

# 既設 H 鋼式落石防護柵の補強に関する研究

A reinforcing technique of existing barriers preventing rockfall

松嶋秀士\*, 小島明德\*, 川合慶直\*, 吉田 博\*\*  
 Syushi Matsushima, Akinori Kojima, Yoshinao Kawai, Hiroshi Yoshida

\*株式会社ビーセーフ (〒939-1518 富山県南砺市松原 220-6)  
 \*\* 工博, 株式会社ビーセーフ (〒939-1518 富山県南砺市松原 220-6)

Key Words: rockfall, barrier, buffer, reinforcing

キーワード: 落石, 防護柵, 緩衝金具, 補強

## 1. まえがき

1950 年代以降のわが国の高度成長と 1956 年より始まった道路整備 5 カ年計画によって, 道路の新設及び改良が進み, 山間部で路側が斜面の場合には落石対策用のワイヤロープ金網式落石防護柵 (以後, 既設防護柵と言う。) が設置されてきました. その総延長はわが国全体で数千 km にも及ぶ膨大な距離に達しているといわれているが, これらの既設防護柵は, 設計寿命に近いものもあり, 落石危険地帯では, 今後, 5 年 ~ 10 年の間に一斉更新を余儀なくされることも想定される (写真-1).

既設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) と言われており, これを突き破って自動車に衝突した 2009 年に発生した富士山五合目の駐車場のような死亡事故や人身事後も多数発生している.

しかし, 既設防護柵に代わる経済的な高性能防護柵は, 現在のところ存在せず, 新たな「簡易型高性能落石防護柵」の開発が望まれていた.

本研究では, 既設防護柵の弱点となる部分を補強し, 落石による衝撃力の負担を幅広いスパンで受け持たせる分散効果により, 既設防護柵の吸収可能な落石エネルギーを倍増させることが可能となった.



写真-1 ワイヤロープ金網式落石防護柵の例

## 2. 既設防護柵の構造概要

### 2.1 既設防護柵の構造

一般によく用いられてきた落石防護柵は, ワイヤロープ金網式であり, その設計においては, 落石が飛び越えないようにその高さを確保し, その許容変位内で落石エネルギーを吸収できるように部材断面, 部材配置を決定し, かつ基礎の安定が確保されることを確認することになっている.

既設防護柵の設計においては, 金網, ワイヤロープおよび支柱の弾塑性変形により落石の運動エネルギーを吸収できることを確認しなければならない. これには, ワイヤロープと支柱の組み合わせにより, 支柱が先に塑性変形する場合とワイヤロープが先に塑性変形する場合がある. 設計においては支柱の許容変位角は 15 度とし, ワイヤロープについては, 万一破断した場合には落石が防護柵を突き破ることにつながるため, 安全側をとり弾性限界以内にとどめることになっている.

### 2.2 落石補足時の挙動

落石対策便覧<sup>1)</sup>によれば, 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するとしている. 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し,

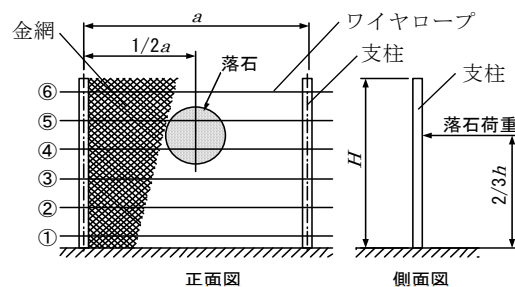


図-1 落石防護柵の落石作用位置

落石が支柱に直接衝突する場合には3本の支柱が塑性変形するものとしている。

表-1 に変形状態を仮定して算出された可能吸収エネルギーを示す。支柱の変位角を $15^\circ$  と仮定し、落石がスパン中間に衝突する場合には、両側の2本の支柱が塑性回転し、落石が支柱に直接衝突する場合には、衝突した支柱と、その両側の支柱が、いずれも $15^\circ$  塑性変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。この場合、落石が衝突した支柱の変位角は $15^\circ$  を大きく超過しているが、変位角 $15^\circ$  分の塑性エネルギーを吸収するものとしている。

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。

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。

## 2.3 現行の設計手法と課題

### (1) ワイヤロープの張力と支柱の変形

ワイヤロープ金網式落石防護柵においては、2本の支柱の中間に落石が衝突した場合、支柱下端に塑性ヒンジを形成するのに要する力を、防護柵面内に直角に作用させている。設計計算では、落石が衝突するワイヤロープは2本として支柱を倒そうとし、そのワイヤロープの張力が作用した支柱が塑性変形するかどうかを検討している。

しかし、ワイヤロープ金網式落石防護柵の設計に際しては、以下の項目に対して留意する必要がある。

- a) 衝突したワイヤロープの張力のみを考慮して支柱が塑性変形するかどうかを検討するのではなく、すべてのワイヤロープの張力を考慮する必要がある。図-2を例として考えると、スパン中央に落石が衝突した場合、これまでの計算では、落石が衝突する2本のワイヤロープ④および⑤が支柱を倒しそ

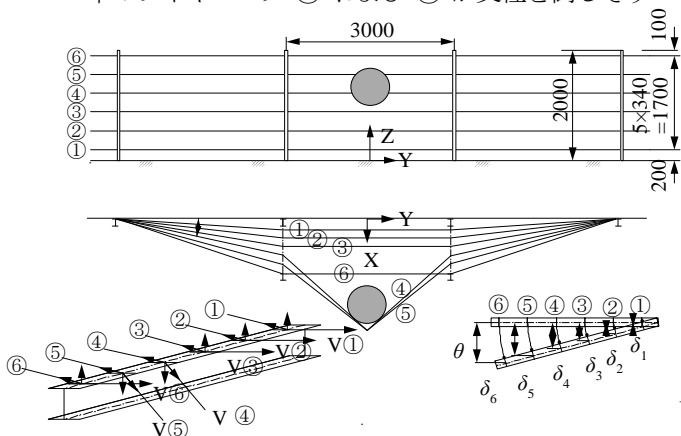


図-2 落石衝突時のワイヤロープの変形

としていた。しかし、支柱が傾斜するためには、残りのワイヤロープ①～③および⑥のワイヤロープにも張力が発生し、支柱の変形に抵抗する力となって作用する。

- b) 落石対策便覧では、最終的に片側の隣接2スパンのワイヤロープが直線になっており、隣接支柱には、ワイヤロープからの合力は作用しない。
- c) 変形後のワイヤロープの合力は、隣接支柱の変形とともに減少する。

このように、衝突したワイヤロープの張力のみを考慮して支柱が塑性変形するかどうかを検討するのではなく、すべてのワイヤロープの張力を考慮する必要がある。

### (2) 支柱の断面特性

一般に用いられているワイヤロープ金網式落石防護柵の支柱断面はH-200×100×5.5×8である。その断面特性を表-2に示す。

使用している支柱は、弱軸まわりの断面係数は、強軸まわりの1/7、塑性断面係数も1/5程度であり、防護柵の面内方向の力に対しては極めて脆弱である。また、支柱に作用する力は、防護柵の面外方向の力のみでなく、面内方向の力も作用するので、小さい弱軸まわりの断面係数により早期に支柱下端に局部座屈が発生し、全体の耐力を失う結果となる。

表-1 落石の衝突条件および衝突高さによる可能吸収エネルギーの比較

変形状態	可能吸収エネルギー (kJ)			
	支柱	ワイヤロープ	金網	計
	23.2	7.35	25	56
	34.8	11.5	25	71

表-2 H-200×100×5.5×8の断面特性

断面積	断面二次モーメント		断面係数		塑性断面係数	
	$I_x$ ( $\text{cm}^4$ )	$I_y$ ( $\text{cm}^4$ )	$W_x$ ( $\text{cm}^3$ )	$W_y$ ( $\text{cm}^3$ )	$Z_x$ ( $\text{cm}^3$ )	$Z_y$ ( $\text{cm}^3$ )
26.27	1,810	138	181	26.7	200	41.4
比率	1.000	0.076	1.000	0.148	1.000	0.207

図-3は、支柱高さ1.5m、スパン長3.0m、3スパンの既設防護柵の重錘衝突実験<sup>2)</sup>(右城氏らの実験、2009年)の結果を示しており、支柱の変位とともに、支柱がねじれ、横変位している状態を示している。

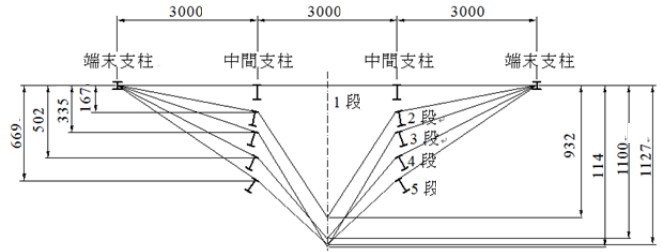


図-3 3スパンの中央に重錘を衝突させた時の支柱のねじれ変形

### 3. 補強方法

#### 3.1 補強金具および部材

この既設防護柵の補強は、部品を簡単に取り付けることにより、支柱下端の局部座屈を防止し、支柱頭部間を2本のバーで連結することにより、支柱の横変位とねじれ剛性を向上させる。これにより、支柱は防護柵の延長方向に対し直角方向(面外方向)のみに変位することでねじれ変形を拘束することで衝撃吸収能力を2倍以上に向上させることができる(図-4)。補強部材の取り付けは、既設防護柵を加工することなく施工性も優れる。

#### 3.2 支柱下端の局部座屈の防止方法

既設防護柵の破壊要因は、使用しているH形鋼支柱の防護柵面内方向の強度が極端に弱く、支柱下端が初期に塑性化を開始し、横倒れ座屈や支柱下端に局部座屈が発生して、全体の強度を失うことによっている。

既設防護柵の支柱の道路側は、障害物が存在しないため、写真-2に示すような下部接続金具は、上方から容易にH形鋼支柱の下端に装着できる。H形鋼支柱と下部接続金具の間には、わずかな隙間を設け、下部接続金具に取り付けられているボルトを締め付けることにより固定され、H形鋼支柱下端の変形を拘束する構造である。

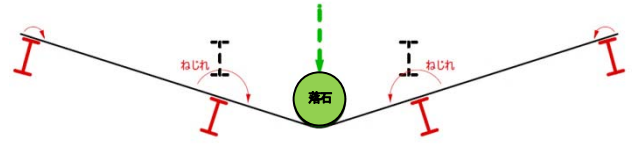
#### 3.3 支柱頭部のねじれ防止方法

H形鋼支柱の下端が補強されても、防護柵面内の荷重が支柱に作用すると、容易にねじれが発生し、強度を失う。これを防止するため、各支柱の上端に上部接続金具を取り付け、それらを相互に連結バー2本で連結させることにより、ねじり強度を飛躍的に増大させることできる。

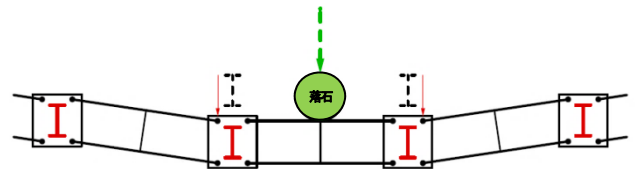
## 4. 防護柵の実物実験

### 4.1 実験概要

本工法の開発に当たり、現在使用されている既設防護柵(スパン長3m、5スパン)の実物実験により、その性能を確認した。その後、補強した既存防護柵(スパン長3m、5スパン)に、既設防護柵により確認した性能の3倍までの重錘エネルギーの落下実験を行い、安全性の確認を行った(写真-3)。既設防護柵に補強を施した防護柵の実験では、既存防護柵に設置しているφ3.2mmの金網に替え、ワイヤ金網(3本よりφ2.6mm)を6本の水平ロープ



(a) 既設防護柵のねじれ変形



(b) 補強した既設防護柵のねじれ変形

図-4 ねじれ拘束の仕組み



(a) 上部接続金具

(b) 下部接続金具

写真-2 ねじれ拘束金具の連結状況



写真-3 重錘鉛直落下実験

上に貼付け、外側の両端のワイヤロープとワイヤ金網をφ10mmのワイヤロープで3網目ごとに縫い合わせた。

#### 4.2 実験方法

重錘鉛直落下実験は、架台に防護柵のスパン3mを5スパン、供試体のH=2.0mの支柱6本を水平に取付け、その上に水平ワイヤロープを所定の間隔で取付け、その上に金網を設置する。

エネルギーロスを極力少なくするため、重錘をクレーンで鉛直に吊り上げ、落石作用位置となる支柱固定端から2/3の位置となる1.333mの位置に落下させた。

#### 4.3 実験で用いる重錘

実験では、EOTA (European Organization for Technical Approvals) 型の重錘質量0.65t, 0.78tおよび1.48tの3種の重錘を使用した。

#### 4.4 防護柵の実験の種類

既存防護柵と補強防護柵の強度および落石時の損傷、破壊状態を調べるために、表-3に示す2種の防護柵に対し、合計12回の実験を行った。主に、既存補強防護柵に対して、質量0.65tの重錘を、落下高さ1mから7.85m(重錘エネルギー50.0kJ)まで、防護柵の変形を修復することなく、徐々に落下高さ増加させる実験(NR-1-1～NR-1-4, 漸増高さ実験と呼ぶこととする)、および前回の実験のすべての部材などを撤去し、最初から組み立てた防護柵に対する実験(NR-2, 単一高さ実験と呼ぶことにする)からなっている。

また、0.65tの重錘を7.85m(50kJ)から落下させた場合(ST-1-1)およびこの防護柵の補修を行わず0.78tの重錘を13.07m(100kJ)から落下させた実験(ST-1-2)を行った。次に、この防護柵を撤去し、新しい補強防護柵を用いて0.78tの重錘を13.07m(100kJ)から落下させた単一高さ実験(ST-2)を行った。

ST-3以降の補強防護柵の実験では、すべての索端金具近傍に、滑り張力40kNの緩衝金具を挿入した。また、端支柱にはH形鋼(JIS G 3192:175×175×7.5×11)のウェブの両側に溝形鋼(JIS G 3192:150×75×6.5×10)を挿入することによって補強している。補強は、既存の端支柱に加工を加える必要がない補強としている。

#### 4.5 測定項目および方法

各実験番号での共通した測定・計測項目は以下のとおりである。

- 重錘の重心に取り付けた加速度計より測定した加速度
- ワイヤロープを切断して取り付けたターンバックルのボルトに貼り付けたストレインゲージから、測定したワイヤロープの張力
- 既設防護柵では、支柱固定端から、補強防護柵では下部拘束棒先端から100mm隔てたH形鋼の上下フランジの両縁から10mm内側に貼り付けたストレインゲージより計測したひずみ量
- 中央スパンの連結バーに貼り付けたストレインゲージから測定した連結バーのひずみ量

表-3 防護柵の実験の種類

実験 No.	漸増/単一	供試体	端支柱	緩衝金具 (40kN用)	ブレース	重錘質量 (t)	落下高さ (m)	重錘エネルギー (kJ)	重錘衝撃力 (kN)	重錘沈下量 (m)	実験後の状態		
											支柱	ワイヤロープ	金網
NR-1-1	漸増	無補強	充填鋼管	無	無	0.65	1.0	6.4	7.3	0.14	変形無し	健全	局所的な変形
NR-1-2		無補強	充填鋼管	無	無	0.65	2.0	12.7	86.6	0.49	変形無し	健全	局所的な変形
NR-1-3		無補強	充填鋼管	無	無	0.65	3.8	24.2	114.9	0.54	基部にわずかな座屈	健全	変形有り
NR-1-4		無補強	充填鋼管	無	無	0.65	7.85	50.0	121.5	0.87	基部の座屈とねじれ	ワイヤロープ④破断	大きな変形と一部破断
NR-2	単一	無補強	充填鋼管	無	無	0.65	7.85	50.0	152.4	0.80	基部の座屈とねじれ	ワイヤロープ④破断	落下位置に孔
ST-1-1	漸増	補強	充填鋼管	無	無	0.65	7.85	50.0	152.1	0.80	微小な塑性変形	健全	損傷無し
ST-1-2		補強	充填鋼管	無	無	0.780	13.07	100.0	191.0	1.25	微小な塑性変形	ワイヤロープ④破断	一部破断
ST-2	単一	補強	充填鋼管	無	無	0.780	13.07	100.0	197.5	1.07	微小な塑性変形	ワイヤロープ④破断	索線切れ
ST-3-A	単一	補強	H鋼(補強)	有	有	0.780	13.07	100.0	201.2	1.15	微小な塑性変形	健全	健全
ST-3-B	単一	補強	H鋼(補強)	有	有	0.780	13.07	100.0	199.8	1.54	微小な塑性変形	健全	健全
ST-4	単一	補強	H鋼(補強)	有	有	1.460	10.48	150.1	269.0	1.27	微小な塑性変形	健全	健全
ST-5	単一	補強	H鋼(補強)	有	有	1.460	6.98	100.0	229.0	1.05	大きな塑性変形	健全	健全

- e) 高速度カメラ (1/2000sec) で撮影した, 中央スパン両側の支柱先端の変位量
- f) 重錘落下前と落下後で重錘除去後の各支柱の変位量

## 5. 実験結果および考察

以下に実験結果と, それに対する考察を行うが, 主として, 既存防護柵に 0.65t の重錘を 7.85m の高さから落下させた, 重錘エネルギーが 50.0kJ の NR-2, 緩衝金具を有する補強防護柵に 0.78t の重錘を高さ 13.07m から落下させた ST-3-A (100.0kJ) の 2 ケースについて比較検討を行う。

### 5.1 支柱の変形

写真-4 (a)は, 既存防護柵に 50kJ の重錘を落下させた場合の衝突スパンの両側の支柱の変形を, 写真-4 (b) は補強防護柵に 100kJ の重錘を落下させた場合の変形を示している。

この変形状況より, 既設防護柵は重錘落下により, 支柱が回転すると同時に, 支柱下端が座屈し, 重錘衝突スパンの両側の支柱先端が広がることが分かる。一方, 補強防護柵の重錘衝突スパン両側の支柱は回転することなく, 鉛直下方に変形している。これにより, 支柱下端の座屈変形も小さく, 耐力が増加していると考えられる。

### 5.2 重錘衝撃力および変位

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。また, 加速度を 2 回積分して得られた重錘の金網面からの変位の経時変化を図-6 に示す。

無補強で緩衝金具が無い場合 (NR-2, 50kJ) は, 最初, 衝撃力が急激に増加した後, ワイヤロープ ④ が破断し, 衝撃力が急激に減少している。補強して緩衝金具が有る場合 (ST-3-A, 100kJ) は, 最初, 衝撃力の振幅が大きいが, 最大値に到達してから徐々に減少している。これより, 余剰耐力は十分に有していると判断される。

図-6 の重錘変位において, 無補強で, 緩衝金具がない場合でも, ワイヤロープ ④ が切断されているにもかかわらず, 重錘は落下することなく, 金網の一部を破断して停止しており, 50kJ が終局限界強度と判断される。

補強し, 緩衝金具がない場合の最大衝撃力は, 補強し, 緩衝金具がある場合の最大衝撃力が, ほぼ同じである。このことは, ワイヤロープが切断しても金網が十分な耐力を有しており, 十分な余剰耐力を有していると考えられる。

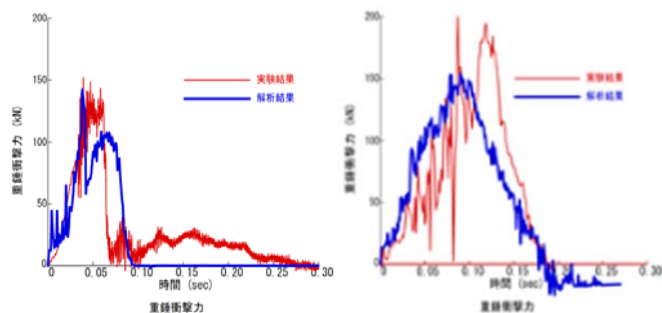


(a) 既設防護柵 (NR-2)



(b) 補強防護柵 (ST-3-A)

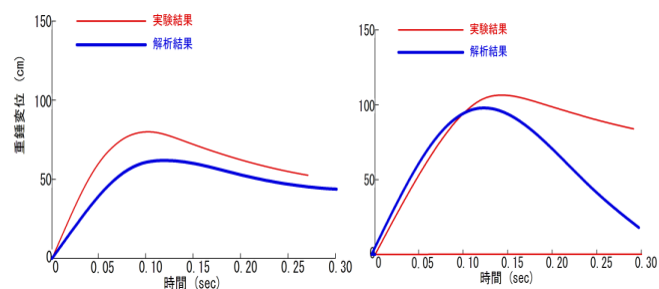
写真-4 防護柵の支柱の変形



(a) NR-2

(b) ST-3-A

図-5 重錘衝撃力の実測値と解析計算結果



(a) NR-2

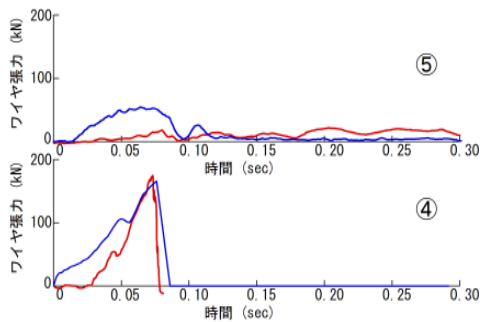
(b) ST-3-A

図-6 重錘の変位の実測値と解析計算結果

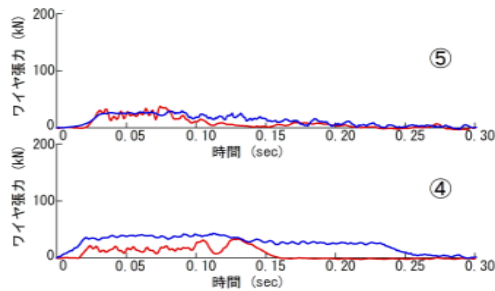
### 5.3 ワイヤロープ張力

ワイヤロープの張力の経時変化を図-7 に示す。ワイヤロープ番号は, 支柱固定端から 6 本のワイヤロープを ① ~ ⑥ までである。重錘の落下位置は, ワイヤロープ ④ と ⑤ の間である。そのため, ④ および ⑤ についてワイヤロープ張力の実験結果と解析結果を示す。

重錘エネルギーが 50kJ (NR-2) の場合で, ワイヤロープ ④ が破断しており, 緩衝金具が挿入されていない。



(a) NR-2



(b) ST-3-A

図-7 ワイヤロープの張力の経時変化

100kJ (ST-2) においても、ワイヤロープ ④ が破断している。緩衝金具を有する場合 (ST-3-A) は、重錘エネルギーが 100kJ であるにもかかわらず、すべてのワイヤロープの張力は、小さい値にとどまっておらず、また、張力がワイヤロープの広い範囲に分散している。

## 6. 設計方法

既設落石防護柵の補強設計は、解析結果から落石対策便覧に準拠した設計計算が妥当であるか検証した。

まず、落石防護柵の構成部材の材料特性について、自社実験により支柱および金網の降伏点応力度を超過後の物性値と変形性能のデータ計測を実施した。そのデータは、落石衝突時に降伏点強度を超過した際の各部材の挙動を把握する基礎データとした。次に実物実験により得られたデータ、各構成部材の諸元データおよびそれらを組み合わせた荷重と変形量について、解析結果と比較し、防護柵全体の変形性能と吸収エネルギーを明確にした。それにより補強後の防護柵設計は、従来用いられている落石対策便覧に準じた設計結果と大きな相違がないことを確認することができた。その結果、既設防護柵を補強する設計方法は、落石対策便覧に準じた設計方法を適用できることが検証された。

## 7. まとめ

過去、数十年の間に、国土の 70% を占める山岳地帯の道路整備が進められてきた。この山岳道路では、落石や雪崩から交通車両および歩行者を守るために、道路の山側に防護柵が設置されてきた。この防護柵の我が国の総延長は、数千 km 以上とも言われており、中には老朽化して耐力が減少しているものもある。そのため、毎年、落石による死亡者や負傷者が多数発生しているのが現状である。

ここ数十年の間に、各種の高性能落石防護柵が設置されてきているが、設置コストが高く、予算の制約もあり、危険箇所すべての既設の防護柵を交換することは不可能である。

本研究では、既設の防護柵に簡単な治具を取り付けるとともに、H 型鋼支柱の天端を 2 本のバーで連結することにより、既存の防護柵の性能を 2~3 倍に増加させることが可能であることを、実験的および解析的に明らかにした。

- (1) 既設防護柵に、一般的に使用されている H 型鋼支柱の固定端の局部座屈を防御するために、下部拘束棒を取り付けた。
- (2) 既設防護柵の支柱頭部にねじれ拘束金具を取り付け、載荷スパンの両側の支柱のねじれを、防護柵全体の支柱で抵抗できるようにした。
- (3) ワイヤロープ端には、緩衝金具を取り付け、一定値以上の張力がワイヤロープに作用しないようにし、緩衝金具で落石エネルギーの一部を吸収できるようにした。
- (4) 高強度金網を張り付けることにより、金網自体でエネルギーを吸収するとともに、落石の貫通が生じないようにした。
- (5) これらの金具、金網などの取り付け作業は、極めて短時間で行うことができ、また、経済的である。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧／社団法人日本道路協会、2000.6.
- 2) 右城猛，他：落石防護柵の重錘衝突実験