



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



従来型落石防護柵に用いられる間隔保持材の設置効果に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本鋼構造協会 公開日: 2019-03-04 キーワード (Ja): 落石防護柵, 間隔保持材, 重錘落下衝撃実験, ワイヤロープ キーワード (En): rockfall protection fence, space keeping member, falling-weight impact test, wire rope 作成者: 今野, 久志, 小室, 雅人, 西, 弘明, 荒木, 恒也, 岸, 徳光 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009711

従来型落石防護柵に用いられる間隔保持材の設置効果に関する研究 A study on installing effects of space keeping members for conventional rockfall protection fences

○今野 久志* 小室 雅人** 西 弘明* 荒木 恒也*** 岸 徳光****
Hisashi KONNO Masato KOMURO Hiroaki NISHI Nobuya ARAKI Norimitsu KISHI

ABSTRACT In this study, in order to investigate the installing effects of space keeping members for conventional rockfall protection fences, the falling weight impact tests and 3D elasto-plastic impact response analyses were conducted taking an interval of space keeping members and falling height of the weight as variables. The results obtained from this study were as follows: 1) impact resistant capacity of the fences with space keeping members may be two times bigger than that of without the member; and 2) the tension forces applied into the wire ropes and the deflection configuration of the wire net can be roughly simulated by means of the proposed numerical analysis method.

Keywords : 落石防護柵, 間隔保持材, 重錘落下衝撃実験, ワイヤロープ
rockfall protection fence, space keeping member, falling-weight impact test, wire rope

1. はじめに

我が国の海岸線や山岳部の道路沿いには、落石等の自然災害から人命や道路交通の安全を確保するための様々な落石防護施設が設置されている。この中で比較的小規模な落石等に対する落石防護施設として、写真-1に示すようなH形鋼の支柱、ワイヤロープ、金網から構成される従来型落石防護柵が道路沿いの基礎土やコンクリート擁壁上に数多く設置されてきた。

従来型落石防護柵は、支柱、ワイヤロープおよび金網の弾塑性変形により落石の運動エネルギーを吸収する構造であることから、その設計は、落石対策便覧¹⁾に基づき、これら構成部材の吸収エネルギーの総和で与えられる防護柵全体の可能吸収エネルギーが、衝突時における落石の運動エネルギーを上回ることを確認することで、安全性の照査が行われている。また、落石がワイヤロープを押し開き金網を突破して道路へ飛び出すという事例等を考慮し、落石がワイヤロープ間をすり抜ける現象を阻止するための間隔保持材の設置が旧

落石対策便覧(昭和58年度版)から現行落石対策便覧(平成12年度版)¹⁾へ改訂された際に構造細目として追記されている。しかしながら、間隔保持材の設置効果に関する検討事例はこれまでに見当たらない。また落石防護柵の本体構造に関しても落石作用時には支柱基部の局部座屈による横倒れや落石が金網を貫通するなど、設計では想定していない損傷事例も報告されている。

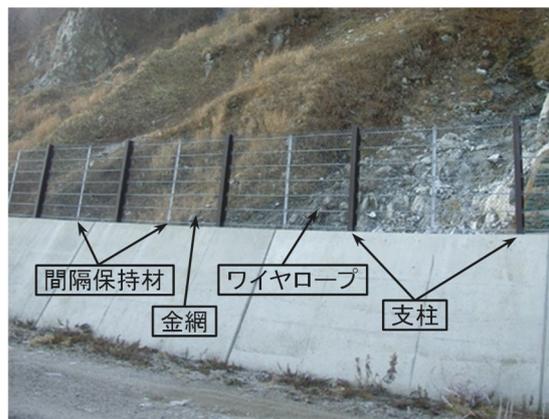


写真-1 従来型落石防護柵の例

*博(工) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)
**博(工) 室蘭工業大学大学院 工学研究科 准教授 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) 第2種正会員
*** 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)
****工博 釧路工業高等専門学校 校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛西 2 丁目 32-1) 第2種正会員
本論文の一部は、平成28年度土木学会北海道支部論文報告集 第72号、2017.2に発表

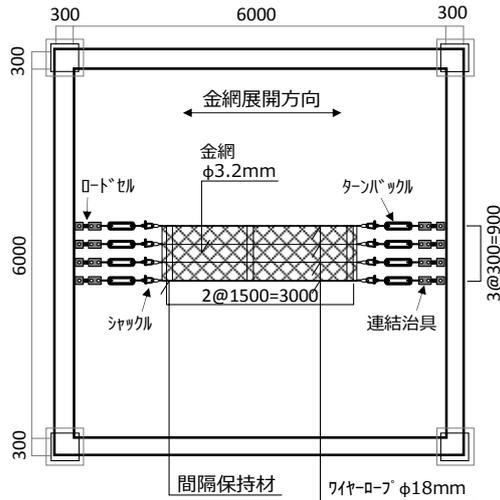


図-1 試験体および鋼製枠架台

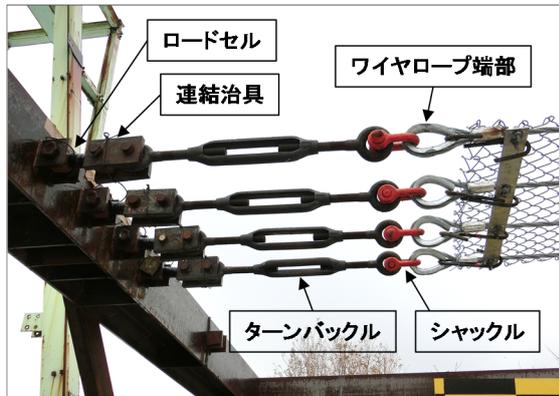


写真-2 ワイヤロープ端部の固定状況

そこで筆者らは、従来型落石防護柵に関する落石衝突時の耐衝撃挙動や保有性能を明らかにし、統一的な性能評価手法や耐衝撃設計法を提案することを最終目的とした研究を開始している。過年度には耐衝撃設計法を確立するための基礎的な検討として、従来型落石防護柵の耐衝撃挙動の把握に関する衝撃載荷実験を実施するとともに、落石がワイヤロープ間からすり抜けることを抑制するために用いられている間隔保持材の設置効果を把握するための基礎的な部材実験を実施している²⁾。本論文では、後者の部材実験に関して実験結果を整理取りまとめると共に、三次元弾塑性衝撃応答解析³⁾を実施し、数値解析手法の妥当性について検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1には、試験体および試験体設置用の鋼製枠架台の形状寸法を示している。従来型落石防護

表-1 試験体に使用した部材の諸元

材料名	諸元 部材耐力(規格値)
ひし形金網	3.2φ×50×50 引張強さ:396(290~540)N/mm ²
ワイヤロープ	18φ 3×7G/O 両端アルミロック 破断荷重:198(≥160)kN
間隔保持材	幅65mm×長さ980mm×厚さ4.5mm 引張強さ:472N/mm ²

柵の標準的な構造は、写真-1(柵高2m)を例に示すと、支柱間隔が3mでワイヤロープ間隔が30cm、金網にはひし形金網が用いられている。ひし形金網は、山形に折り曲げられた列線を互いに交差させることで構成されており、編み込みの向きにより主に荷重を受け持つ展開方向とそれに直行する展開直角方向を有する構造になっている。従来型落石防護柵では水平方向が金網の展開方向である。間隔保持材は、支柱間中央部に金網を挟み込むように全てのワイヤロープに対してU字ボルトで固定されている。試験体は、落石のすり抜け現象に着目した基礎的な実験用であることから、30cm間隔に設置した4本のワイヤロープ(長さ3.3m、両端アルミロック)と素線径3.2mmのひし形金網および間隔保持材より構成される部分モデルとした。ワイヤロープの両端部の間隔保持材は、スパン長3m間隔で設置される落石防護柵の支柱位置に合わせており、支柱部材と同様にU字ボルトでワイヤロープの開きを拘束している。ひし形金網の寸法は、幅1.1m、長さ3.3mであり、ワイヤロープ上面の重錘衝突面側に設置し、3m間隔で配置した間隔保持材にU字ボルトを用いてワイヤロープと共に固定されている。なお、展開直角方向の両端部は固定していない。また、ワイヤロープの両端は、写真-2に示すようにシャックル、ターンバックル、連結治具、ロードセルを介してH形鋼で構成される6m四方の鋼製枠架台にピン支持に近い状態で固定されている。なお、鋼製枠架台の四隅には長さ約2.6mの角形鋼管支柱がボルト接合されており、支柱下端はコンクリート基礎とアンカーボルトで接合されている。表-1には、試験体に使用した部材の諸元を示している。

2.2 実験方法

写真-3には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。筆者らは、これまでに落石防護柵や落石

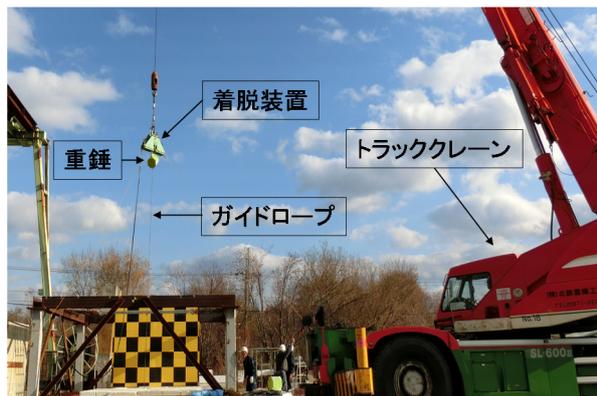


写真-3 重錘落下衝撃実験の状況

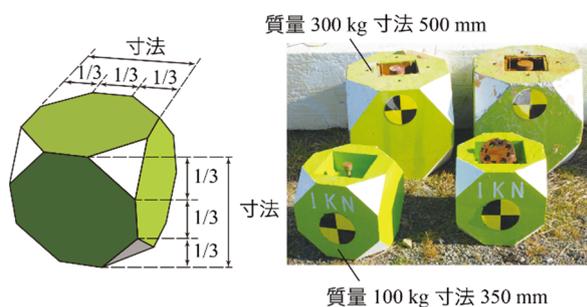


図-2 実験に使用した重錘の形状

防護柵に使用されるひし形金網の耐衝撃挙動に関する研究を実施してきており⁴⁾、その際に使用した重錘は、SAEFLとWSLがスイスでの落石防護柵に対する性能照査試験方法として制定したガイドライン⁵⁾を参考に、図-2に示すような多角形重錘を使用している。本実験は、落石のワイヤロープに対するすり抜け現象に着目して実施することや、ワイヤロープ間隔が30cmであること、後述するように重錘衝突エネルギーが30kJ程度までであることより、1辺の長さがL=35cmの立方体の8つの隅角部を切り取った質量100kgの重錘を使用した。実験は、トラッククレーンを用いて中央の2本のワイヤロープ間に対して、コンクリート製重錘を自由落下衝突させることにより行っている。重錘の衝突に際しては、衝突面がワイヤロープ間に入り込むように正三角形の面が上下方向で水平となるように姿勢制御して行った。また、所定の荷重位置に重錘が精度良く衝突するように、写真-3に示すようなガイドロープを介して重錘を落下させている。

表-2には、実験ケース一覧を示している。実験は、ワイヤロープの間隔保持材が支柱間隔3mの中央部に配置されていることを想定し、間隔保持材上に荷重するケース、1.5m間隔の間隔保持

表-2 実験ケース一覧と実験結果

実験ケース名	保持材間隔(m)	衝突位置	重錘重量(kN)	落下高(m)	衝突エネルギー(kJ)	実験結果
L1.5W1H10P	1.5	①	1	10.0	9.8	重錘捕捉
L1.5W1H20P	1.5	①	1	20.0	19.6	重錘捕捉
L1.5W1H30P	1.5	①	1	30.0	29.4	重錘捕捉
L1.5W1H20C	1.5	②	1	20.0	19.6	捕捉+破網
L1.5W1H25C	1.5	②	1	25.0	24.5	捕捉+破網
L1.5W1H30C	1.5	③	1	30.0	29.4	すり抜け
L3.0W1H10C	3.0	④	1	10.0	9.8	すり抜け
L3.0W1H20C	3.0	④	1	20.0	19.6	すり抜け
L3.0W1H25C	3.0	④	1	25.0	24.5	すり抜け

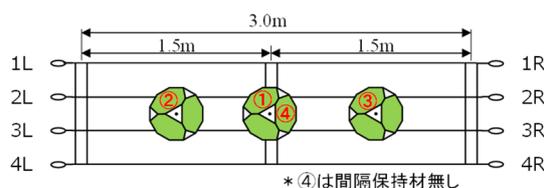


図-3 重錘衝突位置およびロードセル番号

材の中間部に荷重するケース、および間隔保持材が無く支柱間隔3mのスパン中央部に荷重するケースに対して、重錘衝突エネルギーを3段階に変化させて実施した。また、重錘衝突エネルギーに関しては、落石対策便覧⁶⁾によれば、支柱高さ2m、支柱間隔3mの標準的な防護柵の可能吸収エネルギーが80kJ程度であることより、ワイヤロープと金網における可能吸収エネルギー量を考慮して30kJ程度までとした。実験ケース名は、ワイヤロープの間隔保持材のスパン長(L1.5:1.5m, L3.0:3m)、重錘重量(W1:1kN)、重錘の落下高さ(H10:10m, H20:20m, H25:25m, H30:30m)、重錘衝突位置(P:間隔保持材上, C:間隔保持材間)を示している。また、表-2の右欄には実験結果の一覧を示している。ここで、すり抜けとは重錘がワイヤロープを押し広げロープより下方に抜け出す状況を、重錘捕捉はすり抜けが起こらずかつ金網の破損も無く重錘がワイヤロープ上に留まる状況である。また捕捉+破網は、重錘捕捉はされたが金網の一部に破網が見られる状況を示している。

図-3には、表-2における重錘衝突位置を示すと共に、重錘が試験体に接触した時点でのワイヤロープと重錘の位置関係を見下げ図として示している。重錘の形状より、ワイヤロープが50cm程度(ロープ間隔の1.4倍)水平方向に広げられた場合には、重錘はワイヤロープをすり抜けることになる。なお、ワイヤロープには実施工と同様

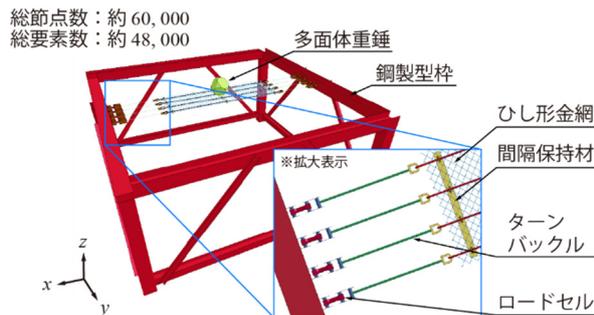


図-4 数値解析の有限要素モデル

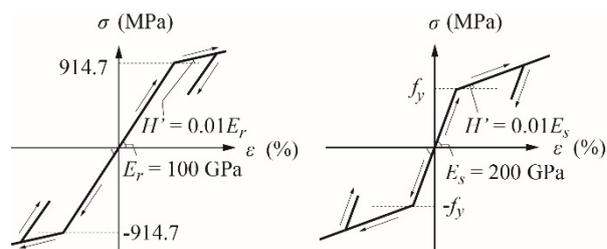


図-5 使用材料の応力-ひずみ関係
(a) ワイヤロープ (b) 金網および保持材

に、実験開始前に 5kN の初期張力を導入している。

実験における測定項目は、1)ワイヤロープの端部に取り付けた専用ロードセルによるワイヤロープ張力、および2)高速度カメラ撮影による試験体各部の鉛直変位である。

3. 数値解析概要

3.1 解析手法

図-4には、本数値解析で用いた有限要素モデルを示している。ここでは、実験状況を正確に再現するため、試験体を構成する各部材の形状を可能な限り詳細にモデル化した。

鋼製枠架台および間隔保持材は4節点シェル要素、金網およびターンバックルは2節点梁要素、それ以外については全て8節点固体要素を用いた。境界条件は、鋼製枠架台支柱底部を完全固定とし、重錘は実験同様に正三角形の面が上下方向で水平な状態で金網に衝突するように設定し、z軸方向成分のみ可動としている。重錘-金網間、金網-ワイヤロープ間、金網・ワイヤロープ-間隔保持材間の各接触面には剥離・すべりを伴う面と面との接触を定義し、摩擦係数を0.4とした。ターンバックル-シャックル・連結治具間に関しては剛結合を仮定し、ターンバックル端部はピン支持状態となっている。

数値解析は、表-2に示す全9ケースの実験を対象として、重錘要素全体に落下高さHから算出された衝突速度を初期速度として与えることにより行っている。なお、ワイヤロープの初期張力、減衰および重力については考慮していない。

3.2 材料構成則

図-5には、ワイヤロープ、ひし形金網および間隔保持材の応力-ひずみ関係を示している。

(a)図に示すワイヤロープの強度特性は落石対策便覧⁹⁾を参考に決定しており、バイリニア型の等方

硬化則を適用し、弾性係数 $E_r=100\text{GPa}$ 、降伏応力 $f_y=914.7\text{MPa}$ とした。塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_r の1%と設定している。ひし形金網と間隔保持材についてもワイヤロープと同様な構成則(弾性係数 $E_s=200\text{GPa}$)を用いた。なお、ひし形金網のJIS規格には、引張強さのみが規定されており、降伏応力に関する規定はない。ここでは、使用したひし形金網の引張強さが 396MPa (ミルシートによる)であることから、SS400材相当(降伏応力 $f_y=245\text{MPa}$)と判断した。また、間隔保持材の降伏応力に関してもミルシートの値($f_y=385\text{MPa}$)を採用した。降伏の判定にはvon Misesの降伏条件式を採用している。なお、ワイヤロープ、金網および間隔保持材は、すべて密度 $\rho_s=7.85(\text{g/cm}^3)$ と仮定している。

鋼製枠架台、ロードセル、ターンバックル、シャックルに関しては、実験時に塑性化していないことを確認していることから、密度 $\rho_s=7.85(\text{g/cm}^3)$ 、弾性係数 $E=200\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ の弾性体と仮定した。また、重錘も弾性体と仮定しており、所定の質量となるように単位体積質量を換算している。

4. 実験結果および考察

4.1 実験後の試験体状況

表-2の右欄には、実験結果の試験体状況を、写真-4には、実験後の試験体状況の代表例を示している。

写真(a)および写真(b)は、重錘を間隔保持材上に衝突させた落下高さ $H=20\text{m}$ のL1.5W1H20Pおよび $H=30\text{m}$ のL1.5W1H30Pの実験後の状況である。いずれも間隔保持材が重錘の衝突により大きく変形していることが分かる。しかしながら、ワイヤロープは、間隔保持材の効果によって等間隔に保たれている。金網の素線が一部破断してい



写真-4 実験終了後の試験体状況

るものの、重錘は確実に捕捉されており、落下高さ $H=10\text{m}$ の実験ケースにおいても間隔保持材の変形量が若干異なるのみで、重錘がワイヤロープおよび金網によって捕捉される結果となっている。

写真(c)~(e)は、間隔保持材のスペンが $L=1.5\text{m}$ で間隔保持材間に重錘を落下高さ $H=20\text{m}$, 25m , 30m で衝突させた $L1.5W1H20C/25C/30C$ の3つの実験ケースにおける実験後の試験体状況を示している。写真(c)より、落下高さ $H=20\text{m}$ の $L1.5W1H20C$ では、重錘がワイヤロープを若干押し広げ金網に喰い込んでおり、金網が局部的に破網している状況が分かる。また重錘形状が多面体であることから、重錘と重錘両端のワイヤロープとの接触状況が左右対称ではないことが見て取れる。次に写真(d)は、 $L1.5W1H25C$ の実験後の状況であるが、重錘はワイヤロープにより大きくリバウンドし、再度落下衝突した際に偏心して衝突したことによりワイヤロープをすり抜けて写真のような状況となった。このため、実験結果の判定としては、重錘捕捉+破網となる。写真(e)は $L1.5W1H30C$ の実験後の状況であるが、重錘はワイヤロープをすり抜け、金網を大きく引きずりながら地表面に落下している。間隔保持材の変形も小さいことから、重錘がワイヤロープからの大きな抵抗も

なく比較的簡単にすり抜けた状況が想定される。

写真(f)は、間隔保持材の無い場合の落下高さ $H=20\text{m}$ における $L3.0W1H20C$ の実験結果を示している。写真(e)と同様に、重錘はワイヤロープからの大きな抵抗もなく金網を巻き込みながら簡単にすり抜けた状況が示されている。落下高さが $H=10\text{m}$ および 25m の $L3.0W1H10C/25C$ の2つの実験ケースにおいても、重錘のすり抜けが発生している。

表-2の実験結果より、支柱間隔 $L=3\text{m}$ のスペン中央部にワイヤロープの間隔保持材を設置することで、①設置しない場合に比較して重錘がすり抜ける場合の衝突エネルギーを2倍以上にすることができること、②間隔保持材を設置した場合においても、重錘の衝突エネルギーが増加することで重錘のすり抜けが発生する場合があること等が明らかとなった。なお、本実験では1種類の重錘のみを使用していることから、間隔保持材の設置効果は定性的な評価に留まっている。今後、実規模試験体を用いた各種実験を実施すると共に数値解析手法の精度向上を図り、定量的な評価を行いたいと考えている。

4.2 各種時刻歴応答波形

図-6には、3種類の実験条件で落下高さが

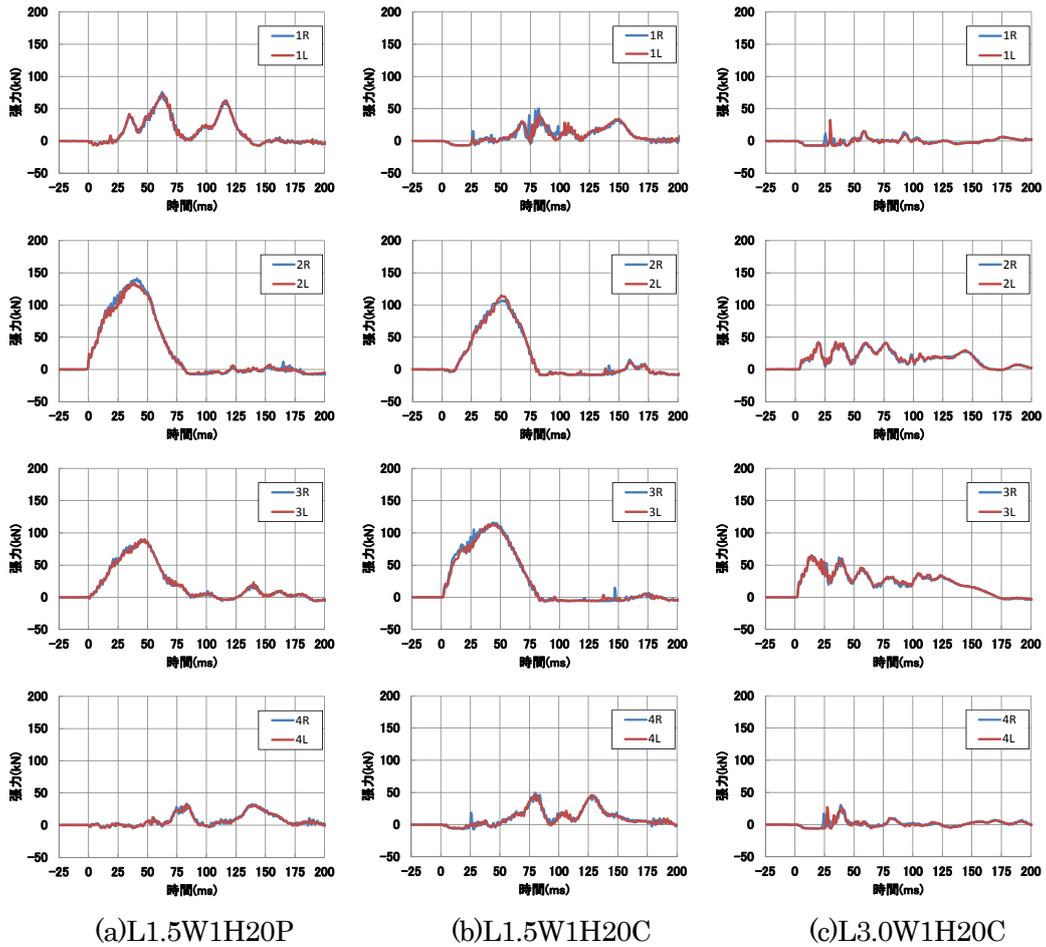


図-6 ワイヤロープ張力の時刻歴応答波形

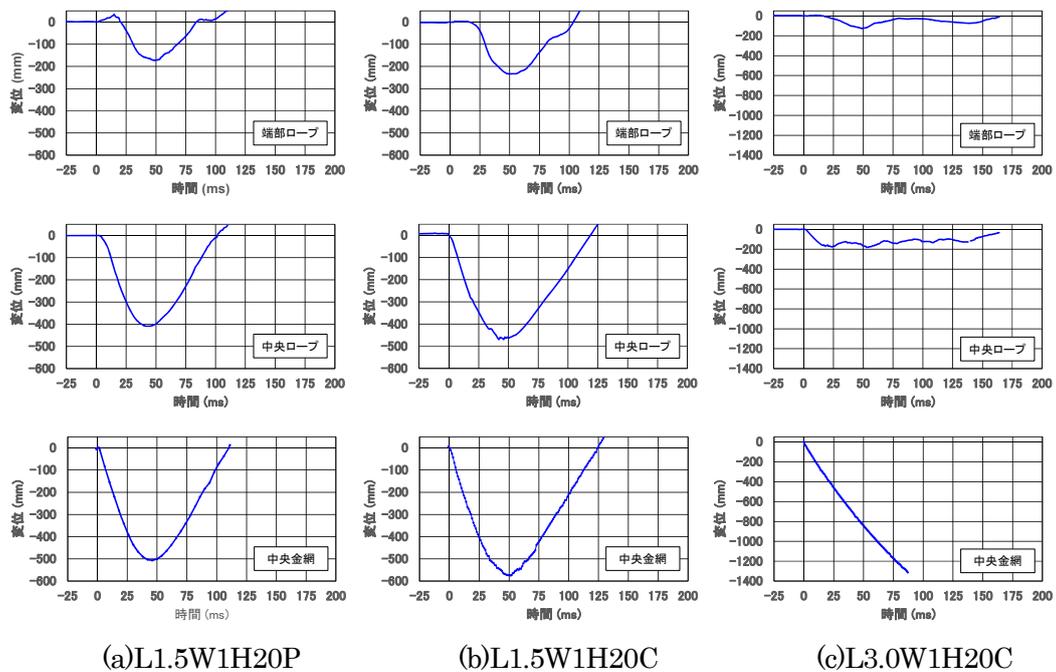


図-7 ワイヤロープおよび金網変位の時刻歴応答波形

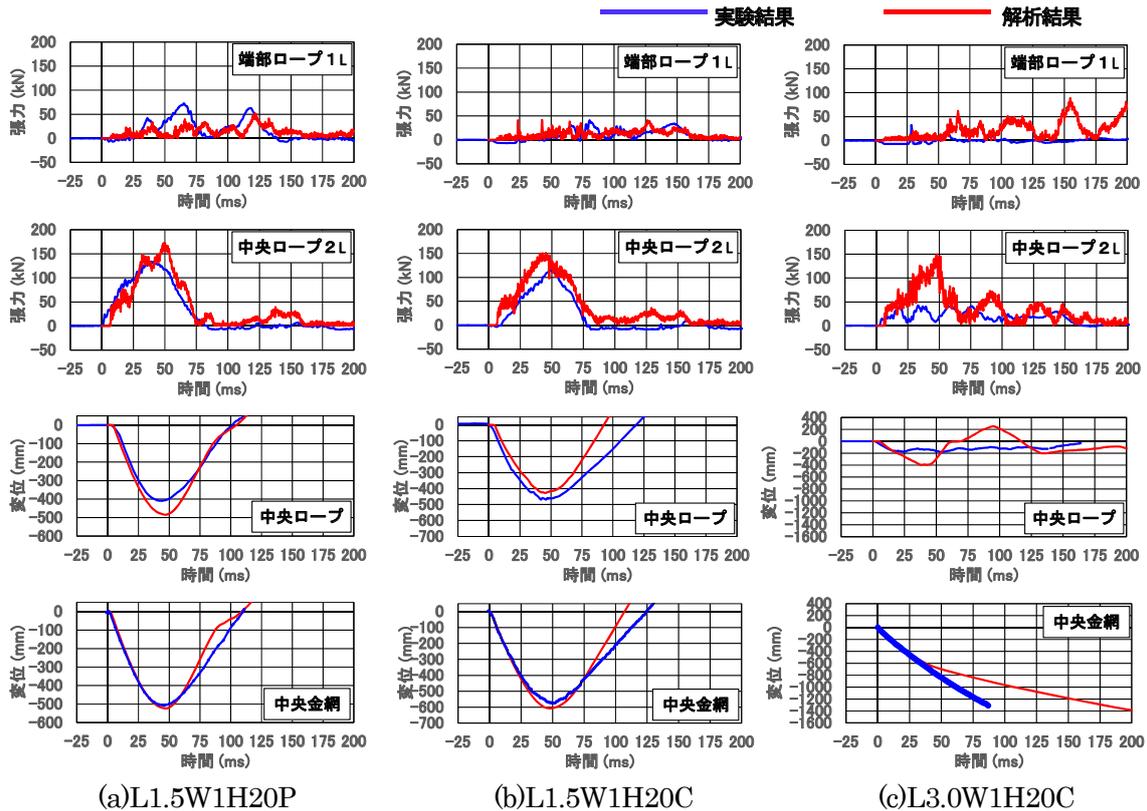


図-8 各種応答波形の実験結果と数値解析結果の比較

H=20m と同一の L1.5W1H20P, L1.5W1H20C および L3.0W1H20C の場合におけるワイヤロープ張力の時刻歴応答波形を重錘衝突時を原点に取って t=200ms まで示している。

重錘のすり抜けが発生しなかった(a)図の L1.5W1H20P および(b)図の L1.5W1H20C では、中央部の2本のワイヤロープ張力は、重錘衝突後急激に立ち上がり最大張力を迎える三角形の波形性状を示し、その後振動状態に移行している。一方、両端部のワイヤロープの張力波形は、重錘衝突後に一旦負の張力を示した後、2つのピークを示し減衰状態へと移行している。これは間隔保持材両端部が上下方向に振動するためと推察される。また、両端部のワイヤロープの最大張力は間隔保持材間に载荷した(b)図の場合に比較して大きな値を示している。間隔保持材を設置しない(c)図の L3.0W1H20C では、中央部のワイヤロープの張力が急激に立ち上がった直後に重錘がすり抜けたためか、張力が減少し激しく振動している状況が示されている。両端部の張力波形の振幅は小さい。これは、試験体全体の振動によるものと

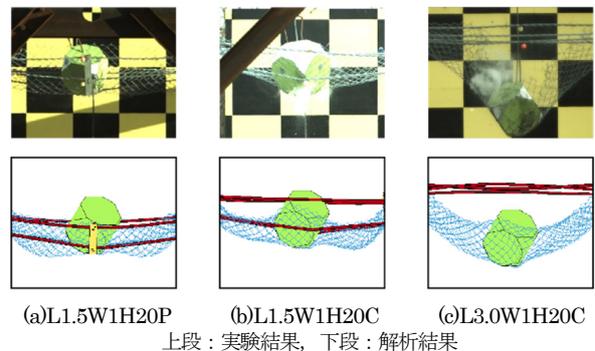


図-9 重錘とワイヤロープの状況 (t=60ms)

推察される。

図-7には、3種類の実験条件で落下高さが H=20m と同一の L1.5W1H20P, L1.5W1H20C および L3.0W1H20C の重錘落下位置と同一断面における端部および中央部ワイヤロープの変位および载荷点直下の金網中央変位の時刻歴応答波形を示している。

重錘のすり抜けが発生しなかった(a)図の L1.5W1H20P および(b)図の L1.5W1H20C の応答波形は、いずれも滑らかな正弦半波状の性状を示しており、最大変位発生時刻は図-6の最大張

力発生時刻とほぼ対応している。また、最大変位量は重錘の先端が金網にめり込むため、金網が最も大きく、次いで中央ロープ、端部ロープの順となっている。間隔保持材の無い(c)図のL3.0W1H20Cでは、重錘がワイヤロープをすり抜けたために中央ロープの最大変位量は200mm程度に留まり、金網の変位量が線形的に増加していることが分かる。

5. 数値解析結果および考察

図-8には、3種類の実験条件で落下高さがH=20mと同一のL1.5W1H20P, L1.5W1H20CおよびL3.0W1H20Cの場合における各種時刻歴応答波形について実験結果と数値解析結果を比較して示している。また、図-9には、時刻60msにおける重錘とワイヤロープの状況を実験結果と数値解析結果を比較して示している。

(a)図のL1.5W1H20Pのワイヤロープ張力に関する数値解析結果を見ると、端部ロープの張力は実験結果と比較して小さいものの、中央ロープに関しては、張力の立ち上がりや応答時間、最大張力等の実験結果をほぼ適切に再現している。ロープ変位に関する数値解析結果を見ると、中央ロープの最大変位は若干安全側に評価されているものの、変位の立ち上がりや応答時間は実験結果と整合している。また、中央の金網変位に関しては波形の立ち上がりから最大変位、応答時間にいたるまで実験結果をほぼ適切に再現していることが分かる。間隔保持材上に載荷した落下高さH=10mおよび30mの実験ケースに関してもほぼ同様の数値解析結果が得られている。

(b)図に示すL1.5W1H20Cに関しては、(a)図に比較して張力の立ち上がりや最大変位到達以降の勾配が数値解析結果と実験結果とで若干違いが見られるものの、応答時間や最大応答値に関する数値解析結果は実験結果を概ね再現しているものと思われる。さらに数値解析精度を向上させるためには、重錘とワイヤロープとの接触部分の境界条件等に関する検討が必要であるものと考えられる。

(c)図のL3.0W1H20Cに関する比較を見ると、実験結果のワイヤロープ張力は、重錘が衝突することによって変位が大きくなる前に重錘がワイヤロープをすり抜けるために小さく、中央の金網変位のみが増加している。一方、数値解析結果は、ワイヤロープの変位がある程度大きくなる状態ま

で重錘がワイヤロープをすり抜けないため、張力が大きく示されている。しかしながら、重錘のすり抜けが発生するという予測に関しては、図-9(c)に示すとおり数値解析でも得られている。これより、本数値解析手法は、重錘がすり抜けるか否かという予測に関しては、適切に評価可能であるものと判断される。

今後は、さらに実規模の実験ケースを増やすと共に、数値解析の精度向上についての検討を進める予定である。

6. まとめ

- (1) 支柱間隔がL=3mのスパン中央部にワイヤロープの間隔保持材を設置することで、設置しない場合に比較して重錘がすり抜ける場合の衝突エネルギーを2倍以上にすることができる。
- (2) 間隔保持材を設置した場合においても、重錘の衝突エネルギーが増加することで重錘のすり抜けが発生する場合がある。
- (3) 本数値解析手法を適用することにより、中央ロープおよび中央部金網の変位量やロープ張力、落石のすり抜けの有無を大略再現可能である。

【参考文献】

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 今野久志，荒木恒也，西弘明，小室雅人，岸徳光：従来型落石防護柵の落石すり抜けに関する重錘落下衝撃実験，平成28年度土木学会北海道支部論文報告集 第72号，2017.2
- 3) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014.
- 4) 小室雅人，西弘明，今野久志，荒木恒也，田中優貴：ひし形金網の耐衝撃挙動に関する数値シミュレーション，構造工学論文集，Vol.63A, pp.1084-1095, 2017.3
- 5) Werner Gerber : Guideline for the approval of rockfall protection kits, Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute (WSL), 2001.