

## ワイヤネット式落石防護柵の性能評価に関する実規模実験と解析について

Prototype impact test and analysis on performance evaluation of steel cable net rock-fall barrier

西田 陽一\*, 石井 太一\*\*, 榎谷 浩\*\*\*  
Yoichi Nishita, Taichi Ishii, Hiroshi Masuya

- \* 工博, 株式会社プロテックエンジニアリング (〒957-0106 新潟県北蒲原郡聖籠町大字蓮潟 5322-26)  
\*\* 株式会社プロテックエンジニアリング (〒957-0106 新潟県北蒲原郡聖籠町大字蓮潟 5322-26)  
\*\*\* 工博, 金沢大学教授, 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

*Key Words: rock fall, impact, absorbing energy, rock-fall barrier*

キーワード: 落石, 衝撃, 吸収エネルギー, 落石防護柵

## 1. はじめに

近年, 我が国の土木構造物の多くは, 従来の仕様設計法から性能照査型設計法への移行が進んでおり, 道路橋や擁壁の構造物をはじめ多くの構造物の設計基準の改訂が行われている。また, 衝撃作用を受ける防護構造物においても, 実規模実験を代表とする性能評価手法の研究が進められており<sup>1)</sup>, 落石防護柵の分野でも多くの実験や解析が行われている。

これまでの研究や開発により施工されている落石防護柵は, 緩衝金具を有しエネルギーを吸収する「高エネルギー吸収柵」と呼ばれるタイプの防護柵とワイヤロープの弾性伸びと鋼製支柱の塑性変形によって落石エネルギーを吸収する「落石防護柵」と呼ばれるタイプに大別される<sup>2)</sup>。

前者は, 緩衝金具を設置することでアンカーへの引き抜き力やワイヤロープに作用する張力を小さくできることが特徴であり, その基礎構造を小さくすることができるが長所であるといわれている。その反面, 落石を受けた後の柵高が小さくなることや, 緩衝装置に復元力がないことから, 繰り返し発生する落石に対して初期の性能を保持できないこと, 変形量が大きくなるのが短所といわれている。性能評価の多くは実規模実験により行われているものの, 実験設備の制約等もあり評価方法は確立されていない。

一方, 後者は, 前者に比べ変形量が小さいことが長所といえるが, 落石エネルギーが大きくなると, 支柱が塑性変形する前にワイヤロープが破断することから, 100kJを超える落石に対しては対応が困難といわれている。また落石が衝突した後の復元性能は, 大小様々であるが両者とも構造物の初期の性能を保持できていない。

現在, 落石防護構造物の性能評価の一つとして, 繰り

返し発生する落石に対しても初期の性能を保持し, 変形量の小さい防護構造の開発が望まれている。

本研究では, 前述した防護柵の中間的な機能を有し, 繰り返し発生する落石に対しても有用な防護柵の性能について検討した。最初の実規模の防護柵供試体に重錘衝突による繰返し載荷実験を行い, 防護柵の衝撃吸収性能の評価および修復性の評価を行った。この実験に対し, 大変形を考慮した有限要素法による解析的検討を行い, ワイヤロープを用いた防護構造の性能評価手法の適用性についての知見を示した。

## 2. 実験供試体

実験に使用したの供試体を図-1(a),(b)に示す。

実験供試体は, 防護柵の柵高 3m, 支柱間隔 6m とし, アンカーの配置位置とアンカーの材質の異なる 2 種類のもを製作した。防護面のワイヤネットには, 金網の一部が破損しても損傷が広がりにくい亀甲金網(目あい 80mm×100mm, 線径 2.7mm)を設置した。

防護面のワイヤネットの構造は, 格子の対角の長さが約 50cm となるように交点をステンレス製の拘束金具で拘束し, 外辺のワイヤロープとワイヤネットの接続はワイヤネットの交点を縫うように設置した。

また, 隣接するワイヤネットも支柱位置でワイヤロープを用いて編み込みワイヤクリップで定着した。

実験に使用したワイヤロープは, 一般用ワイヤロープ FC6×24 (引張強度 1470N/mm<sup>2</sup>) を用い, ワイヤネットに φ12mm (破断荷重 65.9kN), 外辺ロープに φ22mm (破断荷重 221kN) を用いた。支柱の横断方向の控えワイヤロープおよび延長方向の控えワイヤロープは, 上辺に φ22mm (破断荷重 221kN), 下辺に φ18mm (破断荷重 148kN) を用いた。

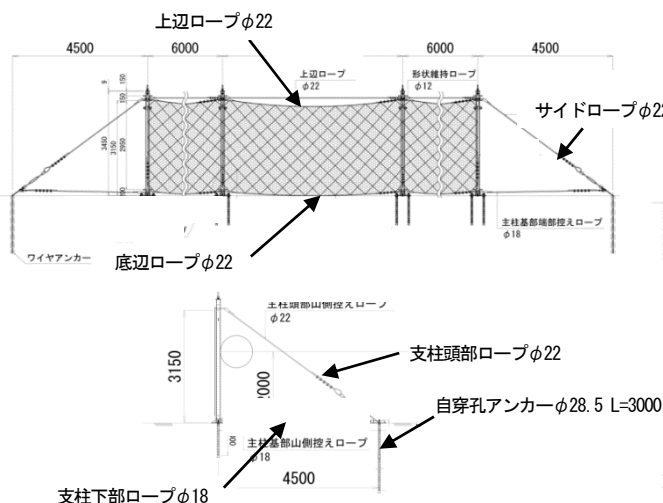
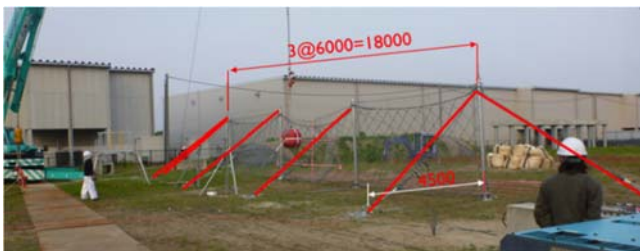


図-1(a) 実験供試体 (Type01)

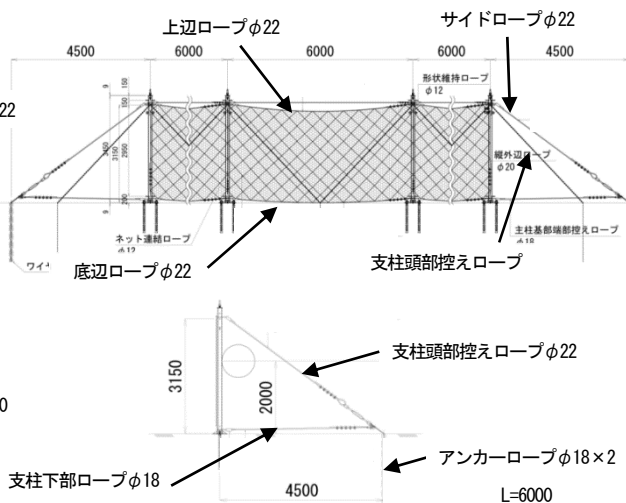


図-1(b) 実験供試体 (Type02)

支柱は、一般構造用炭素鋼管 STK400, φ114.3mm, 肉厚 t=6mm を使用し、支柱基部の構造は、長さ 1m の自穿孔アンカーを支柱基部の変位抑制構造として配置しており、実験地盤が砂質土であることから、半固定の状態となっている。支柱は鋼管内部にワイヤロープを通し、支柱頂部に全ネジボルトと連結して板バネとナットで定着することで支柱に曲げモーメントが作用しない構造としている。支柱の控えロープを定着するアンカーは、Type01 では長さ 3m の自穿孔アンカー 2 本をを削孔径 φ50mm で定着し、Type02 は、長さ 6m の φ18mm のワイヤを 2 本束ねて組み立てたアンカーを削孔径 φ115mm で定着した。なお、サイドアンカーは、Type02 のアンカーを兼用して用いた。

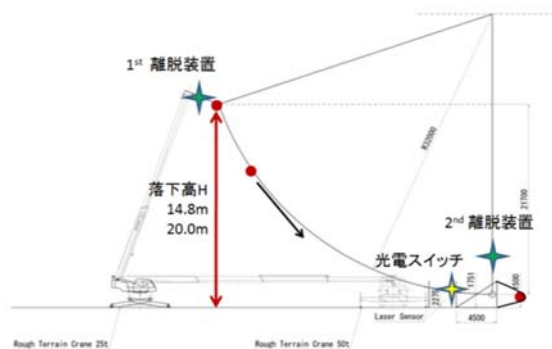


図-2 実験の概要

### 3. 実験方法

#### 3.1 载荷方法および実験ケース

図-2 は、実験の概要を示したものである。

载荷方法は、2 台のクレーンを用いた振り子式载荷とし、重錘を所定の位置まで吊り上げ一つ目のエア式の離脱装置を用いて重錘を離脱させた。振り子運動をした重錘は、供試体手前に設置した光電センサーを通過すると自動的に電磁弁が解放し離脱されることで水平に供試体に衝突する手法を用いている。

表-1 は、本研究の実験ケースを示したものである。

表中の実験ケース名の“-”の後の数字は入力エネルギーを表しており、最後の文字の“C”が中央スパンの載

表-1 実験ケース

実験ケース	重錘重量 (kN)	落下高さ (m)	入力エネルギー (kJ)	衝突位置	载荷種別
Type01-30C	6.8	4.500	30	中央スパン	単载荷
Type01-50C	6.8	7.500	50	中央スパン	繰返载荷
Type01-75C	6.8	11.200	75	中央スパン	繰返载荷
Type01-100C	6.8	14.800	100	中央スパン	単载荷
Type01-150C	10.0	15.000	150	中央スパン	繰返载荷
Type02-100C	6.8	14.800	100	中央スパン	単载荷
Type02-30C	6.8	4.500	30	中央スパン	繰返载荷
Type02-50C	6.8	7.500	50	中央スパン	繰返载荷
Type02-75C	6.8	11.200	75	中央スパン	繰返载荷
Type02-200C	10.0	20.000	200	中央スパン	繰返载荷
Type02-200E	10.0	20.000	200	端部スパン	単载荷

荷ケース，“E”が端部スパンに載荷させたケースである。衝突高さは全ケースとも地表面から 2m の位置としており，載荷種別としてワイヤネットを張り替えたものを単一載荷とし，連続して同一点に載荷させたケースを繰り返し載荷として示している。

### 3.2 計測項目

計測項目は，重錘の中央に設置した 3 軸の加速度計(容量 1000 m/sec<sup>2</sup>：東京測器社製)による加速度，控えワイヤロープの張力(棒鋼にひずみゲージを貼り付けたもの)である。

各センサーのデータは，5kHz でデジタルデータレコーダ(キーエンス社製：NR600)により計測を行った。また，変形状況を確認するために，高速ビデオカメラ(Vision Research 社製)を用い，毎秒 1000 コマで撮影を行っている。

## 4. 実験結果

### 4.1 重錘衝撃力

図-3(a), (b)は，各タイプの重錘衝撃力の経時変化を示したものである。時間軸は重錘が支柱位置を通過した時刻を零としていることから，ネットの緩み等で勾配の立ち上がり位置が異なっている。なお，重錘衝撃力は 3 軸の加速度計の合成重錘加速度に重錘重量を乗じて算出を行ったものである。

Type01 の重錘衝撃力の作用時間は 0.3sec~0.4sec である。最大衝撃力は，Type01-30C で 40kN, 50C で 68kN, 75C で 92kN, 100C で 114kN, 150C で 150kN となっている。

衝撃力波形の形状は，Type01-30, 50, 75C をみると，衝突後緩やかに立ち上がり，その後，衝撃力の立ち上がりが急になっている。Type01-100C は，衝突後に急激に立ち上がり，最大値を示した後に荷重が低下している。

Type01-150C は，初期の段階で緩勾配となっており，最大値を示した後に緩やかに荷重が低下している。これは，繰り返し載荷によってアンカー頭部のグラウトに亀裂が生じ，アンカーが引き抜け衝撃力が低下したものと考えられる。

Type02 の重錘衝撃力の作用時間は，Type01 に比べやや短く，荷重の立ち上がり時間が短い。最大重錘衝撃力は，Type02-30C で 89kN, 50C で 108kN, 75C で 143kN, 100C で 106kN, 200C で 180kN, 200E で 197kN であり，Type01 に比べ，同一エネルギーの衝撃力は大きい結果となっている。これは，Type02 は，横断方向の控えロープを斜めに配置していることから，支柱の縦断方向の拘束力が増し，重錘衝撃力が大きくなったものと考えられる。

次に，載荷スパン位置の異なる Type02-200C と Type02-200E を比較すると，重錘衝撃力の波形にも優位な違いは見られず，本構造のように 1 スパン毎にワイヤネットを定着した構造では，載荷スパンが異なっても衝撃吸収性

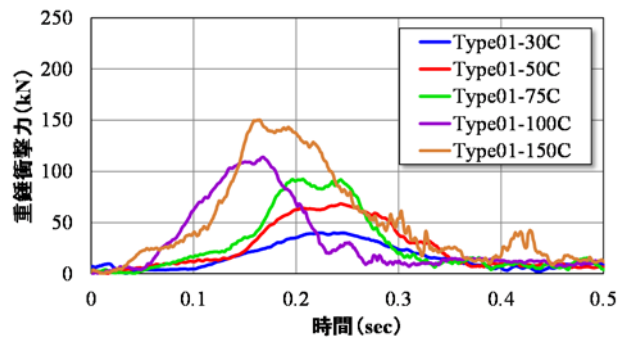


図-3(a) 重錘衝撃力の経時変化 (Type01)

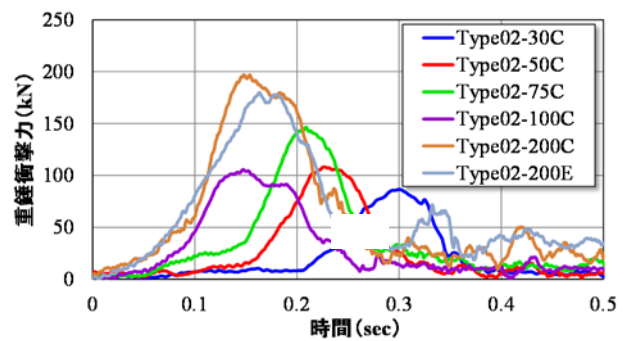


図-3(b) 重錘衝撃力の経時変化 (Type02)

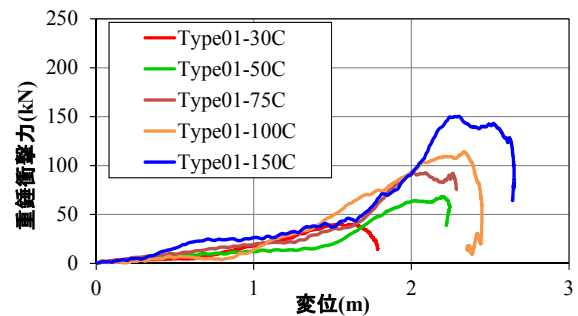


図-4(a) 重錘衝撃力と変位の関係 (Type01)

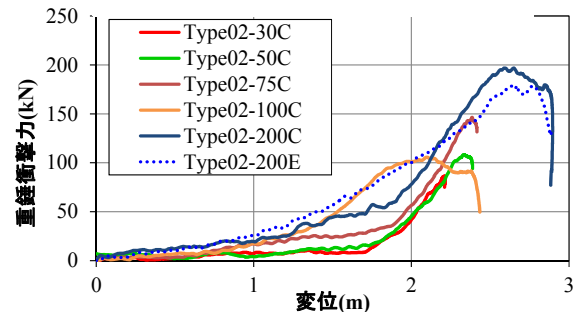


図-4(b) 重錘衝撃力と変位の関係 (Type02)

能に大きな違いはないものと考えられる。

### 4.2 重錘衝撃力，吸収エネルギーと重錘変位

図-4(a),(b)は，重錘衝撃力と変位の関係を示したもので

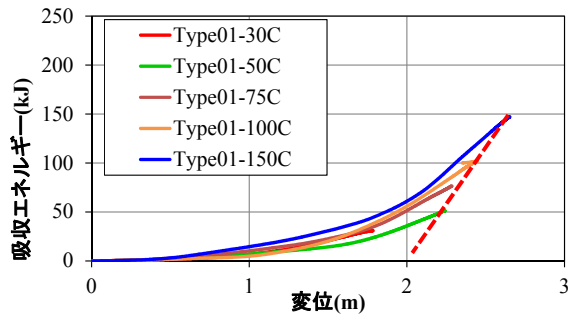


図-5(a) 吸収エネルギーと変位の関係  
(Type01)

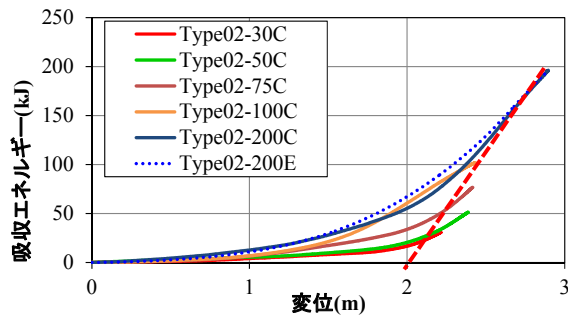


図-5(b) 吸収エネルギーと変位の関係  
(Type02)

ある。変位は、重錘加速度を時間で2回積分して算出している。各 Type の重錘衝撃力と変位の関係は、ワイヤネットの初期の緩みがあることから、1.5m~1.8mの変位を示した後に立ち上がり、その波形は概ね同じ軌跡を示している。これらから繰り返し落石の衝撃を受けた後も一定の耐力を有しており、弾性的な挙動を示していることがわかる。

図-5(a),(b)は、吸収エネルギーと変位の関係を示したものである。Type01, Type02 の吸収エネルギーと変位関係の勾配は、初期勾配が緩く、その後勾配が急になっている。その波形は概ね同じ軌跡を示している。また、最大変位と最大エネルギーの関係をプロットすると概ね比例関係となっており、本防護柵の変形量をエネルギーに応じて評価することができる。図-6に Type02-200C の最大変形時の状況を示す。

### 4.3 残存柵高

柔防護構造物では、落石補足後にロープが緩み、柵高が変化することから、衝突後の残存柵高を落石補足性能の評価としている。表-2に衝突後の残存柵高の一覧を示し、初期の柵高と残存柵高の比を示している。

今回の実験で使用した防護柵の残存柵高は、初期の高さの78%~90%であり、繰り返し作用下においても柵高の低下が小さいことがわかる。これらから、防護柵の補足性能の評価では、残存柵高を予め見込み、繰り返し作

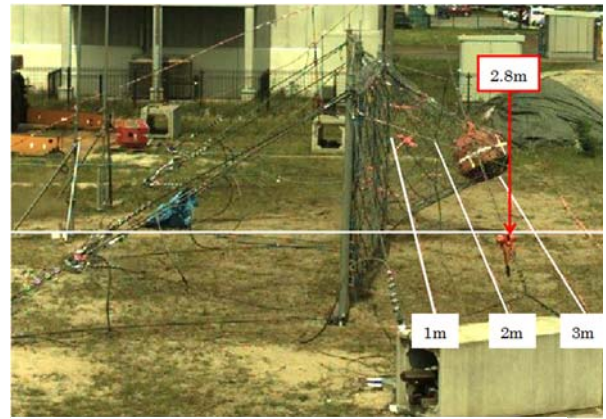


図-6 最大変形時の状況  
(Type02-200C)

表-2 残存柵高の一覧

実験ケース	入力エネルギー (kJ)	载荷種別	初期の柵高 a (m)	载荷後の柵高 b (m)	柵高比 b/a (%)
Type01-30C	30	単载荷	2.90	2.55	88%
Type01-50C	50	繰返载荷	2.90	2.35	81%
Type01-75C	75	繰返载荷	2.90	2.30	79%
Type01-100C	100	単载荷	2.90	2.50	86%
Type01-150C	150	繰返载荷	2.90	2.30	79%
Type02-100C	100	単载荷	2.90	2.60	90%
Type02-30C	30	繰返载荷	2.90	2.55	88%
Type02-50C	50	繰返载荷	2.90	2.50	86%
Type02-75C	75	繰返载荷	2.90	2.45	84%
Type02-200C	200	繰返载荷	2.90	2.50	86%
Type02-200E	200	単载荷	2.90	2.25	78%

用に対する性能を評価する必要があるものと考えられる。

### 4.4 ロープ張力

表-3(a),(b)は、最大ロープ張力の一覧を示している。各ケースの最大ロープ張力は、サイドロープであり Type01 で S1 および S6, Type02 で S1 および S10 である。载荷エネルギーが同じである 100kJ の Type 別のサイドロープ張力を比較すると、Type01-100C の S6 は 83.7kN, Type02-100C の S1 は 77.3kN となっており、Type02 のサイドロープ張力が支柱頭部ロープと分担していることがわかる。

また、今回の実験における最大ロープ張力は、Type02-200C の S1 の 113.5kN であり、ロープの破断荷重が 221kN であることから、ロープの破断荷重に対して 2 倍程度の安全余裕度があることがわかる。

## 5. 大変形有限要素解析による性能評価

### 5.1 解析の概要

衝撃作用を受ける柔防護構造物の挙動は、複雑であり性能に対する安全余裕度等の推定が困難である。また実規模実験を行うためには、施設、時間および費用等に制約を受けることが多く、解析による性能評価精度の向上

表-3(a) 最大ロープ張力の一覧(Type01)

実験ケース	S1 (kN)	S2 (kN)	S3 (kN)	S4 (kN)	S5 (kN)	S6 (kN)
Type01-30C	30.7	7.3	16.0	17.3	6.3	30.2
Type01-50C	44.5	16.7	27.6	32.4	12.8	46.3
Type01-75C	60.7	16.6	34.4	41.4	16.0	65.6
Type01-100C	81.0	-	44.1	49.2	20.1	83.7
Type01-150C	95.4	-	50.5	61.6	29.4	103.5
実験ケース	S11 (kN)	S12 (kN)	S13 (kN)	S14 (kN)	S15 (kN)	S16 (kN)
Type01-30C	0.5	0.2	4.7	4.2	0.1	0.8
Type01-50C	0.7	0.1	7.2	5.0	0.1	0.3
Type01-75C	0.3	0.4	12.4	9.0	0.1	0.2
Type01-100C	9.5	2.5	12.0	13.0	0.1	2.3
Type01-150C	26.3	7.4	11.9	19.5	0.2	1.5

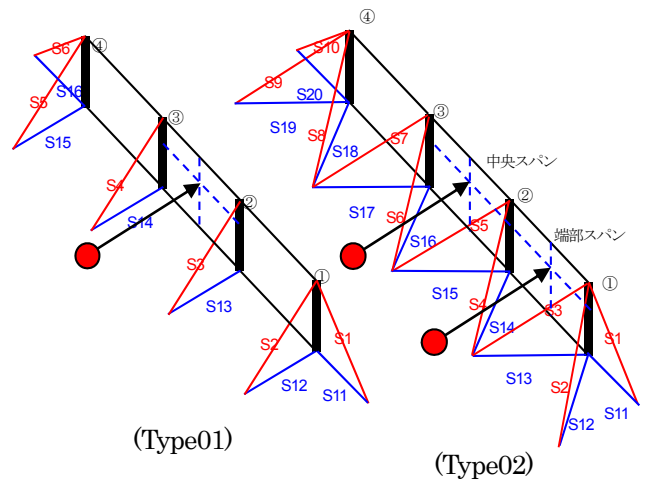


表-3(b) 最大ロープ張力の一覧(Type02)

実験ケース	S1 (kN)	S2 (kN)	S3 (kN)	S4 (kN)	S5 (kN)	S6 (kN)	S7 (kN)	S8 (kN)	S9 (kN)	S10 (kN)
Type02-30C	61.7	12.3	5.7	17.3	-	1.2	30.3	0.5	10.6	44.0
Type02-50C	74.0	15.5	7.3	26.9	-	1.7	46.7	1.0	16.8	58.8
Type02-75C	83.9	18.6	8.7	33.5	-	2.2	55.3	2.4	18.5	64.4
Type02-100C	77.3	13.1	8.5	27.6	-	3.0	45.8	0.1	18.5	68.6
Type02-200C	113.5	22.5	10.2	52.6	-	2.9	72.3	2.7	31.0	91.3
Type02-200E	58.9	76.1	22.6	7.7	64.5	0.2	33.1	0.2	35.0	44.5
実験ケース	S11 (kN)	S12 (kN)	S13 (kN)	S14 (kN)	S15 (kN)	S16 (kN)	S17 (kN)	S18 (kN)	S19 (kN)	S20 (kN)
Type02-30C	13.5	2.9	5.2	1.5	5.9	6.5	4.6	7.3	3.5	11.6
Type02-50C	22.7	3.7	6.0	5.2	12.6	8.3	4.6	10.2	4.7	12.5
Type02-75C	28.4	5.3	6.6	7.7	21.7	10.5	7.5	10.0	6.3	19.4
Type02-100C	30.3	6.8	9.2	10.3	20.8	7.6	8.0	9.6	5.4	17.8
Type02-200C	38.5	6.4	3.3	10.4	27.5	12.4	4.4	9.1	5.1	31.5
Type02-200E	75.3	17.9	11.2	3.0	34.5	17.2	0.3	12.3	6.4	36.8

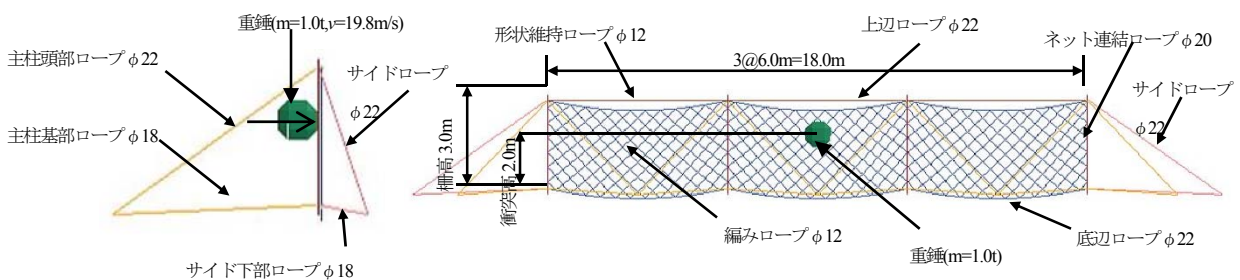


図-7 解析モデルの概要

が求められている。

ここでは、実験を行った防護柵の解析による性能評価方法として、Type02 供試体の LS-Dyna を用いた実験の再現解析を試みた。

## 5.2 解析モデル

図-7 に解析モデルを示し、解析モデルの概要を次に述べる。

解析モデルに使用した要素特性は、ワイヤロープにケーブル要素を用い、支柱にビーム要素を用いた。ワイヤロープは、非線形材料として定義し、引張試験の応力ひずみ関係を用い、支柱は、弾性材料として定義し鋼材の

ヤング係数 200Gpa を用いた。

ネットロープの要素は、ロープの交点間を一要素とし、節点をヒンジ結合とした。また、ネットロープと外辺のロープ接続部は、ワイヤネットを編み込むように外辺のロープを組み立てていることから、ネットロープと外辺ロープの交点をスライドできるようにモデル化を行っている。なお、本解析では、設計実務への適用性評価を目的とし、金網をモデル化しない簡易モデルとした。

### 5.3 解析結果

図-9(a)~(d)に解析結果と実験結果を示す。

重錘衝撃力の解析結果は、実験結果に比べやや大きい応答を示しているものの衝撃力の立ち上がりおよび衝撃力作用時間は概ね再現できているものと考えられる。

最大変形量は、実験結果を概ね再現できており、防護柵の変形性能の評価として有用な結果といえる。

ロープ張力は、支柱頭部ロープの最大値が実験結果に比べ大きいものの、サイドロープの張力は概ね再現できているものと考えられる。これらから、本解析の安全性評価は、実構造の応答に対して 1.0 以上であるものといえ、構造解析による安全率が見込まれているといえる。

### 6. まとめ

本研究で行った落石防護柵の重錘落下実験および LS-Dyna の解析による性能評価を以下にまとめる。

- 1) 防護柵の落石エネルギー吸収性能は、実験範囲である 200kJ であるが、防護柵に損傷はなく、繰り返し発生する落石に対しても十分な耐力を有しているものと評価できる。
- 2) 防護柵の変形量の評価は、繰り返し载荷を行った最大変形量の範囲でエネルギーに応じて予測することができ、最大変形量は、Type02 で 2.8m である。
- 3) 補足性能の評価は、柵高保持率で評価することができることが明らかとなった。また、本防護柵では、80%程度であるといえる。
- 4) 計測したワイヤロープの張力は、研究で使用したロープの 2 倍程度の安全率を有しており、実験的に安全性に関する評価ができたと考えられる。
- 5) 本研究で検討した LS-Dyna を用いた逆解析により、実験結果を概ね再現でき、本防護柵に簡易モデルの解析を用いることで変形量の予測およびロープ張力のシミュレーションが可能であるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 土木学会 構造工学委員会, 防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計, 2013.1
- 2) 日本道路協会, 落石対策便覧, 2000.

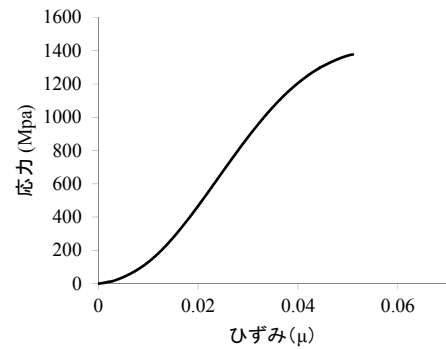
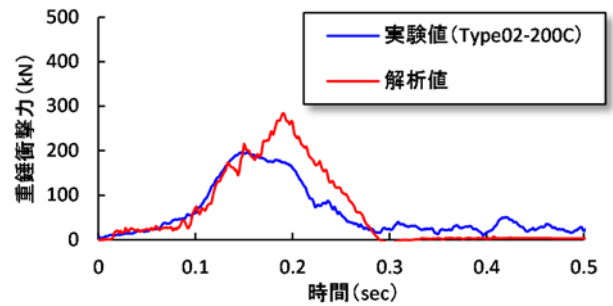
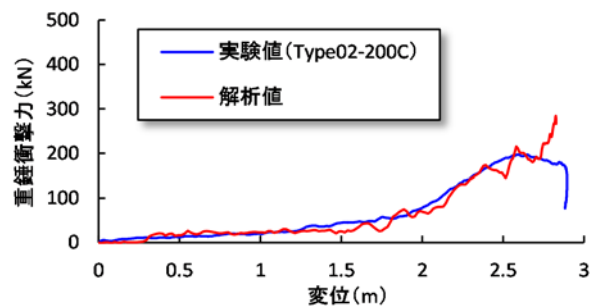


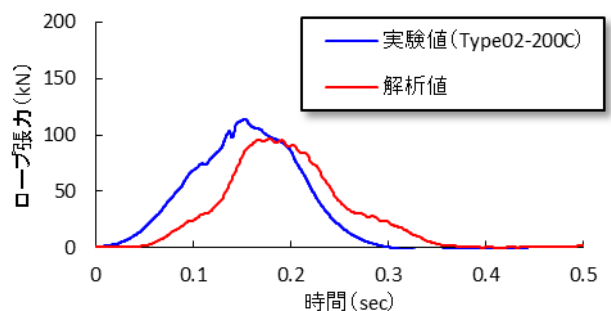
図-8 ワイヤロープの応力ひずみ関係



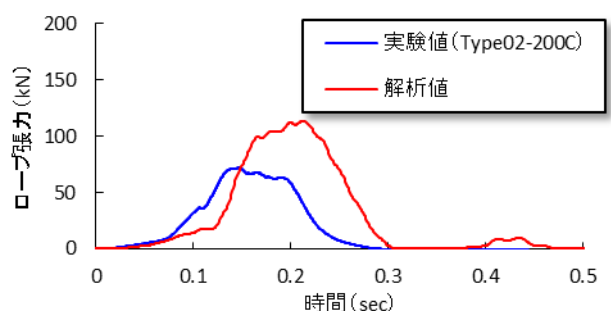
(a) 重錘衝撃力の経時変化



(b)重錘衝撃力と重錘変位の関係



(c)サイドロープの経時変化



(d)支柱頭部ロープの経時変化

図-9 解析結果と実験の比較