

平面要素集合体要素を用いた落石防護網シミュレーション

The simulation of a rockfall protection net using DEM applied to planar clump model

小泉香那子*, 堀口俊行**, 高橋利延***, 橋口寛史****

Kanako Koizumi*, Toshiyuki Horiguchi*, Toshinobu Takahashi***, Hiroshi Hashiguchi****

* 防衛大学校理工学研究科 前期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**博(工), 防衛大学校准教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 修(工), 東京製綱株式会社エンジニアリング (〒103-8306 東京都中央区日本橋三丁目 6 番 2 号)

****修(工), 東京製綱株式会社エンジニアリング (〒103-8306 東京都中央区日本橋三丁目 6 番 2 号)

キーワード: 落石防護網, 集合体要素, 平面要素, 個別要素法

Keywords: rock protection net, clump model, planar element, DEM

1. 緒言

我が国では、交通需要の増加と都市開発により、急峻な地形や地質条件を克服して道路交通網を拡大してきた。これにより、生活基盤内において落石の報告が多く発生している¹⁾。最近の事例を挙げれば、島根県で走行中の軽乗用車に直径 1 m の岩が衝突し、犠牲となった。この件は対策すべき道路に瑕疵があるとして、行政に責任賠償があるとされた。このように、落石災害は直接の被害者だけでなく、管理者にも影響を与える。そのため、保有性能を保持した落石対策を早急に整える必要がある。

落石防護網は、落石対策の一つであり、施行の容易性および環境面への配慮から使用されている。これは、ワイヤーロープや金網で構成され、落石の衝突に対して変形を伴って受け止めることができる非常に柔軟な構造となっている。そのため、静的な荷重に対しても大変形解析を要するので、落石対策便覧に採用されているエネルギー照査手法が用いられる²⁾。しかし、変形エネルギーを見込む部位の設定等の妥当性は、十分検証されていないのが現状である。

さらに、平成 29 年度に落石対策便覧²⁾が改訂され、照査は原則として、実規模実験で確認することが定められた。また、実験と多少異なる条件や性能照査のために数値解析を援用することが可能となった。

落石防護網の研究を見ると、西ら³⁾は、重錘質量 1.0 t を高さ 10 m、幅 15 m、支柱間隔 3 m の落石防護網に衝突させた実験を行い、横ロープ端部の取付け金具やアンカーボルト部で破断が生じることを示している。また、ポケット式落石防護網の仕組みについて、張力を測定することで明らかにしている。この場合、適用可能エネル

ギーが 50~150 kJ 程度と非常に小さく、適用範囲が限定される。そこで、エネルギー吸収性能を高めた高エネルギー吸収型のポケット式落石防護網やワイヤリング落石防護柵に関する研究がされている。^{4)~7)}

田島ら⁴⁾は、実物大実験において緩衝装置の効果について確認している。前川ら⁵⁾は、汎用有限要素法解析を使用し、部材のモデルと緩衝装置を工夫し、滑り張力を表現した。落石対策便覧改定後、酒井ら⁶⁾は、線路脇にも設置可能な新たな高エネルギー吸収型落石防護柵を提案し、その性能評価を行った。解析手法の研究を見ると、園田ら^{10), 11)}はワイヤリング防護柵への衝突実験を対象として、粒子法が適用できることを確認し、2000 kJ の落石まで補足できることを示した。

著者ら^{12), 13)}も、実物大落石防護網への衝突実験の再現解析により、個別要素法を適用できることを示している。そこでは、重錘を球形要素でモデル化し、落石防護網の荷重~時間関係を表現できることを示したが、重錘の形状を再現するには不十分であるため、球の回転量や疑似的に凹凸を表現するために、本来の要素間摩擦角よりもやや大きくする必要があった。

そこで本研究は、DEM を用いて供試体の形状を再現するために、平面要素を組み合わせた集合体要素モデルを提案し、実験の再現シミュレーションを検討するものである。さらに、防護網の衝撃応答について実験と比較し、パラメータの影響について考察するものである。

2. 実験の概要

2.1 実験要領

図-1~3 に、本研究の対象となる実験施設等を示す。

高さ 15 m, 幅 21 m の実物大防護網に対し, 所定の高さから重錘を転落させ, 衝突させるものである. 落石防護網は, 1.0 m 間隔で縦横のロープを格子状に組んだものであり, その内側 (山側) の面に線形 50 mm, 目合い 50 mm×50 mm (以後 5.0φ×50×50 と表す) のひし型の金網をはり, コイル状の結合具で固定している. 図-2 に, 実験施設を示す. 勾配 54° の斜路を用いて, 垂直高さ 40 m の位置から転落させた. 表-1 に, 実験条件を示す. なお, 本実験は, 防護網全体の挙動を記録するためにビデオ撮影を行い, ロープ張力を測定するために, 図-3 に示す落石防護網の, ○番号箇所, ロードセルを設置した.

2.2 実験結果

ここでは, 重錘衝突実験における防護網の応答を示す. なお, 連射カメラ画像から求めた重錘の衝突速度は 23.6 m/sec, 運動エネルギー 346 kJ, 衝突角度は水平面に対して 23.7° である.

図-4 に, 各ロープ固定端 (以後, 図-3 中の番号で示す) における発生張力の時刻歴応答を示す. 応答波形は, 吊ロープ (番号①, ②), 最上段ロープ (番号③, ④) の張力が上昇し始める. 続いて, 上段ロープ (番号⑤, ⑥) が上昇し, その後, 吊りロープおよび最上段ロープの張力が最大値に達した後低下すると, 下部にある中段ロープ (番号⑦, ⑧) の張力が上昇する. 中段ロープの張力が低下した後, 最下段ロープ (番号⑨, ⑩) の張力が上昇する. 全ロープの 2 回目のピークはネットと斜面の間を滑るように落下しているため, 2 回目のピークは水平変位が低下した後, すなわち, 防護網が重錘を押し返した後に生じる. 重錘は, 押し返された後, ネットと斜面の間を滑るように落下しているため, 2 回目のピークはネットの自由振動の過程で生じるものである. また, 落石衝突位置から離れた位置にあるロープの方が発生張力は, 低くなると予測されるが, 最下段ロープは下段ロープ (番号⑨, ⑩) よりも大きな張力が発生している. これは, 縦ロープの端部を下段ロープに固定したため, 縦ロープを介して伝達される荷重が最下段ロープにおいて, より顕著に生じたためであると考えられる. なお, 吊ロープおよび最上段横ロープでは, 負の荷重が出ているが, 初期状態での張力を零構成したため, ネットが持ち上がり初期張力が抜けた際に負の張力として計測されたものである. また, 重錘速度のネット正面からみて左右方向の成分はごく小さいものであるが, 図-4 に示すように吊りロープ, 最上段ロープでは, 左右で測定張力に差が生じており, 左右方向の衝突速度成分の影響を受けることがわかる.

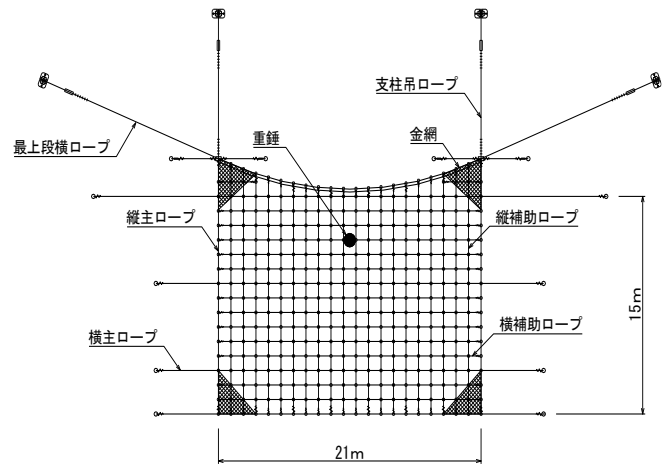


図-1 実験供試体

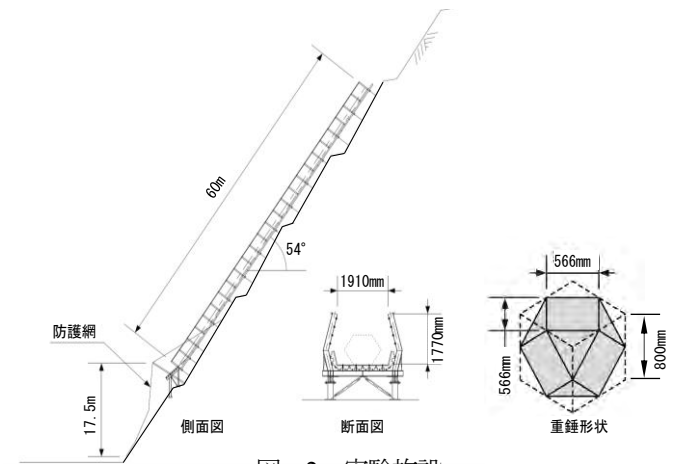


図-2 実験施設

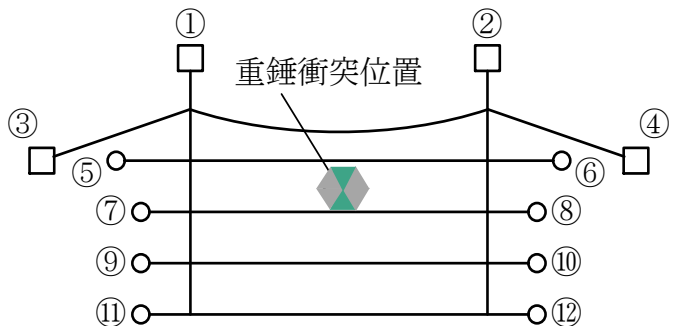


図-3 落石防護網

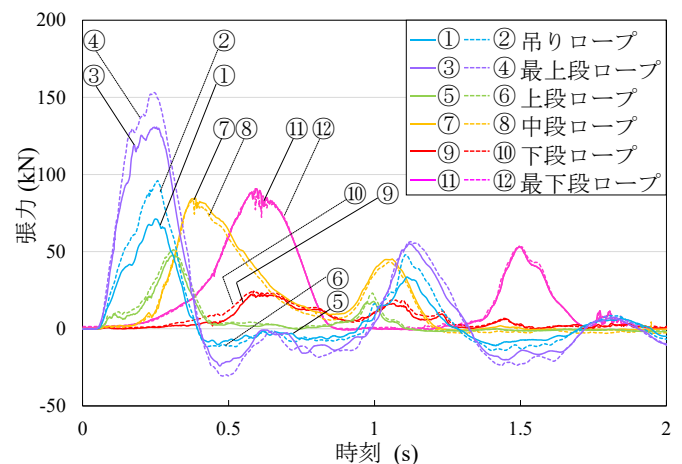


図-4 張力の時刻歴応答

表-1 実験条件

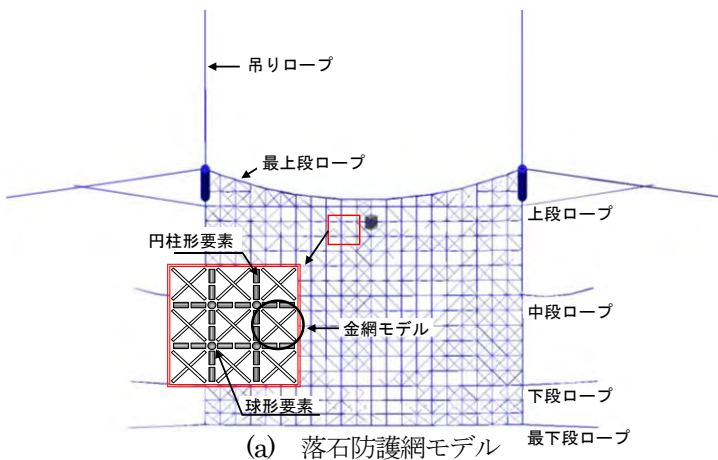
項目	値	
重錘仕様	コンクリートブロック (14面体) 1.0t	
ネット構成部材仕様	支柱吊りロープ	7×7, 24φ
	最上段ロープ	7×7, 24φ
	縦主ロープ	7×7, 18φ
	横主ロープ	7×7, 18φ
	縦補助ロープ	7×7, 14φ
	横補助ロープ	7×7, 14φ
	金網	5.0φ×50×50
設計時のエネルギー予測値 (衝突速度予測値)	378 kJ (27.5 m/s)	

表-2 解析パラメータ

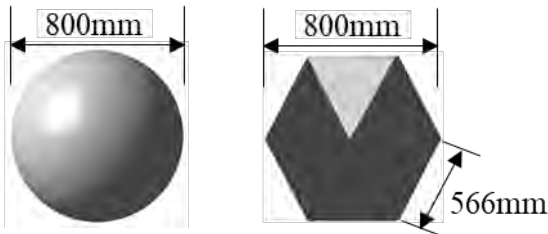
項目			値	
ワイヤーロープ部	7×7 φ24	軸方向ばね	剛性 EA (N)	2.90×10^7
		曲げ方向ばね	剛性 EI (N・m ²)	24.4
	3×7 φ18	軸方向ばね	剛性 EA (N)	1.22×10^7
		曲げ方向ばね	剛性 EI (N・m ²)	2.49
	3×7 φ14	軸方向ばね	剛性 EA (N)	7.92×10^6
		曲げ方向ばね	剛性 EI (N・m ²)	0.912
金網部	軸方向ばね	剛性 EA (N)	1.32×10^4	
	曲げ方向ばね	剛性 EI (N・m ²)	0.0	
接触ばね	法線方向剛性 Kn (N/m ²)		1.00×10^7	
	法線方向剛性 Ks (N/m ²)		3.00×10^7	
	減衰定数		0.2	

表-3 重錘の解析初期値

項目	値		
	提案モデル	球形モデル	
要素	円柱形要素	2196	2172
	球形要素	408	397
	平面要素	20	
要素間ばね	ばね定数	法線方向 Kn (N/m)	1.0×10^7
		接線方向 Ks (N/m)	3.0×10^6
	粘着力 C (N)		0
	摩擦係数 $\tan\phi$		0.5779
時間条件	時間刻み Δt (s)		3.0×10^{-7}
重錘	質量 (kg)		1000
	比重 (kg/m ³)		2.6×10^7
	初速度 並進 (m/s)		23.0
	回転 (rad/s)		31.4



(a) 落石防護網モデル



(b) 球形モデル

(c) 提案モデル

図-5 解析モデル

3. 解析結果

3.1 解析モデル

図-5(a)~(c)に、落石防護網と重錘の解析モデルを示す。ネットの構造は、球形要素と円柱形要素と連結ばねで構成されている^{12),13)}。縦ロープと横ロープの格子点には、球形要素を配置し、格子点間のロープは2つの円柱形要素でモデル化した。また、金網部はロープで囲まれた格子型のせん断変形に対する抵抗力を表現するためにロープの交点を斜め方向に結ぶように円柱形要素を配置した。表-2に、解析パラメータを示す。実験供試体の諸元に基づき、決定した。金網部の軸ばねは、ロープの格子形状のせん断変形を外接円径18mmのロープ(以後3×7,

18φロープと表す。)の約1/1000の軸力剛性とした。また、各ばねの減衰定数(ダッシュポットの減衰力とばねの変形速度の比)および接触ばねの剛性は文献13)を用いた。なお、剛体間の摩擦は、接線方向の接触ばねにより表現している。表-3に、重錘の解析初期値を示す。また、重錘モデルは著者ら^{12),13)}の研究で使用されていた球形モデル(以後、球形モデルと称する。)に加え、球形、円柱形、平面要素を取り入れた平面要素集合体モデルを使用した。平面要素集合体は図-5(c)に示すように、実験で用いた14面体コンクリートブロックを再現し、14面体モデル(以後、提案モデルと称する。)とした。

3.2 再現解析

図-6に、解析と実験における同時刻の全体変形応答を示し、図-6(a)の $t=t_0$ sを重錘衝突前の状態とした。図-6(b) $t=t_0+0.13$ sで、ネットの上部が道路側にはらみ出し、ネット下部には変形が生じていない様子や衝突し

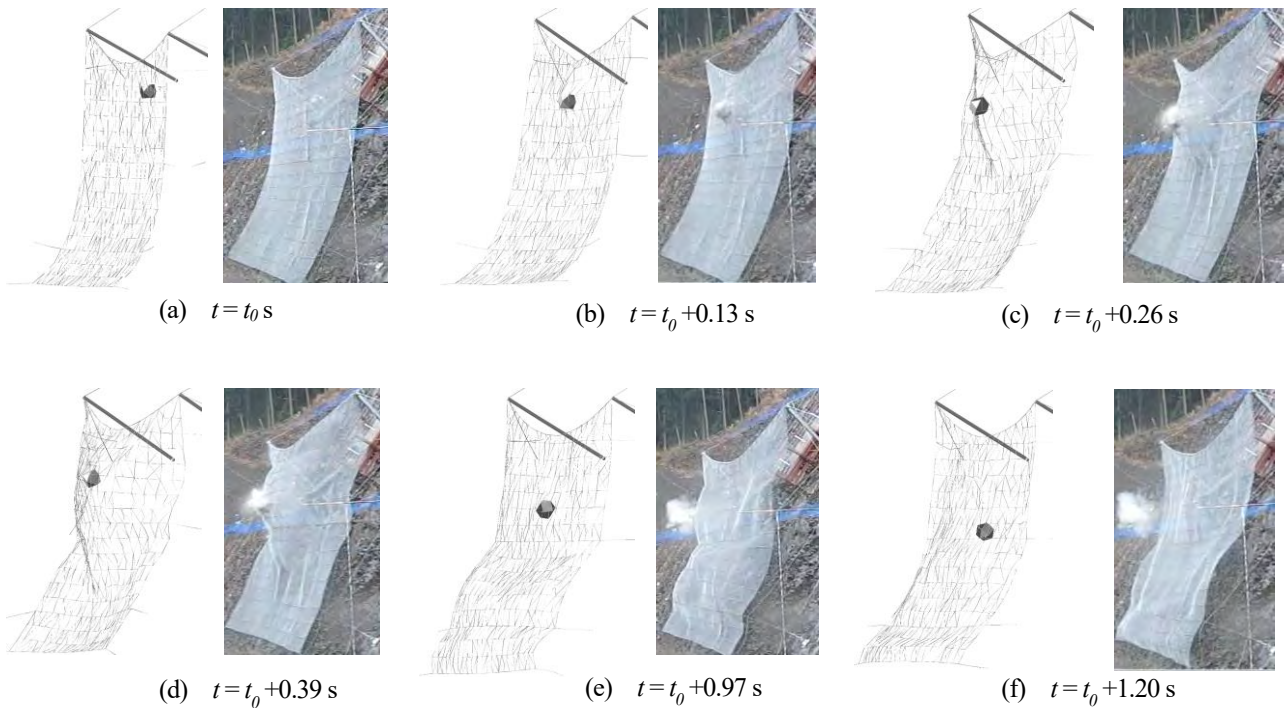


図-6 実験と解析の時刻歴応答

ているネット部分の膨らみにより、最上段ロープが引っ張られながら湾曲している点について、解析と実験とが一致している。局所的にも実験と同様に变形している。図-6(d) $t = t_0 + 0.39$ s は、実験において重錘が衝突していない中段ロープの下部にはらみ出しが生じているが、解析においてもこの挙動を再現できている。さらに、はらみ出ししている部分の拡がりもわかる。さらに、図-6(e), (f) は重錘がネットから押し返される前後の様子であり、波の伝播によりネット下部が盛り上がった状態から、押し返した後はそれが落ち着いていることがわかる。

図-7は、解析と実験における張力～時間関係の比較を示す。なお、解析では形状による影響を明らかにするため、重錘モデルを球形モデルと提案モデルとで比較して示している。解析値は、実験でロードセルを設置している端部と同位置における端部のばね力を張力としており、図-3に示す張力計測位置の②、④、⑥、⑧、⑩、⑫について比較している。図-7(a)の吊りロープでは、波形は球形モデル、提案モデルともに1回目のピークを過ぎ、約1.0 s後に2回のピーク値に達するまでは実験と同様であった。最大荷重を見ると、提案モデルは97.9 kNであり、提案モデルが実験値とよく合っていた。図-7(b)の最上段ロープの最大張力は $t = t_0 + 0.24$ s で提案モデルで9.8%、球形モデルで23.5%違いがあり、最大荷重に達するまでの波形では提案モデルの方が実験波形に近い形であった。図-7(c)の上段ロープで、球形モデルでは実験結果に表れている2つの山が顕著に表れず、提案モデルにおいても、1度目のピークを迎えた後は、変化がなかったが、全般的に張力が小さいことに関して再現できている。

図-7(d)の中段ロープは、1度目のピーク張力を迎える

までの波形は両モデルとも差はないが、提案モデルは最大張力発生後の下降が実験に比べ早く、それに伴い、2回目のピークを0.04 s早く迎えている。波形を俯瞰すると、球形モデルと提案モデルでは下降程度以外の違いは無いように思えるが、解析映像で比較した場合2回目ピークの発生過程に違いがあった。球形モデルでは、2回目ピークは重錘がネットから離れた後に生じており、提案モデルでは、ネットと接触している状態で発生していた。

つまり、球形モデルでは重錘がネットから離れたことによるネット自身による振動で生じているが、提案モデルでは重錘がネットに接触していることによる張力であった。これは、提案モデルの場合、ネットへの引っ掛かりが強く影響し、ネットから抜け出すために時間を要したためと考えられる。実験映像で確認したところ、球形モデルと同様、2回目ピークは重錘がネットから離れた後で発生しているため、提案モデルでは引っ掛かりは再現できているものの、その程度が強く表れたと言える。

図-7(e)の下段ロープは実験とあまり一致していない。これは、中段ロープより下部には、上部で発生した波が伝播して広がるが、その際に下段ロープのネット縁から固定端までの長さは短いため、わずかな固定要領やたるみの加減が張力に大きな影響を及ぼし、本解析モデルでは、モデル化できていないことが原因と考えられる。

図-7(f)の最下段ロープは、最大張力は解析の方が0.1 s早く出ているが、両モデルともその値は実験値と概ね一致している。しかし、その後の波形が実験と異なっており、これは、解析結果の振動伝播が速いこと、そして、ネットと重錘の間の引っ掛かりや回転の影響を合わせら

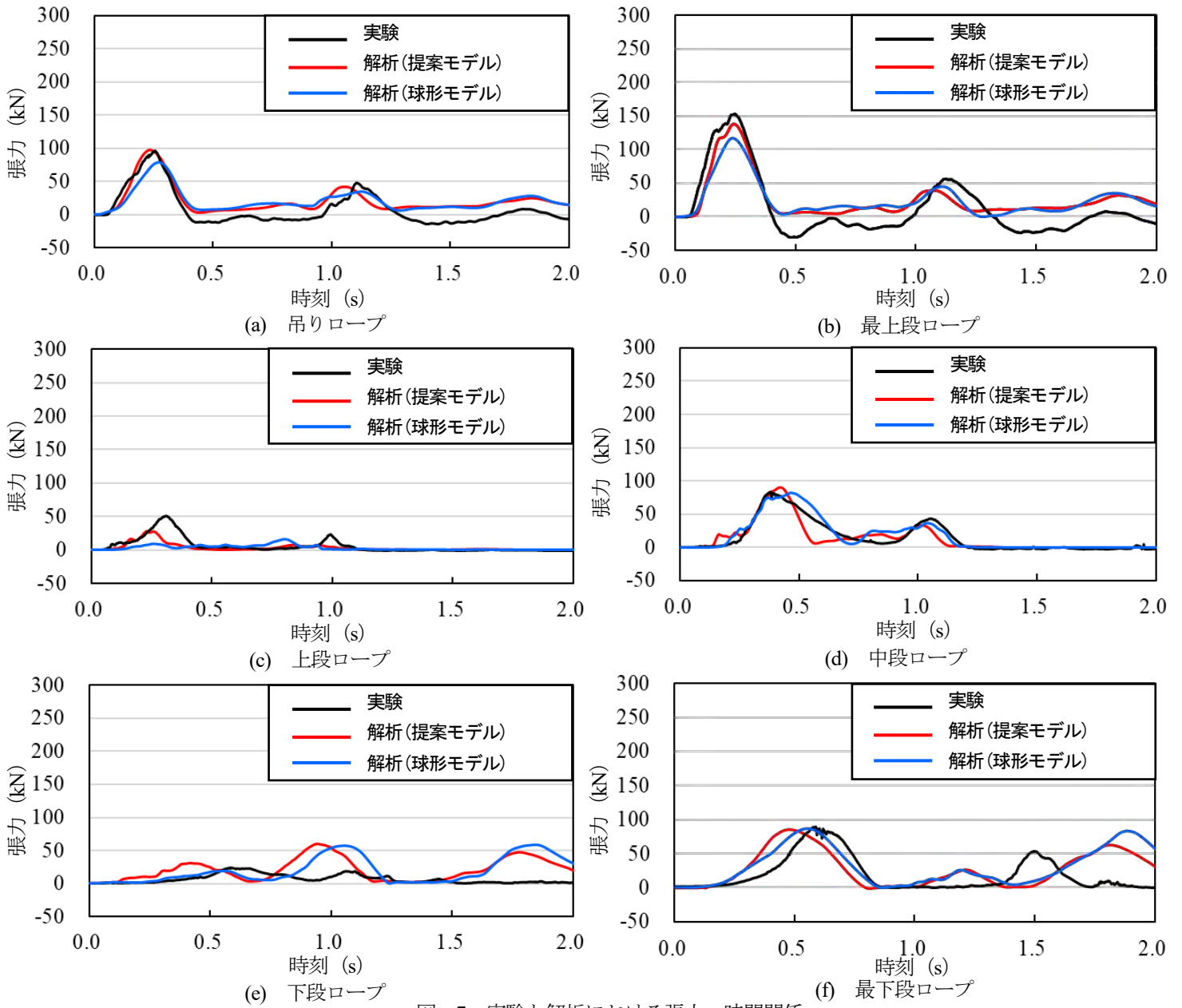


図-7 実験と解析における張力～時間関係

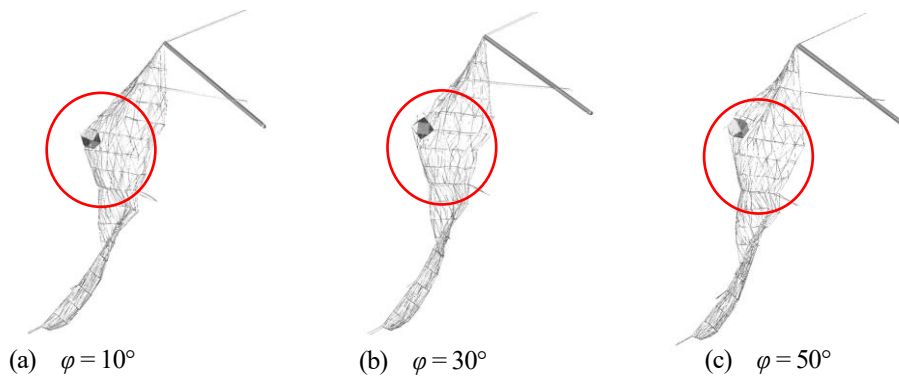


図-8 応答の様子($t=t_0+0.36$ s)

れていないためと考えられる。

総じて、提案モデルでは、形状を再現することで、実験パラメータをそのまま使用することができるため、有

用である。

4. 感度解析

接触時の剛性値 $K_n=1.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^8$ N/m, 摩擦係数 $\phi = 0^\circ \sim 50^\circ$ の範囲と並進方向速度を変えた場合で感度解析を行った結果, 剛性値や摩擦係数の変化は, 最大荷重の差が 10% であった. 図-8 に, 同時刻における摩擦係数を変えた場合の応答の様子を示す. 図-8(a), (b) はおよそ最大変位に達する約 0.1 s 前の様子であるが, 図-8(c) は最大変位に達する約 1.0 s 前の時刻の様子である. 重錘位置を比較すると, 摩擦係数が大きくなるにつれ, 中段ロープから遠くなっている様子が見られる. これは, 摩擦係数が小さい場合は, 衝突直後に滑り, やや下方に滑動するが, 摩擦係数が大きくなると, 衝突と同時に摩擦の影響で滑ることなく, 同じ場所に留まるからであると考えられる.

一方, 並進方向速度を変えた場合は, 重錘が衝突した時点において, 吊りロープや最上段ロープの最大張力に変化が見られ, その程度は, 最も変化のあった場合で約 20% の差があった. よって, 感度解析の結果, ネット側の剛性値や摩擦係数の影響よりも, 重錘側の速度が結果に影響を及ぼすことがわかった.

5. 結論

本研究は, 実規模スケールの落石防護網に対して, 平面要素集合体モデルを用いて, 衝突実験の再現解析を行い荷重～時間関係を再現したものである.

- (1) 高さ 15 m, 幅 21 m の実物大防護網に対する落石衝突実験の変形応答および各ロープ張力を提案手法の集合体要素を適用して, 再現できることを確認した.
- (2) 重錘の衝突によって, 衝突周辺に生じた局所的な変形が, 防護網内に拡がっていくことを示した. つまり, 衝突点での最大変形時点では, 衝突点から離れたロープにとって最大張力に至る増加過程であり, 最大張力が遅れて発生する.
- (3) 集合体要素を用いることで, ネットへの引っ掛かりを再現でき, そのためネットが重錘を巻き込みむことによるワイヤーや金網との接触時間の増加を生じし, 最下段ロープへのエネルギー伝播を遅らせている.
- (4) 感度解析の結果から, ネット側の解析パラメータよりも, 重錘側の初期条件が及ぼす影響の方が大きい.
- (5) 今後は, ネットの限界状態を照査するために, ロープの材料試験の再現解析や, ロープの破断モデルを入れて

照査や金網部分のモデル化について詳細な実験とともに進めていく.

参考文献

- 1) 内閣府 令和 3 年度版 防災白書, 2021.
- 2) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.
- 3) 西弘明, 今野久志, 山口悟, 佐々木哲也, 小室雅人: ポケット式落石防護網の実規模実験, 土木学会第68回年次学術講演会概要集, pp.935-936, 2013.
- 4) 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, pp.1088-1100, 2010.
- 5) 難波正和, 前川幸次, 田島与典, 横田哲也: 緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験に関する一考察, 第11回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, No.37, pp.1-6, 2014.
- 6) 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, pp.75-85, 2011.
- 7) 小畑康隆, 藤井智弘, 小林俊夫, 野村俊充, 吉田博: 緩衝装置を配置したエネルギー吸収型落石防止柵に関する実験的研究, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.147-152, 2000.
- 8) 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, pp.1134-1144, 2011.
- 9) 酒井啓介, 奥田峻, 田邊梨沙, 岸徳光, 小室雅人: 高エネルギー吸収型落石防護柵(支柱強化型)の実物大衝撃荷重載荷実験による性能照査, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.955-963, 2019.
- 10) 園田佳巨, 畑芳宏, 福永一基: SPH 法を改良したワイヤリング防護柵の衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1155-1162, 2011.
- 11) 園田佳巨, 福永一基: 実規模実験と数値解析によるワイヤリング落石防護柵の性能照査, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.811-818, 2018.
- 12) 高橋利延, 山本佳士, 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, pp.1042-1055, 2014.
- 13) 堀口俊行, 高橋利延, 高森潔, 香月智: 3次元個別要素法を用いた落石防護網の限界状態に関する研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1061-1073, 2017.