

## ワイヤロープを支柱に巻き付けた落石防護柵の実物衝撃実験とその解析

IMPACT TEST AND ANALYSIS OF A ROCKFALL PROTECTION FENCE WITH LOOP WIRE-CABLES  
WOUND AROUND TWO ADJACENT STRUTS

園雅伊\*, 塩見昌紀\*\*, 吉田博\*\*\*, 前川幸次\*\*\*\*

Masayoshi SONO, Masanori SHIOMI, Hiroshi YOSHIDA and Koji MAEGAWA

\* 日本ゼネスパイプ(株) 開発部 (〒103-0004 東京都中央区東日本橋 2-24-14)

\*\* 博(工) 日本ゼネスパイプ(株) 開発部部長 (〒103-0004 東京都中央区東日本橋 2-24-14)

\*\*\* 工博 吉田構造工学研究所 代表 (〒932-0102 富山県小矢部市水島 561 番地)

\*\*\*\* 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-0942 石川県金沢市小立野 2-40-20)

キーワード: 落石防護柵, エネルギー吸収能力

(rockfall protection fence, energy absorption capacity)

## 1. はじめに

わが国の落石対策工は、落石予備物質を取り除いたり、斜面に固定したりする落石予防工と、斜面から転落する落石を受け止める落石防護工に分類される。落石防護工には落石防護網、落石防護柵、落石防護擁壁およびロックシェッド等があり、落石エネルギーや重要度に応じて工法が選定されている<sup>1)</sup>。落石防護工をエネルギーの大きさで分類すると、落石防護網では 10kJ 程度まで、汎用タイプの落石防護柵では 100kJ 程度まで、落石防護擁壁では 100～600kJ 程度まで、ロックシェッドでは 600kJ 以上で主に利用されている。しかし、落石防護柵に関しては、吉田らがワイヤロープのスリップ抵抗を利用する緩衝装置を組み込んだ高エネルギー吸収落石防護柵<sup>2)</sup>を開発して以来、落石防護柵が対応できるエネルギーの範囲は 1000kJ 程度まで拡大し、建設コストの低減に寄与してきている。著者らは、この高エネルギー吸収落石防護柵をさらに経済的に利用しやすくするために、新しい工夫を組み込んだ合理的な防護柵を開発した。

本論文では、水平に設置した防護柵に対し、重錘を鉛直落下させる実物衝撃試験を行い、エネルギーの吸収能力を確認すると同時に、大変形を伴う動的解析汎用コードの一つである LS-DYNA を用い、

実験と解析との比較を行った。

## 2. 構造概要

この防護柵は、1 段のワイヤロープを隣接する 2 本の支柱に巻き付けて環状とし、ワイヤロープの重合個所に緩衝装置を取付け固定しており、落石が衝突した場合には、支柱、緩衝装置、ワイヤロープ、間隔保持材、金網等で構成される各部材のエネルギー吸収機構により落石エネルギーを吸収し停止させる。ワイヤロープを環状にすることにより、①動滑車の原理からワイヤロープ 1 本の負荷を半減させ、それに伴い緩衝装置のスリップ張力も半減可能となる、②1 段のワイヤロープに対して必要な緩衝装置は 1 個となり合理的である、③落石衝突時に山側と谷側のワイヤロープが同時に作用することによりロープ間隔を実質的に狭める効果がある、などの利点が挙げられる。基本形状を図 2.1 に示し、構成する主な部材について説明する。

## 2.1 支柱

支柱は、鋼管内に鉄筋を円形に配置し、コンクリートを充填して固化させる。このように製作したコンクリート充填鋼管は、鋼管の耐力低下の原因となる局部座屈を防ぐとともに、鋼管による拘束力が

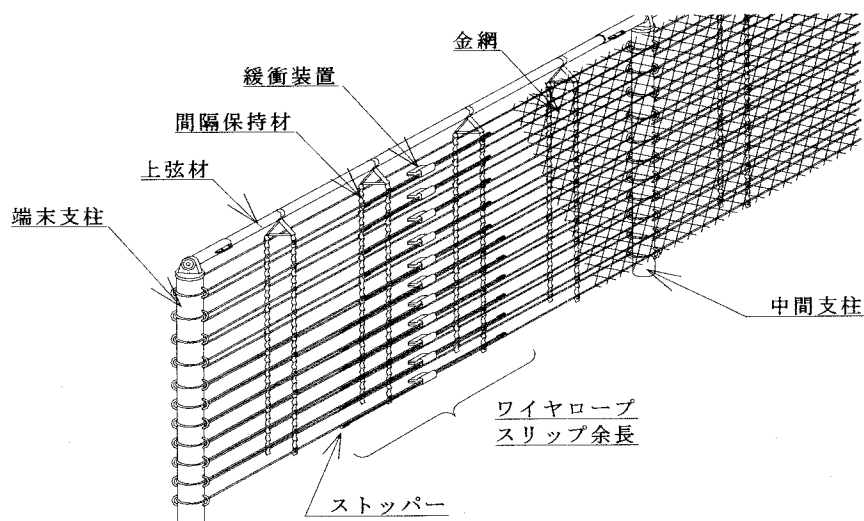


図 2.1 防護柵構造図

コンクリートに 3 軸応力状態を形成させ、また引張側鉄筋の効果から、全体の耐力および靱性の上昇をもたらす<sup>3)</sup>。支柱の静的荷重試験より得られた曲げモーメント-回転角関係を図 2.2 に示す。

図 2.2 から、支柱は荷重の増加にともない回転角度が増加し、塑性ヒンジが形成され、約 350～370kN・m の曲げモーメントを保持したまま 50° 以上の回転が可能であることがわかる。曲げモーメント-回転角の関係を剛塑性と考え、支柱の変形によるエネルギー吸収量は次式で与えられる。

$$E_p = M_U \cdot \frac{\theta \cdot \pi}{180} \quad (1)$$

ここに、

|          |                |             |
|----------|----------------|-------------|
| $E_p$    | : 支柱のエネルギー吸収量  | (kJ)        |
| $M_U$    | : 支柱の塑性抵抗モーメント | (=350 kN・m) |
| $\theta$ | : 支柱の回転角度      | (°)         |

## 2.2 緩衝装置

緩衝装置は隣接する 2 本の支柱に巻き付けたワイヤロープ両端の重合部を把持して固定する部材である。緩衝装置の形状は折り返した鋼板と挟持した鋼板とにより生じる 2 つの空間にワイヤロープを挿通し、鋼板開放部をボルト、ナットにて締結して固定する構造となっている。落石衝突時にはワイヤロープの張力が増大し、所定のスリップ張力に至った時点でワイヤロープがスリップを開始し、ワイヤロープと鋼板との間に生じる摩擦力によりエネルギー

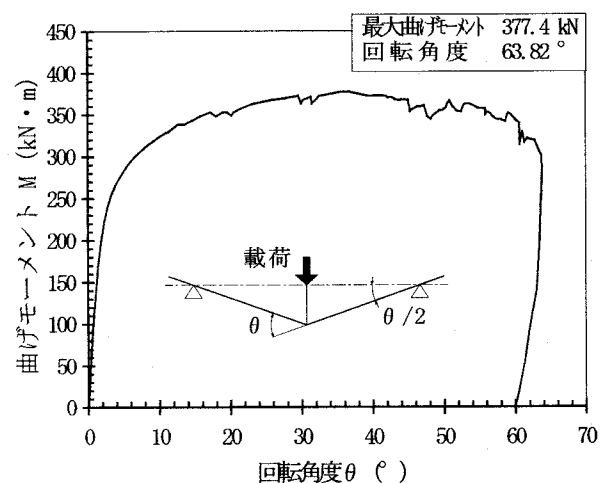


図 2.2 支柱の曲げモーメント-回転角度曲線

を吸収する原理となっている。緩衝装置の構造を図 2.3 に示し、重錘落下衝撃実験で得られた荷重-時間関係を図 2.4 に示す。

緩衝装置の平均張力は、重錘が与えたエネルギー量を実験後のスリップ長で除して求めるとすると、式(2)のように示される。また、この平均張力を用い、後述する実物実験において、緩衝装置が吸収したエネルギー量を式(3)より求めることができる。

$$T = \frac{h \cdot W}{\Delta l_i} \quad (2)$$

ここに、

|     |                          |         |
|-----|--------------------------|---------|
| $T$ | : 平均スリップ張力               | (=27kN) |
| $h$ | : 重錘の移動量<br>(=離脱位置-停止位置) | (m)     |

$W$  : 重錘重量 (kN)  
 $\Delta l_1$  : 実験におけるワイヤロープのスリップ長 (m)

$$E_D = T \cdot \Delta l_2 \quad (3)$$

ここに,

$E_D$  : 緩衝装置のエネルギー吸収量 (kJ)  
 $\Delta l_2$  : ワイヤロープのスリップ長 (m)

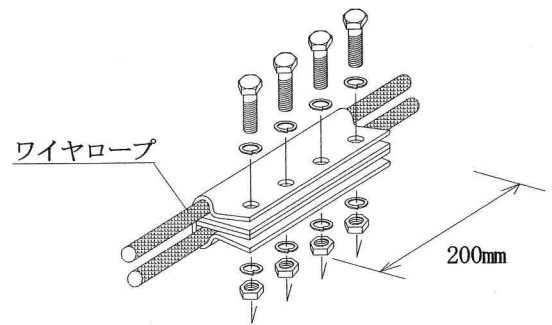


図 2.3 緩衝装置の構造

### 2.3 間隔保持材

間隔保持材はワイヤロープの間隔を保持し、落石の突き抜けを防止する目的で取り付ける鋼板である。この間隔保持材は波状に連続して曲げ加工をしており落石衝突時に急激に生じる引張力を緩和し、エネルギーを吸収しながら伸張する。間隔保持材を、写真 2.1 に示す。

## 3. 実物実験

### 3.1 実験供試体

実物実験は、柵高 2.95m、支柱間隔 6m の防護柵 3 スパンを 1 ユニットとして水平架設し、柵上に重錘を鉛直落下させて行った。防護柵を G.L. +3m に保持するために縦 1.6m、横 1.36m、高さ 4m のコンクリート柱を支柱箇所ごとに築造した。コンクリート柱基礎部は岩着し、あらかじめ岩盤に打設したアンカーを用いて、コンクリート頂部で PC 鋼棒を緊張して転倒を防いだ。実験供試体の平面図を図 3.1 に示す。

### 3.2 実験方法

実験方法は、落石に見立てた重錘をレッカーにて所定の高さまで吊りあげ、離脱装置にて鉛直自由落下させる。重錘は円柱形重錘 (30.38kN) および球形重錘 (8.8kN) を用い、落下高さを変えて実験を行った。

計測は衝突スパンおよび隣接スパンの全段ワイヤロープ張力、重錘の加速度について行った。また、重錘落下後にはすべてのワイヤロープのスリップ長、重錘落下位置の防護柵の変位量および支柱先端部の変位を測定した。さらに高速度カメラによる撮影も行った。実験ケースごとの条件を表 3.1 に、重錘の形状寸法を図 3.2 に、高速度カメラによる実験の状況を写真 3.1 に示す。

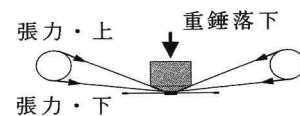
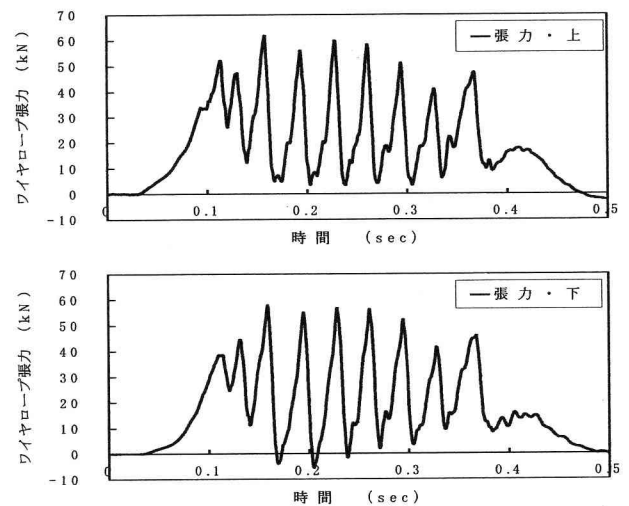


図 2.4 緩衝装置の荷重-時間曲線

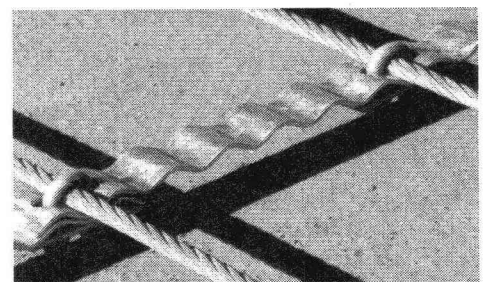


写真 2.1 間隔保持材

表 3.1 実験条件

|              | case-1 | case-2 | case-3 |
|--------------|--------|--------|--------|
| 重錘形状         | 円柱形    | 球形     | 円柱形    |
| 重錘重量 (kN)    | 30.38  | 8.80   | 30.38  |
| 衝突位置         | 5段目    | 5段目    | 7段目    |
| 落下高さ (m)     | 8.2    | 33     | 15     |
| 落下エネルギー (kJ) | 294    | 301    | 504    |

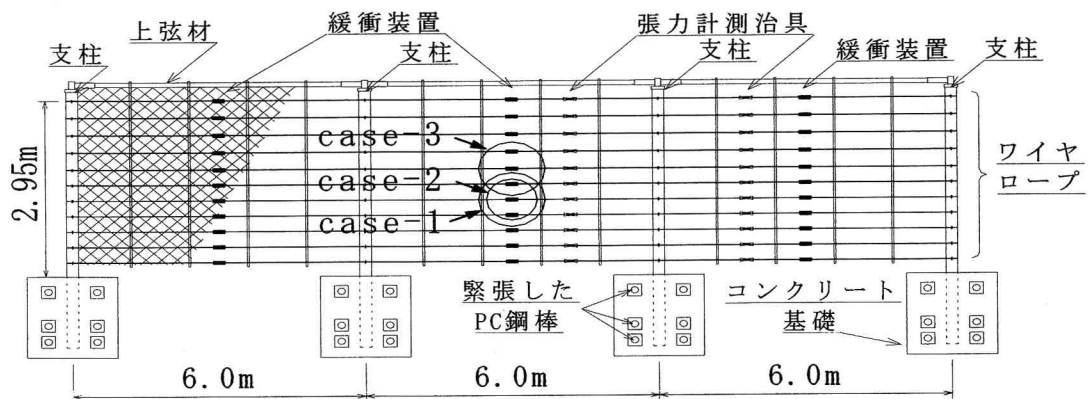


図 3.1 実験供試体平面図

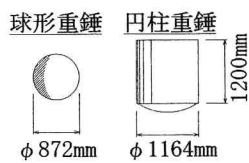


図 3.2 重錘の形状寸法

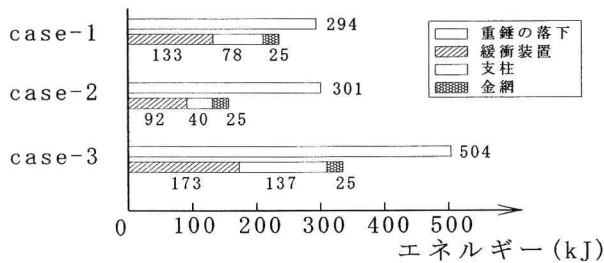


図 3.3 エネルギー収支の比較

### 3.3 実験結果

実験では、すべてのケースで、防護柵は重錘を捕捉し、ワイヤロープの破断も見られなかった。case-3 においてはこの実験の最大落下エネルギーである 504kJ に対して安全であることが確認された。

また、case-2 においては、重錘が約 1.8m リバウンドする余力を残しており、一般に不利と言われる小径落石の高速突入にも対応できる結果を得た。このことは、ワイヤロープを環状にすることによって、山側と谷側ワイヤロープの作用が実質的にロープ間隔を狭めていることによる可能性がある。

実験において得られた結果のうち、式(1)および式(3)を用いて、部材（支柱、緩衝装置）が吸収したエネルギーを算出し、実験ケースごとに比較したものを図 3.3 に示した。ここで、金網によるエネルギー吸収量は一律 25kJ とした。

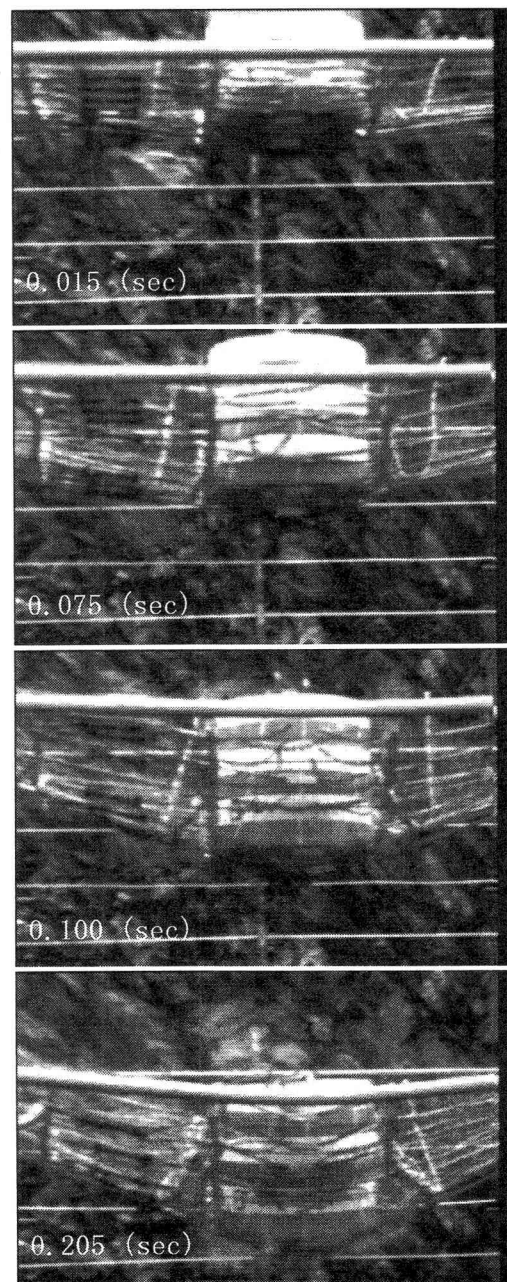


写真 3.1 重錘捕捉の瞬間

図 3.3 より，各部材が吸収した見かけのエネルギーの総和は，重錘の落下エネルギーと比較して小さい値を示している．これは，緩衝装置，支柱，金網によるエネルギー吸収以外に，間隔保持材の変形，上弦材の変形，ワイヤロープとワイヤクリップ間に生じる摩擦，ワイヤロープと支柱表面間に生じる摩擦などのエネルギー消費があることによると考えられる．

また，case-2 においてはその誤差は大きく，case-1 よりも重錘の落下エネルギーが大きいにもかかわらず，見かけの吸収エネルギーの総和は小さい値を示している．このことは①重錘質量と防護柵質量との比率に要因がある，②重錘径が小さいためワイヤロープへの力の分散（伝達）が悪く，緩衝装置等に塑性変形を与えるに十分でない，などが考えられる．

## 4. 解析

### 4.1 解析モデル

解析は，大変形を伴う動的解析汎用コードの一つであり衝撃応答問題に適しているとされている LS-DYNA を用い，case-1 の実験と同条件にて行った．LS-DYNA は，圧縮に寄与しないケーブル要素としての入力が可能で，部材ごとに応力-ひずみ関係を定義することが可能である．また，重錘と防護柵との接触問題も容易に入力できることから，防護柵などの変形に関する解析には適していると考えられる．解析に用いたモデル 1 スパン分を図 4.1 に示す．全体構造のモデル化には以下のような工夫を行っている．

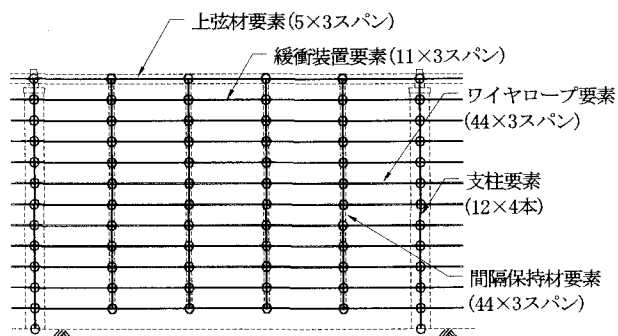
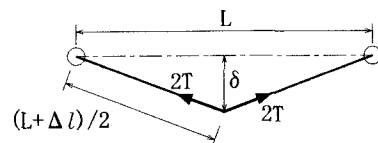


図 4.1 解析モデル

モデル化した場合（スリップ長  $\Delta l$ ，平均張力  $2T$ ）



環状の場合（スリップ長  $\Delta l \times 2$ ，平均張力  $T$ ）

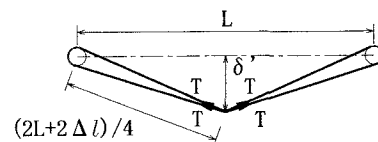


図 4.2 緩衝装置によるエネルギー吸収量比較

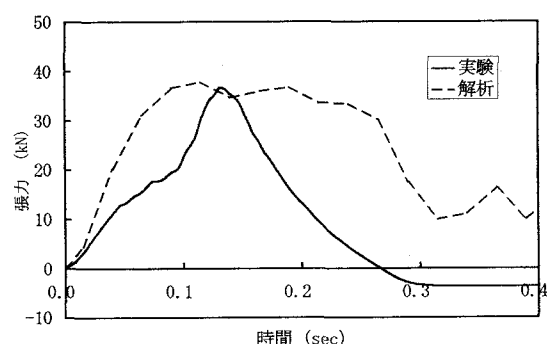


図 4.3 衝突スパンワイヤロープの  
平均張力-時間曲線

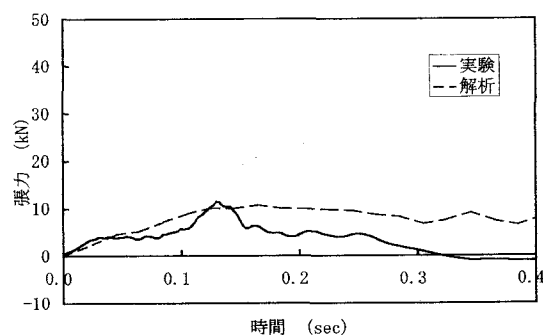


図 4.4 隣接スパンワイヤロープの  
平均張力-時間曲線

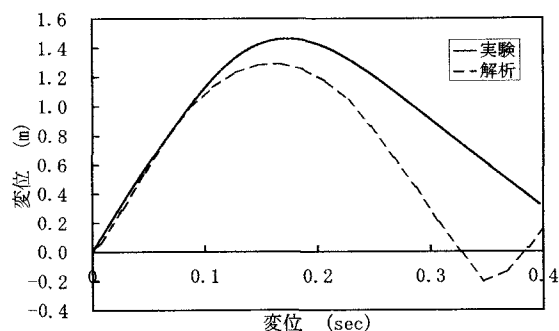


図 4.5 変位-時間曲線

①1 段のワイヤロープは、支柱間を 5 等分する間隔保持材間にて 1 要素とした。そのうち中央部の 1 要素は 緩衝機構を有するケーブル要素であるが、他の 4 要素は引張力に対して弾性変形するケーブル要素とした。また、ワイヤロープが環状であり、重錘衝突時には山側と谷側の両ワイヤロープが同時に作用することから、これらを断面積が 2 倍の 1 本のケーブル要素とした。したがって、解析により出力される張力については、2 で除してワイヤロープ 1 本あたりに換算する。

②中央部の緩衝機構を有するケーブル要素は、所定の張力に達すると塑性変形伸長を生じる特殊なケーブル要素として定義した。このケーブル要素においても山側と谷側を 1 本のワイヤロープと見なし、また、塑性変形を開始する張力は、実際の緩衝装置スリップ張力の 2 倍とした。したがって、張力の解析結果は 1/2 とする。

モデル化した防護柵の緩衝装置によるエネルギー吸収量を環状防護柵と等しくするには、スリップ長を 2 倍にする必要があるが、スリップ長と張出し量との関係は図 4.2 に示すように、双方で等しくなるため、張出し量の解析結果は出力した値のまま用いればよい。

③間隔保持材は、波状加工が伸びることによる塑性変形の挙動を反映させた、特殊なケーブル要素とした。

④支柱は鋼管コンクリート複合構造であるが、曲げ剛性が等価な鋼材に置き換え、鋼管の外径寸法を変化させないパイプ状の梁要素とした。

## 4.2 解析結果

解析から得られた数値をグラフ化し、実物実験 case-1 と比較をする。衝突スパンおよび隣接スパンのワイヤロープ 11 段の平均張力-時間関係を図 4.3 および図 4.4 に示し、重錘落下位置の変位量-時間関係を図 4.5 として示す。

図 4.3 および図 4.4 から、実物実験結果と解析結果の比較において、最大張力はほぼ一致しているが、実験後ではスリップ後に張力が急激に減少しており、最大張力の持続時間は短い。また図 4.5 から、重錘落下位置の変位量は、ほぼ一致している。

以上からワイヤロープ張力の応答時間については差が生じているものの、張力の最大値や変位量については解析と実験がほぼ一致していると考えられ

る。

## 5. まとめ

本論文は新型防護柵の実物衝撃実験および LS-DYNA を用いた解析を行い、比較したものである。その結果、以下のようなことがわかった。

①防護柵は、重錘の落下エネルギー504kJ に対して安全が確認された。

②一般に不利といわれる小径の重錘を高速で突入させる、実験 case-2 に対して防護柵は重錘を捕捉した。これは、山側と谷側のワイヤロープの作用が実質的にロープ間隔を狭めている可能性がある。

③実物実験にて算出した防護柵の見かけのエネルギー吸収量は、重錘の落下エネルギーと比較して小さく、ワイヤロープのスリップ、支柱の転倒、金網の変形以外に、間隔保持材の変形、上弦材の変形、ワイヤロープとワイヤクリップ間に生じる摩擦、ワイヤロープと支柱表面間に生じる摩擦などのエネルギー消費が考えられる。

④実物実験結果におけるエネルギー収支は、小径で突入速度が高い重錘のほうが誤差が大きい。この要因としては、重錘質量と防護柵質量の比率に因するものや重錘径が小さいためワイヤロープへの力の分散（伝達）が悪く、緩衝装置等に塑性変形を与えるに十分でないことなどが考えられる。

⑤実物実験結果と解析結果の比較において、ワイヤロープ張力の最大値はよく一致しているが、最大張力持続時間は、実物実験の方が短い。

⑥実物実験結果と解析結果の比較より、ワイヤロープ平均張力の最大値、張出し量がほぼ一致したことから LS-DYNA による解析を用いて、種々のケースに対しても防護柵の挙動がある程度予測できる可能性が示された。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000
- 2) 柴田健次，中田隆，吉田博：高エネルギー吸収落石防護柵の設計，第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp205-211，1993
- 3) 前川幸次，吉田博：コンクリート充填鋼管はりの静的および重錘衝撃実験，土木学会論文集，No. 513/I-31，pp117-127，1995