	65	120
⑧	144	141	—	—	⑯	137	145	—	—

ひずみゲージによりワイヤロープの張力を計測した結果を表4に示す。緩衝装置を装着していないワイヤロープ(①～③, ⑧～⑪, ⑯ 図5)の最大張力は、実験 CASE-1 で 75 kN～144 kN, 実験 CASE-2 で 92 kN～145 kN を計測した。ワイヤロープ(7×7 G/O φ 18 mm)の降伏荷重は 156 kN であるので力学特性は弾性域内にある。

また、緩衝装置を装着したワイヤロープ(④～⑦, ⑫～⑮ 図5)の最大張力は、実験 CASE-1 で 71 kN～89 kN, 実験 CASE-2 で 64 kN～87 kN を計測した。緩衝装置が作動したことにより、ワイヤロープは降伏荷重の 41～57% でスリップしたことが分かる。緩衝装置が作動したことによるワイヤロープのスリップ量も表4に記載しておく。図6はワイヤロープに作用する張力のイメージ図である。

#### 5) 阻止面天端・支柱先端高の変位

重錘衝突後の阻止面の天端高、ならびに支柱先端高の変位を図7, 表5に示す。

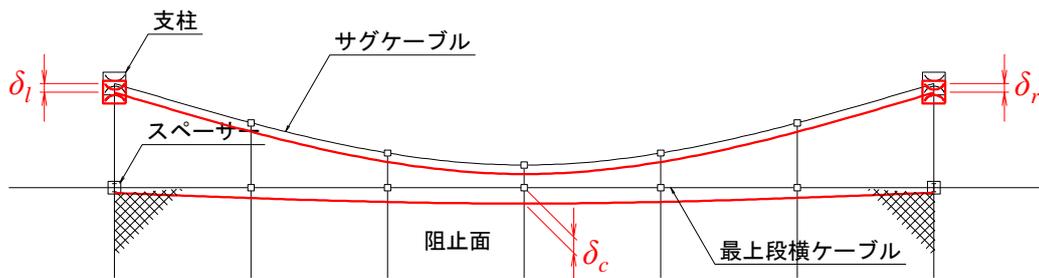


図7 阻止面天端・支柱先端高の変位

表 5 阻止面天端・支柱先端高の変位

実験 CASE	阻止面天端中央部 ( $\delta_c$ )	支柱先端部	
		左側 ( $\delta_l$ )	右側 ( $\delta_r$ )
CASE-1	349 mm	109 mm	93 mm
CASE-2	165 mm	46 mm	55 mm

6) 損傷状況と再使用性

本実験では、重錘衝突後の損傷状況と再使用性を確認するため CASE-1 の実験後、目視により明らかな損傷が見受けられない部材は再使用して CASE-2 の実験を行った。表 6 に CASE-1 による損傷状況、CASE-2 の実験を行うための修復状況、CASE-2 による損傷状況を示す。この実験工程で、修復に要した時間はアンカーの定着確認を含めてわずか 3 日であった。

表 6 損傷状況と再使用性

構成部材	損傷状況 (CASE-1)	修復状況 (CASE-1 → CASE-2)	損傷状況 (CASE-2)
阻止面	衝突部付近が塑性変形	中央部 2 列分の金網を取り替え、残り 4 列は再使用	衝突部付近が塑性変形
支柱	損傷なし	再使用	損傷なし
ワイヤロープ	衝突部付近の縦ロープが塑性変形 横ロープは若干の摩耗を確認	中央部 3 列分の縦ロープを取り替え、残りは横ロープも含めて全て再使用	右側スパーサー先端部に接触したワイヤロープの扁平部がせん断した
基礎・アンカー	横ロープアンカー(計測点②③)の支持岩盤が塑性した	明らかに支持岩盤が塑性していた計測点②③のアンカーをやり替え、残り 14 基は再使用	計測点⑫のアンカー設置岩盤(風化蛇紋岩)が破壊すると共にアンカー頭部が曲げによって破断した
緩衝装置	損傷なし	作動していたので全 8 基を取り替えた	損傷なし

4. 性能照査結果

ロングスパン工法の主要部材の限界状態を表 7 に示す。これは、落石対策便覧に記載されている一般的な限界状態の例に基づいて本工法に適用させたものである。

表 7 ロングスパン工法主要部材の限界状態

性能水準	阻止面	支柱	ワイヤロープ	基礎・アンカー	緩衝装置
性能 1	損傷が生じない、もしくは部材交換を要しない限界の状態	力学特性が弾性域を超えない、もしくは有意な傾斜を生じない限界の状態 ※2	力学特性が弾性域を超えない限界の状態	力学特性が弾性域を超えることなく、支持地盤の力学特性に大きな変化が生じない限界の状態	作動に至らず部材交換を要しない限界の状態
性能 2	部材交換、損傷の修復を容易に行いうる限界の状態 ※1	部材交換、損傷の修復を容易に行いうる限界の状態 ※2	部材交換、損傷の修復を容易に行いうる限界の状態 ※3	副次的な塑性化に留まり、部材交換、損傷の修復を容易に行いうる限界の状態 ※4	許容スリップ量以内であり、部材交換を容易に行いうる限界の状態

- ※1 落石の衝突によって金網の変形が生じるのはやむを得ないが、落石が突き抜けないこと。
- ※2 落石の直撃によって支柱に損傷や変形が生じるのはやむを得ないが、全体系の崩壊につながらないとともに、落石を捕捉していること。
- ※3 ワイヤロープの損傷が全体系の崩壊につながらないとともに、落石を捕捉していること。
- ※4 アンカーの損傷が全体系の崩壊につながらないとともに、落石を捕捉していること。

以上の実験結果を踏まえた性能照査結果を表 8 に示す。

表 8 性能照査結果

構成部材	再使用性・修復性	性能水準
阻止面	塑性変形部分は容易に修復可能で、再度の衝突にも重錘を捕捉した。	2
支柱	弾性域を超える損傷は確認されなかった。	1
ワイヤロープ	塑性変形した縦ロープは容易に修復可能で、再度の衝突にも重錘を捕捉した。減径・扁平したロープは取り替えが必要。	2
基礎・アンカー	横ロープアンカーの支持岩盤が塑性したが容易な修復で再度の重錘衝突に耐えた。アンカーは強固な支持岩盤に設置する。	2
緩衝装置	緩衝装置は作動すれば容易に交換できるので、修復性に優れる。	2
全体	重錘衝突部付近は塑性変形したが捕捉性能を満足した。 要求性能を満たす落石エネルギー：410 kJ	2

ロングスパン工法は、実験 CASE-1 で衝突エネルギー410 kJ、阻止面の張出量 3.7 m、実験 CASE-2 で衝突エネルギー428 kJ、阻止面の張出量 3.2 m、いずれも軽微な損傷で重錘を捕捉した。捕捉性能を確認するうえでは満足できる結果が得られた。

実際に落石を捕捉すれば、鋼製部材は大なり小なり損傷する。例えば、衝撃を受けたうえ摩耗などが認められるワイヤロープの残存強度などは、試験機関に持ち込んで試験をしないと判断できない。大きな衝撃力を受けた後の鋼製部材の長期的な再使用性などは保証できないと考えるの妥当である。ロングスパン工法では、再使用性よりも損傷した部材を容易に取り替えることができる修復性を重視する。

## 5. 今後の課題

これまでの実験では、重錘を阻止面の所定の場所に衝突させて性能を検証してきた。しかし、実験で検証した以外の場所に落石が衝突する場合や、複数の落石が同時に衝突する場合など、実験と異なる条件における安全性は確認できていない。このため、大変形非弾性動的解析ソフト LS-DYNA を用いた解析を実施してきている。

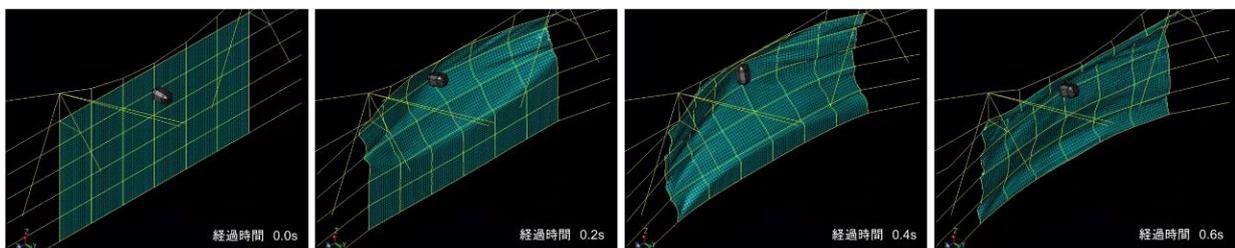


図 8 再現解析による阻止面の変形状況

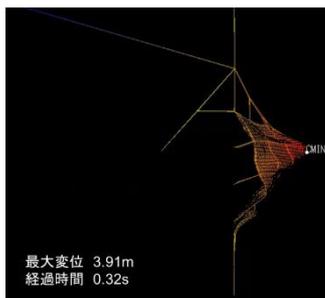


図 9 再現解析による阻止面の最大変形状

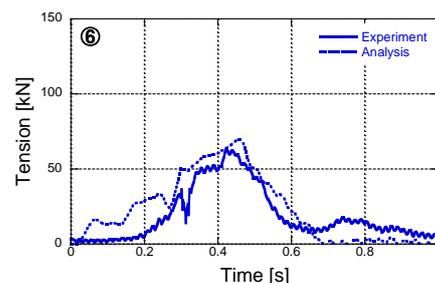


図 10 再現解析と実験の比較 (横ロープ張力時刻歴)

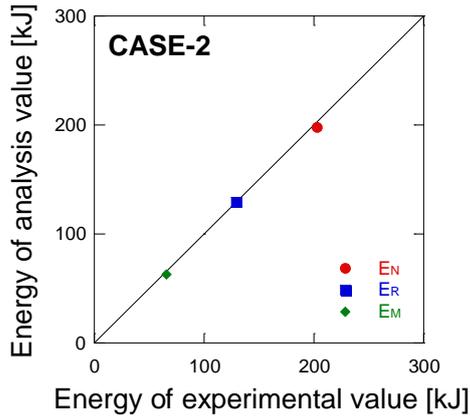


図 11 再現解析と実験の比較(エネルギー)

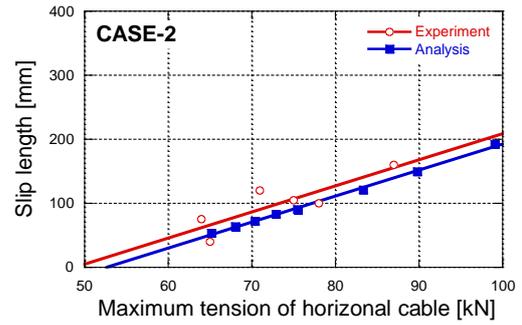


図 12 再現解析と実験の比較  
(最大ロープ張力とスリップ長)

前述の実物大重錘衝突実験の再現解析結果を以下に示す。図 8 および図 9 は再現解析による阻止面の変形状況である。最大変形量は過大評価しているが、変形状況は概ね再現できている。また、図 10 ~ 図 12 は再現解析と実験を比較した結果である。図 10 は横ロープ張力時刻歴 (一例)、図 11 は金網 ( $E_N$ )、ロープ ( $E_R$ )、緩衝装置 ( $E_M$ ) のエネルギー、図 12 は最大ロープ張力と緩衝装置のスリップ長との関係を示している。それぞれ概ね実験を再現できていると判断できる。

今後は更に解析の頻度を増やして信頼性を高めてゆく必要がある。

## 6. これまでの成果

ロングスパン工法は 2019 年 7 月時点で 89 物件の施工が完了している。施工事例のいくつかを写真 8 に紹介する。



(a) 県道久礼須崎線 (高知県)



(b) 県道中土佐佐賀線 (高知県)



(c) 県道穴吹塩江線 (香川県)



(d) 県道猪伏西谷線 (愛媛県)



(e) 国道 493 号 (高知県)



(f) 国道 32 号 (香川県)

写真 8 ロングスパン工法の施工事例

本研究の開発段階で得られた実験データは、落石衝突時におけるポケット式落石防護ネットの挙動や衝撃力の発生メカニズムを解明するうえで極めて有益なものであった。その成果は次の書籍で紹介され、わが国の落石対策技術の進歩に大きく貢献している。

- ・公益社団法人地盤工学会四国支部：落石対策 Q&A, 2009.12
- ・公益社団法人地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例, 2014.12
- ・国立研究開発法人土木研究所他：高エネルギー吸収型落石防護工等の性能照査手法に関する研究共同研究報告書, 2017.3

また、ロングスパン工法は、今日的な視点から見た社会的意義・今後の発展性等を評価され、建設技術開発分野の模範となる技術として、一般財団法人国土技術研究センターから次の賞を授与されている。

- ・第 12 回国土技術開発賞 地域貢献技術賞(国土交通大臣表彰), 2010.7
- ・国土技術開発賞 20 周年記念 創意開発技術大賞, 2018.7

## 7. あとがき

近年、地球温暖化に伴う気候変動により甚大な斜面災害が頻発しており、防災・減災がわが国の重要な課題になっている。斜面崩壊や土石流と共に落石に対する防災・減災対策はこれまで以上に重要になると思われる。

そうした中、ロングスパン工法も含めた落石防護工の設計・施工法に関して、今後研究すべき課題を3つ挙げる。

1つは残存性能の評価法である。これまで研究してきたエネルギー吸収性能、耐衝撃性能は、材料特性が明確な新品の製品を対象にしている。腐食等で劣化した製品のエネルギー吸収性能や耐衝撃性能は不明である。また、落石が衝突して変形が残留した製品の場合、どれだけのエネルギーや衝撃力に堪えるのか不明である。残存性能を評価する技術を確立しなければならない。

2つは斜面を落下する落石の運動の予測法である。現在実務では一般的に、落石の運動をすべり運動と仮定した等価摩擦係数法で推定しているが、実際の落石の運動は飛行と衝突を繰り返す跳躍運動である。落石は斜面に衝突すればエネルギーを大きく消費する。等価摩擦係数法で推定すると、落石の運動エネルギーを実際よりも数倍過大に評価することが多い。将来的には、落石の運動の予測は数値シミュレーションに移行すべきである。

3つは施工の簡単な製品化である。落石対策工事は、急峻かつ狭隘な斜面上での作業になる。特殊技能を持ったとび職がいなければ落石防護工の設置はできない。しかし近年、技能労働者の高齢化、若手職人の不足が深刻化している。このままでは落石対策工事ができなくなる。誰でもが簡単に施工できる製品化の開発が必要である。

## 参考文献

- 1) 建設省道路局道路交通管理課訟務班監修・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，pp189～191.1992.12
- 2) 右城猛他：エネルギー吸収金具を付けた落石防護ネットの開発，社団法人 地盤工学会四国支部支部創立 50 周年記念出版 50 年のあゆみ，pp251～256，2009.9
- 3) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2017.12