

実規模実験による従来型落石防護柵の挙動と補強に関する研究 —既存ストックの有効活用について—

Research on the behavior and reinforcement of conventional rockfall protection fences
by full-scale experiments
—Effective use of existing stock—

松嶋秀士^{a)}*, 井良沢道也^{a)}

Shushi MATSUSHIMA and Michiya IRASAWA

Abstract

About 70% of Japan's land area is mountainous, and rockfall protection fences have been constructed to protect roads and houses since the period of rapid economic growth. The total length of conventional rockfall protection fences, which are composed of rhombic wire mesh, wire rope and H-shaped steel posts, is enormous, and it is necessary to make effective use of the existing stock to strengthen and extend their service life. In this study, the behavior of the conventional rockfall protection fence was investigated by full-scale experiments, and the reinforcement method was verified and its effectiveness was clarified.

Key words : rockfall protection fence, falling-weight impact test, deformational behavior, reinforcement, effective use

和文要旨

我が国の国土の約7割が山地であり、道路や住宅を保全対象とした落石防護柵が高度経済成長期より整備されている。ひし形金網、ワイヤロープ及びH形鋼の支柱で構成されている従来型落石防護柵の総延長は膨大であり、この既存ストックを有効活用した強靱化及び長寿命化が求められている。本研究では、実規模実験により従来型落石防護柵の挙動を把握するとともに、補強方法の検証を行い、その効果を明らかにした。

キーワード：落石防護柵、重錘衝突実験、変形挙動、補強、有効活用

1. はじめに

1950年代以降のわが国の高度経済成長と1954年より始まった道路整備5ヵ年計画によって、道路の新設及び改良が進み山間地道路などには、落石対策用のひし形金網、ワイヤロープ及びH形鋼の支柱で構成された落石防護柵（以後、従来型落石防護柵と言う）が設置されてきた。また、治山事業、急傾斜地崩壊対策事業、林道事業なども同様である¹⁾。その総延長は膨大な距離に達しているが、これらの従来型落石防護柵の耐用年数は施工後30～50年²⁾であり、耐用年数が過ぎていることから修繕を余儀なくされることも想定される。

落石対策便覧³⁾によると、従来型落石防護柵が耐えうる落石が衝突する時の運動エネルギーは25kJ～50kJ（例えば、250kg～500kgの落石が10mの鉛直高さから落下した場合に相当するエネルギー）である。従来型落石防護柵を突き破って自動車に衝突した2009年の富士山五合目駐車場のような人身事故も発生している⁴⁾。

また、柵を超える落石発生箇所では、応急処置として単管パイプなどでかさ上げを行っている場合もある（写真-1）。このような箇所の対策工としては、落石エネルギーが超過した箇所では高エネルギー吸収柵へ、柵高が不足している箇所では既設の防護柵を撤去し同構造の柵を新たに設置している。

本研究では、従来型落石防護柵の挙動を実規模実験により把握し、弱点となる部分を補強することにより、従来型落石防護柵の吸収可能な落石エネルギーを倍増させ、さらに、既設の支柱に加工することなく柵高をかさ上げすることができる構造の検討を実施した。

2. 被災事例から見る構造上の弱点と現行の計算方法

過去5年間にわたり富山県、長野県、岐阜県、高知県など被災した防護柵28件を調査すると、以下の3つの問題点があることがわかった（写真-2）。

1) 支柱の変形

中間支柱は、基部でねじれ座屈を起こしている。写真-2 (a)



写真-1 従来型落石防護柵応急処置の例
(ベニヤ板で覆われている箇所が応急処置箇所)

Photo 1 Example of existing protection fence first aid
(The area covered with plywood is the first aid area.)

* 連絡著者 / corresponding author

a) 岩手大学大学院連合農学研究科

The united Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University

〒020-8550 岩手県盛岡市上田3丁目18-8

3-18-8 Ueda, Morioka-city, Iwate

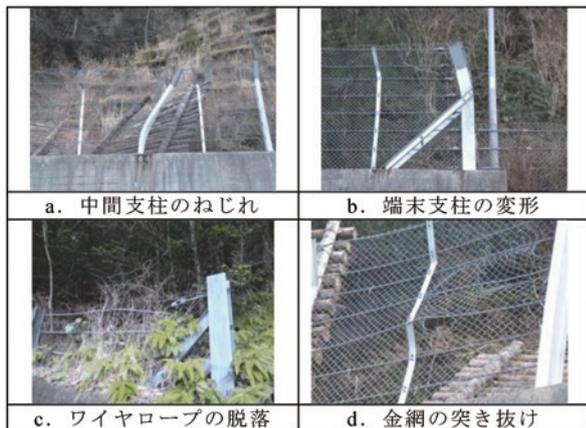


写真-2 落石防護柵の被災事例

Photo 2 Damage case of rockfall protection fence

端末支柱は、柵面内方向に変形している。写真-2 (b)

2) ワイヤロープの破断及び脱落

ワイヤロープへの破断荷重を超える外力の作用によるワイヤロープの破断または、ワイヤを固定している金具からのワイヤの脱落。写真-2 (c)

3) 金網の破網

落石が金網を突き抜ける。写真-2 (d)

一方、落石対策便覧³⁾における支柱の変形と吸収可能エネルギーの算出根拠は、以下の通りに示されている。

- a) 落石の衝突位置は、図-1に示すように支柱間の中央で柵高の2/3の位置とし、落石の衝突方向は柵に直角としている。
- b) 落石が支柱の中間に衝突した場合には、2本の支柱が塑性変形するものとしている。
- c) 柱の変位角を15°と仮定し、落石がスパン中間に衝突し両側の2本の支柱が塑性回転するものとして、支柱の吸収エネルギーを算出している。
- d) ワイヤロープは、弾性変形するものとして、その長さを考慮して弾性限界での吸収エネルギーを計算している。ただし、エネルギー吸収を期待するワイヤロープは、落石径も考慮して2本のみとしている。
- e) 金網の吸収エネルギーは、一様に25kJを用いることになっている。

しかしながら、上述した被災事例を見ると支柱は15°

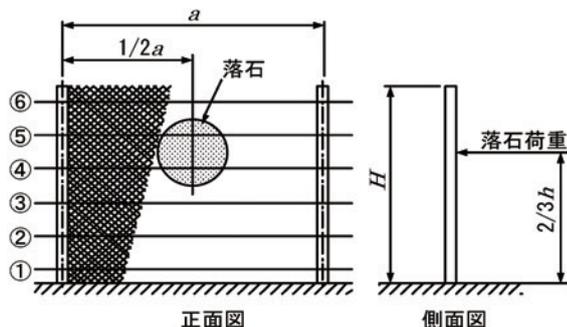


図-1 落石防護柵の落石作用位置

Fig.1 Rockfall action position of rockfall protection fence

曲がる前にねじれ座屈を起こし、ワイヤロープが脱落、金網の突き抜けなど、落石対策便覧に記載されている現象とは異なる事例も報告されている⁴⁾⁵⁾。支柱はエネルギー吸収量も多いが、ねじれを起こすことにより急激に耐力を失うため、支柱のねじれを防ぐことが補強のポイントであると推察できる。

今回、支柱の変形形態、ワイヤロープにかかる張力や金網の挙動など不明な点が多い従来型落石防護柵の性能と挙動について実規模実験を行い検証することとした。

3. 従来型落石防護柵の実験

従来型落石防護柵における落石時の詳細な挙動、限界状態等については、部材レベルの実験や柵高H=2.0mの実験報告がされている^{6)~10)}が、柵高の違いによる挙動については実験が行われていない。

そこで、柵高の違う2種類の落石防護柵について実規模実験を行い挙動と性能を把握した。

3.1 実験タイプ

実験タイプは、柵高の異なるH=2.0m及びH=3.5mタイプとし、1スパン（隣り合う支柱の間隔）3mを5スパン総延長15.0mにて行った（表-1）。

3.2 実験方法

実験方法は、実験架台に埋め込んだφ318.5の鋼管の中に、モルタル充填して一体化させた支柱のφ267.4鋼管（L=1000mm）部を架台に貫通させL=250mmのクサビ（SS400）を用いて架台との隙間を埋めた。さらに、溝形鋼（[100×65）とボルト（M12 4本）を用いて支柱同士を固定し水平に設置した柵に対し、クレーンで吊り上げた重量6.37kNの重錘をエネルギーが50.0kJになるよう7.85mの高さから自由落下させ行った（図-2）。重錘落下位置は、落石対策便覧³⁾に記載されている柵高の2/3とし（図-3）、使用する重錘はEOTA¹¹⁾ (European Organization for Technical Approvals) 型の重錘を使用した。

3.3 測定項目と方法

測定・計測項目は以下の通りである。

- 1) 重錘に取り付けた加速度計より測定した衝撃力
- 2) 端末支柱部の金具（丸鋼）に取り付けたひずみゲージによるワイヤロープの張力（金具全数のキャリブレーションを行い、得られたひずみと荷重の関係を事前に求めた）
- 3) 重錘衝突スパンの支柱基部取り付け付けたひずみゲージによる支柱ひずみの挙動
- 4) 高速度カメラで撮影した中央スパン両側の支柱先

表-1 実験CASE

Table 1 Experiment case

実験 CASE	柵高	重錘エネルギー
CASE-1	H=2.0m	50.0kJ
CASE-2	H=3.5m	50.0kJ

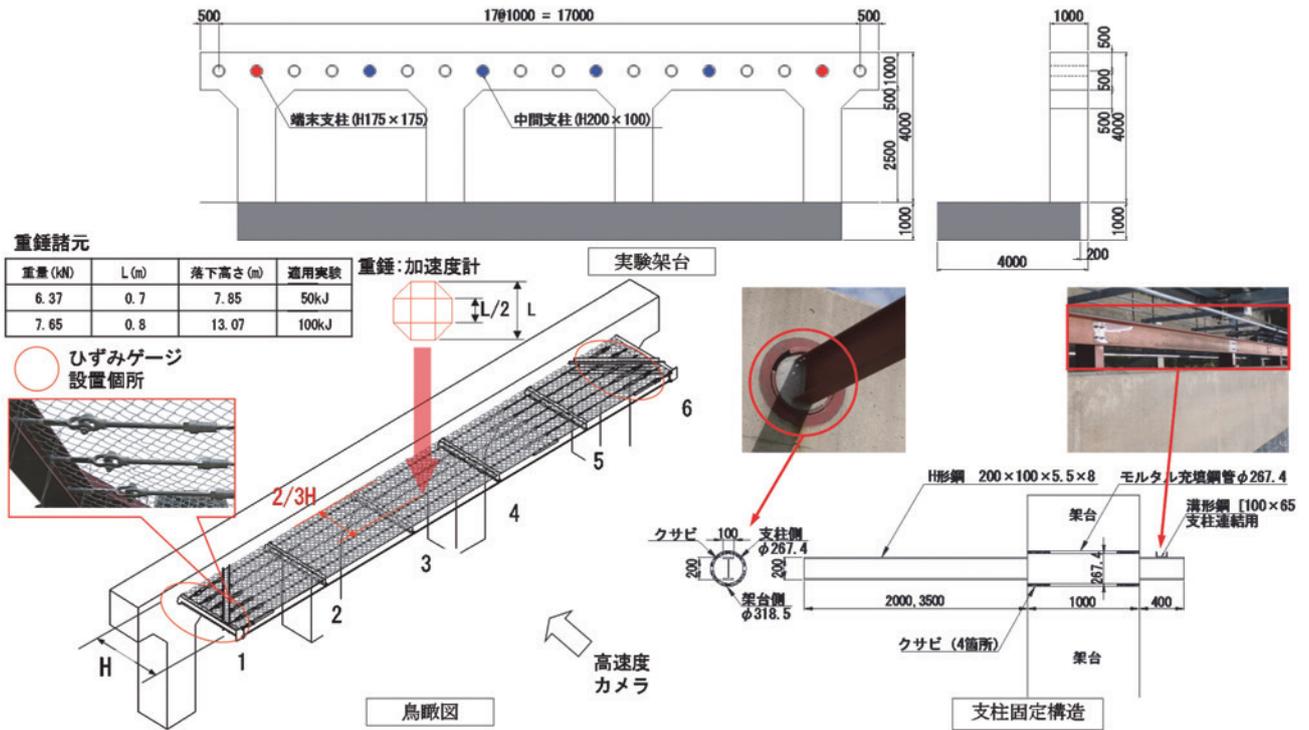


図-2 実験用架台と試験体 (1.2...は支柱No)
Fig. 2 Experimental mount and test object

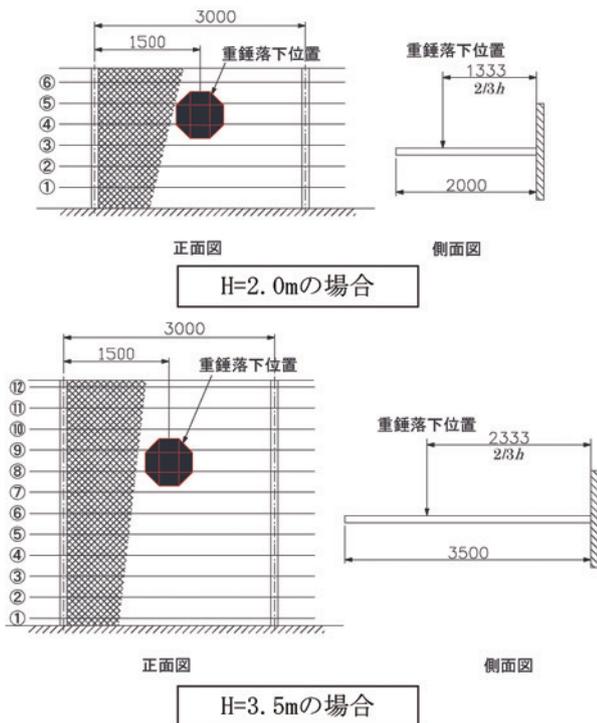


図-3 重錘落下位置とワイヤロープ番号
Fig. 3 Falling weight position and wire rope number

端の変位量と変位角

使用材料諸元は表-2, 測定機器は表-3の通りである。

4. 従来型落石防護柵の実験結果

4.1 支柱の変形について

高速度カメラから得られた画像に, 支柱の変形 (図-

表-2 使用材料諸元
Table 2 Specifications of materials

材料名	諸元
末端支柱	H175×175×7.5×11 mm
中間支柱	H200×100×5.5×8 mm
ワイヤロープ	φ18 mm 3×7 G/O 破断強度: 157kN
ひし形金網	φ3.2 mm 50×50 mm Z-GS3

表-3 測定機器
Table 3 measuring equipment

計測項目	測定機器
ワイヤ張力	ひずみゲージ: 2枚1ゲージ法 3線式結線法
支柱変位	高速度カメラ: FASTCAM SA1.1 (株式会社フォトロン製) 2000fps
衝撃力	加速度計: 東京測器 ARJ-1000A
データロガー	キーエンス: NR-500, NR-ST04

2: 支柱No. 3, 4間) 軌跡をトレースした (写真-3)。柵高の違いによる支柱変位角に違いがあるが, どちらの軌跡も直線的ではなく曲線を描いていることから支柱がねじれながら変形していることがわかる。

連続写真 (写真-4) から支柱の変形の経時変化を見ると, 20msの時点ですでに支柱のねじれが発生しており, ワイヤロープのたわみがねじれを助長していることがわかる。

支柱頭部の変位を比較すると (表-4), 柵高が高くなると変位が大きくなることがわかるが, 支柱のねじれ

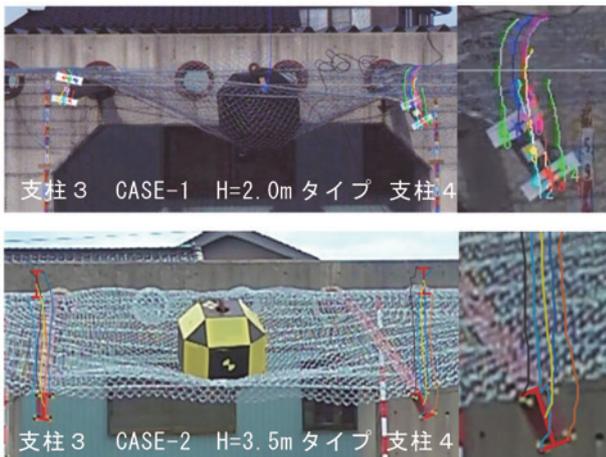


写真-3 重錘衝突時の支柱の挙動
Photo 3 Behavior of posts during a collision

については、どちらも大きな違いが見られない。

4.2 ワイヤ張力について

重錘落下位置にある2本のロープにかかる張力の経時変化を図-4に示す。CASE-1では、ワイヤの破断荷重である157kNを超える177.7kNが作用し、ワイヤロープの素線の一部が破断した(写真-5)。

CASE-2における最大張力は86.1kNであり、柵高によりワイヤに作用する張力に違いがあることがわかった。

また、CASE-1では重錘衝突部の金網に破れを確認したが(写真-6)、CASE-2では金網の破れは確認されなかったことから、CASE-2では、ワイヤロープ及び金網にかかる作用力が小さかったと考えられる。

また、落石対策便覧³⁾では、落石防護柵にかかる荷重を落石衝突部のワイヤロープ2本で計算を行っているが、

表-4 支柱の変形について
Table 4 Deformation of the posts

タイプ	支柱 No	変位量 (mm)	変位角 (°)	ねじれ角 (°)
CASE-1	3	89	2.5	18
	4	300	8.5	25
CASE-2	3	943	15.1	18
	4	955	15.3	27

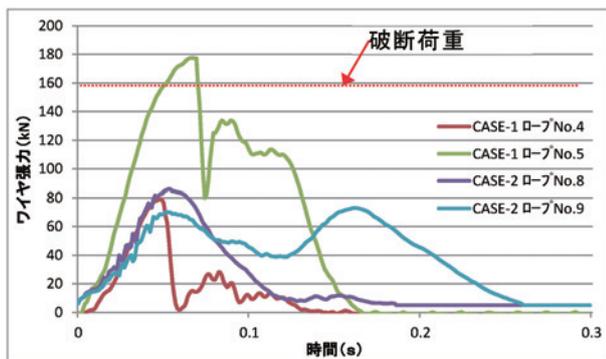


図-4 ワイヤ張力の経時変化
Fig. 4 History of wire tension

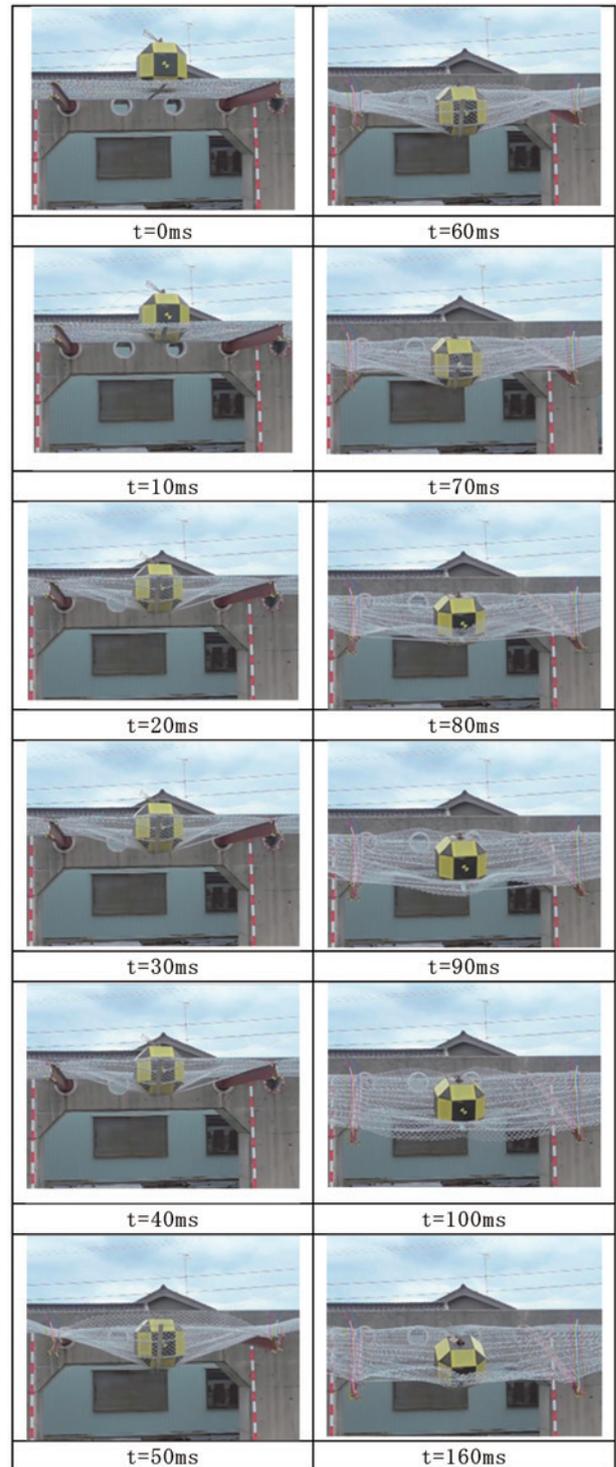


写真-4 衝突時の経時変化 (CASE-2)
Photo 4 History of during collision (CASE-2)

実験では全てのロープに張力が発生している(表-5)。

4.3 重錘衝撃力について

重錘の重心近くに固定した加速度計の測定記録より、重錘が防護柵に衝突する時の重錘衝撃力を算出した。その経時変化を図-5に示す。

衝撃力の最大値については、柵高の違いは見られなかったが、H=2.0mの場合、金網の一部が破網していたため、衝撃力とその影響を受けた可能性もある。い



写真-5 ワイヤロープの素線切れ (CASE-1)
Photo 5 Wire rope strands break (CASE-1)



写真-6 金網の破れ (CASE-1)
Photo 6 Breaking the wire mesh (CASE-1)

表-5 ワイヤ張力測定結果 (CASE-2)
Table 5 Wire tension measurement result (CASE-2)

ロープNo.	端末支柱 (左) (kN)	端末支柱 (右) (kN)
1	9.2	8.9
2	9.8	11.7
3	12.7	14.9
4	11.5	12.3
5	9.4	9.1
6	9.9	8.6
7	16.6	16.3
8	86.1	78.7
9	73.0	67.0
10	35.0	18.2
11	26.4	25.8
12	32.5	24.4

※ロープ番号は支柱基部から上部に向かって付番

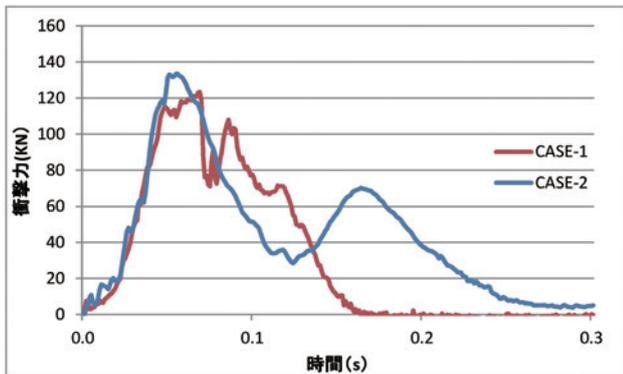


図-5 衝撃力の経時変化
Fig. 5 History of impact force

れのCASEとも2つのピークが見られ、高速度カメラの画像で確認すると、最初のピークは衝突時に支柱とワイヤロープの抵抗によるものである。

2つ目のピークは重錘のリバウンド時であり、支柱の変位量が最大になった時のものであることが確認できた。

柵高の違いにより、最大変位に至るまでの時間が異なるため、2つ目のピークの応答時間が異なると考えられる。

4.4 従来型落石防護柵の実験まとめ

今回の実験結果と落石対策便覧に記載されている落石防護柵の吸収可能エネルギーとの比較を試みた。落石対策便覧³⁾に記載されている支柱及びワイヤロープの吸収可能エネルギーの算出式は以下の通りである。

1) 支柱

$$E_p = 2 F_y \cdot \delta = 2 F_y \cdot h \cdot \tan \theta \quad \dots(\text{式-1})$$

2) ワイヤロープ

$$E_R = L/E \cdot A (T^2 - T_0^2) \quad \dots(\text{式-2})$$

ここに

F_y : 支柱下端が塑性ヒンジを形成する力

$$F_y = \sigma_y \cdot Z/h \quad \dots(\text{式-3})$$

σ_y : 支柱H鋼材の降伏点応力度(SS400で235N/mm²)

Z : H鋼材の断面係数(181,000mm³)

h : 重錘の衝突高さ

θ : 支柱の変位角

L : ロープ長

E : ワイヤロープの弾性係数(100,000N/mm²)

A : ワイヤロープの断面積(129mm²)

T : ワイヤロープ張力

T_0 : 初期張力(5.0kN)

上記式を用いて、実験結果より得られた変位角、ワイヤ張力の値を代入して、それぞれの吸収エネルギーを算出してみた(表-6)。ワイヤロープについては、重錘が衝突したワイヤ2本のそれぞれに計測した張力にて算出した。

金網の吸収エネルギーは落石対策便覧に計算式がなく、一律25kJとなっているため、実験結果では、重錘エネルギー50kJより、支柱及びワイヤロープの吸収可能エネルギーの差より算出した。

落石対策便覧式と比較すると、全体の吸収エネルギーは、落石対策便覧式によるエネルギーが若干大きいものの、CASE-1及びCASE-2ともほぼ同程度だった。

部材別エネルギーは、支柱とワイヤロープで大きな違いとなった。特にワイヤロープについては、重錘と接触していないワイヤにも張力が発生していることから、ワイヤロープの吸収エネルギーはもっと大きいと考えられ、金網のエネルギー吸収は小さいと言える。

また、支柱は変形の途中でねじれ座屈を起こして耐力

表-6 落石対策便覧式と実験結果の比較

Table 6 Difference between rockfall countermeasure handbook and experimental results

柵高	支柱	ワイヤ	金網	全体
落石対策便覧式				
H=2.0m	22.79kJ	5.66kJ	25.00kJ	53.45kJ
H=3.5m	22.79kJ	2.64kJ	25.00kJ	50.43kJ
実験結果				
H=2.0m	8.27kJ	21.96kJ	19.77kJ	50.00kJ
H=3.5m	23.07kJ	6.18kJ	20.75kJ	50.00kJ

を失っているため (写真-7), 変位角から求める吸収エネルギーより実際は小さいと考えられる。

5. 落石防護柵の補強方法について

5.1 支柱の補強

従来型落石防護柵の実験結果より, 使用しているH形鋼支柱のねじれが問題であることが分かった。このH形鋼の断面特性は, 弱軸まわりの断面係数が, 強軸まわりの1/7, 塑性断面係数も1/5程度であることから (表-7), 防護柵の面内方向の力に対しては極めて脆弱であるため, ねじれ座屈を起こしたことがわかる。

写真-8に補強した支柱構造を示す。補強材として支柱下端の局部座屈防止を目的とした補強部材 (写真-9-a), 支柱頭部間を2本の鋼材で連結する補強部材 (写真-9-b)を用いて (写真-8), 支柱の横変位とね



H=2.0m 支柱 No. 4



H=3.5m 支柱 No. 4

写真-7 支柱のねじれ状況

Photo 7 Twisting situation of the posts

表-7 中間支柱 (H-200×100×5.5×8) 断面性能¹²⁾

Table 7 Cross-sectional characteristics of middle post (H-200x100x5.5x8)

断面積	断面二次モーメント		断面係数		塑性断面係数	
	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	W_x (cm ³)	W_y (cm ³)	Z_x (cm ³)	Z_y (cm ³)
A (cm ²)	1,810	138	181	26.7	200	41.4
比率	1.000	0.076	1.000	0.148	1.000	0.207



写真-8 支柱の補強部材

Photo 8 Reinforcing member of support posts

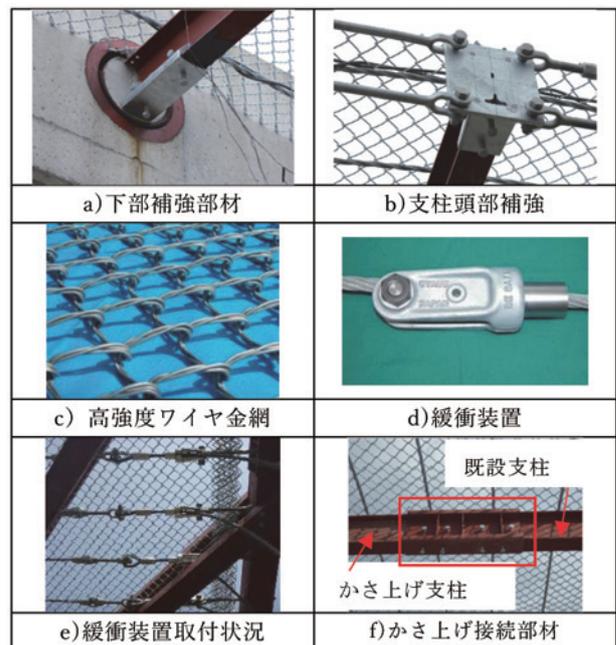


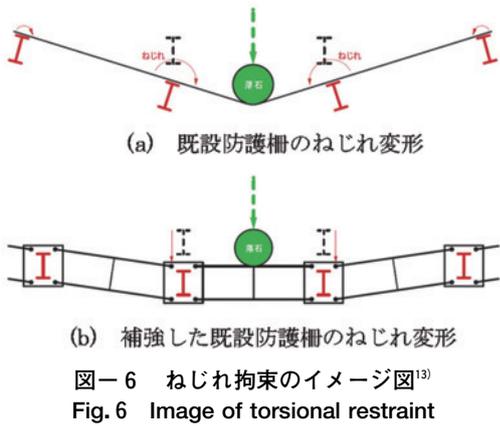
写真-9 補強に用いる部材

Photo 9 Materials used for reinforcement

じれ剛性を向上させることで, 支柱は防護柵の延長方向に対し直角方向 (面外方向) のみに変位し, 衝撃吸収能力を向上させることができると考えた (図-6)。

5.2 金網の補強

金網の突き抜け対策とエネルギー吸収能力を向上させるため, 高強度ワイヤ金網 (3本よりφ2.6mm)を用いた (写真-9-c)。



5.3 ワイヤロープの張力低減

端末支柱の変形要因であるワイヤにかかる張力を低減させるために、一定の張力でワイヤをスリップさせエネルギーを吸収する緩衝装置を用いて対応することとした(写真-9-d, e)。スリップさせる張力は、端末支柱の降伏応力以内になるよう予めフレーム解析を行い20kNと設定した。

5.4 柵高のかさ上げ

落石の飛び越えに対応するため、既存支柱に支柱を継ぎ足し柵高をかさ上げできる接続部材を用いることとした(写真-9-f)。

これらの部材は、現地での作業を軽減するために、現地加工することなく、既設の落石防護柵にはめ込みボルトで締め込むだけの構造とした(図-7)。

6. 補強落石防護柵の実験結果

実験は、写真-9の補強金具を取り付け緩衝装置の有無と柵高の違いによる挙動を把握するため、表-8に示すCASEにて行った。実験方法は、従来型と同じであるが、重錘重量を7.65kNとし、重錘のエネルギーが従来型の倍である100kJになるよう落下高さを13.07mより落させた。

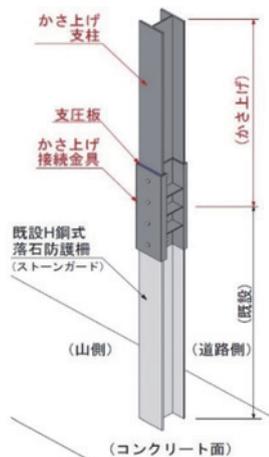


図-7 支柱のかさ上げ方法
Fig. 7 Method to heighten the posts

表-8 実験CASE
Table 8 Experiment case

実験 CASE	柵高	緩衝装置
CASE-1	H=2.0m	なし
CASE-2	H=2.0m	あり
CASE-3	H=3.5m (かさ上げ)	あり

6.1 支柱の変形について

高速度カメラから得られた画像に、支柱の変形(図-2:支柱No.3,4間)軌跡をトレースした(写真-10)。軌跡はほぼ真下に向かって変形しており、支柱のねじれが無補強の場合とくらべ小さいことがわかる。また、CASE-3のかさ上げの場合において、既存支柱とかさ上げ支柱を接続した「かさ上げ接続部材」に損傷はなかった。

支柱の変形について実験結果を表-9に示す。H=2.0

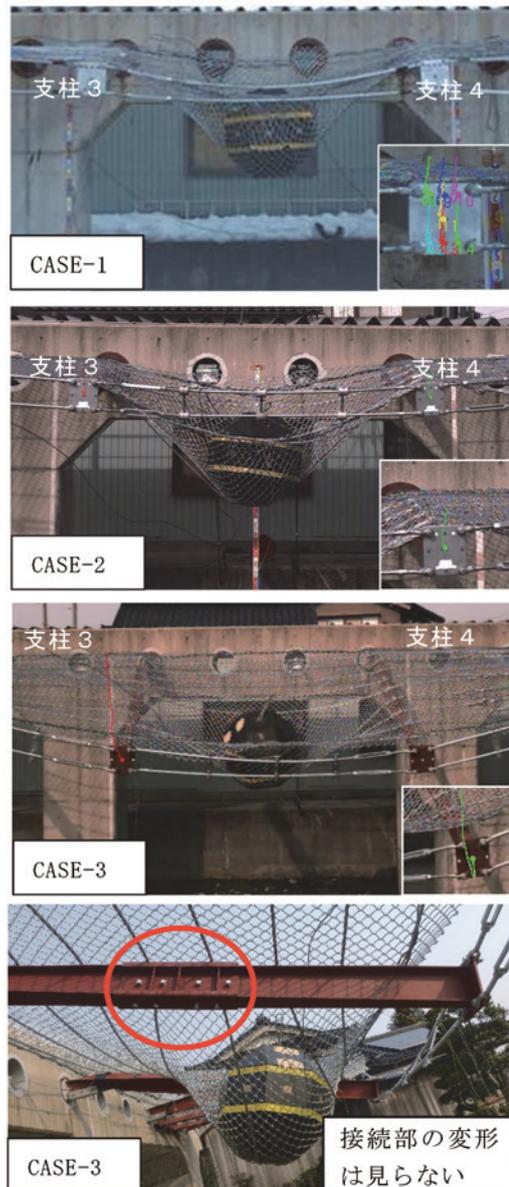


写真-10 重錘衝突時の支柱の挙動
Photo 10 Behavior of posts during a collision

表-9 支柱の変形について
Table 9 Deformation of the posts

タイプ	支柱 No	変位量 (mm)	変位角 (°)	ねじれ角 (°)
CASE-1	3	164	4.7	0
	4	158	4.5	0
CASE-2	3	208	5.9	2
	4	223	6.4	3
CASE-3	3	995	15.9	4
	4	1028	16.4	7

mの場合 (CASE-1, 2) 無補強の実験と比べ重錘エネルギーが倍になっても、変位角は逆に小さくなっているが、H=3.5m (CASE-3) の場合は、無補強と比べ約1°程度大きくなった。ねじれ角は最大でも7°であり補強の効果が見られ、支柱の性能を十分に引き出したことにより、エネルギーが倍になってもねじれ角が小さい結果になったと考えられる。

また、端末支柱に着目すると、緩衝装置の効果により重錘衝突後の変形は見られなかった (写真-11)。

6.2 ワイヤ張力について

各CASEで重錘が衝突したワイヤロープ2本の内、最も大きい張力が発生したロープにて比較を行った。

緩衝装置を設けていないCASE-1において、最大張力174.9kNが発生しワイヤロープが破断した。CASE-2, 3においては、緩衝装置の効果により、CASE-2では19.9kN, CASE-3では31.1kNの最大張力を計測し、ワイヤロープの損傷や端末支柱の変形は見られなかった (図-8)。

6.3 重錘衝撃力について

無補強の場合と比較するとCASE-1では、重錘エネルギーが倍になったことに比例して、衝撃力も大きくなったことがわかった。

補強タイプのCASE-1とCASE-2を比較すると、ピーク時間に違いがみられ緩衝装置のスリップによるものと



写真-11 端末支柱の変形状況 (CASE-3)
Photo11 Deformation of terminal post

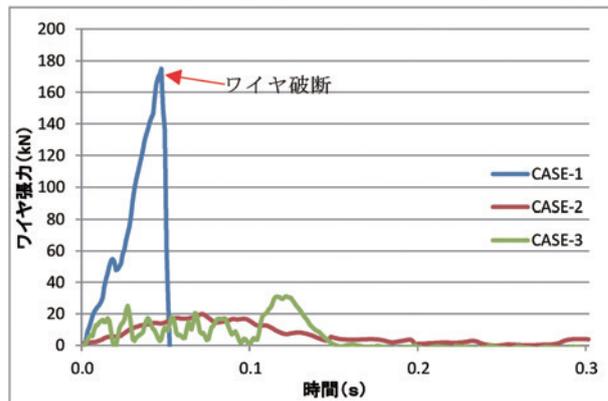


図-8 ワイヤ張力の経時変化
Fig. 8 History of wire tension

考えられる。また、衝撃力を比較するとCASE-2の方が15kN小さくなっていた。

緩衝装置を用いた補強の柵高の違いは、無補強の場合にはほぼ同じ値を示していたが、CASE-3の衝撃力が小さくなった。これは、緩衝装置の設置や、高強度ワイヤ金網使用により各部材のエネルギー吸収バランスが、無補強の場合と異なっているためと考えられる (図-9)。

6.4 緩衝装置のスリップ量について

緩衝装置は、ワイヤに一定の張力が発生すると装置が保持しているワイヤがスリップすることにより、重錘のエネルギーを吸収する (写真-12)。

CASE-2及び3において緩衝装置を用いたが、それ

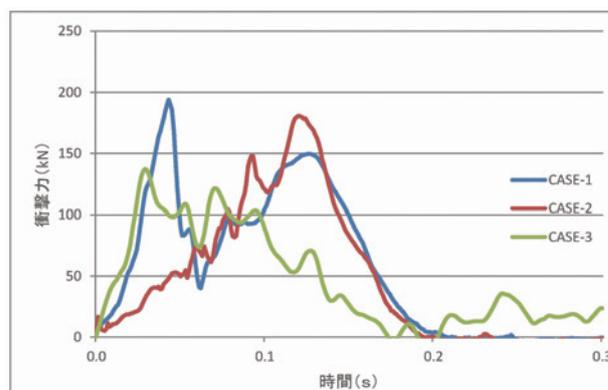


図-9 衝撃力の経時変化
Fig. 9 History of impact force



写真-12 緩衝装置のスリップ状況
Photo12 Slip condition of buffer device

表-10 緩衝装置のワイヤスリップ量
Table10 Amount of wire slip in buffer device

CASE-2			
ロープNo.	端末支柱(左) (m)	端末支柱(右) (m)	総スリップ長 (m)
1	0.030	0.070	1.997
2	0.010	0.022	
3	0.152	0.053	
4	0.370	0.654	
5	0.040	0.363	
6	0.073	0.160	
CASE-3			
ロープNo.	端末支柱(左) (m)	端末支柱(右) (m)	総スリップ長 (m)
1	0.000	0.000	1.339
2	0.000	0.000	
3	0.000	0.000	
4	0.000	0.000	
5	0.000	0.000	
6	0.095	0.025	
7	0.103	0.550	
8	0.003	0.465	
9	0.043	0.015	
10	0.025	0.015	

ぞれのCASEにおけるスリップ量を表-10に示す。

重錘が衝突したワイヤは大きくスリップしているが、近傍のワイヤにおいてもスリップが確認され、エネルギー吸収を効果的に行っていることがわかった。

緩衝装置のスリップ張力は、図-8より波形は短い周期で変動しているが、ワイヤロープがスリップしている時の平均値を20kNとし、総スリップ量を乗じた吸収エネルギー量は、CASE-2で39.94kJ、CASE-3で26.78kJとなった。

6.5 補強落石防護柵実験の考察

支柱頭部及び下部の5.1に示す補強材の効果により、支柱のねじれを抑えることが可能となり耐力を向上させることができた。

緩衝装置が無い場合(CASE-1)、ワイヤロープに大きな張力が発生し破断したが、緩衝装置を設けることにより(CASE-2,3)、ワイヤロープ張力の低減とエネルギー吸収が効果的に機能したことが確認できた。

5.2及び5.4に示す高強度ワイヤ金網、かさ上げ部材を用いた場合、重錘エネルギーが増加しても、損傷なく重錘を捕捉することが可能となった。

従来型と同様の方法にて、実験結果から各部材のエネルギー吸収量を求めた(表-11)。金網の吸収量は、重錘エネルギー100kJから金網以外の部材のエネルギーの差で求めた。CASE-1は、ワイヤが破断したため除外した。

表-11 各部材のエネルギー吸収量
Table11 Energy absorption of each parts

タイプ	支柱	ワイヤ	金網	緩衝装置
CASE-2	9.17kJ	2.57kJ	48.32kJ	39.94kJ
CASE-3	24.59kJ	1.92kJ	46.71kJ	26.78kJ

7. まとめ

本研究では、被災事例から従来型落石防護柵の構造上の弱点を把握するとともに、実規模実験により従来型落石防護柵の挙動を把握した。

既存の落石防護柵に簡単な金具を取り付けることにより、落石吸収エネルギーを2倍に増加させることが可能であることを実験にて確認できた。本研究で得られた結果を整理すると以下の通りである。

- (1) 従来型落石防護柵は柵高の違いにより支柱の変位及びワイヤロープ張力に違いがあり、エネルギー分担も異なることがわかった。
- (2) 従来型落石防護柵の衝撃挙動では、被災事例と同様な支柱のねじれを実験にて再現することができた。
- (3) 支柱のねじれを少なくする補強部材、高強度金網及び緩衝装置を追加することで、従来型落石防護柵に対し2倍の落石エネルギーが吸収できることを実験で確認できた。
- (4) かさ上げ部材を用いた支柱のかさ上げを行った場合でも、接続部の損傷なく落石を受け止めることが可能であることを確認できた。

8. 謝辞

本研究を行うにあたり、国立研究開発法人寒地土木研究所の今野久志博士には、実験のご助言や実験結果に対する評価を頂いた、金沢大学名誉教授吉田博博士には、補強や実験及び測定方法のご助言を頂いた、(株)寒河江測量設計事務所の堀和彦博士には、従来型落石防護柵の問題点についてご助言を頂いた、(株)ビーセーフの社員のみなさまには、実験準備、試験体の組立や実験計測など多岐にわたってご協力頂いた。記して、以上の方々へ厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 中島利樹, 小澤岳弘 (2003): 長野県達磨山における落石災害復旧工事について, 日本地すべり学会誌Vol. 40, No. 4, pp. 71-78.
- 2) (一社)日本溶融亜鉛鍍金協会: <http://www.aen-mekki.or.jp> (参照日2020年12月28日).
- 3) (公社)日本道路協会 (2017): 落石対策便覧
- 4) (公社)地盤工学会 (2014): 落石対策工の設計法と計算例.
- 5) (国研)土木研究所 (2017): 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, 第491号.
- 6) 中村拓郎・今野久志・山澤文雄・寺澤貴裕・西弘明・小室雅人 (2019): 従来型落石防護柵の実規模衝突実験, 寒地土木研究所月報, 第791号, pp. 14-22.
- 7) 荒木恒也, 今野久志, 寺澤貴裕, 小室雅人, 田畑翔太 (2018): 従来型落石防護柵の実規模重錘衝突実験, 平成29年度土木学

- 会北海道支部論文報告集, Vol.74 (CD-ROM), A-04.
- 8) 今野久志, 荒木恒也, 寺澤貴裕, 小室雅人, 岸徳光 (2018): 重錘落下衝撃実験による従来型落石防護柵の落石すり抜けに関する研究, 平成29年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol.74 (CD-ROM), A-07.
 - 9) 小室雅人, 服部桃加, 今野久志, 荒木恒也 (2018): 重錘落下を受ける従来型落石防護柵模型の衝撃応答解析, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.74, No.2, pp. I_303-I_313.
 - 10) 小室雅人, 服部桃加, 中村拓郎, 西弘明, 岸徳光 (2020), 従来型落石防護柵の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討, 構造工学論文集Vol.66A, pp.1016-1026.
 - 11) EOTA (2008): Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (ETAG027).
 - 12) JFEスチール(株)(2018): 構造設計便覧, pp.5-1-5-12.
 - 13) 松嶋秀士, 小島明德, 川合慶直, 吉田博 (2014): 既設H鋼式落石防護柵の補強に関する研究, 第11回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム (38), pp.1-6.
(原稿受付2021年1月5日, 原稿受理2021年5月31日)