



水平に設置された落石防護網の耐衝撃挙動に関する 衝撃応答解析

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): 落石防護網, 重錘衝撃実験, 有限要素解析 キーワード (En): rockfall protection nets, falling-weight impact loading test, finite element analysis 作成者: 小室, 雅人, 西, 弘明, 今野, 久志, 荒木, 恒也, 佐々木, 哲也 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009707

水平に設置された落石防護網の耐衝撃挙動に関する衝撃応答解析

Impact response analysis of dynamic behavior of rockfall protection nets

○小室 雅人* 西 弘明** 今野 久志*** 荒木 恒也**** 佐々木 哲也*****
Masato KOMURO Hiroaki NISHI Hisashi KONNO Nobuya ARAKI Tetsuya SASAKI

ABSTRACT In this paper, the numerical simulations for rockfall protection net by means of 3D elasto-plastic finite element analysis were conducted taking the falling height of the weight and the loading position as variables. Here, the steel net and wire-rope were modeled by using shell element and cable element, respectively. From this study, the following results are obtained: 1) the impact force and displacement at loading point can be appropriately evaluated by applying the proposed numerical method until it reaches maximum displacement; and 2) however, since the rebound behavior of protection net cannot be properly simulated, it is necessary to investigate the modeling of net and stiffness between net and wire-rope.

Keywords : 落石防護網, 重錘衝撃実験, 有限要素解析
rockfall protection nets, falling-weight impact loading test, finite element analysis

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路には、落石災害を防止するための落石対策工の一つとして、吊りロープや支柱、金網、ワイヤロープ等の部材を組み合わせたポケット式落石防護網が数多く建設されている。落石規模が比較的小さい場合に適用される従来型のポケット式落石防護網は、落石対策便覧¹⁾に基づき、構成部材の吸収可能エネルギーおよびエネルギー差を用いて設計が行われているものの、落石衝突に対する応答メカニズムの解明やエネルギー収支という観点から行われた検討事例^{2), 3)}は限られており、設計法の妥当性に関しては必ずしも十分な検証がなされていない。

一方、近年では、より大きな落石エネルギーに対して適用可能なように、落石防護網のワイヤロープ端部に緩衝装置(金具)を取り付けた、いわゆる高エネルギー吸収型の落石防護網が研究・開発、実用化されている^{4)~6)}。また、このような緩衝装置を有する落石防護網に関する数値解析も実施されており、実験結果との比較によって解析手

法の妥当性の検討がなされている^{4), 7), 8)}。しかしながら、それらの性能評価に関しては、開発者独自の手法で実施されており、統一的な指標がないのが現状である。

このような背景のもと、著者らは従来型の落石防護網も含めた落石防護工に関する性能照査技術の確立に向けた種々の検討を行っている^{9)~11)}。本論文では、それらの一連の研究において、落石防護網の耐衝撃挙動やエネルギー吸収機構などを明らかにするために数値解析的側面から検討を試みている。具体的には、著者らによって実施された水平に金網を設置した落石防護網の実規模模型実験¹¹⁾を対象に、三次元弾塑性衝撃解析による再現解析を実施し、その妥当性を実験結果と比較することによって検証した。ここでは、落石防護網の設計上重要と考えられる最大変位時までの再現を中心として検討を行っている。さらに、各構成部材におけるエネルギーの経時変化についても検討した。なお、本解析にはLS-DYNA¹²⁾を使用している。

*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

**博(工) (国研) 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) (国研) 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)

**** (国研) 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)

***** (国研) 土木研究所つくば中央研究所 土質・振動チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

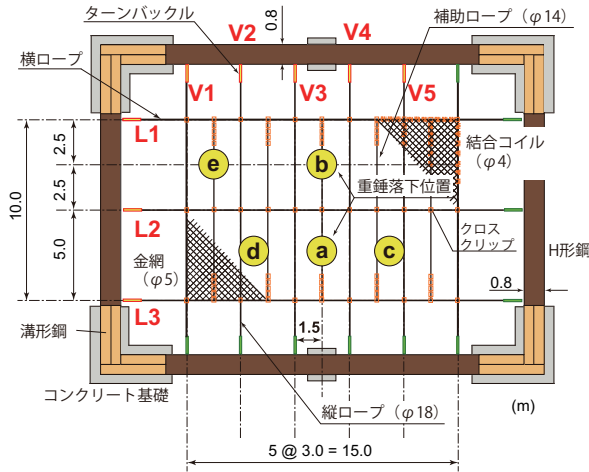


図1 試験体の形状寸法および重錘落下位置

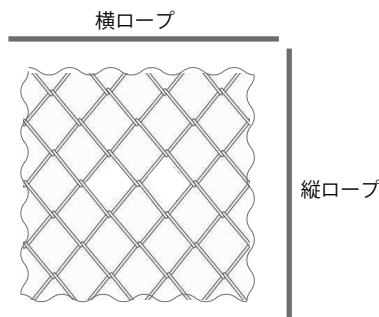


図2 ひし形金網の形状と配置方向

2. 実験概要

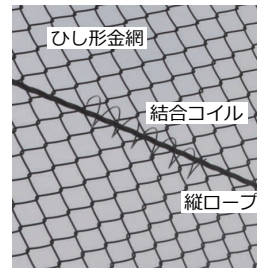
2.1 試験体概要

図1には、試験体の形状寸法および重錘落下位置を示している。試験体の形状寸法は、縦10 m、横15 mであり、金網にはひし形金網φ5.0、縦・横ロープには18φ、補助ロープには14φを用いた。縦(補助)ロープの間隔は3.0(1.5) m、横ロープの間隔は5.0 mである。なお、ひし形金網は素線を山形に加工し、編み合わせて平行四辺形の網目を形成したものであり、本実験では図2に示す方向に配置した。写真1(a)には、試験体の設置状況(全景)を示している。

各ロープと金網の結合には、写真1(b)に示すφ4.0 mmの結合コイルを使用している。なお、縦ロープ、横ロープおよび補助ロープの長さは、それぞれ15 m、27 m、10 mである。また、縦・横ロープの端部は、写真1(c)に示すようにターンバックルおよびUボルトを介して周囲に設置したH形鋼とピン接合に近い状態となるように接続した。



(a) 全景



(b) 結合コイル



(c) Uボルト

写真1 試験体の設置状況

表1 実験ケース一覧

実験ケース	落下高さ H (m)	载荷位置		備考
D1-w5.0	5.0	a	補助	連続载荷
D1-w7.5	7.5	b	ロープ上	
D2-n5.0	5.0	c	金網上	中央スパン 金網交換後 連続载荷
D2-n7.5	7.5	d		
D3-w5.0	5.0	e	補助	連続载荷
D1-w10.0	10.0	b	ロープ上	

2.2 実験方法

実験は、質量1 tの重錘(直径500 mm、高さ610 mm、底部より高さ60 mmの範囲が半球状)をトラッククレーンで吊り上げ自由落下衝突させることにより実施した。また、表1には実験ケース一覧を示している。実験ケースは落下高さおよび载荷位置(図1参照)を変化させた全6ケースである。なお、重錘は2台のトランシットによって所定の位置となるように調整し精度よく落下衝突させている。

実験における測定項目は、(1)重錘に取り付けた加速度計による重錘衝撃力、(2)縦・横ロープ端部のターンバックルに貼付したひずみゲージによる

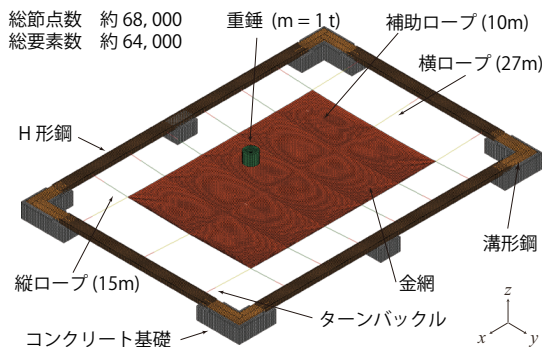


図3 要素分割状況

ロープ張力, および (3) 高速度カメラ撮影による重錘落下位置の金網の鉛直変位量である。なお, 実験の詳細に関しては文献¹⁾を参照されたい。

3. 数値解析概要

3.1 解析手法

図3には, 本数値解析で用いた試験体および実験装置の要素分割状況を示している。ここでは, 実験状況を可能な限り正確に再現するために, 鋼製治具も含めて詳細にモデル化した。

金網, H形鋼および溝形鋼は4節点シェル要素, ターンバックルは2節点梁要素, ワイヤロープは圧縮力を伝達しない2節点ケーブル要素, コンクリート基礎は8節点固体要素を用いた。ターンバックル端部は, 実験条件と同様にピン支持としている。

接触面は重錘-金網間に面と面との接触および剥離・すべりを伴うように設定した。なお, 接触面における摩擦については考慮していない。また, 金網とワイヤロープの接合に関しては, 実験では結合コイルを用いて両者を結合しているが, 解析ではこれらのモデル化が困難であることより, 完全結合と仮定している。

数値解析は, 表1に示す6箇所の荷重位置について重錘に落下高さ 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。解析時間は1,000 msとした。なお, 計算の煩雑さを避けるため全解析ケースにおいては無損傷の落石防護網に一度だけ重錘を衝突させている。また, 本数値解析では減衰を考慮していない。

3.2 材料構成則

図4(a)には, 縦・横ロープおよび補助ロープの応力-ひずみ関係を示している。ここでは, 引張

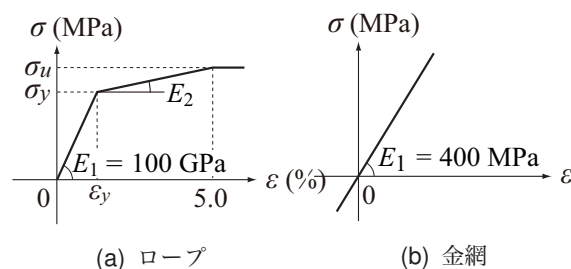


図4 応力-ひずみ関係

表2 ワイヤロープの材料物性値

ロープ径	断面積 A (mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (%)	降伏応力 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)
14φ	78.1	0.943	943.6	1257.7
18φ	128	0.914	914.7	1217.1

側をトリリニア型とする非線形弾性体モデルを適用した。表2に示すロープの降伏応力 σ_y および引張強度 σ_u は, 落石対策便覧¹⁾に示されているロープの降伏張力および破断強度をロープ断面積で除すことにより算出した。また, 一次弾性係数 E_1 についても落石対策便覧に基づき設定した。なお, 破断ひずみは5%と仮定した。

(b) 図には, 金網の応力-ひずみ関係を示している。金網に関しては, 重錘衝突位置近傍において局所的な塑性化が生じるものと考えられるが, 実験では金網が破網すること無く重錘を捕捉していることや, 計算の煩雑さを避けるために, ここでは等方弾性体としてモデル化した。なお, 弾性係数は既往の研究成果を参考に予備解析を実施し, 400 MPaと設定した。

金網および横・縦ロープを接続しているH形鋼およびターンバックルに関しては, 実験時に塑性化が生じていないことより, 弾性体と仮定した。また, 重錘に関しても弾性体と仮定し, 質量1tとなるように単位体積質量を換算している。

4. 数値解析結果と考察

4.1 重錘衝撃力および荷重点変位波形

図5には, 全解析ケースにおける重錘衝撃力および重錘落下位置の鉛直変位(以後, 荷重点変位)波形を比較して示している。なお, 時間軸の0は, 重錘が金網に衝突した時刻を意味する。

(a) 図に示す重錘衝撃力波形に着目すると, 落

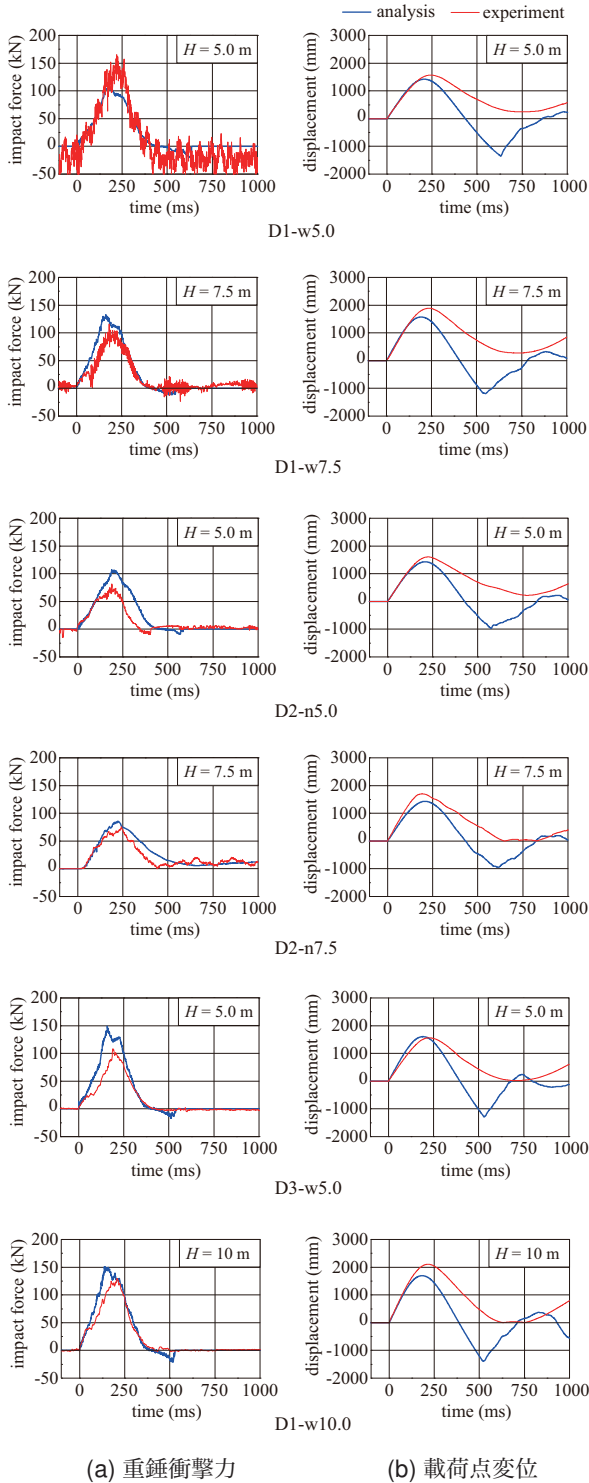


図5 重錘衝撃力および荷点変位波形

下高さ H や重錘落下位置(a~e)によって若干異なる結果を示している。

すなわち、補助ロープ上に落下した D1-w5.0/7.5/10.0 および D3-w5.0 に関しては、数値解析結果における波形の立ち上がりは実験結果とほぼ一致しているものの、その後の波形性状は若干異なり、

また最大値も数値解析結果の方が大きいことが分かる。一方、衝撃荷重の継続時間は、両者でほぼ一致している。

金網上に落下した D2-n5.0/n7.5 の場合には、補助ロープ上に落下した場合と異なり、衝撃力波形の立ち上がりは両者で非常によく一致しているものの、数値解析結果は実験結果の最大値を過大に評価しており、また継続時間も若干長い。

次に、(b) 図に示す変位量に着目すると、数値解析結果は、実験結果の波形の立ち上がりをほぼ適切に再現している。一方、最大変位量に関しては実験結果に比べて若干小さく、また落下高さ H の増大とともにその差は大きくなる傾向にあるものの、数値解析結果は実験結果の最大応答値をほぼ再現できることが分かる。なお、最大変位以降のリバウンド状態において数値解析結果は実験結果と異なる挙動を示している。これは、実験では金網とロープの接続に結合コイルを部分的に使用しているのに対して、本数値解析では両者を完全結合と仮定していることによるものと推察される。

以上より、本数値解析手法を用いることによって、落下位置によって最大衝撃力や衝撃力継続時間に若干の差異が見られるものの、重錘落下位置における変位は、最大応答値に至るまで概ね実験結果を再現できるものと考えられる。

4.2 ワイヤロープ張力

図6および図7には、それぞれ横および縦ロープに作用する張力の時系列分布を示している。なお、いずれのロープ張力に関しても、重錘落下位置近傍のロープについてのみ示している。

図6に示す横ワイヤロープ張力に着目すると、数値解析結果は、D3-w5.0のL2ロープの場合を除いて、落下高さや重錘落下位置にかかわらず、張力の立ち上がりや最大値、および作用継続時間をほぼ適切に再現していることが分かる。なお、D3-w5.0の数値解析結果が実験結果と異なる要因の一つとしては、重錘落下位置が金網の端部であることより、金網とロープを完全結合と仮定している影響が、他の重錘落下位置よりも大きいことによるものと推察される。

一方、図7に示す縦ロープ張力に関しては、横ロープの場合と異なり、いずれの場合も数値解析結果が実験結果の最大張力を大きく評価する傾向にある。しかしながら、張力の作用継続時間に関しては、両者おおよそ一致していることが分か

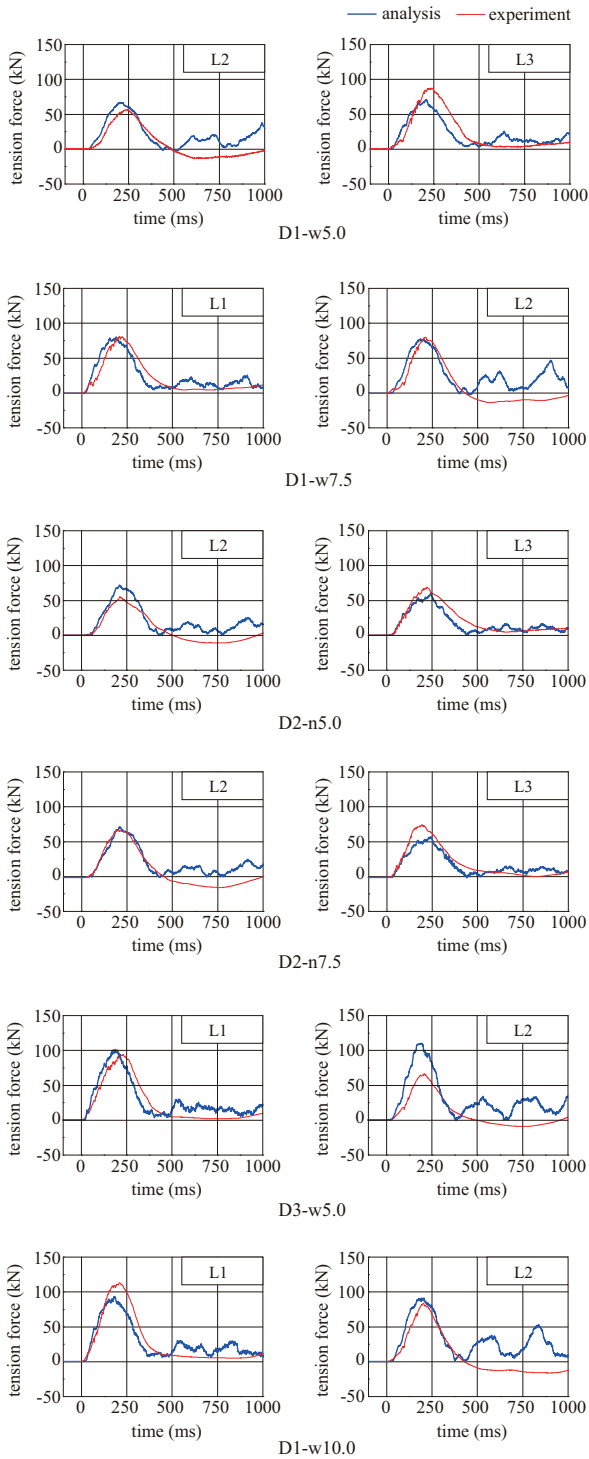


図6 横ワイヤロープ張力

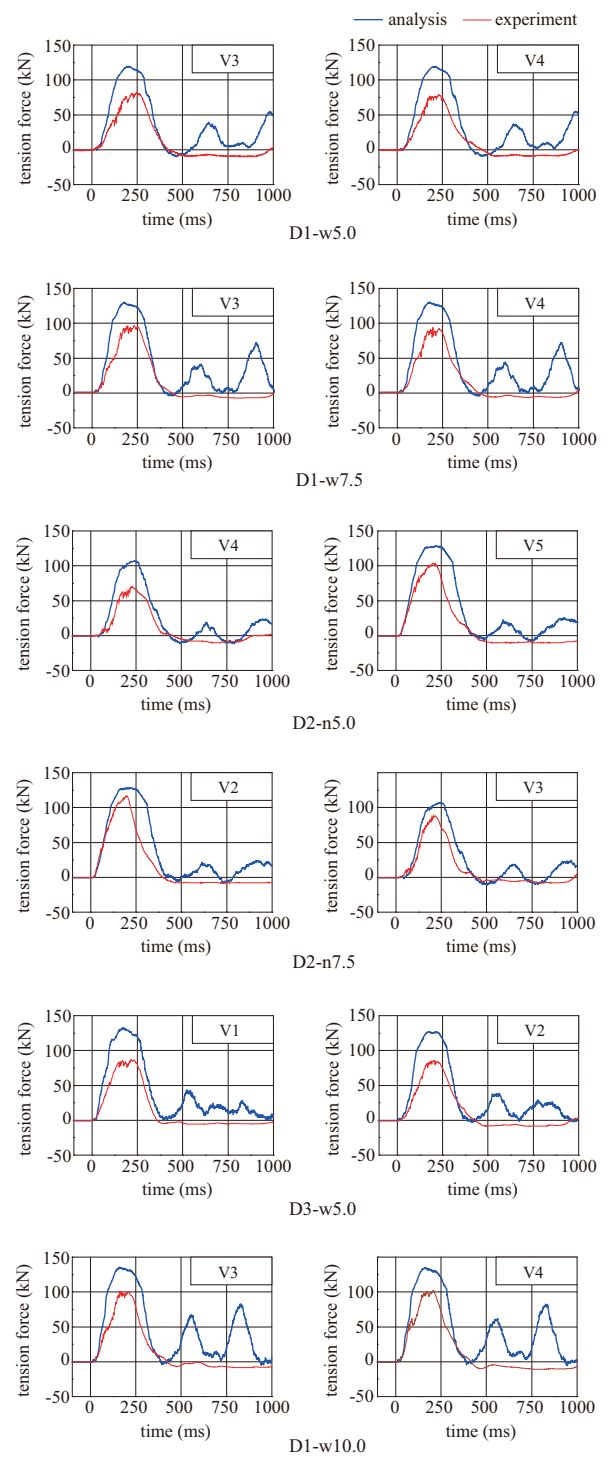


図7 縦ワイヤロープ張力

る。なお、数値解析結果が実験結果と比較して大きく示される理由は、1) ひし形金網が有する剛性の異方性を数値解析では考慮していないこと、2) 試験体の縦ロープ本数が多く、かつ金網とロープを完全結合と仮定していることから、実際の試験

体の剛性を過大に評価していることによるものと推察される。

4.3 エネルギーの経時変化

図8には、全ケースにおけるエネルギーの経時変化を示している。図は重錘衝突後から500ms

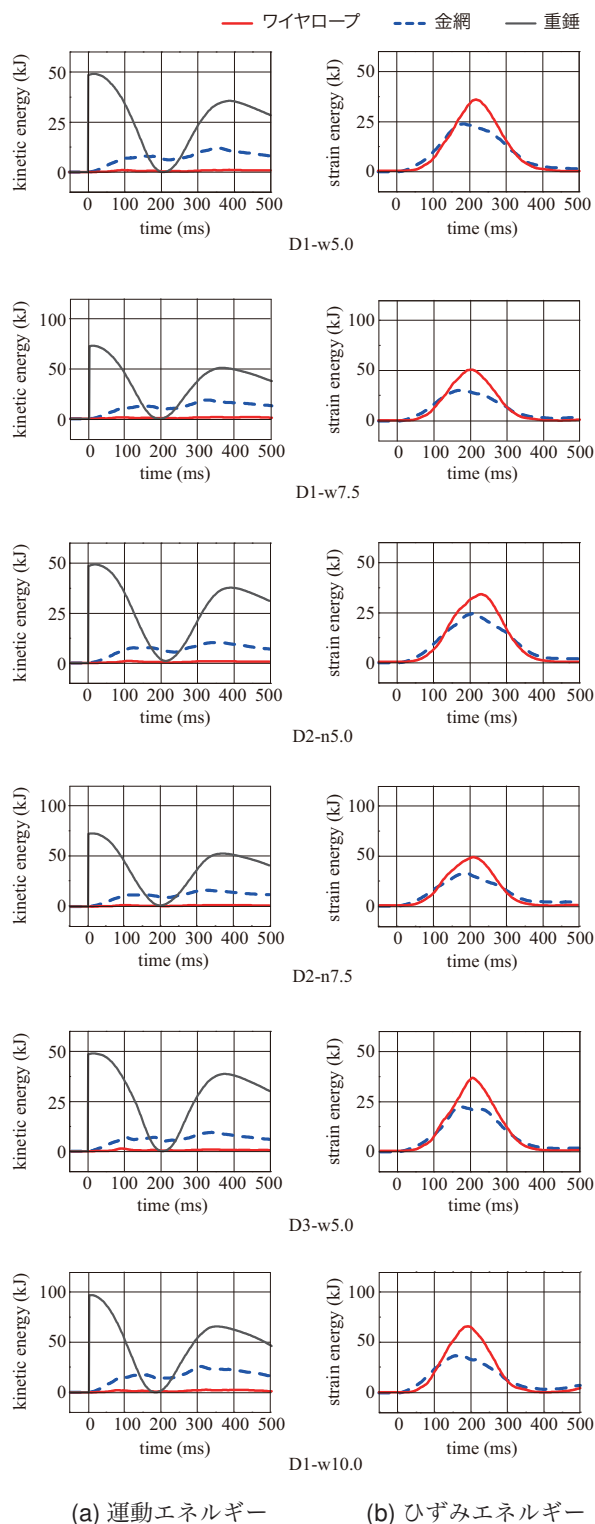


図8 エネルギーの経時変化

までの結果である。なお、運動およびひずみエネルギーは、LS-DYNAにより自動的に出力される。

(a) 図に示す運動エネルギーに着目すると、重錘の運動エネルギーは、重錘が金網に衝突後、徐々に

に減少し金網が最大変位を示す 200 ms 前後で最小値を示している。また、重錘を捕捉するために金網は大きく振動することより、金網の運動エネルギーが発生している。一方、ワイヤロープの運動エネルギーは、それらに比較して非常に小さいことが分かる。

(b) 図より、ひずみエネルギーは、いずれのケースにおいても重錘の運動エネルギーが最小値を示す 200 ms 前後で最大値を示していることが分かる。なお、前節で述べたように金網の最大変位時までは実験結果と数値解析結果は大略一致していることより、最大変位時における金網とワイヤロープのひずみエネルギー分担率は、落下位置によって若干異なるものの、1:1.5~1:2程度であるものと考えられる。

5. まとめ

本論文では、水平に設置されたポケット式落石防護網の実規模衝突実験を対象に、LS-DYNAを用いた三次元弾塑性衝撃解析を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) 提案の材料構成則および解析手法を用いることにより、落下位置によって最大衝撃力や衝撃力継続時間に若干の差異が見られるものの、重錘落下位置における変位は、最大応答値に至るまで概ね実験結果を再現可能である。
- 2) 数値解析結果は、実験結果の縦ロープ張力を若干過大に評価する傾向にあるものの、横ロープ張力に関してはほぼ適切に再現可能である。
- 3) 一方、リバウンド後の挙動に関しては、実験結果を適切に再現できておらず、ひし形金網や結合コイルのモデル化も含めて精度の向上を図る必要がある。

今後は、ひし形金網および金網とワイヤロープを接続している結合コイルのモデル化を試み、重錘リバウンド後の変形挙動についても適切に評価できる解析手法の構築を検討する予定である。

【参考文献】

- 1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 2) 原木大輔，香月智，田代元司：円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析，土木学会論文集 A，Vol.65, No.2, 536-553，

- 2009.
- 3) 高橋利延, 山本圭士, 香月 智, 高森 潔: 三次元個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol. 60A, 1042-1055, 2014.
 - 4) 窪田潤平, 中村浩喜, 吉田 博: 特殊ひし型金網および緩衝金具を配置した落石防護網の実斜面実験について, 構造工学論文集, Vol. 54A, 11-22, 2008.
 - 5) 右城 猛, 西岡南海男, 筒井秀樹, 田中登志夫: エネルギー吸収金具を付けた落石防護ネットの開発, 第3回南海地震四国地域学術シンポジウム, 2008.
 - 6) 田島与典, 前川幸次, 岩崎征夫, 河上康太: 実物大重錘衝突実験による緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の評価, 構造工学論文集, Vol. 56A, 1088-1100, 2010.
 - 7) 前川幸次, 河上康太, 田島与典, 岩崎征夫: ポケット式落石防護網のシミュレーション解析に関する研究, 構造工学論文集, Vol.57A, 1134-1144, 2011.
 - 8) 岩崎英治, 加規秀二, 向笠正洋: 落石防護工に用いる緩衝金具の開発と性能評価, 構造工学論文集, Vol.57A, 75-85, 2011.
 - 9) 山口 悟, 今野久志, 西 弘明, 佐々木哲也, 小室雅人: 従来型ポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 21, 104-110, 2013.
 - 10) 平田健朗, 小室雅人, 西弘明, 今野久志, 山口悟: 従来型ポケット式落石防護網の耐衝撃挙動に関する衝撃応答解析, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 22, 137-143, 2014.
 - 11) 山口悟, 今野久志, 西弘明, 加藤俊二, 小室雅人: 落石防護網の実規模模型実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 22, 131-136, 2014.
 - 12) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014.