

実物大実験と動的解析による 落石防護網の設計手法の検討

ソリューション部門 インフラリスク班

木下尚樹

(愛媛大学大学院 理工学研究科)

本資料の複製はご遠慮ください

実物大実験と動的解析による落石防護網の設計手法の検討

1. 落石対策工の種類
 - 1.1 予防工の種類
 - 1.2 防護工の種類
2. ポケット式落石防護網の設計
 - 2.1 従来型ポケット式落石防護網
 - 2.2 高エネルギー吸収型ポケット式落石防護網
 - 2.3 落石対策便覧について
3. 落石防護網の実物大規模重錘衝突実験
4. 動的解析による落石防護網の性能評価



地盤工学会(2014)

本資料の複製はご遠慮ください

2

1. 落石対策工の種類

■ 落石対策工

- 斜面から落下すると想定される岩塊等から保全対象物を護る工法
- 予防工と防護工に分類される

■ 予防工

- 斜面上の岩塊等が動き出す前に講ずる対策(落石の発生を予防)
- 予防工は防護工との組み合わせで適用する機会が多い(経済性等)

■ 防護工

- 落石から保全対象を防護する対策(待受け工法)
- 防護工は単独で適用する機会が多い

■ 落石対策工の設計方針

- 落石発生源の分布状況や規模, 発生形態, 斜面地形, 保全対象物などの現地状況を考慮する必要がある

本資料の複製はご遠慮ください

3

1.1 予防工の種類

■ 予防工

- 従来工法: 切土工, 除去工, 根固め工, 接着工, アンカー工, ワイヤロープ掛工, 排水工, 編柵工, のり面保護工, ロックボルト工, アンカー工
- 新工法: ワイヤロープ掛工, ワイヤロープ伏工, 密着型安定ネット工法

■ 除去工・根固め工



クレーンによる除去



根固め工の例

出典: 地盤工学会(2014) 落石対策工の設計法と計算例
本資料の複製はご遠慮ください

4

1.1 予防工の種類

■ 接着工



■ ワイヤロープ掛工・ワイヤロープ伏工



出典: 地盤工学会(2014) 落石対策工の設計法と計算例
本資料の複製はご遠慮ください

5

1.2 防護工の種類

■ 防護工

- 従来工法: ポケット式落石防護網工, 落石防護柵工, 落石防護柵工, 落石防護擁壁工, ロックシェッド工, 落石防護土堤・溝工
- 新工法: ポケット式落石防護網工, 落石防護柵工, 落石防護補強土壁工

■ 落石防護柵工



従来工法
(防護網との併用例)



新工法 (左)路側設置 (右)斜面設置
より大きいエネルギーを吸収



出典: 地盤工学会(2014) 落石対策工の設計法と計算例
本資料の複製はご遠慮ください

6

1.2 防護工の種類

■ ロックシェッド工・落石防護擁壁工



■ 落石防護補強土壁工



出典: 地盤工学会(2014) 落石対策工の設計法と計算例

本資料の複製はご遠慮ください

7

1.2 防護工の種類

■ ポケット式落石防護網工

➤ 従来型

- 支柱間隔: 3~5 m
- 可能吸収エネルギー: 100 kJ程度が標準(最大150 kJ)



➤ 新工法

- 長支間タイプ, 高エネルギー吸収タイプなどが開発される



従来タイプ



長支間タイプ

出典: 地盤工学会(2014)落石対策工の設計法と計算例
本資料の複製はご遠慮ください

2. ポケット式落石防護網の設計

ポケット式落石防護網

- 落石防護網の上部を支柱で持ち上げることで落石の入り口を設ける。
- 金網に落石を衝突させた後、落石を金網の裾まで誘導する構造。
- 落石が金網に衝突時、落石の運動エネルギーは、金網やワイヤロープなど構成部材の変形によるひずみエネルギー、振動エネルギーなどに変換される。
- 近年では、様々なエネルギー吸収機構が考案され、多種多様な高エネルギー吸収型と呼ばれるポケット式落石防護網が開発されている。



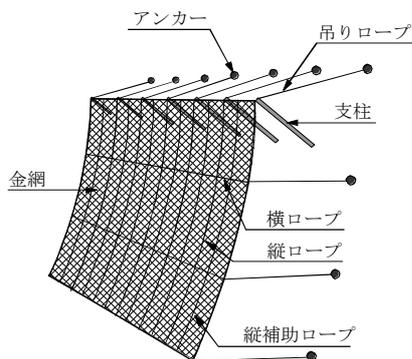
2.1 従来型ポケット式落石防護網

構成部材とその特性

- 支柱, 金網, ワイヤロープ(主ロープ, 縦補助ロープ), アンカー等で構成.
- 3 m~5 m間隔に設けた支柱により落石の入り口となる開口部を設け, 金網に落石が衝突することで落石の持つエネルギーを吸収する.
- 150 kJまでの落石を対象

■ (1)支柱および吊りロープ

- 支柱:H 100×100×6×8のH鋼で, 1本毎に吊りロープで固定.
- 支柱長さ:地山の不陸に対応できるように2.0 mから0.5 m刻みで4.0 mまで.
- 落石が吊りロープを直撃して破断させることがある.



出典:地盤工学会(2014)
落石対策工の設計法と計算例

落石が直撃した支柱
本資料の複製はご遠慮ください

10

2.2 高エネルギー吸収型ポケット式落石防護網

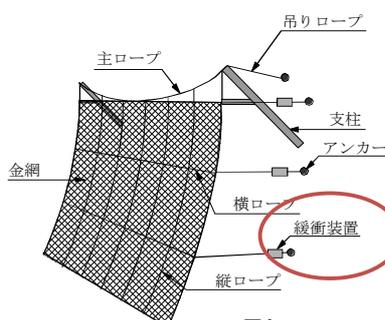
構成部材

■ (1)支柱

- 従来型に比べ数段サイズの大きいH形鋼や鋼管を使用.
- 地山に不陸がある場合への対応や, 支間長を長くとれるようにするための構造上の理由により, 支柱長は2.0 m~8.0 m程度のものが存在.

■ (2)金網

- 大きな落石エネルギーを吸収するために, 多種多様化が見られる.
 - ✓ 金網素線の引張応力度を強くしたもの
 - ✓ φ2.3 mm~φ4.0 mmの素線を3本撚りにしたワイヤ金網



出典:地盤工学会(2014)
落石対策工の設計法と計算例

本資料の複製はご遠慮ください

11

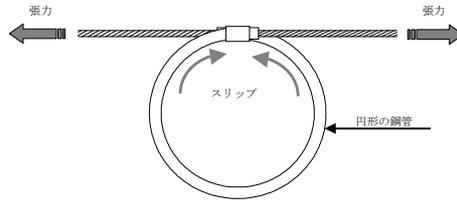
2.2 高エネルギー吸収型ポケット式落石防護網

■ 緩衝装置

➤ 大きな落石衝撃力を緩和させながら落石エネルギーの吸収効率を向上させるのに不可欠な部品.

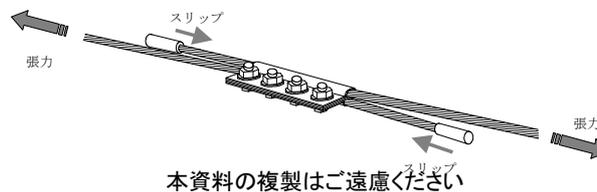
i) リング型

- ワイヤロープに強い張力が発生すると円形の鋼管部材が塑性変形.



ii) プレート挟み型

- ワイヤロープをプレート部材で挟み込むことにより、スリップ時の摩擦抵抗により緩衝機能が得られる.



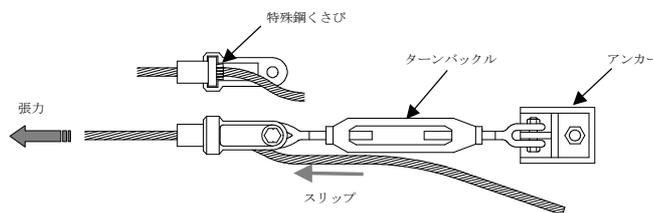
出典:地盤工学会(2014)
落石対策工の設計法と計算例

12

2.2 高エネルギー吸収型ポケット式落石防護網

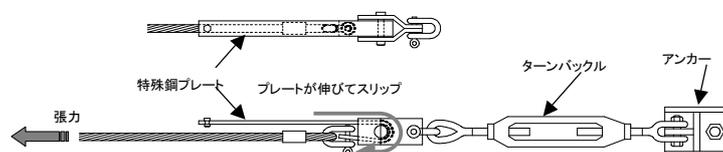
iii) 筒状くさび型

- 特殊鋼でできた筒状くさびとワイヤロープとのスリップ時の摩擦抵抗により緩衝機能が得られる.



iv) プレートスリップ型

- 特殊鋼でできたプレートが塑性変形しながら伸びる.



出典:地盤工学会(2014)
落石対策工の設計法と計算例

本資料の複製はご遠慮ください

13

■ 種類と一般的事項

➤ 従来型ポケット式落石防護網

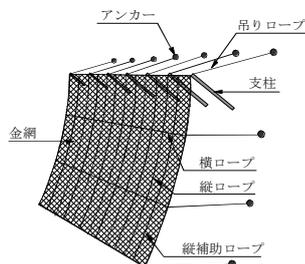
- 阻止面がひし形金網とワイヤロープ
- 指示部材がH鋼支柱, ワイヤロープ, 基礎
- 形状寸法が定型化

➤ 高エネルギー吸収型ポケット式落石防護網

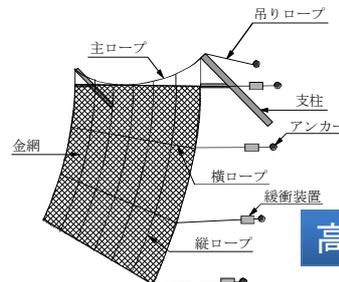
- 緩衝装置, 緩衝機構を組み込んだり, 支柱間隔が大きく, 構造全体系でエネルギーを吸収
- 従来型の適用範囲を超える大きな落石エネルギーに対応

➤ その他のポケット式落石防護網

出典:地盤工学会(2014)
落石対策工の設計法と計算例



従来型



高エネルギー型

本資料の複製はご遠慮ください

設計の考え方と手順

■ 限界状態の設定

➤ 要求性能に対する限界状態を設定する

➤ 要求性能と限界状態

- **性能1: 落石防護施設は健全**, または, 防護施設は損傷するが, 道路機能は支障を及ぼさない. 安全性, 使用性, 修復性を満たす.
- **性能2: 落石防護施設の損傷は限定的**, 道路機能の一部は支障. 安全性, 修復性は満たす.
- **性能3: 落石防護施設の損傷が道路機能に支障を及ぼすが**, 致命的にならない. 安全性は満たす.

➤ 限界状態の例(阻止面)

- 性能1: 損傷が生じない, もしくは部材交換を要しない限界の状態
- 性能2: 損傷の修復を容易に行いうる限界の状態

安全性の照査(1)

■ 照査の方法

- 実験による性能検証
- 慣用設計法(従来型ポケット式落石防護網に適用⇒性能2を満足する)

■ 実験による性能検証

➤ 実験方法

- 実物大を原則, 現地に適用する最低構成
- 実験条件: 重錘形状, 衝突速度, 入射角度, 載荷位置などが規定されている.
- 計測項目・計測方法: 衝突前, 衝突時, 衝突後データを計測

➤ 実験結果

- 構成部材の限界状態に照らして, 構造体として各要求性能を満たす落石エネルギーを導き明示する.

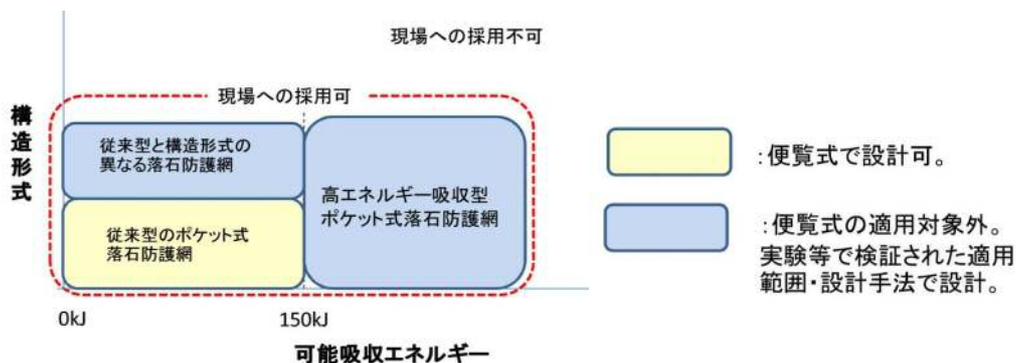
本資料の複製はご遠慮ください

16

安全性の照査(2)

■ 慣用設計法の考え方と適用範囲

- 適用対象: 従来型のポケット式落石防護網
- 可能吸収エネルギー : 150kJ 以下.
- 落石の衝突前後のエネルギー差 E_L : 落石防護網質量として有効となる範囲は, 幅 12m 以下 × 高さ 12m 以下.



本資料の複製はご遠慮ください

17

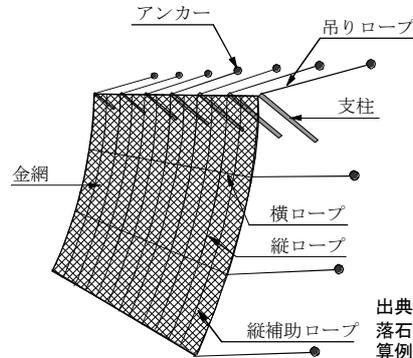
■ 落石エネルギー: E_w

$$\triangleright E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) mgH$$

■ 落石防護網の可能吸収エネルギー: E_T

$$E_T = E_N + E_R + E_P + E_{HR} + E_L$$

- E_N : 金網の吸収エネルギー
- E_R : 横ロープの吸収エネルギー
- E_P : 支柱の吸収エネルギー
- E_{HR} : 吊りロープの吸収エネルギー
- E_L : 衝突前後のエネルギー差



出典: 地盤工学会(2014) 落石対策工の設計法と計算例

■ エネルギー照査

- 可能吸収エネルギーが落石エネルギーを下回らないように各部材の諸元を決定
- ワイヤロープの破断荷重に耐えるようにアンカーの安定性を検討する.

$$E_T \geq E_w$$

本資料の複製はご遠慮ください

$$E_T = 2P \sin \alpha \cdot \delta = 0.22Ph = 0.22 \times 17.85 \times 5.0 = 19.6$$

慣用設計法(抜粋)

(1) 金網の吸収エネルギー

$$P = 1.5DP_a \quad [\text{kN}] \quad (3)$$

$$E_N = 2P \sin \alpha \cdot \delta = 0.22Ph \quad [\text{kJ}] \quad (4)$$

(2) 横ロープによる吸収エネルギー

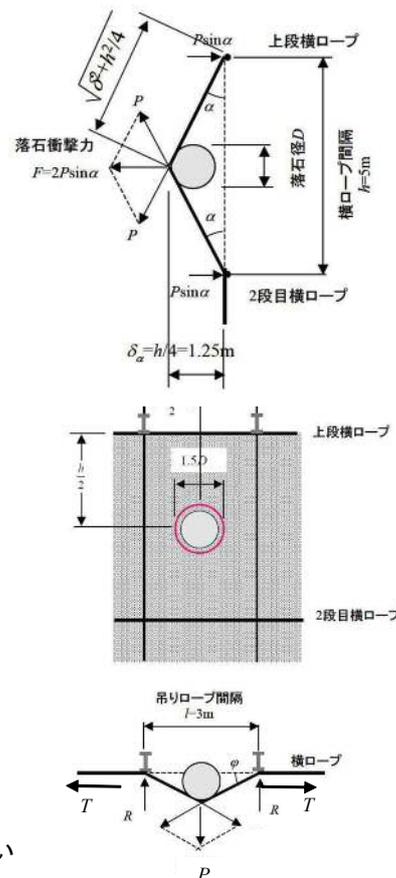
$$T = \frac{R}{\sin \varphi} = \frac{P}{2 \sin \varphi}$$

$$\cos \varphi = \frac{l}{l + \frac{TL}{EA}}$$

より,

$$\varphi = 19.07^\circ \quad T = 27.3$$

$$E_R = 2 \frac{L}{2EA} (T^2 - T_0^2) \quad [\text{kJ}] \quad (8)$$



本資料の複製はご遠慮ください

可能吸収エネルギー算定

■ 衝突前後のエネルギー差: E_L

- 落石が落石防護網に衝突すると、落石と防護網が一体となって運動する。この場合のエネルギーロス
- 支柱スパンが3mの場合、4スパン分を防護網の質量とする。

$$E_L = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_W$$

m_1 : 落石質量
 m_2 : 落石防護網質量

■ 日本道路協会(2009)切土工・斜面安定工指針

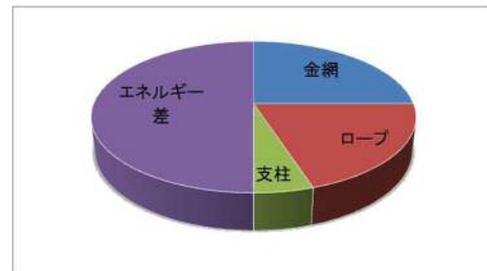
$$E_T = E_N + E_R + E_P + E_{HR} - E_L$$

削除



■ E_L の取り扱い

- 従来型: 従来通り考慮する。
- 経験則



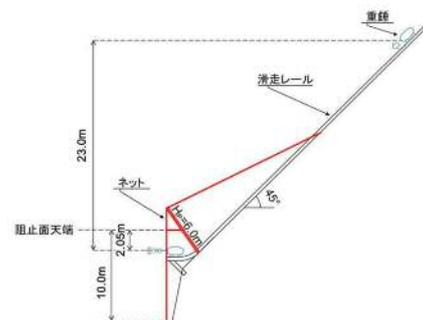
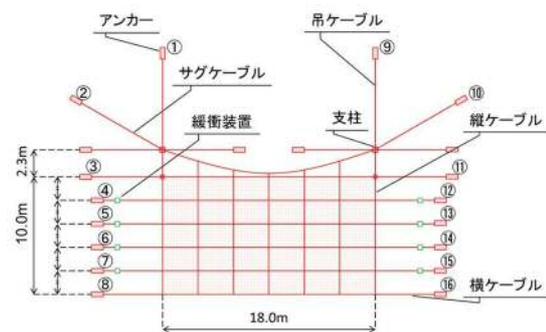
本資料の複製はご遠慮ください

3. 落石防護網の実物大規模重錘衝突実験

■ 実験概要



防護網 支柱間隔 18 m
 ※想定エネルギー 400 kJ級



衝突速度と衝突エネルギー(実績値)

重錘の質量 m [kg]	衝突速度 v [m s ⁻¹]	衝突エネルギー E_W [kJ]
2050 (Case 1)	20.0	410
2100 (Case 2)	20.2	428

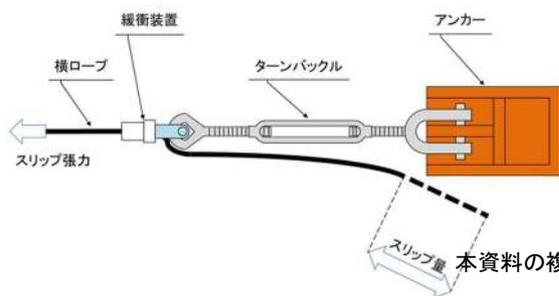
本資料の複製はご遠慮ください

3. 落石防護網の実物大規模重錘衝突実験

■ エネルギー緩衝装置



横ロープアンカー取付部

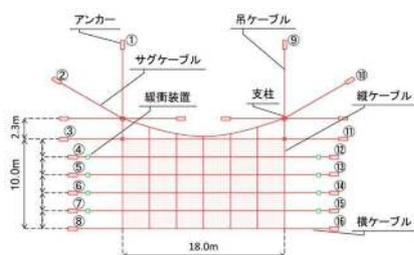
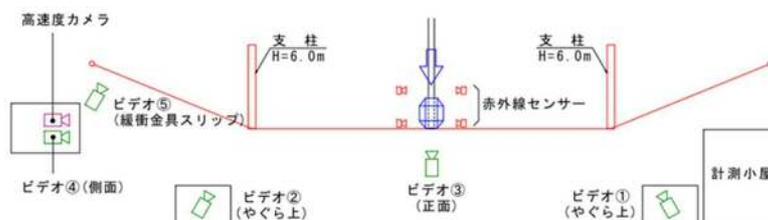


【エネルギー緩衝装置】
横ロープに設定張力以上の荷重が作用
⇒金具部でロープがスリップ
⇒エネルギーを吸収

本資料の複製はご遠慮ください

3. 落石防護網の実物大規模重錘衝突実験

■ 計測機器



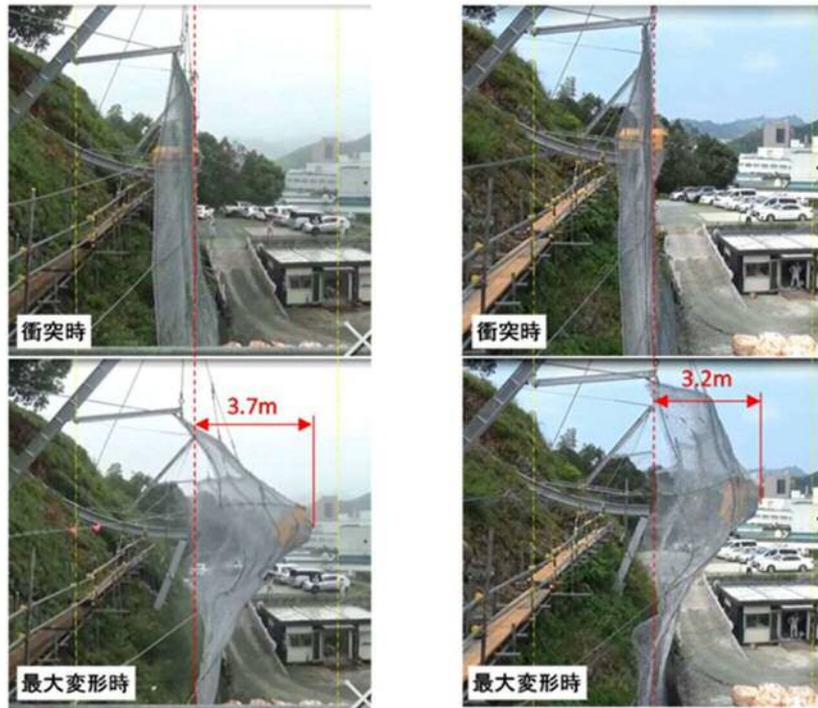
- ロープ張力: ターンバックル部のひずみゲージ(ゲージ長 5 mm, 抵抗60Ω単軸, 断面の対角線上に貼付した曲げひずみ消去法)により測定
- ワイヤロープについてはひずみ出カ-張カ-伸び関係を較正試験により求めておく
- 20 kHz



本資料の複製はご遠慮ください

落石防護網の実物大規模重錘衝突実験

■ 防護網の最大変形量(Case 1, Case 2)

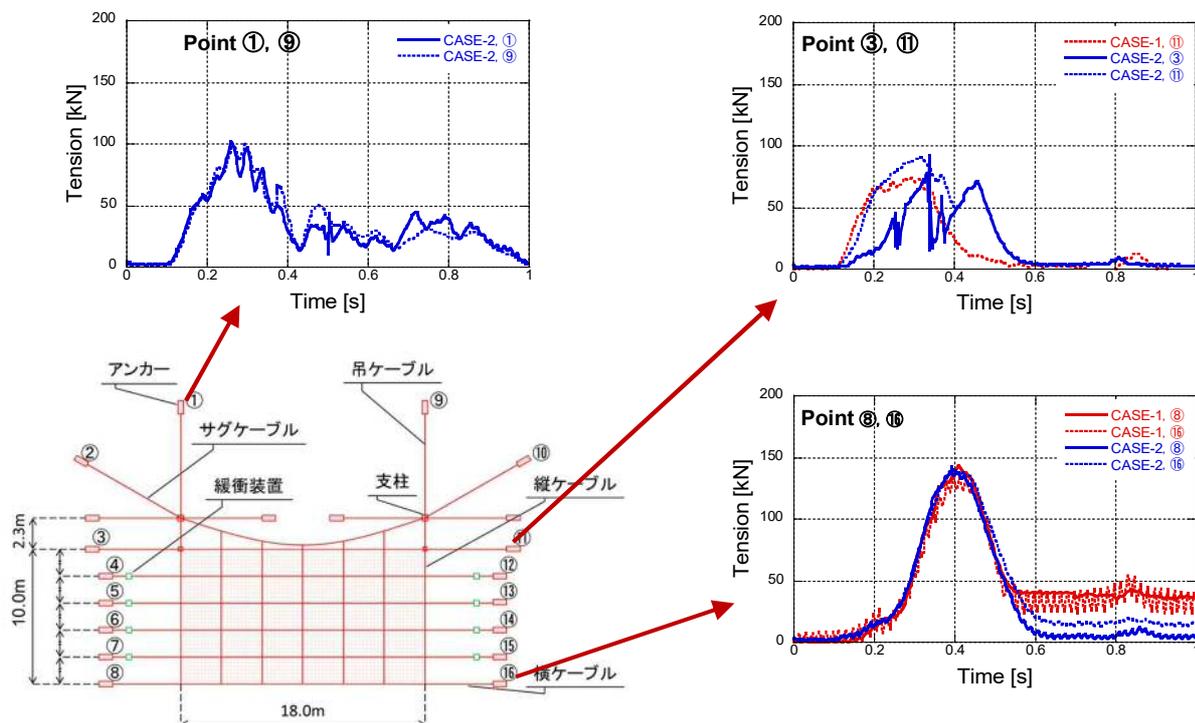


本資料の複製はご遠慮ください

24

落石防護網の実物大規模重錘衝突実験

■ ロープ張力の経時変化



本資料の複製はご遠慮ください

25

落石防護網の実物大規模重錘衝突実験

■ 性能照査

構成部材	使用性・修復性	性能水準
阻止面	塑性変形は容易に修復可能で、再度の衝突にも重錘を補足した。	2
支柱	弾性域を超える損傷は確認されなかった。	1
ワイヤロープ	塑性変形した縦ワイヤロープは容易に修復可能で、再度の衝突にも重錘を補足した。	2
基礎・アンカー	横ワイヤロープアンカーの支柱岩盤が塑性変形したが容易な修復で再度の重錘衝突に耐えた。	2
緩衝装置	緩衝装置は作動すれば容易に交換できるので、使用性・修復性に問題はない。	1
全体	重錘衝突部付近は塑性変形したが補足性能を満足した。	2

本資料の複製はご遠慮ください

26

4. 動的解析による落石防護網の性能評価

■ ポケット式落石防護網における解析の必要性

- エネルギー吸収を防護網の構造全体で行うものや緩衝装置を有するもの等、**従来設計の適用範囲外と考えられる製品**が開発されてきている
- 従来設計の適用範囲外と考えられる製品については**実物大実験により性能照査**が必要、実物大実験は費用および時間が必要で**開発コストの増加**となる



- 実物大の落石衝突実験より得られたデータと**動的シミュレーション解析**で得られた結果を比較、構成部材物性を同定
- 解析による防護網の**性能評価・設計手法**の検討

▶ LS-DYNA

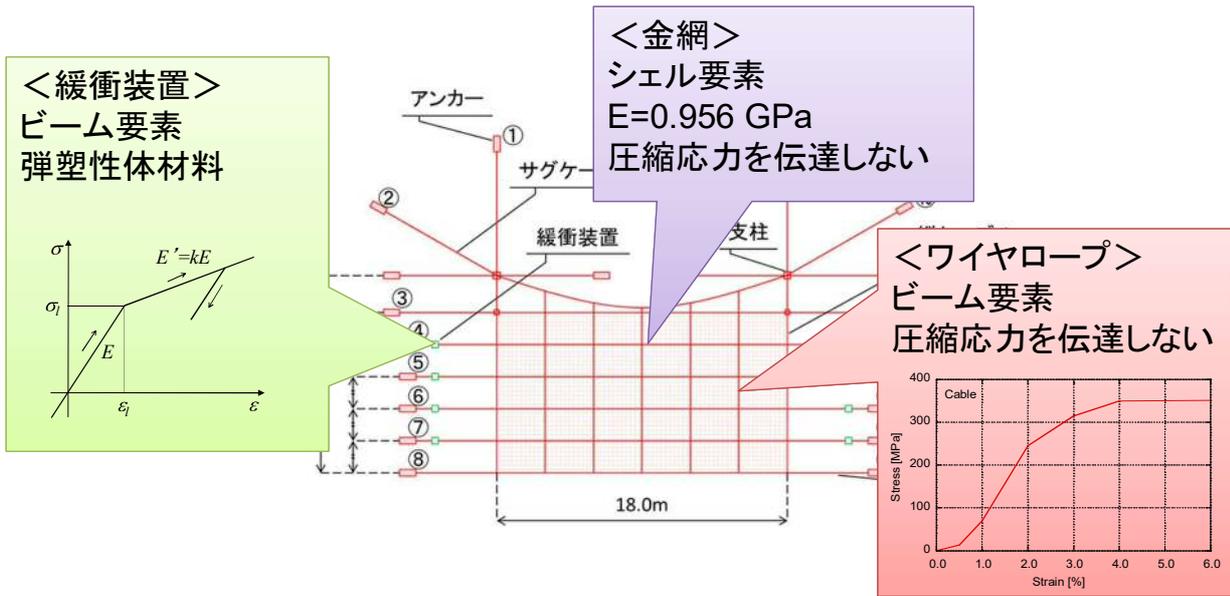
- 大規模変形を伴う動的挙動を得意とする非線形構造解析ソフト
- 有限要素法による空間の離散化・中心差分に基づく陽的時間積分を用いた陽解法ソルバ(陰解法ソルバも搭載)

本資料の複製はご遠慮ください

27

重錘衝突実験の再現シミュレーション

■ 構成部材のモデル化



重錘: 質量 2100 kg, 初速度 20.2 m/s, 衝突エネルギー 428 kJ
 金網との動摩擦係数0.40, ダンピング係数 0.45
 解析時間: 衝突開始 0.0 s ~ 1.0 s

本資料の複製はご遠慮ください

28

重錘衝突実験の再現シミュレーション

■ 解析に用いた防護網の諸物性

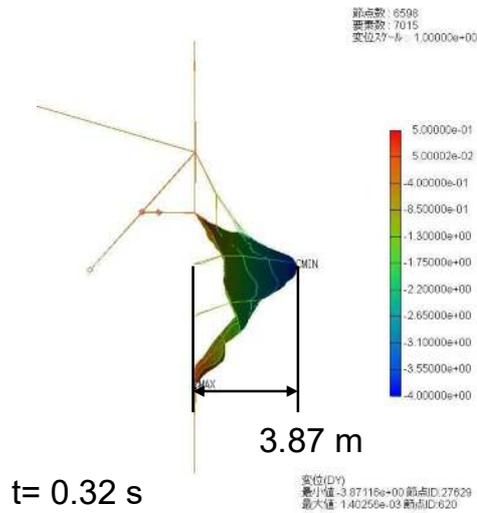
構成部材	物 性	
金 網	寸法	50 × 50 × Φ4.0 mm
	要素タイプ	シェル
	密度	7874 kg/m ³
	ヤング率	0.956 GPa
ロープ	要素タイプ	ビーム
	密度	7874 kg/m ³
	平均ヤング率	65.6 GPa
支 柱	寸法	H-200 × 200 × 8 × 12
	要素タイプ	ビーム
	ヤング率	210 GPa
	ポアソン比	0.3
	降伏応力	300 MPa

本資料の複製はご遠慮ください

29

重錘衝突実験の再現シミュレーション

■ 解析結果



最大変位時の防護網の変形状況

本資料の複製はご遠慮ください

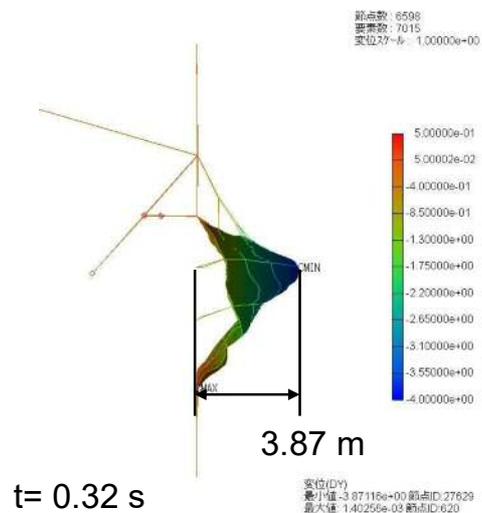
30

重錘衝突実験の再現シミュレーション

■ 実験結果との比較



実物大実験の防護網の変形状況



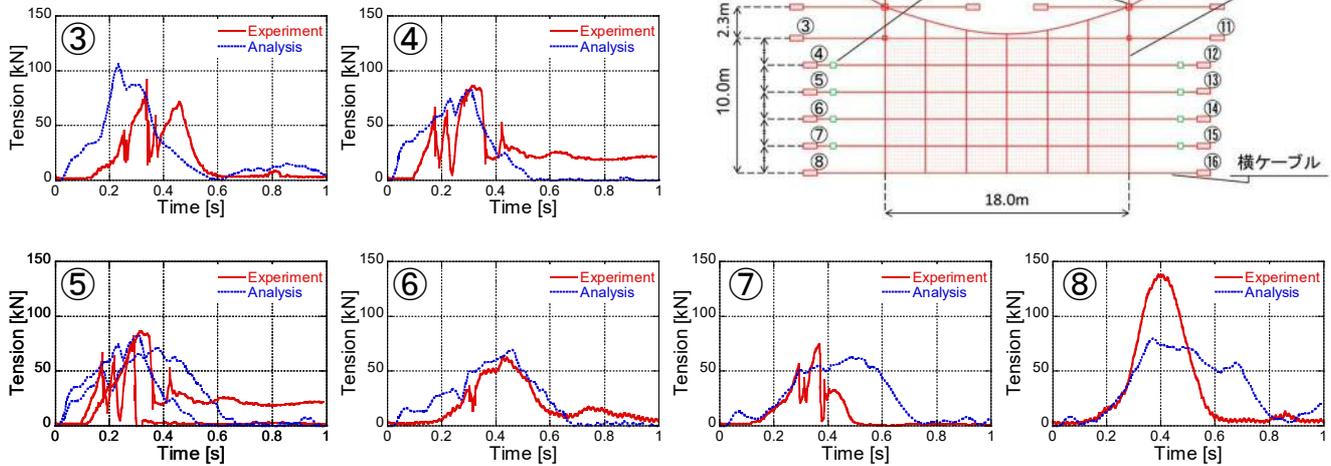
最大変位時の防護網の変形状況

本資料の複製はご遠慮ください

31

重錘衝突実験の再現シミュレーション

■ ケーブル張力の経時変化の比較

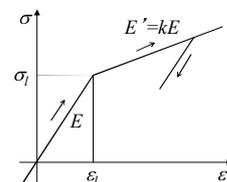
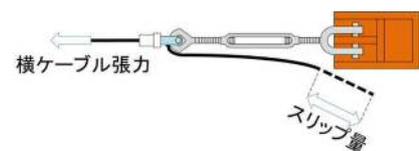
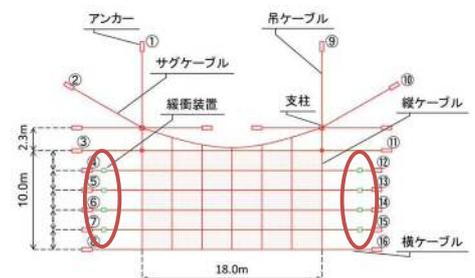
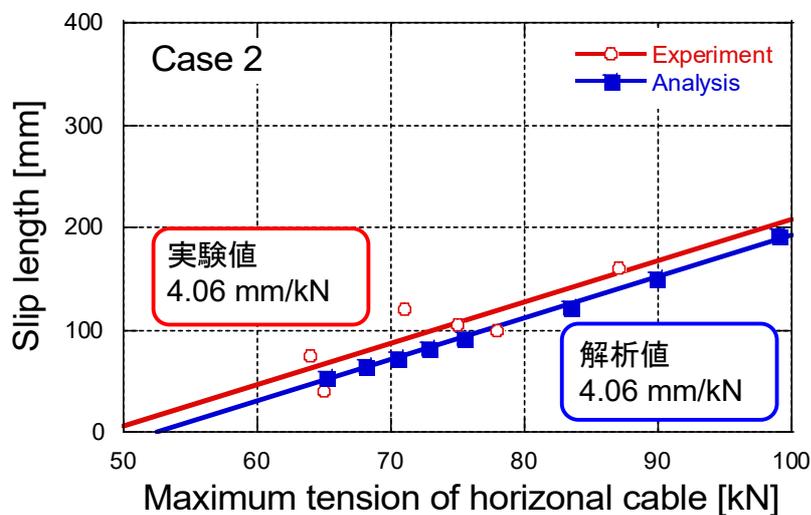


本資料の複製はご遠慮ください

32

重錘衝突実験の再現シミュレーション

■ 横ケーブル張力の増加量に対するすべり量の増加量の関係を比較 ※硬化係数 k パラスタにより決定



本資料の複製はご遠慮ください

33

主要部材の吸収エネルギーの比較

- 実物大実験より得られた値を簡易式に代入
- 主要部材の吸収エネルギーを算出

実験値の算出に用いる簡易式

金網の吸収エネルギー E_N [kJ]

$$E_N = P[\cos\{\tan^{-1} h_1/\delta\} + \cos\{\tan^{-1}(h_2/\delta)\}] \cdot \delta$$

h_1 : 上段ケーブルと落石との鉛直方向の距離 [m]
 h_2 : 下段ケーブルと落石との鉛直方向の距離 [m]
 δ : 金網の変形量 [m](ネット高の1/4とする)

ワイヤケーブルの吸収エネルギー E_R [kJ]

$$E_R = \frac{L}{E \cdot A} (T^2 - T_0^2)$$

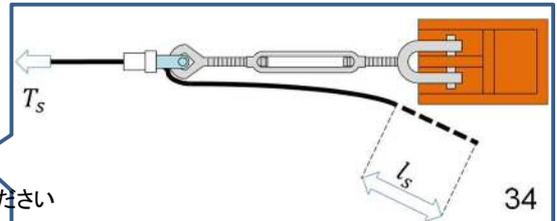
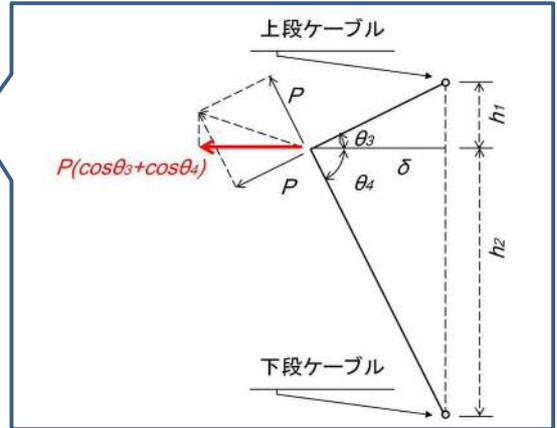
L : ケーブル長 [m]
 E : ケーブル弾性係数 [N/mm²]
 A : ケーブル断面積 [mm²]
 T : ケーブルに生じる張力 [kN]
 T_0 : ケーブルの初期張力 [kN](5kNとする)

緩衝装置の吸収エネルギー E_M [kJ]

$$E_M = T_s \cdot l_s$$

T_s : スリップ張力 [kN]
 l_s : 横ケーブルのスリップ量 [m]

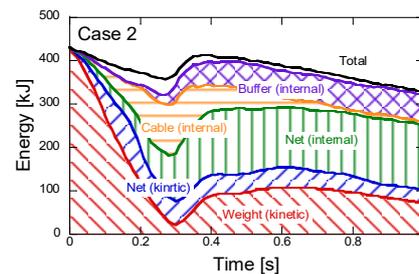
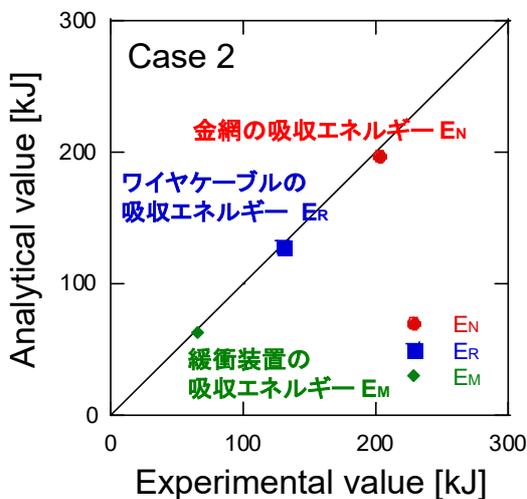
本資料の複製はご遠慮ください



34

主要部材の吸収エネルギーの比較

- 実物大実験と再現解析の主要構成部材の吸収エネルギーを比較



各部材の吸収エネルギー

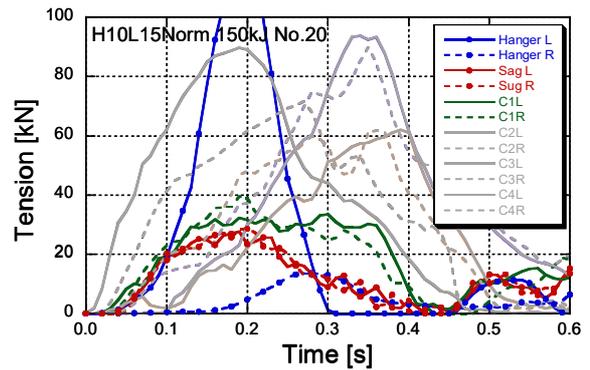
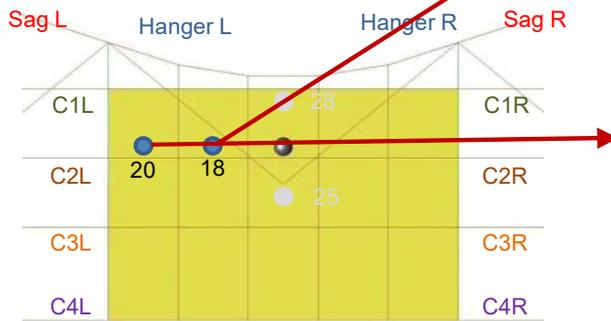
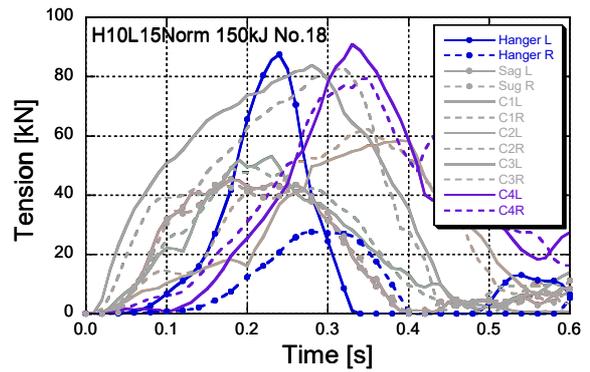
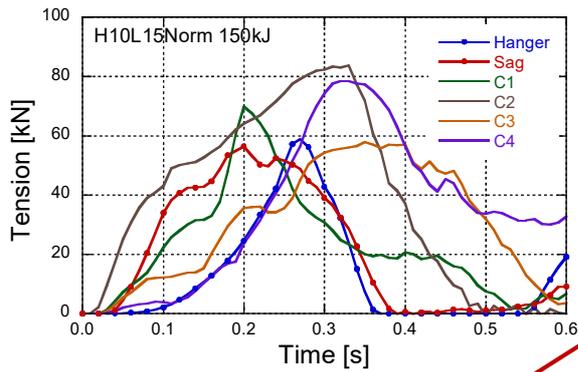
	実験値 [kJ]	解析値 [kJ]	誤差百分率 [%]
E_N	203	198	-2.6
E_R	129	129	-0.1
E_M	66	63	-5.2

$$\text{※誤差百分率} = \frac{\text{解析値} - \text{実験値}}{\text{実験値}} \times 100$$

本資料の複製はご遠慮ください

落石衝突位置による性能評価

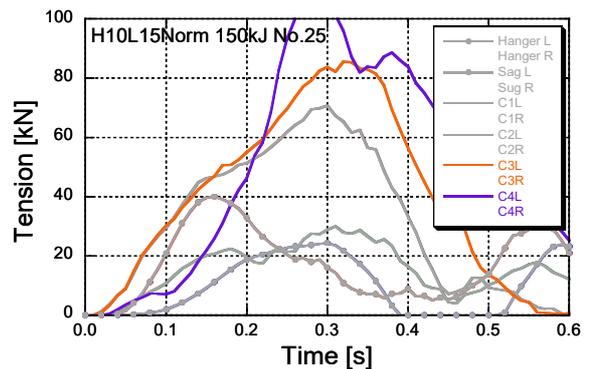
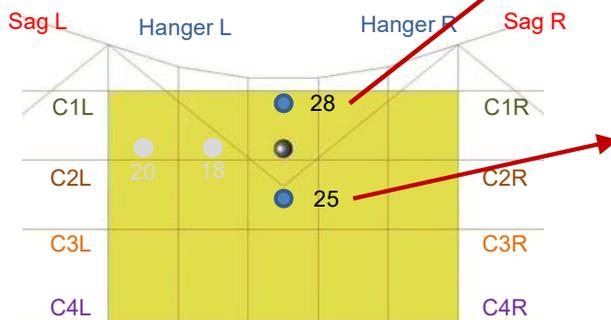
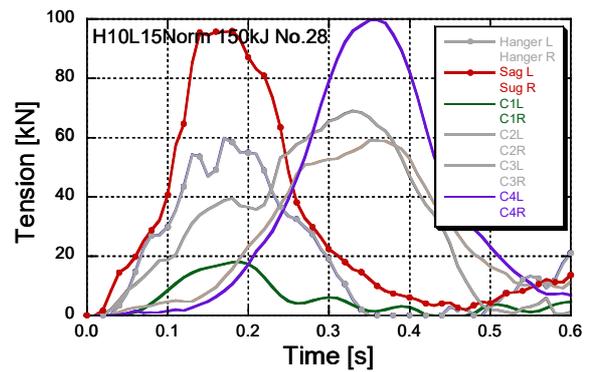
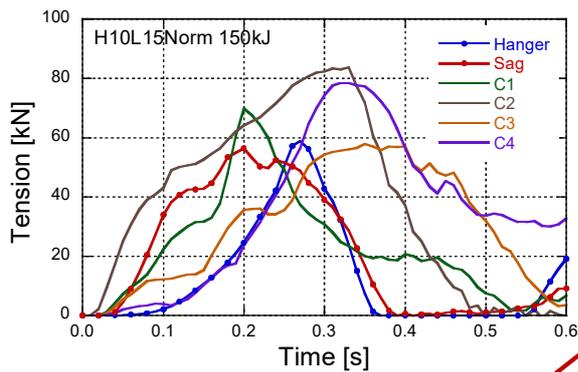
■ 水平方向



本資料の複製はご遠慮ください

落石衝突位置による性能評価

■ 鉛直方向



本資料の複製はご遠慮ください