

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

An analytical study of a pocket-type rockfall protection net

前川 幸次*, 河上 康太**, 田島 与典***, 岩崎 征夫****

Koji Maegawa, Kota Kawakami, Tomonori Tajima, Masao Iwasaki

* 工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

** 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 (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)

**** (株)ライテック福岡事務所所長 (〒812-0039 福岡県福岡市博多区祇園町 1-28)

We conducted the full-scale tests on a pocket-type rock net which consisted of wire-meshes, wire-ropes accompanied by energy absorbers and a balanced support-rope owing to pulleys. Furthermore we have presented the paper about test results. Those tests have shown that energy absorbers and a balanced support-rope are effective in improving the performance of a pocket-type rock net. It is necessary to investigate the behavior of a practical pocket-type rock net, since we have unfortunately simplified the rockfall trajectory against the rock net due to the test conditions. In this paper we make and confirm the model of a pocket-type rock net for LS-DYNA in order to simulate the tests. And then the extended analysis is carried out to investigate the behavior of a practical pocket-type rock net.

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, 安全性の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するワイヤロープの把持具) 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する) と緩衝装置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-1 に示すように, 重錘の鉛直落下に対して衝突面が 20 度となるよう金網設置面を水平に対して 70 度で傾斜させた. 一方, 落石対策便覧³⁾では, 落石の飛び出し方向を水平とし, 金網に対して垂直に衝突するものとしており, 実験での衝突方向とは一致しない. そこで, 実構造物における落石の飛び出し方向を水平とした場合や衝突位置等による影響を, LS-DYNA を用いて解析的に検討することにした.

本研究では, まず, 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. 次に, その知見を落石対策便覧に準じて設計された実構造のポケット式落

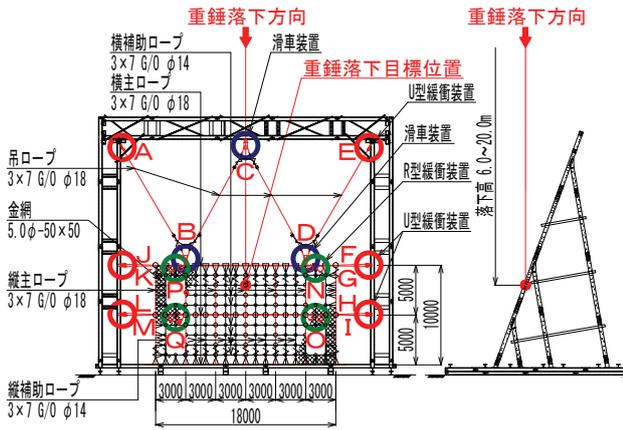


図-1 供試体の形状寸法

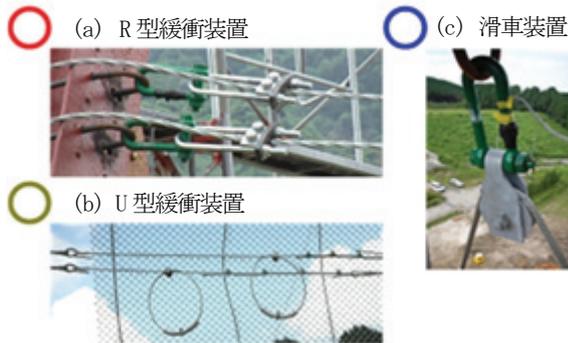


図-2 滑車装置と緩衝装置

石防護網の解析モデルに適用し、種々の落石衝突条件によるポケット式落石防護網の挙動を検討する⁴⁾。

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実物大重錘衝突実験

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実験について概説する。図-1 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-2 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。図-1 中の○印の色は図-2 の緩衝装置の種類および滑車装置ごとに付けた色付き○印に対応している。

滑車装置は、図-1 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。

緩衝装置は図-3 のように金属ブロック 2 個で構成される緩衝金具の間にロープを通し、ボルト緊結によりロープを把持するものである。U 型緩衝装置は U ボルト

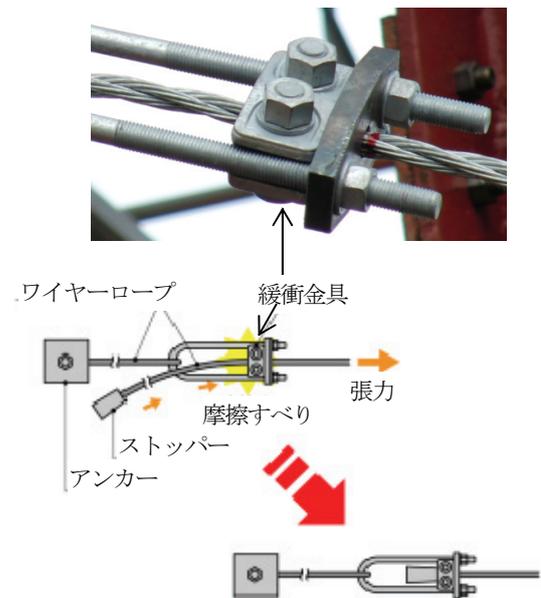


図-3(a) U型緩衝装置写真と作動イメージ

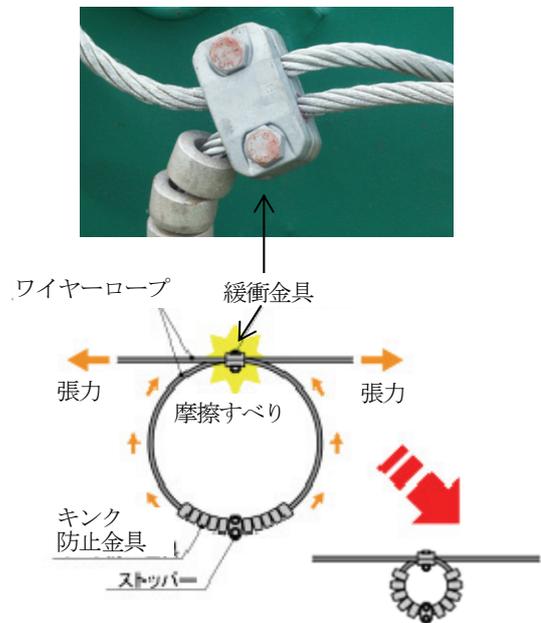


図-3(b) R型緩衝装置の写真と作動イメージ

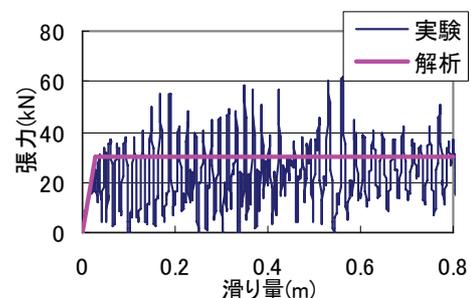


図-4 緩衝装置の張力-滑り量関係(R型)

を介して定着する装置で、R 型緩衝装置はロープをループ状に把持して用いる。緩衝装置のロープに重錘を衝突させて行った室内試験において、ロープ張力は図-4 の

ように激しく変動しながら滑りを生じることがわかっている。設計に用いる平均滑り張力は、室内試験において計測された重錘の位置エネルギー（緩衝装置の吸収エネルギー）とロープの滑り長から算出している。緩衝金具とロープの間に滑りが生じると、ロープだけでなくそれを挟んでいる緩衝金具の表面が損傷するため、滑り張力が徐々に低下することが懸念される。多くの室内試験結果と安全側の観点から、設計では限界滑り長を 1m 程度とし、特に R 型はキンク防止金具部を除く実質滑り長さを 1m のループにしている。なお、緩衝装置についての議論は本研究の目的ではないので、その詳細な室内試験データについては文献 2) を参照されたい。

横主ロープの緩衝装置は、その性能確認実験で得た平均滑り張力と限界滑り長により設計を行い、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 型を直列に併用した。この直列の場合であっても、ロープ張力は激しく変動しながら滑ることから平均滑り張力の小さい R 型 (28kN) が U 型 (30kN) より先に滑りきるわけではない。

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。

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	なし	1.7	6.0	100.0
No.2			1.7	8.0	133.3
No.3	高エネルギー吸収型	R 型	2.5	7.0	171.5
No.4			2.5	10.0	245.0
No.5			R 型	2.5	15.0
No.6		U 型	2.5	20.0	490.0

2.2 実験の解析モデル

図-5 および図-6 は解析モデルの概要を示している。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にたるみを考慮しない平らな防護網のモデル (図

図-6 左) 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-6 右) も作成した。以下、要素名等については LS-DYNA⁵⁾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。

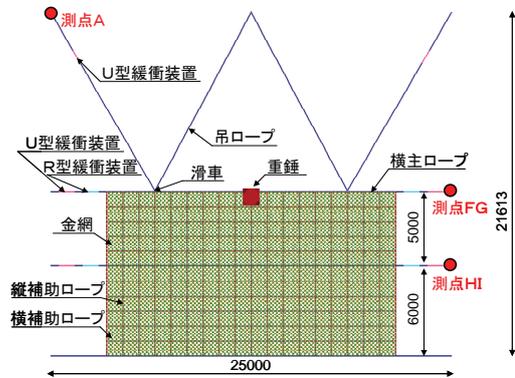


図-5 解析モデル (正面図)

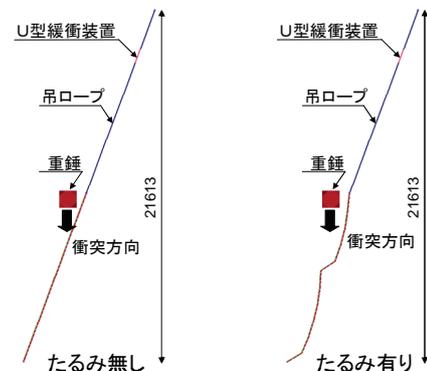


図-6 解析モデル (側面図)



図-7 SAEFL⁶⁾ 型の重錘

(1) 重錘

図-7 は実験に用いた重錘の写真であり、SAEFL⁶⁾が落石防護柵の認証試験において定義している形状で、それを RIGID 要素でモデル化した。

(2) 横主ロープ、縦・横補助ロープ、吊ロープ

ロープは圧縮力、曲げモーメントに抵抗しない CABLE 要素としたが、CABLE 要素には破壊ひずみを考慮でき

表-2 重錘衝突実験の解析モデルに用いた材料特性

部材名	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-18 φ	129	100	118	157	0.04
縦, 横補助ロープ	3×7G/O-14 φ	78	100	73.6	98.1	0.04
金網	5.0 φ × 50 × 50	19.63	200	4.71	7.85	0.3

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 要素を挿入した。TRUSS 要素は、曲げモーメントに抵抗するが、TRUSS 要素の両端に CABLE 要素が結合されることで TRUSS 要素の節点では、曲げモーメントが発生しない。また、ポケット式落石防護網の上段と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た。

(3) 金網

CABLE 要素でモデル化し、ワイヤロープと同様に TRUSS 要素を挟んでいる。要素数を減らすために網目寸法を実際の目合い 100mm に対して 282.8 mm とし、等価な軸剛性（断面積を 2.83 倍）とした。こうすることにより、金網の質量と単位荷重当りのひずみを一致させた。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 型緩衝装置および U 型緩衝装置²⁾

緩衝装置の滑り張力室内試験では、図-4 のように張力が激しく変動し、R 型緩衝装置の平均滑り張力は 28 kN である。簡単のため、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。同様に U 型緩衝装置では平均滑り張力 30 kN（横主ロープ2本分を1本で表現するため 60 kN）を用いた。

(5) 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）を連結して置き換えている。解析モデルでは、吊ロープを SEATBELT 要素で作成した。SEATBELT 要素は、SLIPRING 節点を用いることで、角度が急であっても、SLIPRING 節点内の SEATBELT 要素の連続移動が可能である。SLIPRING 節点と接する2つの SEATBELT 要素は、SLIPRING 節点内を自由にスリップできる。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

解析画像の一例として、図-8 は実験 No.5 の条件による「たるみ有り」の解析を 0.1 秒間隔で示している。

(1) ワイヤロープの軸力

図-9 および図-10 は、それぞれ実験 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-5 に示されている。測点 FG および測点 HI の実験値はそれぞれ図-1 の測点 F と G の和および測点 H と I の和としている。

まず、No.2 について、吊ロープ左端の測点 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。横主ロープ1段目右端の測点 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。測点 A と測点 FG のたるみ無しでは金網に衝突した時点と横主ロープ2段目の2箇所でピークが発生するが、たるみ有りでは金網と横主ロープ2段目にはほぼ同時に当るのでピークが1箇所となる。また、横主ロープ2段目右端の測点 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。

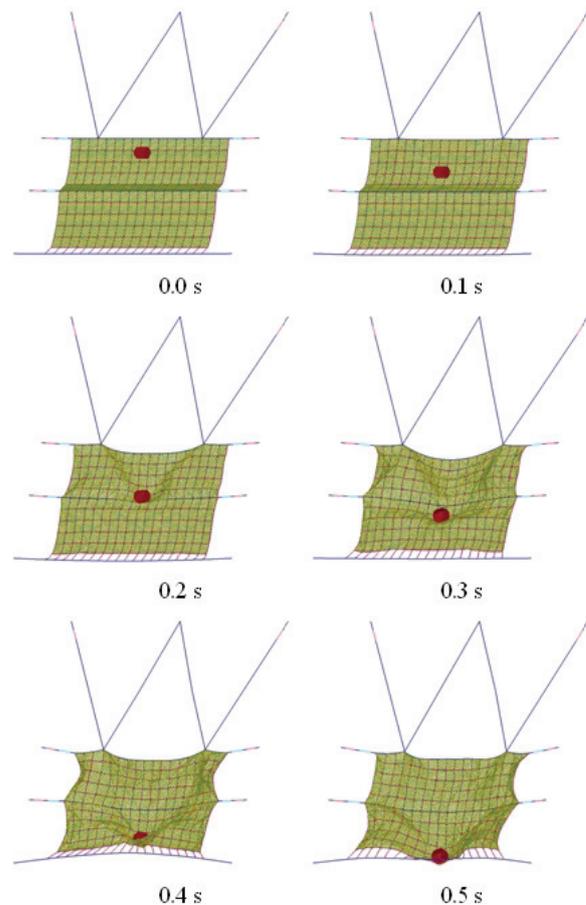
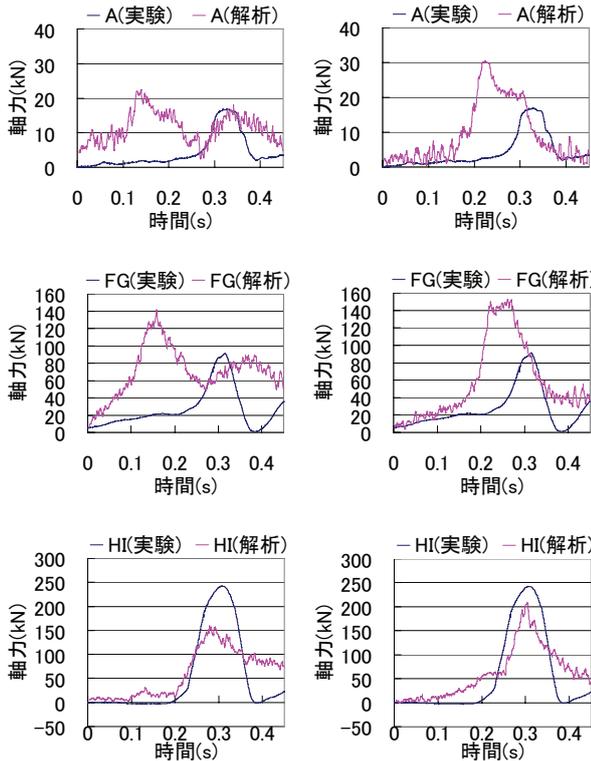


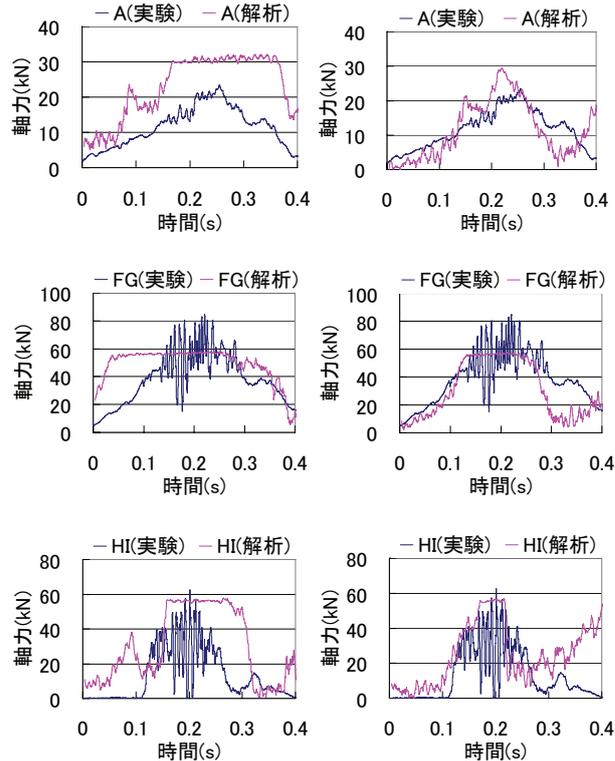
図-8 No.5の解析映像（たるみ有り）

次に、No.5 について、吊ロープ左端の測点 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。横主ロープ1段目右端の測点 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 56~60 kN（R 型は 28 kN×2 本、U 型は 30 kN×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。横主ロープ2段目右端の測点 HI では緩衝装置の設定値である 56~60 kN に対して実験では平均張力 30 kN 程度で滑ってしまった（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



(たるみ無し) (たるみ有り)

図-9 No.2のワイヤロープの軸力



(たるみ無し) (たるみ有り)

図-10 No.5のワイヤロープの軸力

可能性がある)。一方、解析では設定通りの56~60 kN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。

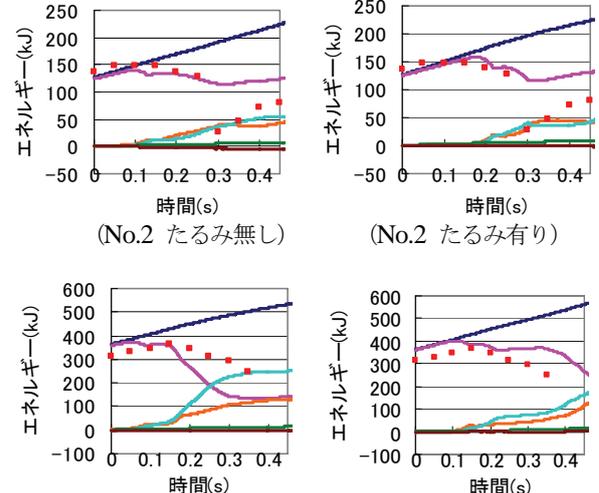
(2) エネルギー収支

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。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っている。減衰エネルギーは質量比例型減衰による損失エネルギーであり、今回の解析では質量比例型減衰を5%としている。接触エネルギーは、接触時の仕事で摩擦エネルギーを含み、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。また、接触エネルギーは本来生じないものであり、このエネルギーが全エネルギーに対して10%程度以下で、変形などでめり込みなどが発生していなければ接触がうまくいっていると判断される⁵⁾。なお、重錘の運動エネルギー(実験値)は高速度カメラ(300 fps)により算出した速度から求めている。

(3) 緩衝装置のエネルギー吸収量

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

- 全エネルギー
- 防護網の運動エネルギー
- 減衰エネルギー
- 重錘の運動エネルギー(実験値)
- 重錘の運動エネルギー
- ひずみエネルギー
- 接触エネルギー



(No.2 たるみ無し) (No.2 たるみ有り) (No.5 たるみ無し) (No.5 たるみ有り)

図-11 エネルギー収支

残留伸び量を各装置ごとに合計している。なお、解析では横主ロープを1本でモデル化したため張力は2倍になっている。

No.2について、吊ロープのU型緩衝装置は、実験では滑っていないが、解析のたるみ無しは0.7 kJ、たるみ有り

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	張力	吸収量	滑り長	張力	吸収量	滑り長	張力	吸収量		
		(mm)	(kN)	(kJ)	(mm)	(kN)	(kJ)	(mm)	(kN)	(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	181.5
	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	49.6

は2.0 kJ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と言える。次に、No.5について、吊ロープのU型緩衝装置は、実験では35.4 kJのエネルギーを吸収しており、解析のたるみ無しは81.4 kJ、たるみ有りは2.9 kJのエネルギーを吸収している。そして、横主ロープのR型緩衝装置は、実験では79.4 kJのエネルギーを吸収しており、解析のたるみ無しは99.3 kJ、たるみ有りは45.8 kJのエネルギーを吸収している。また、横主ロープのU型緩衝装置は、実験では52.5 kJのエネルギーを吸収しており、解析のたるみ無しは0.8 kJ、たるみ有りは0.9 kJ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167.3 kJであるのに対して、解析のたるみ無しは181.5 kJであり、たるみ有りは49.6 kJで実験値の3分の1程度である。

図-9に示した実験における測点HIの横主ロープのR型緩衝装置は設定値より小さい張力で滑っており、設定滑り張力で算定したエネルギー吸収量は過大評価になっている。したがって、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合っているとは言えない。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52.5 kJ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56 kN）とU型（同60 kN）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56 kNで先に滑り始め、U型の張力が60 kNに到達していないためである。

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の重錘の運動エネルギーは、たるみ無しの解析は実験とは異なっているが、たるみ有りの解析は実験と類似している。一方、たるみ無しの場合にはひずみエネルギーや防護網の運動エネルギーとして消費されている。

3. ポケット式落石防護網（実構造）の解析

3.1 ポケット式落石防護網の諸元

2.3における解析モデルの設定方法については、実験と同じ初期状態を計測していないことから、たるみによる影響を正確に評価することはできないが、たるみによる影響が大きいことがわかった。本章では実物のポケット式落石防護網の挙動について解析による検討を行う。

図-12は、落石エネルギー450 kJに対して落石対策便覧³⁾に準じて設計されたポケット式落石防護網の形状寸法ならびに基本構造の例を示している。ポケット式落石防護網の形状寸法は、ネット高15 m、ネット幅36 m、支柱間隔12 mとした。上部の吊ロープは、各折れ点部に配置された滑車装置を通る1本のワイヤロープである。

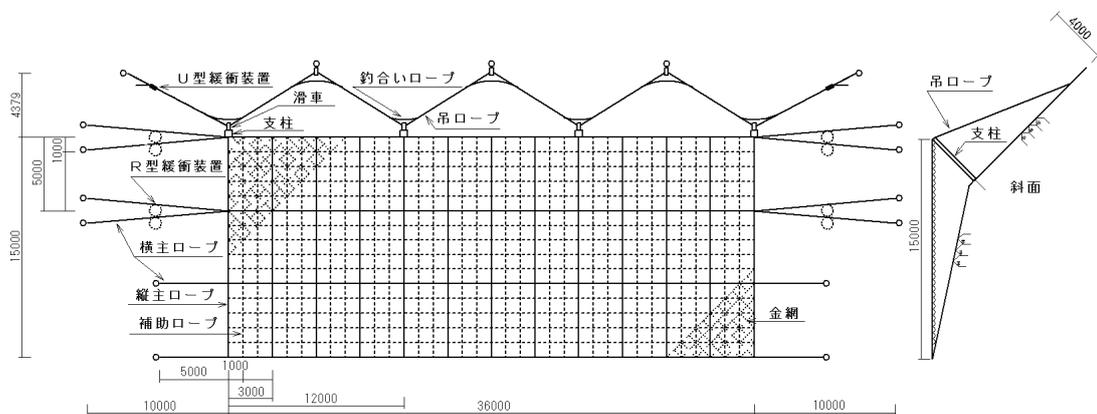


図-12 ポケット式落石防護網（実構造）の形状寸法

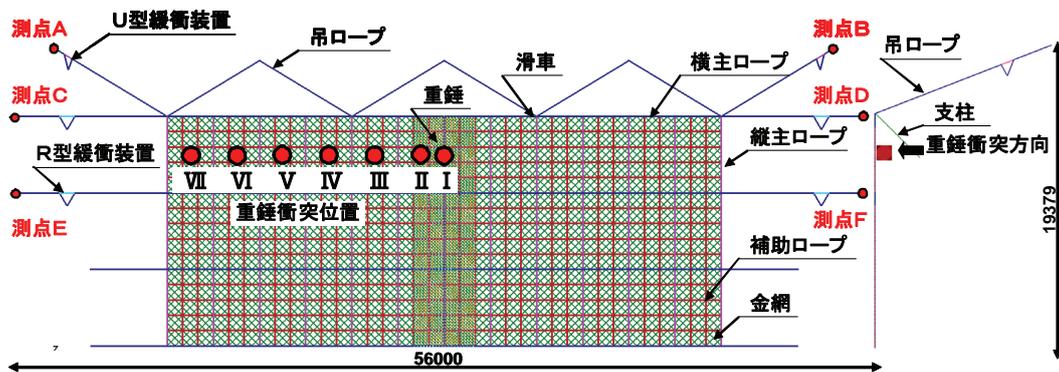


図-13 実構造解析モデル

横主ロープは、1段につき2本のワイヤロープを張設しており、R型緩衝装置を横主ロープ1本につき左右対称の位置に2箇所ずつ、全体で8箇所に設置した。また、吊ロープの両端にはU型緩衝装置を設置した。



図-14 緩衝装置のストッパーのモデル

3.2 ポケット式落石防護網(実構造)の解析モデル

図-13は実構造解析モデルの概要を示しており、解析において仮定した各部材の材料特性を表-4に示す。また、現行の設計法³⁾では、落石を防護網の中央に衝突させて、エネルギーロスを考慮したエネルギー論により設計されているが、今回の解析では衝突位置の変化による影響を調べた。

(1) 重錘

重錘は、2.2(1)と同様な SAEFL 型⁶⁾の形状を RIGID 要素でモデル化し、質量を 2 ton とした。

(2) 横主ロープ、縦主ロープ、補助ロープ、吊りロープ

2.2(2)と同様に CABLE 要素と TRUSS 要素でモデル化し、2本ずつある上段と中段の横主ロープはそれぞれ1本で表し、断面積を2倍とした。

(3) 金網

2.2(3)と同様に、解析時間を短縮するために、重錘が衝突・接触する部分は網目寸法(目合い)を 282.8 mm とし、それ以外の部分は質量効果を考慮できれば十分であるので網目寸法(目合い)を 1414.2 mm とし、それぞれ等価な軸剛性(断面積2.82倍、14.1倍)を有する CABLE 要素と TRUSS 要素でモデル化した。

(4) R型緩衝装置

平均滑り張力は 28 kN であり、2.2(4)と同様に、平均滑り張力が 56 kN (横主ロープ2本を1本でモデル化している)になるようにモデル化した。緩衝装置1個の限界滑り長は 1 m 程度とされているため、図-14のように

滑り長 1 m で働く長さ 1 m のストッパーを挿入した。

(5) U型緩衝装置

実物実験では平均滑り張力 30 kN の U 型緩衝装置を用いたが、実構造では平均滑り張力 22 kN のものを使用し、R 型緩衝装置と同様に平均滑り張力が 22 kN になるようにモデル化した。また、滑り長 1 m で働くストッパーを挿入した。

(6) 吊ロープと滑車装置

2.3(5)と同様に、SEATBELT 要素と SLIPRING 節点でモデル化した。

(7) 支柱

支柱は、基礎をヒンジ構造としており、支柱によるエネルギー吸収を見込まないことから、BEAM 要素で作成した。そして、断面は、断面二次モーメントと断面積が同等となる中空の正方形で定義した。

3.3 ポケット式落石防護網(実構造)の解析結果

ポケット式落石防護網は落石エネルギー 450 kJ で設計されているので、重錘質量 2 ton、速度 21.21 m/s とし、落石対策便覧³⁾に準じて防護網に垂直に衝突させた。その結果、図-13に示した衝突位置 I、II、III、IV、V では重錘を捕捉できたが、衝突位置 VI、VII では重錘を補足できずに重錘は防護網を突き破った。これは、重錘の衝突位置が防護網の端になるほど、防護網の変形が小さくなり、防護網全体でエネルギーを吸収できないからであ

表-4 ポケット式落石防護網(実構造)の解析モデルに用いた材料特性

部材名	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
縦・横主ロープ、吊ロープ	3×7G/O-16φ	101	100	88.5	118	0.04
補助ロープ	3×7G/O-12φ	59	100	51.5	68.6	0.04
金網	4.0φ×50×50	12.57	200	3.02	5.03	0.3
支柱	SS-400	3965	200	951.6	1586	0.3

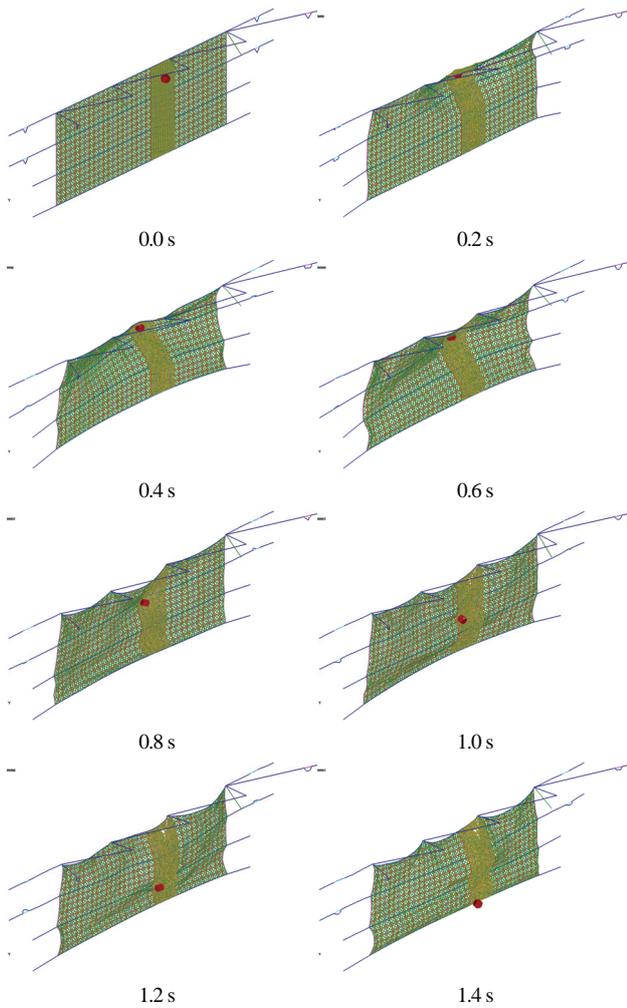


図-15 衝突位置Ⅲの解析画像

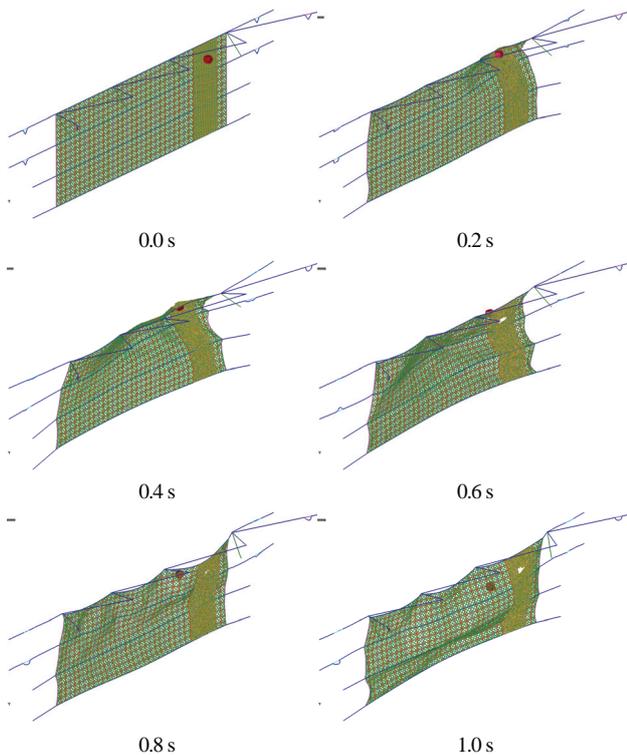
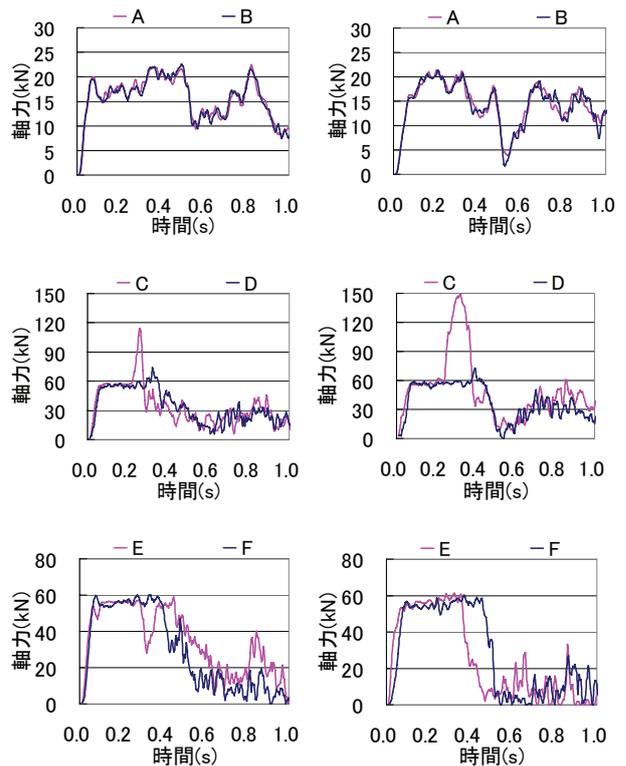


図-16 衝突位置Ⅵの解析画像



(重錘衝突位置Ⅲ) (重錘衝突位置Ⅵ)

図-17 ワイヤロープの軸力

と考えられる。解析結果の画像の一例として、重錘衝突位置ⅢおよびⅥの解析画像をそれぞれ図-15 および図-16 に示す。図-16 では、0.6秒で重錘が防護網を突き破り、谷側に落ちているのがわかる。

(1) ワイヤロープの軸力

重錘を捕捉できた重錘衝突位置Ⅲと重錘を捕捉できなかった重錘衝突位置Ⅵについて比較する。図-17 は、重錘衝突位置ⅢおよびⅥにおいて得られたワイヤロープの軸力を示している(測点位置A~Fは図-13参照)。吊ロープ左端A、右端の測点Bの軸力は、1本の吊ロープが滑車装置を通っているので、重錘衝突位置Ⅲ、Ⅵともにほぼ同じ結果になった。横主ロープ1段目左端の測点Cの軸力は、1段目の横主ロープのR型緩衝装置が最大滑り長1mを滑りきってストッパーが働くため、平均滑り張力の56kNより大きな軸力が作用している。重錘衝突位置Ⅲでは最大110kN程度に対し、重錘衝突位置Ⅵでは最大150kN程度と大きい結果となった。横主ロープ1段目右端の測点Dの軸力についても平均滑り張力の56kNを超え、両者とも最大75kN程度となった。横主ロープ2段目左端、右端の測点E、Fの軸力は、2段目の横主ロープのR型緩衝装置が最大滑り長1m以内であったため、重錘衝突位置Ⅲ、Ⅵともに最大56kN程度である。

(2) 緩衝装置のエネルギー吸収量

表-5 は、重錘衝突位置ⅢおよびⅥの解析における緩衝装置のエネルギー吸収量を示している。吊ロープのU型緩衝装置のエネルギー吸収量は、重錘衝突位置Ⅲ、Ⅵ

表-5 緩衝装置のエネルギー吸収量

衝突位置	測定位置	U型緩衝装置 (吊ロープ)			R型緩衝装置 (横主ロープ1段目)			R型緩衝装置 (横主ロープ2段目)			吸収量 合計 (kJ)
		滑り長	張力	吸収量	滑り長	張力	吸収量	滑り長	張力	吸収量	
		(mm)	(kN)	(kJ)	(mm)	(kN)	(kJ)	(mm)	(kN)	(kJ)	
Ⅲ	左側	63	22.0	3.3	1000	56.0	112.0	390	56.0	45.8	161.0
	右側	86			1000			427			
Ⅵ	左側	3	22.0	0.2	1000	56.0	112.0	737	56.0	68.7	180.9
	右側	5			1000			490			

ともに小さい結果となった。横主ロープ1段目のR型緩衝装置は、重錘衝突位置Ⅲ、Ⅵともに最大滑り長1mを滑りきっている。また、横主ロープ2段目のR型緩衝装置のエネルギー吸収量は、重錘衝突位置Ⅲで45.8kJ、重錘衝突位置Ⅵで68.7kJとなり、両者とも最大滑り長を滑りきっていない。

(3) エネルギー収支

図-18は、重錘衝突位置ⅢおよびⅥの解析におけるエネルギー収支を示している。重錘衝突位置Ⅲ、Ⅵともに、重錘の運動エネルギーの多くは、防護網のひずみエネルギーとなり300kJ程度である。次に防護網の運動エネルギーが100~150kJ程度であり、減衰エネルギーと接触エネルギーは非常に小さい。また、重錘衝突位置Ⅲ、Ⅵともに、0.35s程度で重錘の運動エネルギーは0kJに近づき、その後は重錘が落下することによる位置エネルギー相当分として全エネルギーが増加する。

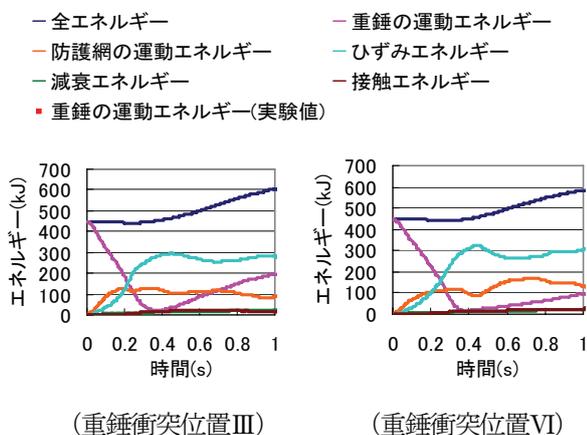


図-18 エネルギー収支

3.4 緩衝装置のストッパー無しの解析

3.3の実構造の解析では横主ロープの1段目に取り付けられたR型緩衝装置は滑り長1mを滑りきってストッパーが作用することから、横主ロープにかかる軸力が大きく出る結果となった。以上の結果を踏まえ、本節ではストッパー無しの場合について検討する。

ストッパー無しの場合、重錘衝突位置Ⅰ~Ⅶの解析すべてで重錘を捕捉することができた。図-19は解析画像の一例であり、ストッパー有りの場合には重錘を捕捉で

きなかった重錘衝突位置Ⅵの解析について示している。

(1) ワイヤロープの軸力 (ストッパー無し)

図-20は、重錘衝突位置ⅢおよびⅥの解析におけるワイヤロープの軸力を示している。

ストッパー有りの解析結果 (図-17) では、測点C、Dにおいて緩衝装置の最大滑り長1mを滑りきり、平均滑り張力56kN以上の軸力が作用していたが、ストッパー無しの解析では当然のことながら最大値は56kN程度である。

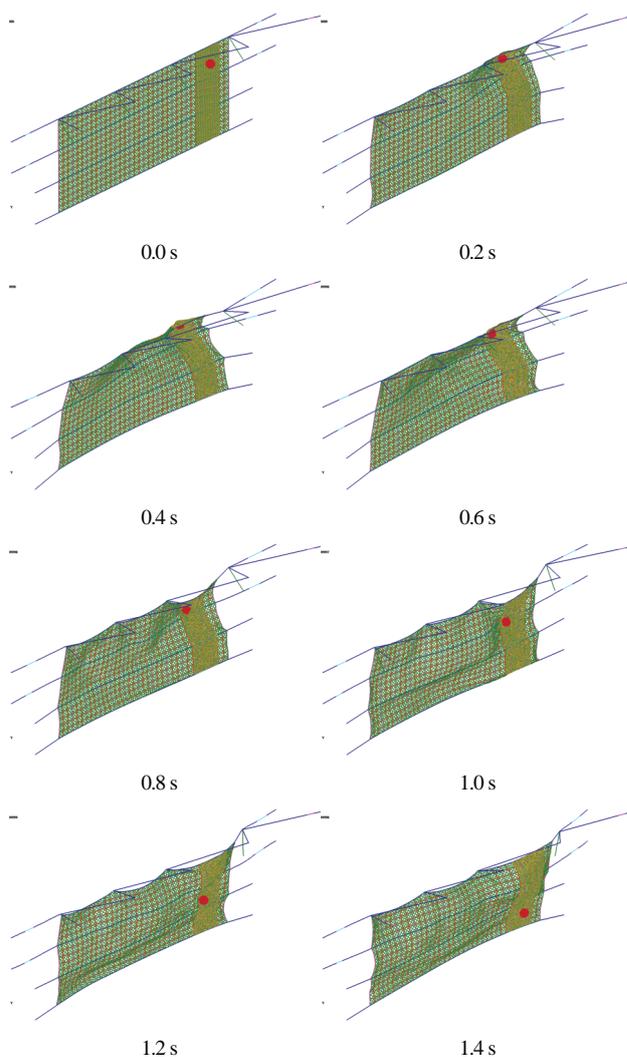
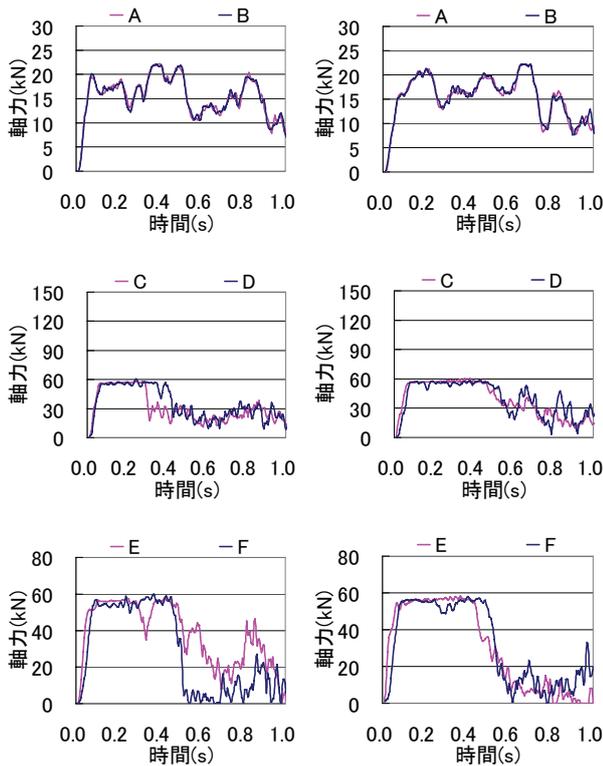


図-19 衝突位置Ⅵの解析画像 (ストッパー無し)



(重錘衝突位置Ⅲ) (重錘衝突位置Ⅵ)
図-20 ワイヤロープの軸力(ストッパー無し)

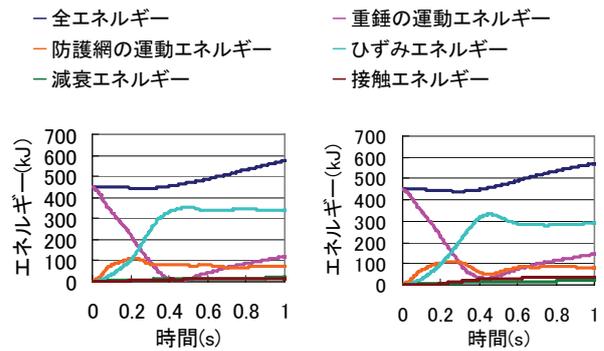
(2) 緩衝装置のエネルギー吸収量 (ストッパー無し)

表-6 は、重錘衝突位置ⅢおよびⅥの解析における各緩衝装置のエネルギー吸収量を示している。

ストッパー有りの解析結果(表-5)では、横主ロープ1段目のR型緩衝装置の滑り長は、最大滑り長の1mであったが、ストッパー無しの場合、重錘衝突位置Ⅲの解析における左側測点で1.259m、重錘衝突位置Ⅵの解析における左側測点で1.976mとなった。また、横主ロープ2段目のR型緩衝装置は、重錘衝突位置Ⅵの解析における左側測点で、ストッパー有りの解析よりも滑り長が長くなった。これは、ストッパー有りの解析においては、緩衝装置が滑っている途中で重錘が防護網を貫通したためである。

(3) エネルギー収支 (ストッパー無し)

図-21 は、重錘衝突位置ⅢおよびⅥの解析におけるエネルギー収支を示している。ストッパー有りの解析(図-17)と比較してその差はわずかであるが、ストッパー



(重錘衝突位置Ⅲ) (重錘衝突位置Ⅵ)
図-21 エネルギー収支(ストッパー無し)

無しにおけるひずみエネルギーは大きくなり、防護網の運動エネルギーが小さくなる傾向が見られる。

4. まとめ

4.1 シミュレーション解析の妥当性について

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²⁾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。
- (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が確認されており、エネルギー吸収量の実験値はもう少し小さい結果に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よりたるみ有りの解析で、実験値に類似する結果となった。
- (4) 実験と同じ初期状態を計測していないことから、たるみによる影響を正確に評価することはできないが、たるみによる影響が大きいことがわかった。また、たるみ無しの解析よりたるみ有りの解析の方が、全体的に実験結果に類似すると言える。

表-6 緩衝装置のエネルギー吸収量 (ストッパー無し)

衝突位置	測定位置	U型緩衝装置 (吊ロープ)			R型緩衝装置 (横主ロープ1段目)			R型緩衝装置 (横主ロープ2段目)			吸収量 合計 (kJ)
		滑り長	張力	吸収量	滑り長	張力	吸収量	滑り長	張力	吸収量	
		(mm)	(kN)	(kJ)	(mm)	(kN)	(kJ)	(mm)	(kN)	(kJ)	
Ⅲ	左側	75	22.0	3.0	1259	56.0	123.6	423	56.0	46.0	172.6
	右側	60			948			399			
Ⅵ	左側	27	22.0	3.7	1976	56.0	154.7	981	56.0	71.2	229.5
	右側	139			786			290			

4.2 ポケット式落石防護網（実構造）の解析について

本研究では、重錘衝突位置の違いと緩衝装置のストッパーの有無による影響について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

(1) ストッパー有りの解析では、重錘衝突位置Ⅰ～Ⅴの解析で重錘を捕捉でき、重錘衝突位置ⅥおよびⅦの解析では重錘を捕捉できなかった。一方、ストッパー無しの解析では、すべての重錘衝突位置Ⅰ～Ⅶで重錘を捕捉できた。このことから、LS-DYNAでの解析が必ずしも定量的に正解とは言えないが、緩衝装置の有効性が確認できた。同時に、ポケット式落石防護網の現・設計法³⁾において落石の衝突位置の影響を加味する必要性が明らかになった。

(2) ワイヤロープの軸力について、測点AとBはほぼ類似した結果となり、滑車装置のモデル化をうまく表現できている。また、測点C、Dについては、ストッパー有りの解析では、ストッパーが最大滑り長1mを滑りきり、平均滑り張力の56kNを超えていたが、ストッパーを外すことにより、最大軸力を56kN程度に低減することができた。

(3) 横主ロープ1段目のR型緩衝装置は、ストッパー有りの解析では最大滑り長1mとなり、ストッパー無しで重錘衝突位置ⅢおよびⅥの解析の場合にそれぞれ1.259mおよび1.976mとなった。したがって、緩衝装置の有効な滑り長さは2m程度に改善すべきであるが、緩衝装置の性能を保証できる滑り長さを確保する工夫または

確認試験が必要である。

(4) 吊ロープのU型緩衝装置のエネルギー吸収量は小さい結果となった。

(5) エネルギー収支は、ストッパー有りの解析とストッパー無しの解析で大差はないが、ストッパー無しにおけるひずみエネルギーは大きく、防護網の運動エネルギーが小さくなる。

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, 2010.9.
- 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, 2001.
(2010年9月16日受付)