

高エネルギー吸収型落石防護柵（支柱強化型）の 実物大衝撃荷重実験による性能検証

Performance verification of high energy absorbing protection barrier with strengthened posts
by means of full-scale impact loading tests

酒井啓介[†], 奥田峻*, 田邊梨沙*, 岸徳光**, 小室雅人***

Keisuke Sakai, Shun Okuda, Risa Tanabe, Norimitsu Kishi, Masato Komuro

[†]修(工), 東亜グラウト工業株式会社 (〒160-0004 東京都新宿区四谷二丁目 10 番地 3)

*東亜グラウト工業株式会社 (〒160-0004 東京都新宿区四谷二丁目 10 番地 3)

**工博, 室蘭工業大学特任教授, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***博(工), 室蘭工業大学准教授, 大学院工学研究科 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

The regulation for countermeasures against rockfall disaster has been revised focusing on the safety of road traffic. If the national disaster occurred, it may be important to ensure the road network against the disaster to save people's lives and to keep the logistics network. Therefore at first the construction limit area of roads must be protected from falling rocks as far as possible. To accomplish this, some kinds of traffic facilities were installed along the highway networks. In this paper, a low deflection barrier was developed and its applicability was verified based on the full-scale impact loading tests following the design guidelines. Here, outline of the structural details and experimental results were introduced.

Key Word : safety of traffic space, full-scale impact loading test, barrier's deformation

キーワード: 通行空間の安全性, 実物大衝撃荷重実験, 柵変形量

1. はじめに

我が国で高エネルギー吸収型落石防護柵の建設・施工が開始されて 20 年以上が経過した現在, より高性能な同防護柵が開発・施工されてきている. 一般にこの種の防護柵は支柱強化型とネット強化型の 2 種類¹⁾に大別される. 前者は防護対象物に比較的近い位置に設置するものであり, 後者は大きな変形を許容することから, 前者に比べて大きな落石エネルギーに対応できるものの, 保全対象物との離隔距離が必要となる.

一方, 落石防護柵に対するニーズは時代とともに変化しており, 道路分野においては道路土工構造物技術基準の制定²⁾, 落石対策便覧の改訂³⁾等を受けて, 重要度の高い路線については高性能な落石防護柵が求められ, 特に路側に設置する場合には道路空間の安全性を損なわないことが必須となった. また, 鉄道分野においては従前から, 列車の安全走行を確保するため, 同様の高い性能を有する防護柵が求められている.

このような背景から, 道路や鉄道に近接して設置

が可能で, かつ通行空間の安全性を確保できる落石防護柵の開発を目的に, 2 種類のプロトタイプ防護柵を製作し, その緩衝性能を検証するために実物大衝撃荷重実験を実施した. 本論文では, 2 種類の防護柵の緩衝性能について, 変形量やロープ張力ならびに緩衝構造のすべり量に着目し, 実験的側面から詳細に検討を行った.

2. 落石防護柵の技術的要件

本研究では, 新しい防護柵の開発にあたり, 要求される技術的要件として, 以下の項目を設定し, これを満足できる落石防護柵の仕様を決定することとした.

- 1) 道路や鉄道に近接して設置可能な落石防護柵とし, 対象とする最大運動エネルギーに対して柵の最大変形量が 2 m 以下であること.
- 2) 用地範囲が限られるケースを想定して, 可能な限り防護柵の設置面積が小さいこと. すなわち, 支柱を支える補強ロープ等を必要としない構造であること.

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: keisuke.sakai@toa-g.co.jp

表-1 試験体ケース一覧

試験体名	入力エネルギー (kJ)	間隔保持材本数 (本)	支柱タイプ	上弦材の接続方法	実験結果
C-5	449.9	5	コンクリート充填鋼管柱	回転を許容	貫通
H-7	514.4	7	H形鋼内挿型支柱	回転を拘束	捕捉

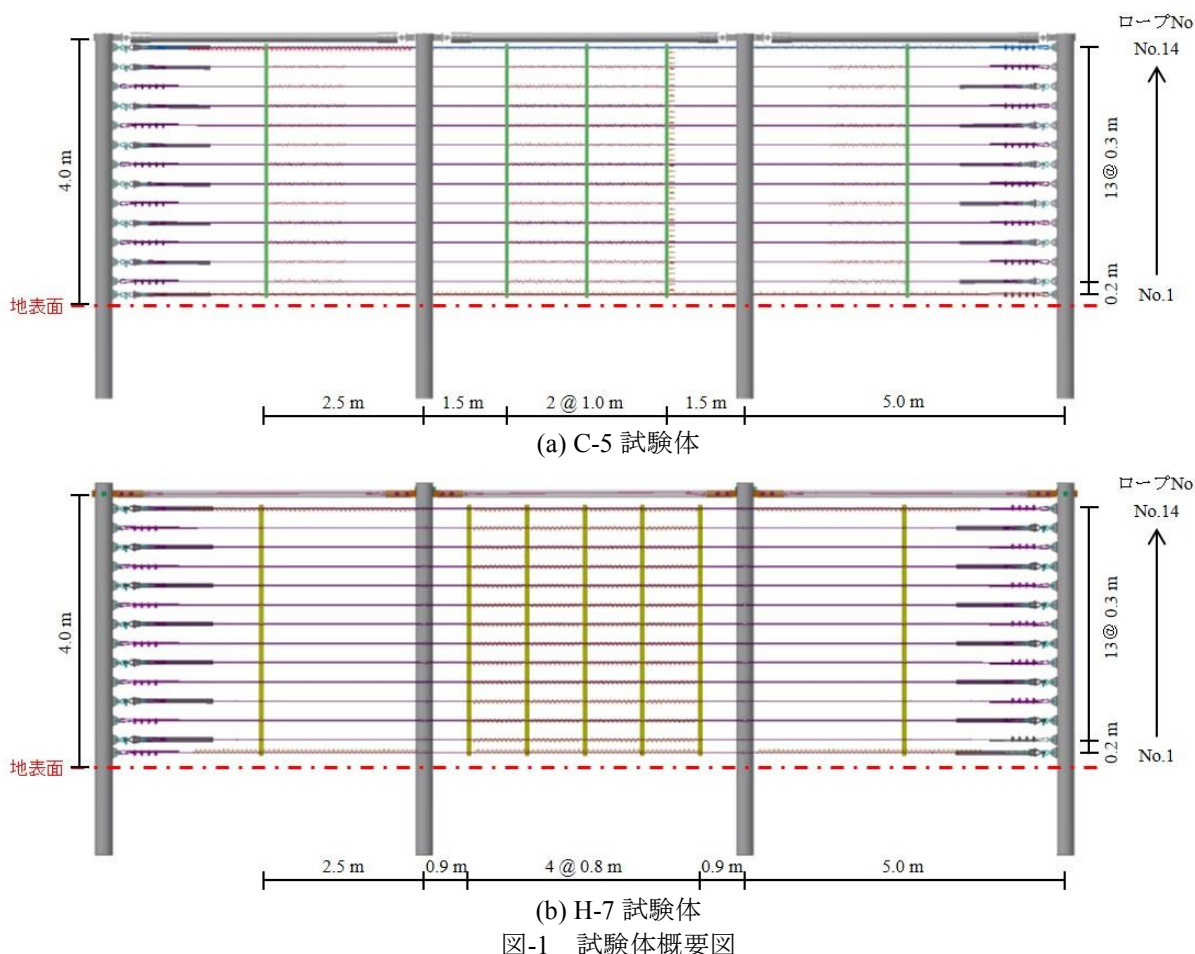


図-1 試験体概要図

3) 最大運動エネルギーに対する落石防護柵の性能を実物大衝撃荷重実験により検証し、実験仕様が落石対策便覧に記載の規定される内容に適合すること。

上記の性能を満足するためには、防護柵全体の剛性を高めるとともに、防護柵全体でバランスよく変形させることがきわめて重要となる。したがって、プロトタイプの開発にあたっては、部材単体を含めた基礎的な実験による検討を行った上で、基本構造を決定し、最終的な性能確認実験とこれに基づく数値解析⁴⁾を実施して仕様を決定することとした。なお、ここでは、実物大実験から得られた知見を述べる。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

表-1 には、実験ケースを示している。試験体名の第 1 項は支柱の仕様を表し、第 2 項は間隔保持材

の本数を表している。

C-5 試験体は支柱にコンクリート充填鋼管柱を使用しており、各支柱頭部には、上弦材を設置した構造である。支柱頭部に設置した専用のキャップと上弦材端部の専用部材を 2 本のボルトによって接続しており、上下左右に回転が可能な構造 (図-2 (a) 参照) となっている。一方、H-7 試験体は、鋼管支柱内に H 形鋼を配置した支柱を使用し、上弦材は支柱を貫通させた専用プレートと 2 本のボルトを用いて接続することで回転を拘束した剛接合に近い構造 (図-2 (b) 参照) である。

図-1 には、本実験で使用した C-5 試験体および H-7 試験体の形状寸法を示している。また、図-2 には、各試験体の支柱天端における上弦材との接合方法を示している。各試験体の形状寸法は柵高 4.0 m、延長 5.0 m × 3 スパン = 15 m である。

(1) C-5 試験体

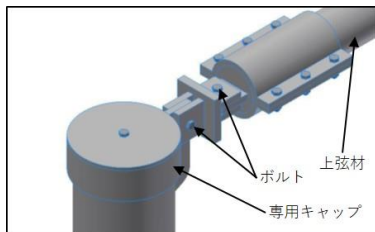
表-2 には、C-5 試験体を構成する部材の一覧を示している。C-5 試験体は鋼管内にコンクリートを充

表-2 C-5 試験体使用部材一覧

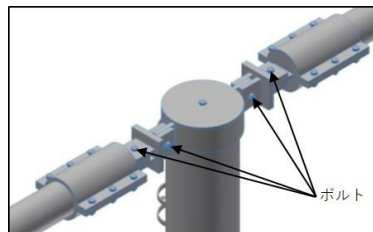
項目	部材	仕様	材質
支柱	鋼管	φ 273-t12.7	SS400
	充填コンクリート	—	高流動コンクリート
	PC 鋼棒	φ 23	SBPR 1,080/1,230
ワイヤロープ	ワイヤロープ	ロープ径：φ 18 構成：6×36WS+IWRC 破断荷重：204 kN	硬鋼線
金網	高強度金網	素線径：4.0 mm 目合い寸法：83 mm×138 mm 公称素線引張強度：1,770 N/mm ²	硬鋼線
上弦材	鋼管	φ 139.8-t9.53	SGP
衝撃緩和装置	U ブレーキ	初期作動荷重：75 kN (静的)	鋼板：X5CrNi18-10
間隔保持材	鋼材	上部：PL-1,900×65×9 下部：PL-2,100×65×9	SS400
	U ボルト	M14-50	SS400

表-3 H-7 試験体使用部材一覧

項目	部材	仕様	材質
支柱	鋼管	φ 273-t12.5	S355
	H 形鋼	HEM160 (H-166×180×14×23)	S355
ワイヤロープ	ワイヤロープ	ロープ径：φ 18 構成：6×36WS+IWRC 破断荷重：204 kN	硬鋼線
金網	高強度金網	素線径：4.0 mm 目合い寸法：83 mm×138 mm 公称素線引張強度：1,770 N/mm ²	硬鋼線
上弦材	鋼管	φ 141.3-t9.53	S355 J0+AR
衝撃緩和装置	U ブレーキ	初期作動荷重：75 kN (静的)	鋼板：X5CrNi18-10
間隔保持材	鋼材	PL-3,900×60×12	S355 J0+AR
	U ボルト	M14-35	Steel 6.8



端末支柱

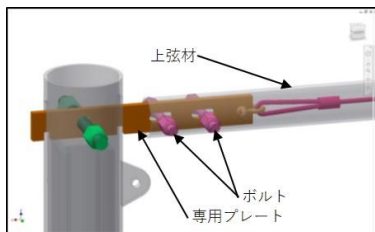


中間支柱

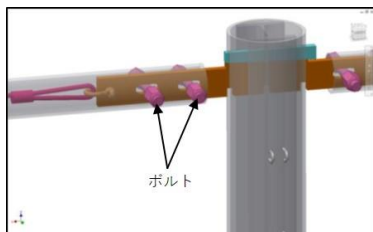
(a) C-5 試験体



写真-1 ネットおよびワイヤロープ



端末支柱



中間支柱

(b) H-7 試験体



写真-2 U ブレーキ

図-2 各支柱天端における上弦材の接合方法

填させた支柱，支柱間を連結し，柵延長方向の変形を抑制する上弦材，写真-1 に示す重錘捕捉用のワイヤロープと高強度ひし形金網，重錘のワイヤロープ

間のすり抜けを防止する間隔保持材および重錘捕捉時に衝撃力を吸収する衝撃緩和装置の U ブレーキ (写真-2) から構成される．ワイヤロープは上から



写真-3 実験装置

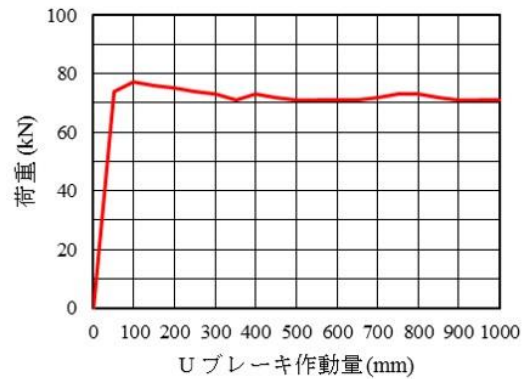


図-3 U ブレーキの静的引張試験結果

表-4 性能検証方法 (主要項目抜粋)

要求事項	落石対策便覧	本実験	
		C-5 試験体	H-7 試験体
実験供試体	3 スパン	3 スパン	
実験方式	斜面滑走式, 転落式, 振り子式, 鉛直落下式など	水平滑走式	
重錘形状 材質	形状: 多面体 材質: コンクリート (密度 2,300 ~ 3,000 kg/m ³)	形状: 多面体 材質: コンクリート (2,600 kg/m ³)	
衝突速度	25 m/s 以上	24.7 m/s	26.2 m/s
入射角度	阻止面に対して垂直	阻止面に対して垂直	
載荷位置	水平方向: スパン中央 鉛直方向: 鉛直中央高さから最大衝突高さの間	水平方向: スパン中央 鉛直方向: 2.25 m	

300 mm 間隔で 13 本, 最下端のみ 200 mm で 1 本の計 14 本を水平に配置している。

本試験体に使用した U ブレーキは, 鋼板の曲げ変形を利用したエネルギー吸収装置であり, ワイヤロープ張力作用時に鋼板がガイドをすべりながら変形することでワイヤロープ張力の緩和とエネルギー吸収を目的とする部材である。図-3 には, U ブレーキの静的引張試験結果を示している。縦軸に荷重, 横軸に作動量を表している。荷重はほぼ線形的に増加し, 約 75 kN で鋼板のすべりが発生するとともに, 荷重がほぼ一定値を示す特性を有する。間隔保持材は施工性を考慮し, 上下 2 枚に分割した鋼板を間隔保持材と No.9 のロープを連結している U ボルトを用いて併せて接続した。

なお, 支柱基部はコンクリート基礎に埋め込まれた杭式構造となっており, 控えのロープを必要としない構造となっている。

(2) H-7 試験体

表-3 には, H-7 試験体を構成する部材の一覧を示している。H-7 試験体は, 後述するように C-5 試験体の実物大実験において, 重錘が防護柵を貫通したことより, 支柱, 上弦材, 間隔保持材の仕様を変更した試験体である。具体的には, 施工性の向上や最

適化を図るため, 支柱をコンクリート充填鋼管柱から鋼管に H 形鋼を内挿させた支柱に変更した。上弦材は支柱頭部に貫通させた鋼板とボルト接合することにより, 支柱との一体化を図った。また, 間隔保持材は, 重錘貫通時において接合部の U ボルトが破断したことより, 2 枚を接合する仕様から 1 枚もの間隔保持材に変更するとともに, その本数を 5 本から 7 本に増設した。

3.2 実験方法

実験は, 平成 29 年度に改訂された落石対策便覧に基づき実施することとした。国内で部材ならびに防護柵の基礎実験を実施し, 主たる構造仕様を決定した後に, スイスの DTC (Dynamic Test Center)⁵⁾にて実物大衝撃荷重実験を実施し, その性能を検証した。

実験は, 重錘の運動エネルギーを 500 kJ 以上となるように衝突速度を設定し, 水平滑走式の重錘射出装置 (写真-3) を防護柵の直前で停止させ, 慣性力により重錘を射出させて実施した。なお, 重錘は EOTA 規格⁶⁾に準拠したコンクリート多面体 (外寸 960 mm, 質量 1,499 kg) を用いた。重錘衝突位置はスパン中央部に柵高の 2/3 の高さ (約 2.67 m) を想定し

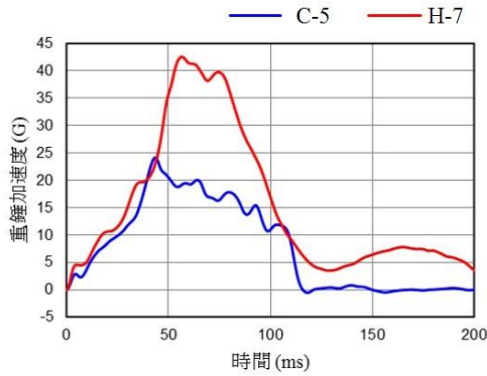


図-4 重錘加速度の時刻歴応答波形

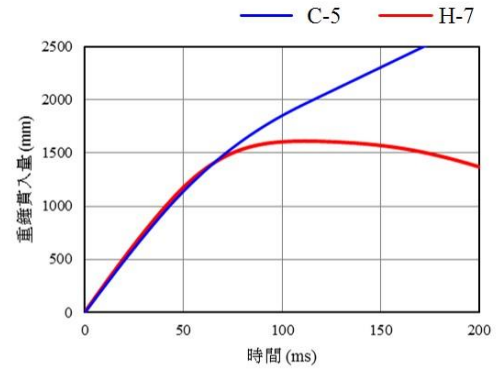


図-5 重錘貫入量の時刻歴応答波形

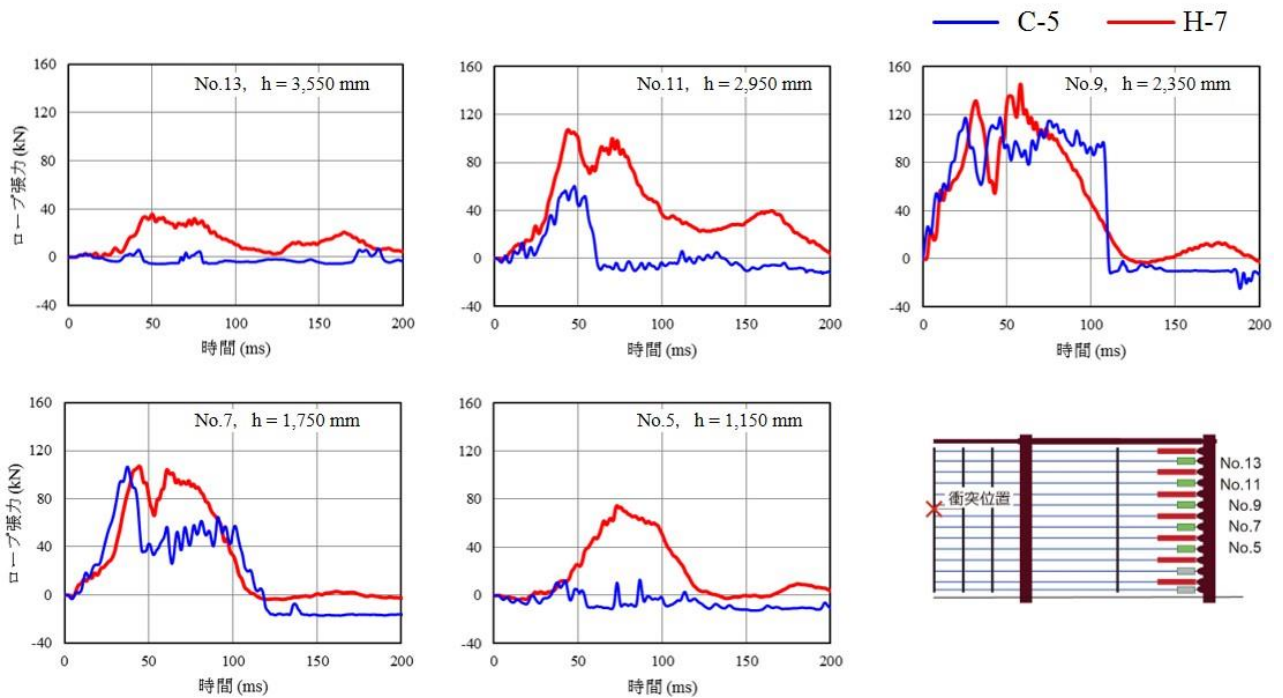


図-6 重錘衝突位置近傍のワイヤロープ張力に関する時刻歴応答波形

たが、実験装置の性能により実際には基部より高さ 2.25 m に衝突させた。表-4 には、落石対策便覧に基づく性能検証方法と本実験における性能検証方法の主要項目を比較している。C-5 試験体に関しては、衝突速度が若干小さく、所定の衝突エネルギーを満足していないものの、H-7 試験体に関しては落石対策便覧の性能検証方法を満足する実験であった。

3.3 測定項目

本実験における測定項目は、1) 重錘加速度、2) ワイヤロープ張力、3) 重錘貫入量(柵変形量)である。重錘加速度の測定は、重錘に内蔵された 3 軸加速度センサおよび 3 軸ジャイロセンサを用いて行った。ワイヤロープ張力はワイヤロープ端部に接続したロードセル(ロープ番号 No.1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 に接続)により計測した。また、重錘貫入量は高速カメラにて撮影した写真から画像解析により計測している。高速カメラによる撮影のフレームレートは

1,250 fps である。実験時の応答波形は、広帯域用データロガーを用いて一括収録した。

さらに、高速カメラやリアルタイムカメラ、シーケンスカメラなど計 8 台のカメラを用いて、防護柵全体の動的挙動を詳細に確認した。また、実験終了後には目視点検および写真撮影により、損傷状況を観察した。

4. 実験結果および考察

4.1 各種応答波形

(1) 重錘加速度

図-4 には、C-5 および H-7 試験体に関する重錘加速度の時刻歴応答波形を示している。なお、重錘が防護柵に衝突した時刻を零としている。図より、重錘加速度の立ち上がりに関しては、C-5 および H-7 試験体でほぼ同様な応答性状を示していることが分かる。一方、45 ms 以降では、両者の応答波形が

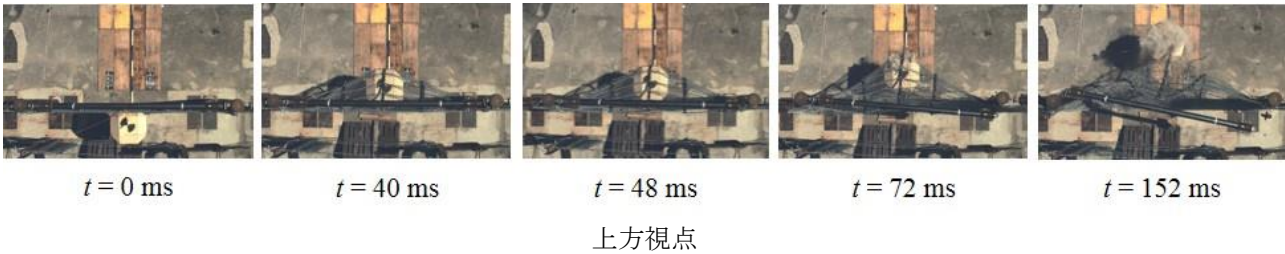


写真-4 C-5 試験体の変形状況

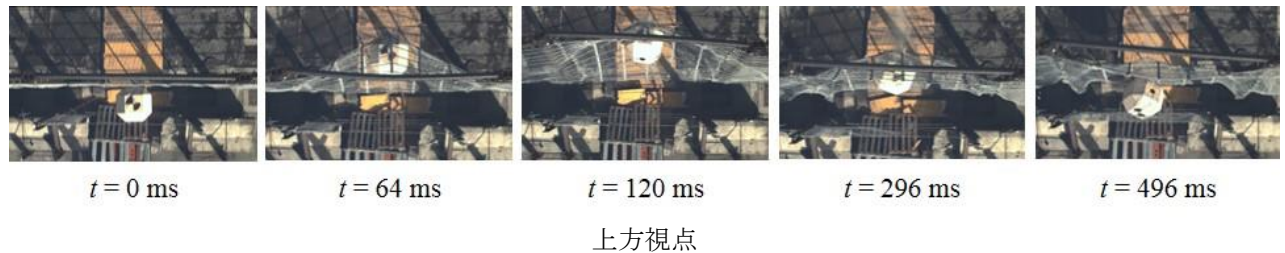
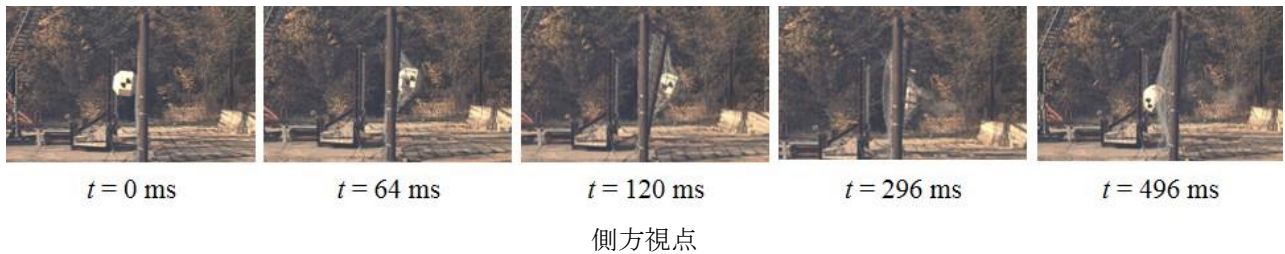


写真-5 H-7 試験体の変形状況

大きく異なっている。すなわち、C-5 試験体の場合には、加速度が減少しているのに対し、H-7 試験体は未だ増加している。これは、C-5 試験体の場合には、重錘が防護柵を貫通したのに対して、H-7 試験体の場合には、重錘を捕捉したこと起因しているものと推察される。なお、H-7 試験体に作用した最大衝撃力は最大重錘加速度と重錘質量の積として評価すると 626 kN 程度であったものと推察される。

(2) 重錘貫入量

図-5 には、重錘の水平方向貫入量について、両者の結果を比較して示している。前述の重錘衝撃力の場合と同様に、重錘貫入量の立ち上がりに関しては、両者で同様の波形性状を示していることが分かる。しかしながら、H-7 試験体の場合には、その後重錘貫入量の増加率が徐々に減少し、約 110 ms 経過後に最大値 (1,612 mm) を示し、リバウンド状態に移行している。一方、C-5 試験体の場合には、重錘が防護柵を貫通したことにより、貫入量の増加率はほぼ一定のまま増加していることが分かる。

なお、H-7 試験体の最大重錘貫入量は 1,612 mm となり、道路空間の安全性評価などで重要となる柵

の変形量は、支柱外縁からの水平変位で評価することを考慮すると、次式より

$$\begin{aligned}
 \text{柵変形量} &= \text{重錘貫入量} - \text{鋼管直径} \\
 &= 1,612 \text{ (mm)} - 273 \text{ (mm)} \\
 &= 1,339 \text{ (mm)}
 \end{aligned}$$

となるため、本研究で設定した技術要件 (重錘捕捉時の最大変形量 2 m 以下) を満足していることが分かる。

(3) ロープ張力

図-6 には重錘衝突位置近傍のワイヤロープ張力に関する時刻歴応答波形を示している。ここでは、重錘衝突位置である No. 9 を中心とした 5 本のワイヤロープ張力を示している。

図より、重錘衝突位置に最も近い No. 9 に着目すると、衝突後 50 ms 程度までは、両試験体でほぼ同様な傾向を示している。しかしながら、50 ms 以降では、その性状に若干の差異が確認されるとともに、C-5 試験体では 110 ms 経過時に張力がゼロまで急激に減少している。これは、重錘衝突によってワイ

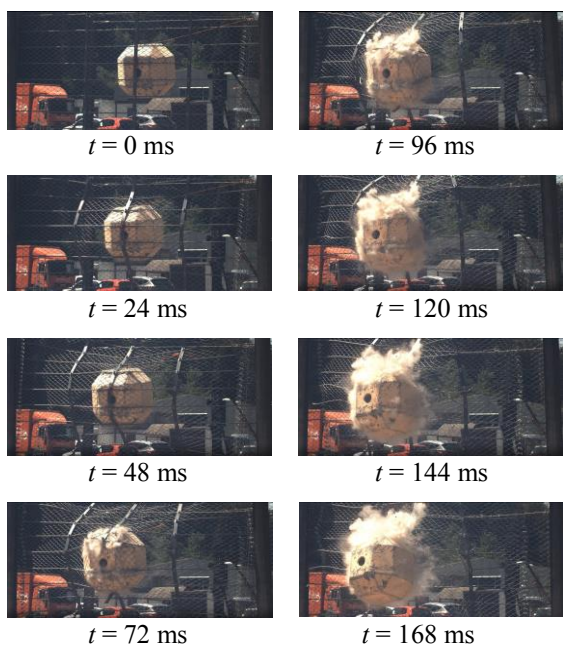


写真-6 重錘の貫通状況 (C-5 試験体)

ヤロープが破断したことによるものと考えられる。

また、衝突位置近傍のワイヤロープ張力 (No. 7, 11) を見ると、C-5 試験体の場合にはいずれも急激に張力が低下する現象が確認されていることから、重錘が防護柵を貫通した現象と対応している。なお、H-7 試験体の場合には、ロープ張力が急激に低下する現象は見られない。

さらに、衝突位置から離れた No. 13 および No. 5 に着目すると、H-7 試験体の場合には、ロープ張力が励起されているものの、C-5 試験体の場合には張力がほぼ零となっている。これは、H-7 試験体と比較して、C-5 試験体の場合には、重錘衝突時に間隔保持材が破断したことにより、重錘衝突位置近傍に変形が集中していることを意味している。

4.2 重錘衝突時における動的挙動

写真-4 および写真-5 には、重錘衝突時の防護柵柵の変形状況を時系列的に示している。また、写真-6 には C-5 試験体における重錘の貫通状況を示している。C-5 試験体の場合には、写真からは判読しがたいが重錘衝突後 40 ms 程度で上弦材の接続部が破壊したことを確認している。その後、50 ms 程度で間隔保持材の U ボルトが破断したことで、ひし形金網に衝撃荷重が作用し、70 ms 程度で金網が破断するとともに、ワイヤロープ (No.9) の素線も破断し始めている。110 ms 程度でワイヤロープは完全に破断し、重錘が防護柵を貫通している。なお、重錘の貫通については、間隔保持材を接続していた U ボルトが破断したことによりワイヤロープが上下に押し広げられたことで、荷重が局所的に作用したことによるものと推察される (写真-6 参照)。

一方、H-7 試験体においては、重錘が衝突時にワイヤロープと金網が変形し、その後、支柱、上弦材へと力が伝達されることにより柵全体で重錘を捕捉

表-5 U ブレーキ作動量および吸収エネルギー量

U ブレーキ 番号	作動量 (mm)		エネルギー吸収量 (kJ)	
	C-5	H-7	C-5	H-7
No.1~5	0	0	0	0
No.6	0	35	0	2.0
No.7	130	180	7.9	11.6
No.8	430	280	30.4	20.6
No.9	530	385	37.9	27.0
No.10	130	275	7.9	18.8
No.11	0	115	0	6.8
No.12~14	0	0	0	0
合計	1,220	1,270	84.1	86.8

する挙動を示している。また、端末支柱の動的挙動においても C-5 試験体と比較して変形が大きいことより、衝撃荷重を各部材が効率よく機能し、防護柵全体で受け止めていることが分かる。

表-5 には実験終了後における U ブレーキ作動量および図-3 に示す静的引張試験結果を用いて算出したエネルギー吸収量を示している。C-5 試験体は重錘が直接衝突したワイヤロープ (No.9) において、最大作動量 530 mm を示している。また、作動した U ブレーキは No.7 ~ No.10 のワイヤロープに限定されており、重錘衝突位置近傍のみが局所的に変形をしたものと推察される。一方、H-7 試験体の場合には、C-5 試験体と同様に No.9 のワイヤロープにおいて最大作動量 385 mm を示している。C-5 試験体と比較すると小さな値を示しているが、作動した U ブレーキは No.6 ~ 11 のワイヤロープとなり、C-5 試験体と比較して広範囲であることが分かる。

これより、C-5 試験体は局所的に荷重が作用しているのに対し、H-7 試験体の場合には、C-5 試験体よりも広範囲で変形が生じることで、効率よく衝撃荷重が分散されていることが確認された。したがって、重錘の捕捉 (貫通) 性能は、防護柵を構成する個々の部材が大きく影響し、特に本実験においては、間隔保持材の機能が防護柵の捕捉 (貫通) 性能を支配する要因であるものと推察される。

4.3 損傷状況

写真-7 には、実験終了後の防護柵および各部材の損傷状況を、表-6 には各実験終了後の損傷状態一覧を示している。上弦材の損傷状況に着目すると、C-5 試験体は支柱頭部の接続部ボルトの破断により、端末支柱まで力が伝達されていない。一方、H-7 試験体は、上弦材を剛接合したことにより、支柱頭部近傍で局所的な変形が生じているものの、端末支柱まで力が伝達されたことによって、C-5 試験体と比較して端末支柱の変形も大きいものと推察される。

また、間隔保持材に着目すると、C-5 試験体の場合には、分割部において U ボルトが破断し、ワイヤロープ間隔が広がったことで重錘衝突位置近傍部ワイヤロープに応力が集中し破断に至った。一方、間

C-5 試験体

H-7 試験体

柵全体



支柱頭部近傍

ネットおよび
ワイヤロープ近傍

U ボルト



写真-7 実験終了後の各試験体の損傷状況

表-6 損傷状態一覧

		C-5	H-7
支柱	中間	軽微な塑性変形	塑性変形
	端末	弾性変形	軽微な塑性変形
ワイヤロープ		No.9 破断	No.9 損傷
ネット		破網	損傷なし
上弦材		接続ボルト 2 箇所破断, 片側落下	上弦材端部塑性変形, 接続プレート塑性変形
間隔保持材		接続部 U ボルト破断	塑性変形 + 表面塗装ひび割れ

間隔保持材として 1 枚ものを使用した H-7 試験体の場合には、重錘衝突による塑性変形が生じたものの破断には至っていない。このことから、間隔保持材は、1 枚ものを使用する必要があると考える。

4.4 防護柵の吸収エネルギー

図-7 には各試験体における重錘の運動エネルギーと貫入量の関係を示している。C-5 試験体の場合には、重錘衝突後、重錘の運動エネルギーは徐々に

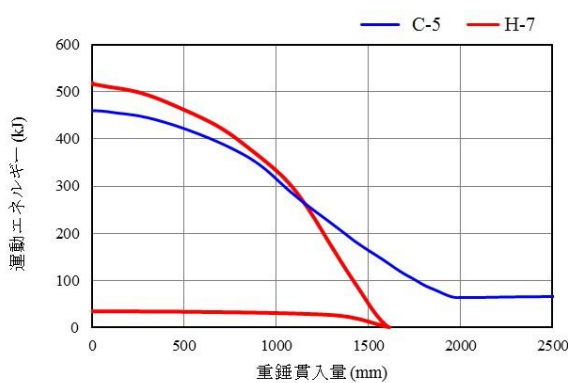


図-7 重錘の運動エネルギーと貫入量の関係

減少し、貫入量が約 1,900 mm 時点で重錘が金網を貫通したことにより、運動エネルギーが 70 kJ 程度で一定値を示している。重錘の運動エネルギーと防護柵の吸収エネルギーが等価であると仮定すると、C-5 試験体は 400 kJ 程度のエネルギーを吸収した後に貫通していることが分かる。一方、H-7 試験体に関しては、重錘衝突後、重錘の運動エネルギーが徐々に減少し、最大貫入量到達時 (1,612 mm) に零となり、その後のリバウンドによって再びエネルギーが増加している。

なお、表-5 に示す U ブレーキのエネルギー吸収量の総和は、C-5 試験体では 84.1 kJ、H-7 試験体では 86.8 kJ である。これより、U ブレーキは防護柵全体の 15～20% 程度、エネルギー吸収に寄与しているものと推察される。

5. まとめ

本実験では、道路や鉄道等重要施設に近接して設置が可能で、かつ通行空間の安全性を確保できる落石防護柵の開発を目的に、落石対策便覧に基づく要件を考慮した種々の実験を通して、新しい落石防護柵を開発した。本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 開発した落石防護柵は、落石対策便覧³⁾に基づき設定した実験の要件を満足し、500 kJ 相当の落石を捕捉することが可能であり、落石捕捉時の

柵変形量は約 1.34 m である。そのため、道路や鉄道等に近接して設置した場合でも実物大実験で確認された離隔を確保することで、落石衝突による最大変形時でも、通行の安全性が確保できる。

- 2) 間隔保持材が破壊することで柵の性能は急激に低下する。そのため、間隔保持材を使用する落石防護柵は、間隔保持材の部材選定には留意する必要がある。

近年、物流や災害発生時の交通確保の観点から、交通網の重要性が高まっている。当防護柵は想定される落石防護に対して、交通の安全性を確保できる一手法であると判断される。今後は、実施工や落石捕捉実績等を踏まえ、施工性の向上や維持管理の最適化を行っていく予定である。

謝辞

最後に国内での基礎実験の実験場提供と実験指導をいただいた寒地土木研究所寒地構造チームの方々に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計 2013.1
- 2) 国土交通省道路局：道路土工構造物技術基準，2015.3
- 3) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 4) 堅田恭輔，小室雅人，奥田峻，酒井啓介，栗橋祐介：小変形落石防護柵の動的挙動に関する衝撃応答解析，土木学会北海道支部論文報告集，2018.1
- 5) Dynamic Test Center AG (<https://www.dtc-ag.ch/>)
- 6) EOTA, Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (ETAG 027), 2008

(2018 年 9 月 21 日受付)

(2019 年 2 月 1 日受理)