

(48) ポケット式落石防護網の実物大実験への LS-DYNA の適用

An application of LS-DYNA to the full scale tests of the pocket-type rockfall protection nets

河上康太*, 前川幸次**, 田島与典***, 岩崎征夫****
 Kota Kawakami, Koji Maegawa, Tomonori Tajima, Masao Iwasaki

* 金沢大学大学院博士前期課程, 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

** 工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (同)

*** 金沢大学大学院博士後期課程, 自然科学研究科環境科学専攻 (同)

**** 所長, (株) ライテック福岡事務所 (〒812-0039 福岡県福岡市博多区冷泉町)

Key Words: pocket-type rockfall protection net, shock absorber, simulation

キーワード: ポケット式落石防護網, 緩衝装置, シミュレーション解析

1. はじめに

落石災害は, 道路交通への障害とそれに伴う経済活動へ影響を及ぼし, さらには人命を奪う危険性もある. 近年, 人命はもとより道路交通に対する災害防止, 安全性向上は社会的に強く要望されているところであり, 落石防災対策について, 合理的な調査, 設計および施工方法や適切な維持管理方法を確立して行くことが重要な課題となっている.

落石に対する対策工には, 発生した落石を待ち受けてその運動を止めるもの, さらに落石を下方または側方へ誘導する落石防護工がある. その中でも斜面中腹から下方を面的に覆って落石を受け止めて下方へ誘導するポケット式落石防護網(図-1)があり, 経済性と施工性に優れている反面, 材料強度の限界などから対応可能な落石エネルギーは 50~200 kJ 程度と小さく, 適用できる箇所が限定される.

従来のポケット式落石防護網にワイヤロープの緩衝装置(滑りにより作用力を緩和しつつエネルギーを吸収)を適用したもの¹⁾, さらに著者らは, 釣合いロープ(滑車装置により吊ロープの負荷を平滑化)を導入した高エネルギー吸収釣合い式落石防護網(以後, 単に「ポケット式落石防護網」という)を開発し, 緩衝装置と滑車装置の効果を検証するために実物大重錘衝突実験を行った²⁾.

ポケット式落石防護網は, 斜面勾配が水平に対して 60~70 度の箇所へ設置されることが多く, 落石の衝突方向と金網面がなす角度は約 20 度となる. このことから, 実物大の重錘衝突実験では図-2 に示すように, 重錘の鉛直落下に対して衝突面が 20 度となるように, 金網設置面を水平に対して 70 度で傾斜させた.

本研究では, 実物大の重錘衝突実験を対象として, LS-DYNA によるシミュレーション解析を行い, その解析モデルの妥当性を確認する.

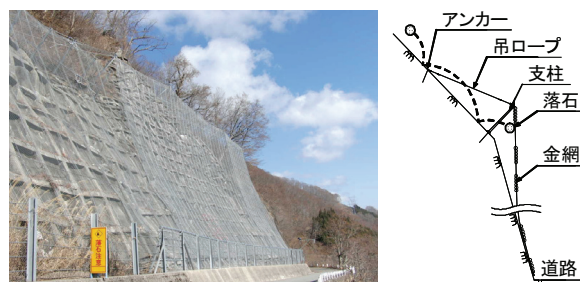


図-1 ポケット式落石防護網

2. 実物大重錘衝突実験と解析モデル

2.1 ポケット式落石防護網の供試体

詳細は文献 2) に記述されているが, 解析モデルの説明のために, 以下に実験について概説する. 図-2 は, 供試体の基本構造を示している. その形状寸法は, ネット高 10 m, ネット幅 18 m, 実構造での支柱位置となる B 点と D 点の間隔は 12 m である. 供試体は, 標準的なポケット式落石防護網の落石エネルギーの吸収性能を高めるために, 図-3 に示す滑車装置を用いた釣合いロープと緩衝装置を導入している.

滑車装置は, 図-2 における B, C, D 点に設けており, A, B, C, D, E 点を W 形状で結ぶ吊ロープを, 1 本のワイヤロープで連続させている. これは, 落石の衝突時に吊ロープの移動を円滑にし, 負荷を吊り合わせると同時に落石の衝撃力を分散させ, 構造全体で落石のエネルギーを吸収する効果を期待している.

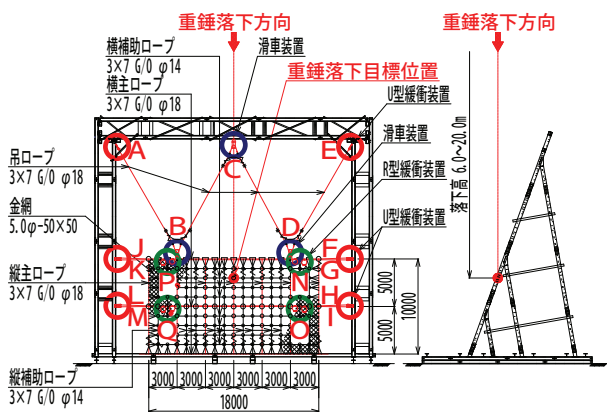


図-2 供試体の形状寸法

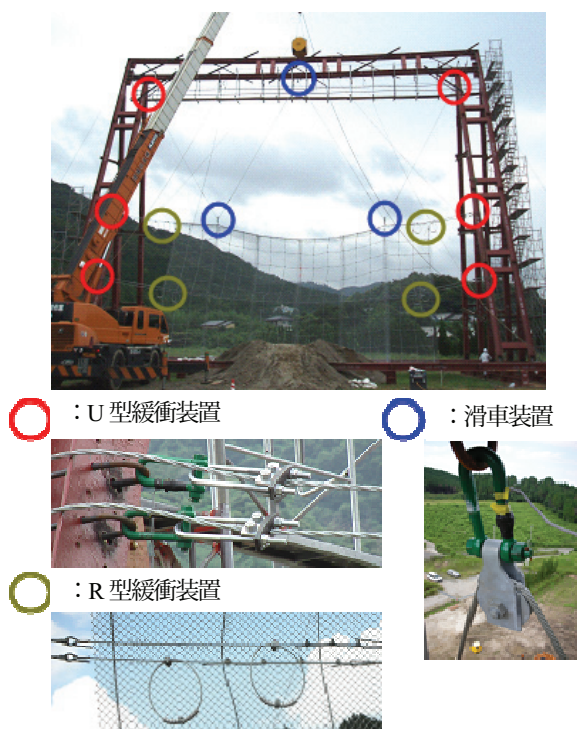


図-3 滑車装置と緩衝装置の設置箇所

表-1 実験ケース

実験 No.	構造形式	緩衝装置	重錘質量 (tf)	重錘落下高 (m)	衝突エネルギー (kJ)
No.1	標準型	無	1.7	6.0	100.0
No.2			1.7	8.0	133.3
No.3	高エネルギー	R型	2.5	7.0	171.5
No.4			2.5	10.0	245.0
No.5	吸収型	R型	2.5	15.0	367.5
No.6		U型	2.5	20.0	490.0

表-2 重錘衝突実験の解析モデルに用いた材料特性

名称	規格	断面積(mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)	降伏張力(kN)	破断荷重(kN)	破断ひずみ
横主ロープ, 吊ロープ	3×7G/O-18φ	129	100	118	157	0.04
縦・横補助ロープ	3×7G/O-14φ	78	100	73.6	98.1	0.04
金網	5.0φ×50×50	19.63	200	4.711	7.852	0.3

緩衝装置は、その性能確認実験で得た平均滑り張力により設計を行い、250 kJ 程度までの落石エネルギーに対しては、R 型のみで吸収可能との結果を得た。したがって、衝突エネルギーが 250 kJ 以下の実験ケースでは、R 型のみ設置し、250 kJ を超える実験ケースでは、R 型と U 型を併用した。

横主ロープは、高エネルギーに対応できるように、1 段につき 2 本のワイヤロープを張設している。したがって、R 型の設置箇所は、横主ロープ 1 本につき左右対称の位置となる N, O, P, Q 点に 2 箇所ずつ、全体で 8 箇所に設置した。また、U 型の設置箇所は、吊ロープ両端となる A, E 点の 2 箇所、ならびに横主ロープ両端となる F, G, H, I, J, K, L, M 点の 8 箇所、全体で 10 箇所に設置した。実験は、表-1 に示す 6 ケースについて実施した。

2.2 実験の解析モデル

実験の解析モデルの概要を図-4a および図-4b に示す。実験においては、各ワイヤロープや金網には防護網の自重によるたるみが存在した。当初の解析においては簡単のためたるみを考慮しない平らな防護網のモデル(図-4a)を用いたが、たるみによる影響を調べるために仮想のたるみを考慮した防護網のモデル(図-4b)も作成した。

吊ロープおよび横主ロープの端部は、実験では H 鋼に固定されているが、解析においては、それぞれのワイヤロープの端部は並進を固定し回転を自由としている。

以下、要素名等については LS-DYNA⁹⁾での英字名称を用いる。また、各部材に仮定した材料特性は表-2 の通りである。

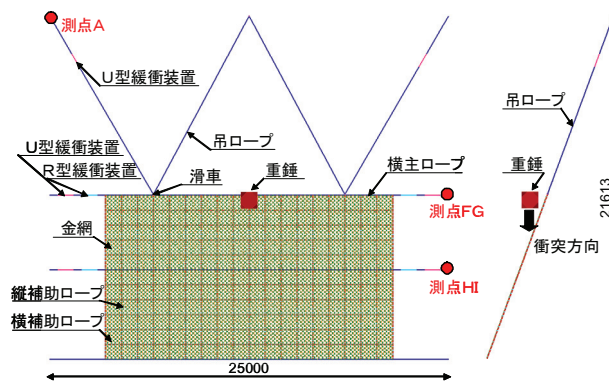


図-4a 解析モデル (たるみ無し)

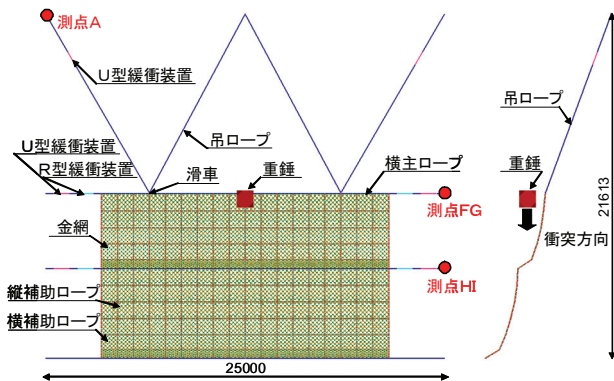


図-4b 解析モデル (たるみ有り)

(1) 重錘

図-5は実験に用いた重錘で、SAEFL[®]が落石防護柵の認証試験において定義している形状であり、それをRIGID (剛体) でモデル化した。



図-5 SAEFL 型の重錘⁶⁾

(2) 横主ロープ、縦・横補助ロープ、吊ロープ

圧縮力に抵抗しない CABLE 要素とし、材料特性の各パラメータは公称値を用いている。しかし、CABLE 要素では破壊ひずみを考慮できないため、CABLE 要素と CABLE 要素の間に破壊ひずみを考慮できる TRUSS 要素を挿入している。また、防護網上中段の横主ロープは 2 本ずつあるが、解析では断面積を 2 倍にすることで表現している。

(3) 金網

CABLE 要素でモデル化し、材料特性の各パラメータは公称値を用い、ワイヤロープと同様に TRUSS 要素を挟んでいる。要素数を減らして解析時間を短縮するために、網目寸法 (目合い) を 282.8 mm とし、等価な軸剛性 (断面積を 2.83 倍) とした。なお、金網を構成する線材の交点は緊結されていないが、CABLE 要素は交点で結合されている。

(4) R 型緩衝装置

緩衝装置の滑り張力試験²⁾では、図-6 のように張力が変動し、平均滑り張力は 28 kN である。解析モデルでは張力が 28 kN (横主ロープ 2 本分を 1 本で表現するため 56 kN) で降伏棚に達するような材料特性を緩衝装置に相当する TRUSS 要素に設定することにより表現した。したがって、解析における滑り長はその TRUSS 要素長と塑性ひずみから求めた。

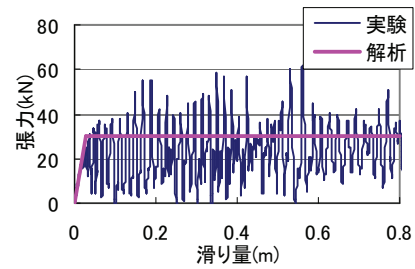


図-6 R 型緩衝装置のモデル化

(5) U 型緩衝装置

滑り張力試験での平均滑り張力は 30 kN であり、R 型と同様に、TRUSS 要素の張力が 30 kN において降伏棚に達する材料特性を設定することにより緩衝装置を表現した。横主ロープに取り付けるものは、2 本分を考慮して張力が 60 kN で、吊ロープに取り付けるものは張力が 30 kN で降伏棚に達する材料特性で表現した。

(6) 吊ロープおよび滑車装置

吊ロープには防災施設用ワイヤロープ (3×7G/O-16φ または 18φ) を使用するが、滑車装置の前後数mは柔軟性のある巻き上げ機用ワイヤロープ (6×24G/O-16φ) で置き換えている。解析モデルでは、吊ロープを SEATBELT 要素で作成した。SEATBELT 要素と滑車位置に SLIPRING 節点を用いることで、吊ロープが滑車装置を移動する状態を表現できる。

2.3 実験と解析結果の比較

実験映像の一例として、図-7 は No.5 の実験映像を示し、解析画像の一例として、図-8 は No.5 の条件による「たるみ有り」を、それぞれ 0.1 秒間隔で示している。

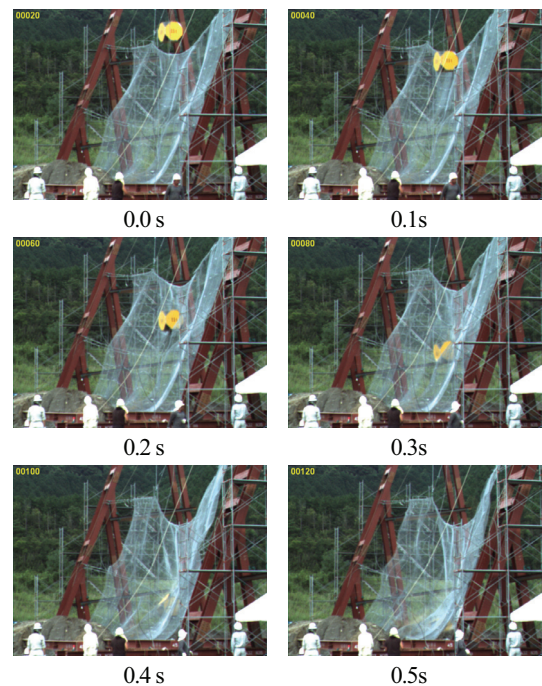


図-7 No.5 の実験映像

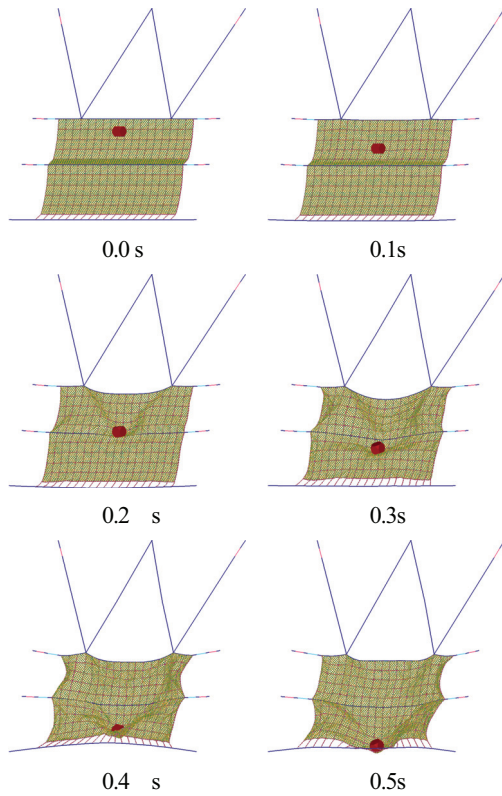


図-8 No.5の解析映像 (たるみ有り)

(1) ワイヤロープの軸力

図-9 および図-10は、それぞれNo.2 および No.5 におけるワイヤロープの軸力を示している。図中の測点名 A, FG および HI は図-3 に示されている。

まず、No.2について、測点Aにおける最大値は、たるみ無しの解析値が実験値の1.3倍であり、たるみ有りでは1.8倍である。波形はたるみ有りの方が実験と類似している。測点FGにおける最大値は、たるみ無しの解析値が実験値の1.5倍であり、たるみ有りでは1.6倍である。波形はたるみ有りの方が実験と類似している。また、測点HIにおける最大値は、たるみ無しの解析値が実験値の0.6倍であり、たるみ有りでは0.8倍である。波形は両者とも類似しているが、たるみ有りの方がより実験と類似している。

次に、No.5について、測点Aにおける最大値は、たるみ無しの解析値が実験値の1.4倍であり、たるみ有りでは1.3倍となる。波形はたるみ有りの方が実験と類似している。測点FGにおいては実験も解析も緩衝装置が設定通りの滑り張力56~60kN (R型は28kN×2本, U型は30kN×2本)で滑っている。また、たるみ無しの解析は、実験に比べて早い段階から軸力が大きくなり緩衝装置が滑り出している。測点HIでは緩衝装置の想定値である56~60kNに対して実験では平均張力30kN程度で滑った(これは実験後の計測でR型の滑り長が極端に大きかったことから設置上の問題の可能性がある)。一方、解析では設定通りの56~60kNで滑っているため、実験値とは異なる結果となった。

図-9および図-10から、たるみ有りのモデルが実験値

に近い波形および軸力を示すと言える。

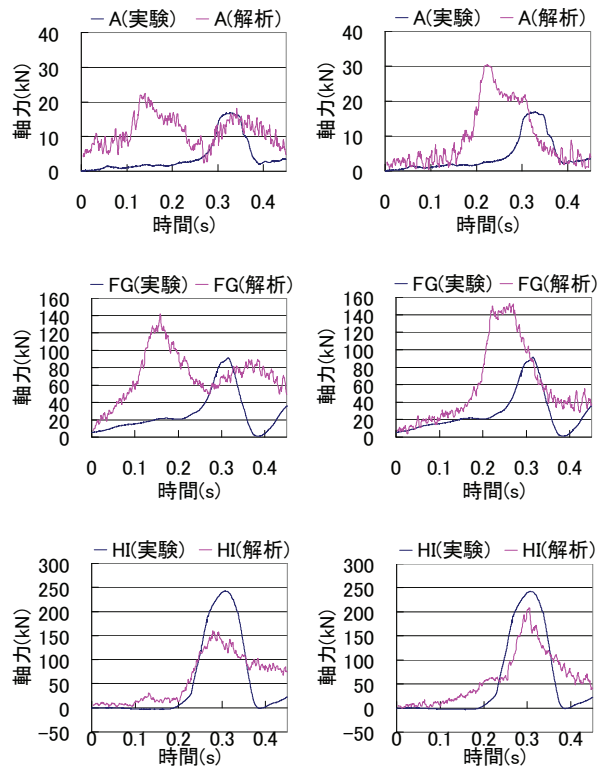


図-9 No.2のワイヤロープの軸力

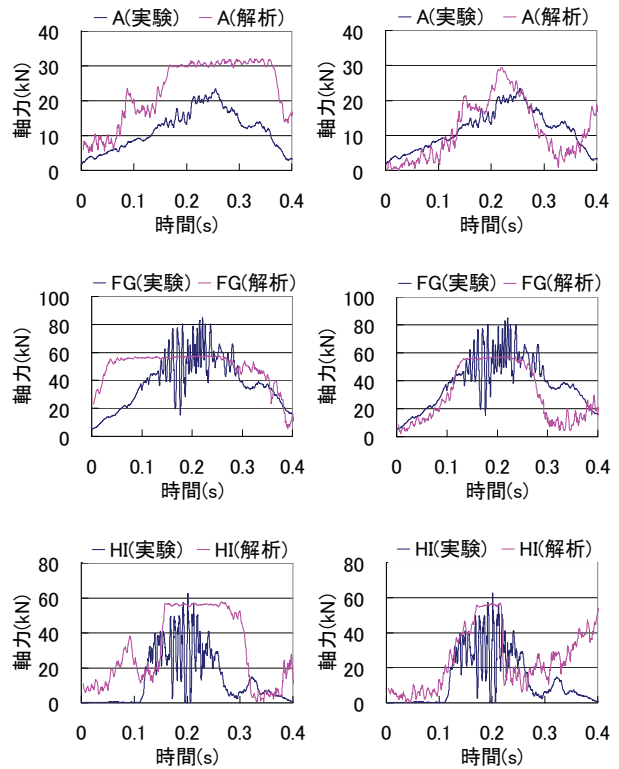


図-10 No.5のワイヤロープの軸力

(2) 緩衝装置のエネルギー吸収量

表-3は、No.2 および No.5 における緩衝装置のエネルギー吸収量を示している。また、エネルギー吸収量は、緩衝装置の設定滑り張力×滑り長により求めており、滑り長は、実験後の計測値および解析終了時の残留伸び量を用いた。

まず、No.2について、吊ロープのU型は、実験では滑っていないが、解析のたるみ無しは0.7kJで、たるみ有りは2.0kJのエネルギーを吸収しているが、少量でありほぼ実験値と同等である。次に、No.5について、吊ロープのU型は、実験では35.4kJのエネルギーを吸収しており、解析のたるみ無しは81.4kJで、たるみ有りは2.9kJのエネルギーを吸収している。そして、横主ロープのR型は、実験では79.4kJのエネルギーを吸収しており、解析のたるみ無しは99.3kJで、たるみ有りは45.8kJのエネルギーを吸収している。また、横主ロープのU型は、実験では52.5kJのエネルギーを吸収しており、解析のたるみ無しは0.8kJで、たるみ有りは0.9kJのエネルギーを吸収している。緩衝装置による合計のエネルギー吸収量は、実験で167.3kJであるのに対して、解析のたるみ無しは181.5kJであり、たるみ有りは49.6kJで実験値の3分の1程度である。

図-10の測点HIのように実験では横主ロープのR型緩衝装置が設定値より小さい値で滑っている可能性もあり、その場合のエネルギー吸収量は小さくなることから、僅か9%の差ではあるが実験値より大きな結果となっているたるみ無しの解析の方がよいとは言えない。

そして、吊ロープのU型緩衝装置の吸収は、たるみ有りの解析ではほとんどないが、No.5のたるみ無しの解析では大きくなっている。また、No.5の横主ロープU型緩衝装置は、実験では52.5kJのエネルギーを吸収しているが、解析ではほとんど吸収していない。これは、横主ロープには緩衝装置としてR型（滑り張力56kN）とU型（同60kN）を直列に取り付けているが、実験のような滑り張力の変動を解析では表現できないため、R型が56kNで先に滑り始め、U型の張力が60kNに到達していないためである。

(3) エネルギー収支

図-11は、それぞれNo.2 および No.5 におけるエネルギー収支を示している。図の全エネルギーとは、重錘の

運動エネルギー、防護網全体の運動エネルギー、緩衝装置も含めた部材のひずみエネルギー、減衰エネルギー、接触エネルギーの合計であり、時間とともに落下する重錘の位置エネルギーの分が全エネルギーの増加になる。減衰エネルギーは質量比例型減衰によるものであり、接触エネルギーは解析上での未検出の貫入によりわずかに負になる場合がある。なお、重錘の運動エネルギー（実験値）は高速度カメラ（300fps）による速度から評価している。

まず、No.2について、実験では0.25~0.3秒において重錘の運動エネルギーが大きく減少しているが、解析ではたるみ無し・有りに関わらず小さな減少である。次に、No.5について、たるみ無しの解析では、重錘の運動エネルギーが防護網との衝突で大きく減少しており、実験とは異なっているが、たるみ有りの解析では、実験と類似している。

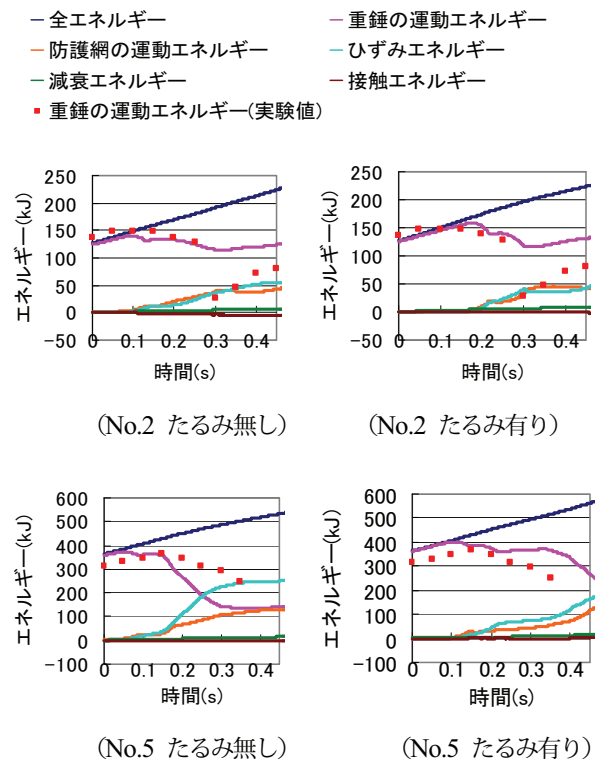


図-11 エネルギー収支

表-3 緩衝装置のエネルギー吸収量

実験No. および 解析の種類	U型緩衝装置 (吊ロープ)			R型緩衝装置 (横主ロープ)			U型緩衝装置 (横主ロープ)			吸収量 合計 (kJ)	
	滑り長 (mm)	張力 (kN)	吸収量 (kJ)	滑り長 (mm)	張力 (kN)	吸収量 (kJ)	滑り長 (mm)	張力 (kN)	吸収量 (kJ)		
実験値	No.2	0	30.0	0.0	—	—	—	—	—	0.0	
	No.5	1180	30.0	35.4	2837	28.0	79.4	1750	30.0	52.5	167.3
解析値	たるみ 無し	No.2	23	30.0	0.7	—	—	—	—	—	0.7
		No.5	2713	30.0	81.4	1774	56.0	99.3	13	60.0	0.8
	たるみ 有り	No.2	68	30.0	2.0	—	—	—	—	—	2.0
		No.5	96	30.0	2.9	818	56.0	45.8	15	60.0	0.9

3. まとめ

本研究では、ポケット式落石防護網の重錘衝突実験の結果とLS-DYNAによる解析結果を比較し、モデル化の妥当性を検討した結果、以下のことがわかった。

- (1) ワイヤロープの軸力は、防護網のたるみ無しの解析よりもたるみ有りの解析の方が実験に近い結果となった。特に、No.5については実験結果とほぼ一致する結果を得た。
- (2) 緩衝装置のエネルギー吸収量について、No.2の実験値は0kJで、解析値もかなり少ない吸収量となり、ほぼ実験と一致した。一方、No.5の吸収量については、たるみ無しの解析では実験値より大きくなり、たるみ有りの解析では実験値より小さくなった。なお、実験では緩衝装置が設定滑り張力より小さい値で滑っていることも確認されており、エネルギー吸収量の実験値はもう少し小さい結果となることが考えられる。
- (3) 重錘の運動エネルギーについて、No.2では実験値と解析値ではやや異なる結果となった。しかし、No.5ではたるみ無しの解析ではやや異なる結果となったが、たるみ有りの解析ではほぼ一致する結果となった。

(4) たるみ有りの解析の方が、全体的に実験結果と一致しており、防護網のモデルをより実物に近づけることで、解析の妥当性を確認することができた。

参考文献

- 1) 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, 2008.12.
- 2) 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, 土木学会 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1088-1100, 2010.4.
- 3) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6.
- 4) 河上 康太, 田島 与典, 前川 幸次: ポケット式落石防護網の落錘衝突シミュレーションに関する研究, 土木学会第64回年次学術講演会, I-568, 2009.9.
- 5) Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL Ver. 970, 2003.
- 6) Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL): Guideline for the approval of rockfall protection kits, pp.30, 2001.