

## 2.5 規模の大きな落石に対応する斜面对策工の性能照査技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究機関：平 23～平 27

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地構造）

研究担当者：西 弘明、今野久志、荒木恒也、山澤文雄

### 【要旨】

斜面对策工の一つとして採用事例が増加している高エネルギー吸収型を含む落石防護工の性能評価には統一的な指標がなく、開発者独自の実験や解析により行われていることから、それらに求められる機能を明確化するとともに、性能照査技術を確立することが必要である。

本研究では、落石防護工の要求性能の考え方について、海外基準や他の構造物の要求性能等を参考に提案を行った。従来型ポケット式落石防護網に関して、従来設計法に関する実験的・解析的検討により簡易式の適用範囲等を整理した。また、落石防護工の落石作用に対する部材・要素レベルおよび構造全体系の性能検証法について、実規模実験や数値解析結果等を踏まえた検討により提案を行った。

キーワード：落石防護工、落石防護網、性能照査技術、静的載荷実験、衝撃載荷実験、エネルギー吸収機構

### 1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路には、落石災害を防止するための様々な落石防護工が数多く建設されている。近年、緩衝装置等を組み込んだ高エネルギー吸収型と呼ばれる落石防護工（落石防護網や落石防護柵等）が開発され、経済性や適用範囲の広さから、現場適用事例が増えている。しかしながら、それらの性能評価については統一的な指標がなく、従来型との性能比較も曖昧で安全余裕度等も不明確である。

本研究では、落石防護工の要求性能の考え方について、海外基準や他の構造物の要求性能等を参考に提案を行った。

また、主としてポケット式落石防護網について、構成部材のエネルギー吸収機構の把握や数値解析における材料構成則の設定等を目的として、各種重錘落下衝撃実験を実施し、その挙動について検討を行った。これらの重錘衝突実験を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、解析手法の妥当性について検討を行った。以上の実験・解析を踏まえて落石防護工の落石作用に対する部材・要素レベルおよび構造全体系の性能検証法の提案を行った。

さらに、従来型ポケット式落石防護網に関して、従来設計法に関する実験的・解析的検討により簡易式の適用範囲等を整理した。

## 2. 部材の性能照査技術に関する検討(1)

### 2.1 目的

部材の性能照査手法策定に向けた基礎的検討とし

て、金網に対する静的および衝撃載荷実験を実施した。さらにエネルギー吸収機構を適切に評価可能な数値解析モデルの構築を目的に、金網を対象とした弾塑性衝撃応答解析を実施した。

### 2.2 実験概要

写真－2.1, 2.2 には、重錘落下衝撃実験の実験状況、金網の形状を示している。実験では重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルを用いて重錘衝撃力を、レーザ変位計を用いて重錘貫入量を測定している。また、支点用ロードセルを用いて反力を測定している。試験体の平面寸法は 700×700mm であり、φ3.2mm×50×50mm のひし形金網を使用している。なお、重錘落下衝撃実験は、直径 200mm、質量 500kg の鋼製重錘を所定の高さから自由落下させ、金網に衝突させる衝撃荷重載荷にて行っている。静載荷実験については、重錘先端部を載荷版とし油圧ジャッキを用いて実施している。

### 2.3 実験結果

#### 2.3.1 静載荷実験

図－2.1 には、静載荷実験における荷重－変位関係を示す。載荷荷重は、変位の増加に対応して二次放物線的に増加しており、最大荷重は 25.5kN、最大荷重時変位は 330.9mm であった。破壊形態は素線の破断である。

#### 2.3.2 重錘落下衝撃実験

表－2.1 には、重錘落下衝撃実験における供試体一覧を示している。また、実験により計測された重錘衝撃力および重錘貫入量の時刻歴応答波形の一例を図－2.2 に示す。



写真-2.1 実験状況      写真-2.2 金網の形状

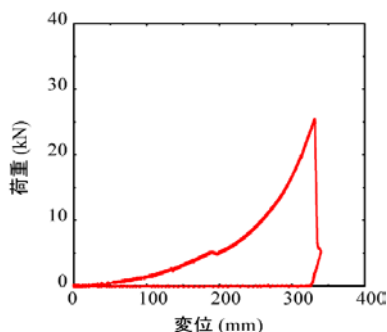


図-2.1 静載荷実験結果

重錘衝撃力波形より、重錘が金網に接触した後50ms程度より大きな抵抗を受けて衝撃力が急増し、一端ピーク値を示した後、除荷状態となりその後再び衝撃力が増加してピークを示す2波からなる性状を示している。その後、リバウンドによるものと思われる衝撃力の変動が示されている。重錘貫入量の応答波形より、重錘は金網に接触後ほぼ直線的に貫入量が増加し、200ms程度で最大貫入量に達した後、リバウンドによる振動状態を示している。

表-2.2には、重錘衝撃力、重錘貫入量の最大応答値一覧を示している。なお、N-IC-1.0、N-IS-1.74、NL-IS-1.0の重錘貫入量については、重錘が重錘脱落防止用のEPSと衝突したため正しい値を測定できていない。

実験結果より、重錘落下衝撃実験において金網が破断する場合の重錘貫入量は330mm程度と考えられ、静的載荷実験での最大変位と同程度の値であるものと推察される。

### 2.4 数値解析概要

図-2.3には、本数値解析で用いた解析モデルの要素分割状況を示している。モデル化に関しては、すべての要素を2節点梁要素でモデル化している。要素の積分点に関しては、計算精度を向上させるために2x2Gauss積分を用いている。なお、金網は複数本の素線を組み合わせた三次元的な構造であるが、本検討では、金網を便宜的に二次元として考え、梁要素を用いて簡略化したモデルを使用した。

図-2.4には、本数値解析における境界条件を示し

表-2.1 供試体一覧

試験体名	荷荷方法	スパン長 (mm)	衝突速度 (m/s)	破壊性状
N-IC-1.0	衝撃 繰り返し	700	1.0, 1.0	1回目の荷荷時には破断なし 2回目の荷荷時に破断, 重錘貫通
N-IS-1.0			1.0	破断なし
N-IS-1.42			1.42	破断なし
N-IS-1.74			1.74	重錘貫通
N-IS-2.0			2.0	荷荷点近傍にて一部破断
NL-IS-1.0	単一	1400	1.0	破断なし 重錘落下防止用 EPS に衝突

表-2.2 衝撃実験応答値一覧

試験体名	荷荷方法	衝突速度 (m/s)	入力エネルギー (J)	重錘衝撃力 (kN)	重錘貫入量 (mm)
N-IC-1.0	衝撃 繰り返し	1.0	250	20.9	272.8
		1.0	250	28.8	-
N-IS-1.0	衝撃 単一	1.0	250	31.4	288.5
N-IS-1.42		1.42	500	26.5	302.3
N-IS-1.74		1.74	750	28.8	-
N-IS-2.0		2.0	1000	29.4	335.2
NL-IS-1.0		1.0	250	25.8	-

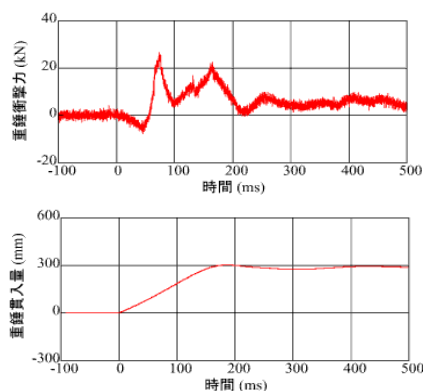


図-2.2 時刻歴応答波形 (N-IS-1.42)

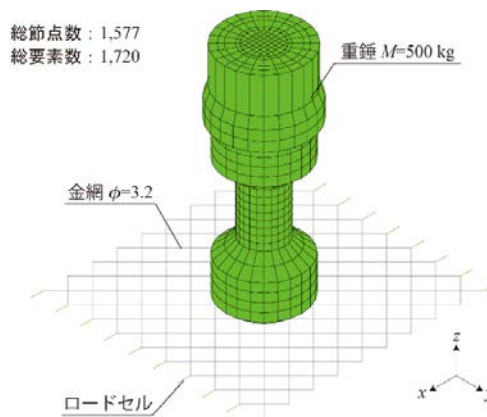


図-2.3 解析モデルの要素分割状況

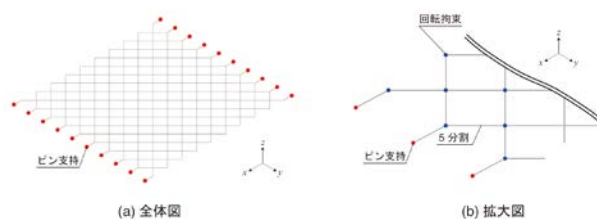


図-2.4 境界条件

ている。境界条件に関しては、ロードセル部分の節点に回転を許容する境界条件を設定し、ピン支持に近い構造を再現している。また、衝突体と金網の間には、面と節点との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。表-2.3 には、本数値解析に使用した物性値一覧を示している。なお、重錘の密度に関しては、質量を体積で除した値を使用している。図-2.5 には、事前実施された金網の引張試験より得られた応力とひずみ関係および数値解析で使用した材料物性モデルを示している。数値解析に適用したモデルに関しては、実験結果の応力とひずみ関係をトリニア型に近似したものである。なお、金網の降伏応力  $f_y$  は 350MPa と設定した。

表-2.3 物性値一覧

材料	密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 $E$ (GPa)	ポアソン比 $\nu$
緩衝ネット (φ3.5mm)	7.85	350	450	100	0.3
鋼材	7.85	-	-	103	0.3
重錘	-	-	-	206	0.3

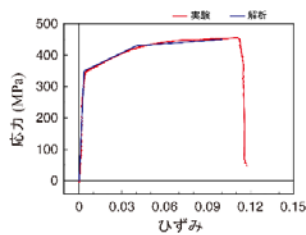


図-2.5 金網の応力-ひずみ関係

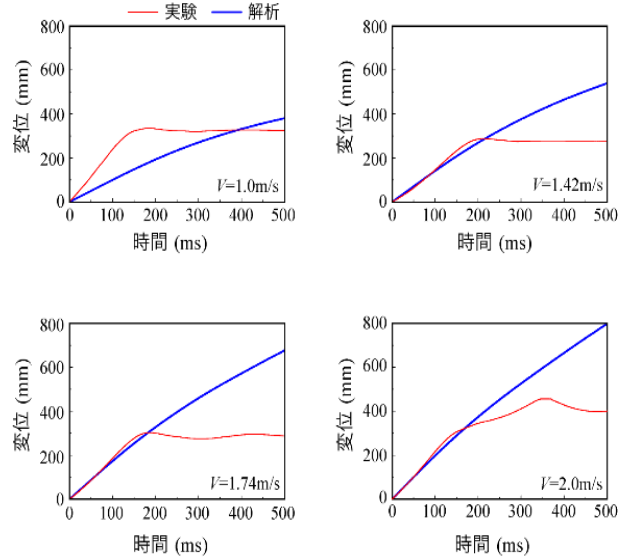
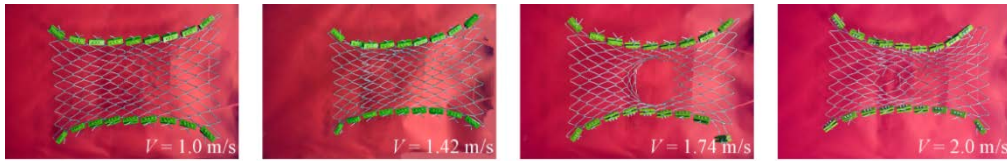
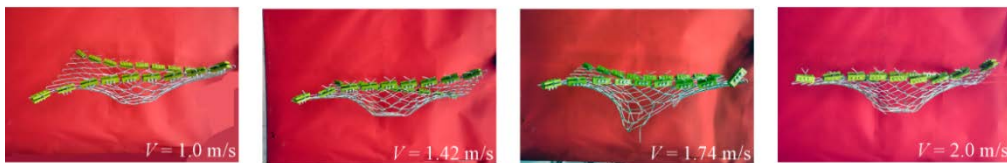


図-2.6 重錘貫入量波形

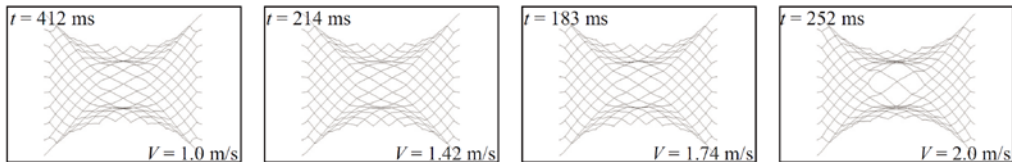


(a) 平面図

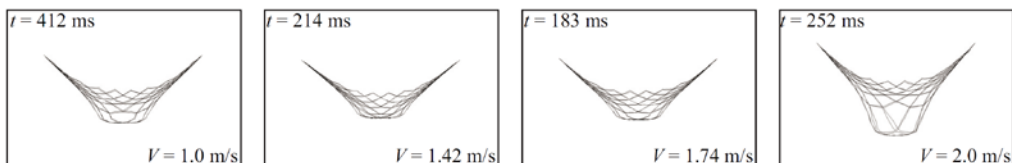


(b) 側面図

写真-2.3 実験終了後の変形状況



(a) 平面図



(b) 側面図

図-2.7 最大変位発生時刻の変形状況 (解析結果)

## 2.5 数値解析結果

図-2.6には、N-IS-1.0~2.0の4実験ケースに関する数値解析結果から得られた重錘貫入量の時刻歴波形を実験結果と比較して示している。

図より、重錘衝突速度  $V=1.0\text{m/s}$  を除き、解析結果は実験における重錘貫入量-時間関係における最大変位までの挙動を概ね再現できている。しかしながら、解析では重錘貫入量は時間とともに増加し続ける結果となっている。

写真-2.3、図-2.7には、実験終了後の金網の変形状況および解析結果における実験結果の最大変位に対応する時刻の変形状況を示している。なお、変形倍率はすべて等倍である。

図より、いずれの衝突速度においても実験時の最大変位発生時刻における解析の変形状況は実験結果を概ね再現できている。平面図では、重錘荷点近傍において金網端部が中央部に絞り込まれている状況や側面図ではスパン方向の支持部から荷点部に至るまでの形状等両者は良く対応している。

## 2.6 まとめ

- 1) 重錘落下衝撃実験において金網が破断する場合の重錘貫入量は、静的荷重実験での最大変位と同程度の値であるものと推察される。
- 2) 三次元弾塑性衝撃応答解析により、実験時の金網の変形性状を概ね再現可能である。

## 3. 部材の性能照査技術に関する検討(2)

### 3.1 目的

部材の性能照査手法策定に向けた基礎的検討として、ワイヤロープ端部処理として一般的に採用されている巻付グリップについて、その耐荷性状および荷重方法の違いによる影響を検討するための実験を実施した。

### 3.2 実験概要

図-3.1には、本実験で用いた供試体の形状と寸法を示す。供試体は加工長約2.00mとし、ワイヤロープ(3×7 G/O φ18mm)の一方の端部をシングル入りロック(圧縮)加工とし、他端にφ18mm用の長さ1.35mの巻付グリップを取り付けたものである。一部供試体には、巻付グリップの抜け出しを防止するため、ワイヤクリップを併用した。ワイヤクリップのナットの締付けトルクは、100 N・mとして管理した。また、ワイヤロープの破断荷重や衝撃実験時の想定荷重算

出のため、両端をロック加工した供試体についても併せて実験を実施した。

### 3.2.1 静荷重実験

表-3.1に静荷重実験ケースの一覧を示す。実験は500 kN 引張試験機にて供試体を引張り、ワイヤロープ・巻付グリップの破断あるいは巻付グリップが滑り出す際の最大荷重を確認した。

計測項目は引張荷重と変位、実験前後の供試体寸法である。なお、計測変位にはワイヤロープ自体の伸び、

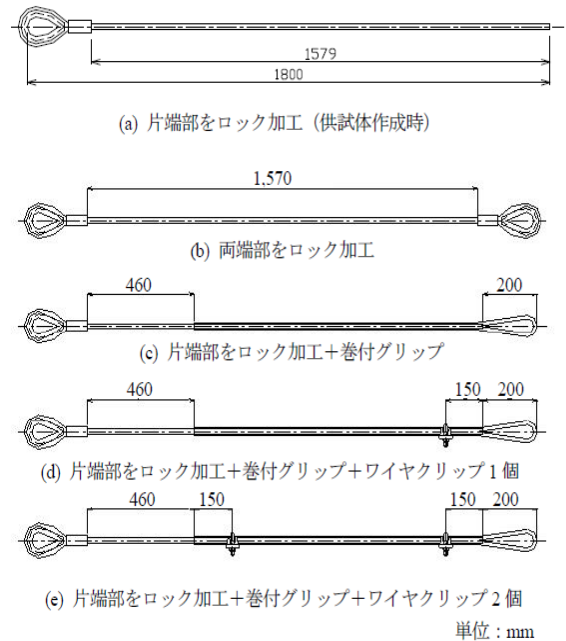


図-3.1 供試体形状と寸法図

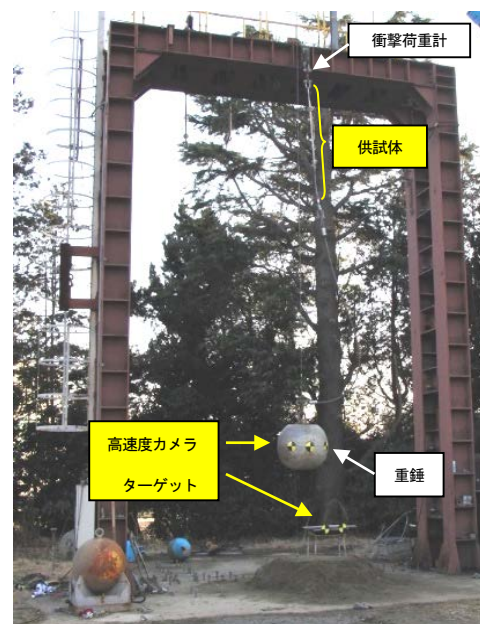


写真-3.1 衝撃荷重実験状況

表-3.1 静载荷実験ケース一覧

名称	供試体形状	最大荷重 (kN)	実験終了状況
a-1	両端部をロック加工	191	ワイヤーロープ破断
a-2	片端部をロック加工+巻付グリップ	181	巻付グリップ引抜け
a-3	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 1個	185	巻付グリップ引抜け
a-4	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 2個	193	ワイヤーロープ破断
b-1	両端部をロック加工	199	ワイヤーロープ破断
b-2	片端部をロック加工+巻付グリップ	188	巻付グリップ破断
b-3	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 1個	185	巻付グリップ破断
b-4	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 2個	187	巻付グリップ破断

表-3.2 衝撃载荷実験ケース一覧

名称	重錘質量 (kN)	落下高さ (m)	入力エネルギー (kJ)	供試体形状	最大荷重 (kN) (両端ロック加工)	最大荷重 (kN)	実験終了状況
a-0.5-1	15.2	0.50	7.5	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 1個	162.1	131	巻付グリップ引抜け有
a-0.5-2		0.50	7.5	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 2個	162.1	144	巻付グリップ引抜け有
a-0.75-2		0.75	11.4	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 2個	171.9	166	巻付グリップ引抜け有
a-0.75-2		0.75	11.4	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 2個	171.9	168	巻付グリップ引抜け有
a-1.0-1		1.00	15.2	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 1個	181.5	123	巻付グリップ引抜け重錘地上に落下
a-1.0-2		1.00	15.2	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 2個	181.5	168	巻付グリップ引抜け重錘地上に落下
b-0.5-0		0.50	7.5	片端部をロック加工+巻付グリップ	162.1	150	引抜け、破断なし
b-0.75-0		0.75	11.4	片端部をロック加工+巻付グリップ	171.9	169	巻付グリップ少し引抜け有
b-1.0-2		1.00	15.2	片端部をロック加工+巻付グリップ+ワイヤクリップ 2個	181.5	180	巻付グリップ引抜け重錘地上に落下

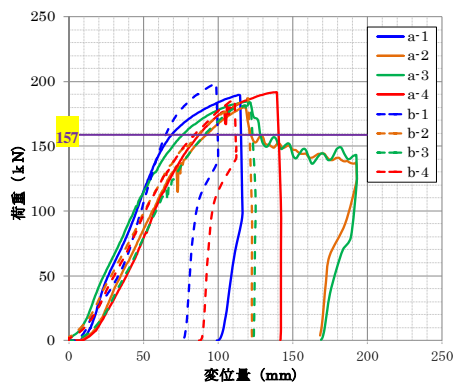


図-3.2 荷重-変位関係 (静载荷実験)

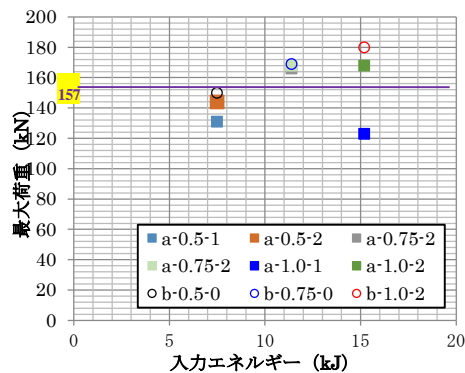


図-3.3 入力エネルギーと最大荷重の関係 (衝撃载荷実験)

端部(シングル)の変形、巻付グリップの抜けだし量が含まれる。

### 3.2.2 衝撃载荷実験

表-3.2に衝撃载荷実験ケースの一覧を、写真-3.1に衝撃载荷実験状況を示す。実験は門型フレームの横梁中央部に衝撃荷重計を介し、供試体の巻付グリップ側端部を吊下げ設置し、ロック加工側端部にφ26mmの連結ロープ(3.50m)を連結し、重錘をクレーンにより所定の高さより自由落下させることにより実施した。巻付グリップの長さは、a供試体が130mm、b供試体が140mmである。なお、衝撃実験には質量15.2kNの重錘を用いた。衝撃実験における計測項目は衝撃荷重計によるワイヤーロープ張力、高速度カメラによる挙動計測である。

## 3.3 実験結果及び考察

### 3.3.1 静载荷実験

表-3.1に、各実験ケースの最大荷重と実験終了時の状況を、図-3.2に荷重-変位関係を示す。

両端をロック加工した場合、実験ケースa-1が最大荷重191kN、変位約115mmで、b-1が同じく199kN、約100mmでワイヤーロープの破断に至っており、両者はほぼ同様な荷重-変位関係を示している。

一方、巻付グリップを用いた場合、a、b供試体で挙動が大きく異なっている。a供試体では、ワイヤクリップ無しおよび1個の場合、それぞれ最大荷重181kN、185kN(変位約120mm)に達した後、巻付グリップの引抜きが生じている。ワイヤクリップ2個の場合は、最大荷重193kN、最大変位約140mmでワイヤーロープの破断に至っている。これに対し、b供試体

では、ワイヤクリップの有無に係わらず、最大荷重約185 kN、最大変位110~120 mmで巻付グリップの破断に至っている。

静載荷実験の結果、巻付グリップを用いた場合の静的耐力は、ワイヤロープの破断荷重を若干下回るもの、5章の従来型ポケット式落石防護網におけるワイヤロープの設計破断荷重である157 kNを満足していることが確認できた。また、本実験条件では、ワイヤクリップを併用した場合、巻付グリップの種類によっては引抜け挙動を抑えることが可能であるが、静的耐力の向上効果はあまり期待できないことがわかった。

なお、a、b供試体の挙動の相違は、巻付グリップの長さでワイヤロープとの接合面である巻付グリップ内面の粗さの違いによるものと考えられる。

### 3.3.2 衝撃載荷実験

表-3.2に、各実験ケースの最大荷重と実験終了時の状況と両端をロック加工した場合の実験結果から得られた最大荷重を、図-3.3に最大荷重-入力エネルギー関係を示す。表に示すように実験時ワイヤロープの破断が確認されなかったことより、動的(衝撃的)耐力は、182 kN以上であるものと推察される。

表より、巻付グリップを用いた場合には、実験ケースb-0.5-0を除き、巻付グリップの引き抜けが生じており、最大荷重は両端ロック加工した場合と比較して小さな値となっていることがわかる。また、実験ケースa-1.0-1, a-1.0-2では、両者とも巻付グリップが完全に拔出しているが、ワイヤクリップを2個にすることによって、最大荷重は123 kNから168 kNに大きく増加していることがわかる。

衝撃載荷実験の結果、巻付グリップを用いた場合には静的耐力より低い荷重においても引き抜けが生じやすいこと、また、引き抜けが生じると緩衝装置を設置した場合のように、作用荷重が小さくなる傾向にあることがわかった。

### 3.4 まとめ

- 1) 巻付グリップを用いた場合の静的耐力は、ワイヤロープの破断荷重を若干下回るもの、ワイヤロープの設計破断荷重(157 kN)を満足している。
- 2) 巻付グリップを用いた場合には、動的(衝撃的)作用に対して、静的耐力より低い荷重においても引抜けが生じやすい。
- 3) ワイヤクリップを併用することにより、最大荷重が増加する傾向にある。

## 4. 部材の性能照査技術に関する検討(3)

### 4.1 概要

落石防護網・柵の構成部材であるひし形金網とワイヤロープのエネルギー吸収機構の把握や数値解析における材料構成則等の設定を目的として、静的載荷実験および重錘落下衝撃実験を実施し、その挙動について検討を行った。さらに、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、解析手法の妥当性について検証した。

### 4.2 静的載荷実験

#### 4.2.1 実験概要

実験概要を図-4.1に示す。実験は、H形鋼で構成される鋼製枠(寸法約6m×6m×3m)内に、3m間隔で縦横それぞれ2本のワイヤロープを設置し、ワイヤロープで囲まれる3m四方の領域にひし形金網(3.6m×3.3m)を設置して実験を行っている。表-2.1には、試験体に使用した部材の諸元を示している。ひし形金網には素線径の異なる3種類(3.2, 4.0, 5.0φ)を、ワイヤロープには18φを用いている。金網とワイヤロープとの接続は、25cmピッチで配置したU字ボルトを用いて固定している。また、ワイヤロープの交点はクロスクリップで固定した。ワイヤロープは両端アルミロックとし、ターンバックルとシャックルを介して鋼製枠にピン接合に近い状態で固定されている。

#### 4.2.2 実験方法

写真-4.1に実験状況を、図-4.1に重錘載荷位置および変位計設置位置を示す。実験は、H形鋼で構成される鋼製枠架台に水平に設置した試験体に、トラッククレーンで吊り下げた重錘により静載荷させて実施した。載荷には、質量10t(直径1.25m, 高さ95cm, 底部より高さ30cmの範囲が半径1mの球状)の重錘上部に鉛部材を設置し、総質量を約22 tに調整して使用している。本実験における測定項目は、重錘吊り下げ用のワイヤロープに取り付けたロードセルによる載荷荷重、架台の4本の支柱基部に設置したロードセルによる鉛直方向反力、ワイヤロープ端部のターンバックルに貼付した歪ゲージによるロープ張力、ワイヤ式変位計による金網の鉛直変位である。載荷位置は、金網中央の1箇所とした。なお、ワイヤロープには約10kNの初期張力を導入している。

#### 4.2.3 実験結果および考察

図-4.2には、3.2φ金網のケースにおける載荷荷重と金網の鉛直変位の関係を示す。図より、載荷点直下の測定点であるD-4に着目すると、載荷初期(数kN程度まで)においては、荷重の増加に対して変位の増加が大きいが、その後はみかけの剛性が大きくなり変位

増分が徐々に小さくなっていることがわかる。なお、  
 載荷途中ではU字ボルトのすべり等によるものと考えられる荷重の微増減を伴っている。本ケースでは、最大荷重時点で載荷点部近傍における金網に破断等が生じてはいなかったが、金網とワイヤロープの固定部の局所的な変形状況やロープ張力等から判断して、約75 kN（変位約1,100 mm）までの載荷とした。この荷重-変位関係から、本実験条件における金網とワイヤロープから構成される構造体の最大荷重作用時点までのエネルギー吸収量は約20 kJと算定される。なお、除荷時の残留変位は750 mm程度であった。載荷点以外の測定点に着目すると、重錘中心から1m離れた点（D-2, D-6）の鉛直変位は約500 mm、残留変位は250 mm程度であった。金網の素線径が太い場合（φ4.0, φ5.0）には、金網の見かけの剛性が大きくなる傾向にあるが、変形状についてはφ3.2のケースと類似なものであることを確認している。

図-3.3 には、同様に3.2φ 金網のケースにおける載荷荷重とワイヤロープ張力の関係を示す。なお各ロープで両端の張力がほぼ等しかったことから、片側の値で代表している。図より、載荷初期（載荷荷重10～15 kN）には荷重の増加は緩やかであるが、それ以降の荷重とロープ張力はほぼ線形関係にあることがわかる。ロープの最大張力に着目すると、T-1Aが100kNと他の張力に比較して大きな状態となっている。これは、金網の異方性（網目の向き）の影響に加えて、載荷点がT-1ロープ側に偏心してしまったことによるものと考えられる。他のケースでもロープ張力に対し、この金網の異方性の影響が明確に現れていることを確認している。

4.3 重錘落下衝撃実験

4.3.1 実験概要

重錘落下衝撃実験を実施した実験装置および試験

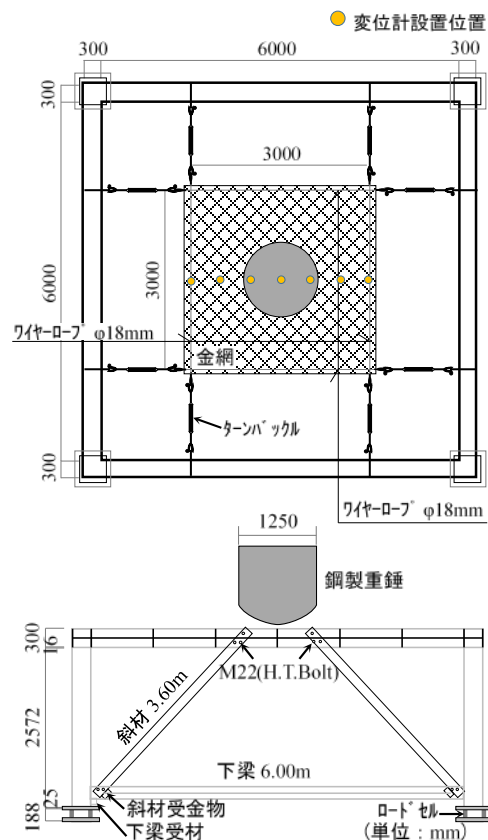


図-4.1 載荷実験の概要



写真-4.1 静的載荷実験状況

表-4.1 使用部材の諸元

材料名	諸元 部材耐力(規格値)
ひし形 金網	3.2φ×50×50mm 引張強さ: 386(290~540)N/mm <sup>2</sup>
	4.0φ×50×50mm 引張強さ: 389(290~540)N/mm <sup>2</sup>
	5.0φ×50×50mm 引張強さ: 387(290~540)N/mm <sup>2</sup>
ワイヤ ロープ	18φ 3×7G/O 両端アルミロック 破断荷重: 206(≥160)kN
ターン バックル	両アイ型 1×12 ねじ径 W=1 公称破断荷重: 222(ー)kN

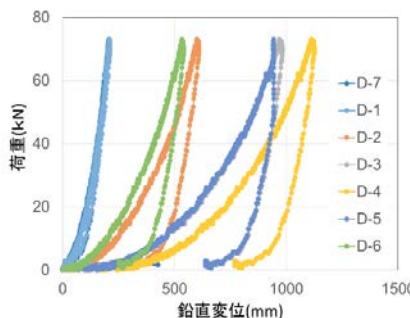


図-4.2 荷重-変位関係 (3.2φ)

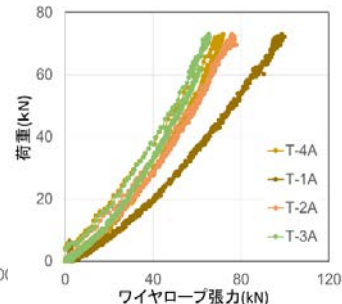


図-4.3 荷重-ロープ張力関係 (3.2φ)

体は図-4.1 に示すとおり、静的載荷実験と同一である。

4.3.2 実験方法

写真-4.2 には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。また表-4.2 には、実験ケース一覧を示している。実験では、入力エネルギーが異なる場合および重錘の回転エネルギーの影響を検討している。重錘に回転を与える実験は、多面体重錘に荷吊り用の帯を巻き付け自由落下時に回転を与えている。計測項目は、ターンバックルに貼付したひずみゲージによるロープ張力、高速度カメラ撮影による金網の載荷点直下の鉛直変位量である。なお、表-4.2 に示す回転エネルギーは、高速度カメラ映像により算定した値であり、回転エネルギーは全エネルギーの11~13%であった。

4.3.3 実験結果および考察

図-4.4 (a), (b) には、一例として実験ケース D5.0W3H10における金網の載荷点変位およびロープ張力の時刻歴応答波形を示している。ここで、ロープ張力に関しては金網の設置方向を考慮し、実斜面での設置状況に合わせて便宜的にワイヤロープを縦ロープおよび横ロープと区別して記述する。

(a) 図より、載荷点変位は重錘衝突後急激に増加し0.11sec後に最大変位1.12mに達した後、リバウンドし

表-4.2 衝撃実験ケース一覧

実験ケース名	金網 (mm)	重錘 (kN)	落下高 (m)	衝突エネルギー(kJ)		
				並進	回転	合計
D3.2W3H5	3.2	3	5.0	14.7	—	14.7
D3.2W3H7.5			7.5	22.1	—	22.1
D3.2W3H10			10.0	29.4	—	29.4
D4.0W3H5	4.0	3	5.0	14.7	—	14.7
D4.0W3H7.5			7.5	22.1	—	22.1
D4.0W3H10			10.0	29.4	—	29.4
D5.0W3H5	5.0	3	5.0	14.7	—	14.7
D5.0W3H7.5			7.5	22.1	—	22.1
D5.0W3H10			10.0	29.4	—	29.4
D3.2W3H10R	3.2	3	10.0	25.6	3.8	29.4
D4.0W3H10R	4.0			26.1	3.3	29.4
D5.0W3H10R	5.0			26.1	3.3	29.4

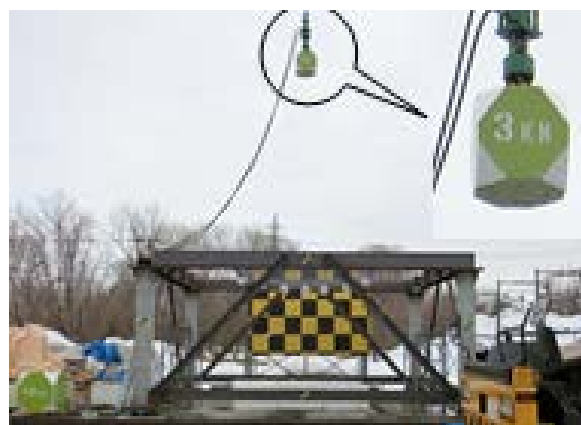


写真-3.2 衝撃実験の状況

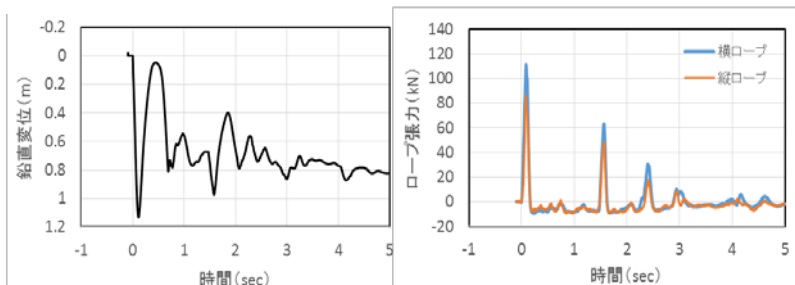


図-4.4 金網の載荷点変位およびロープ張力の時刻歴応答波形 (D5.0W3H10)

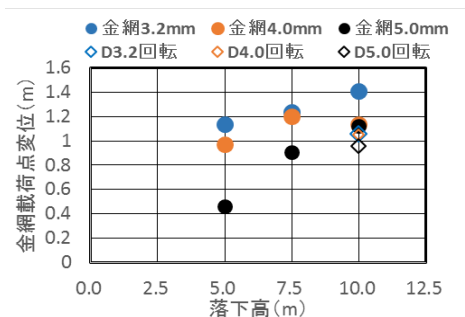


図-4.5 落下高と載荷点変位の関係

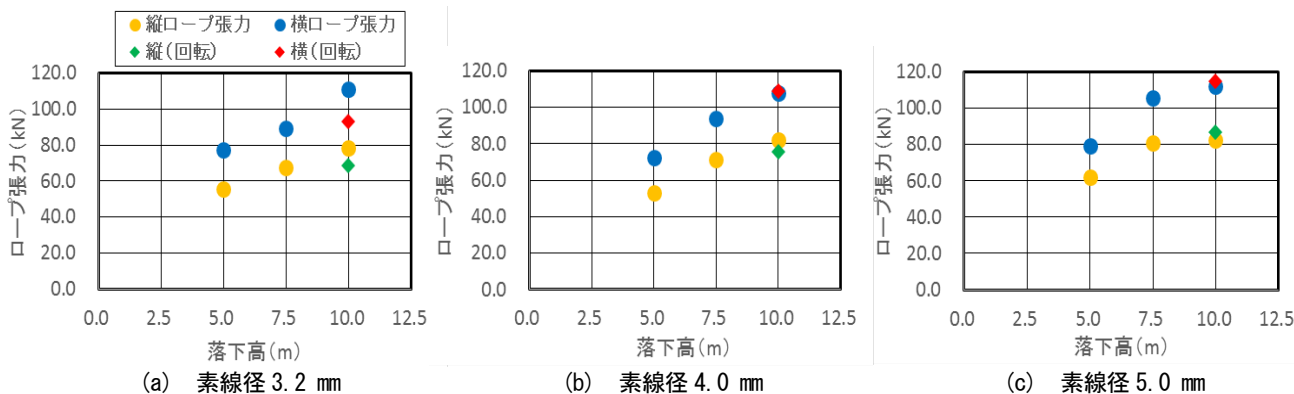


図-4.6 落下高とロープ張力の関係



ながら上下動を繰り返し、最終的に0.8m程度の残留変位が発生している。

(b) 図より、ロープ張力は、金網の载荷点変位波形に対応した波形性状を示しており、载荷点変位のピーク発生時点において各ロープ張力においてもピーク値が示されている。最大張力に関しては、横ロープが縦ロープに比較して30%程度大きな値を示している。これは、ひし形金網の異方性により、重錘衝突時における金網の変形に伴い、横ロープの方がより大きく载荷点側に引き寄せられるためと推察される。

図-4.6には、重錘落下高と金網の载荷点最大変位の関係を示している。素線径4.0mmの落下高10.0mにおける変位量が若干小さく示されているが、その他の実験ケースでは落下高の増加に対応して载荷点変位も増加する傾向が示されている。また、素線径で比較すると、素線径が小さくなるに従って変位量は大きくなる傾向が示されている。回転有りの実験では、素線径3.2mm, 4.0mm, 5.0mmでは、並進エネルギーが減少するため回転無しに比較してそれぞれ25%, 8%, 14%程度変位量が小さい。

図-4.6には、重錘落下高とロープ張力の関係を示している。ロープ張力は、重錘衝突位置の誤差等を考慮し、縦・横ロープそれぞれの平均値を採用した。いずれの素線径においても落下高の増加に対応して張力が増加している。また、横ロープの張力が縦ロープに比較して20~30%程度大きくなっている。重錘の回転の影響に関しては、3.2mmでは回転させた場合が小さく示されているが、それ以外の実験ケースについては両者ほぼ同程度の張力となっている。

#### 4.4 数値解析

##### 4.4.1 解析モデル

図-4.7には、本数値解析で用いた2種類の解析モデルを比較して示している。(a) 図は金網を膜要素でモデル化した場合、(b) 図は実際の形状を忠実に梁要素でモデル化した場合の要素分割状況である。なお、その他の構成部材に関しては両モデルで同一であり、鋼製型枠を構成しているH形鋼および溝形鋼は4節点シェル要素、ターンバックルは2節点梁要素、ワイヤロープは圧縮力を伝達しない2節点ケーブル要素、重錘およびロードセルは8節点固体要素を用いた。膜要素モデルの場合には重錘—金網間に、梁要素モデルの場合には金網の素線間および重錘—金網素線間に、面と面の接触および剥離・すべりを伴う接触面を定義した。なお、接触面における摩擦については静摩擦係数および動摩擦係数を0.4と設定した。また、境界条

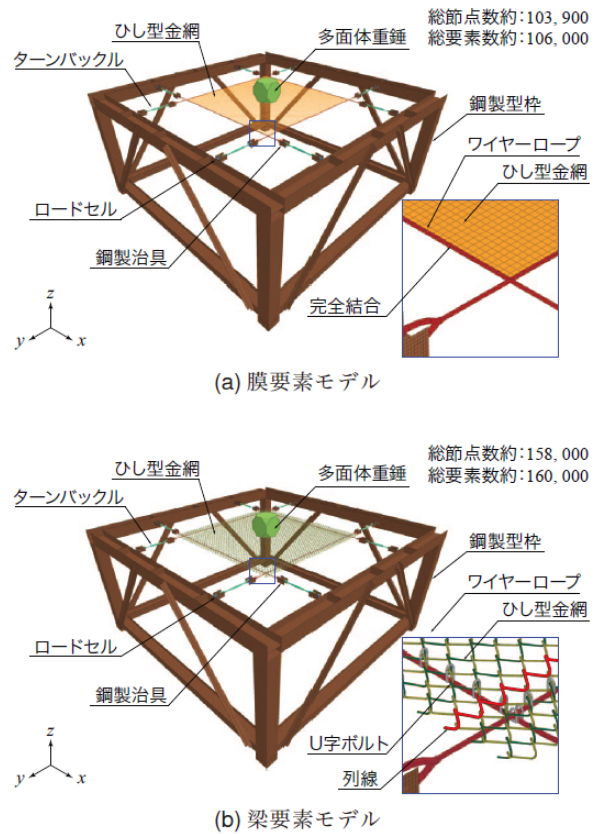


図-4.7 数値解析モデル

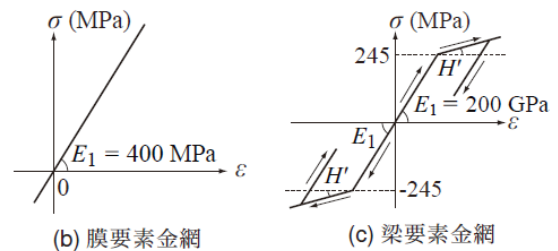
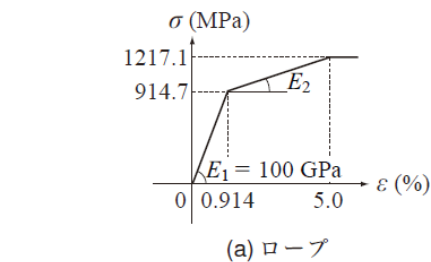


図-4.8 応力-ひずみ関係

件は実際の実験条件と同様に柱基部を完全固定としている。

数値解析は、重錘に落下高さ H から算出された衝突速度を重錘に初速度として付加し、金網中央部に重錘が回転することなく、水平に落下するものと仮定した。解析時間は 200ms とし、本数値解析では減衰を考慮していない。

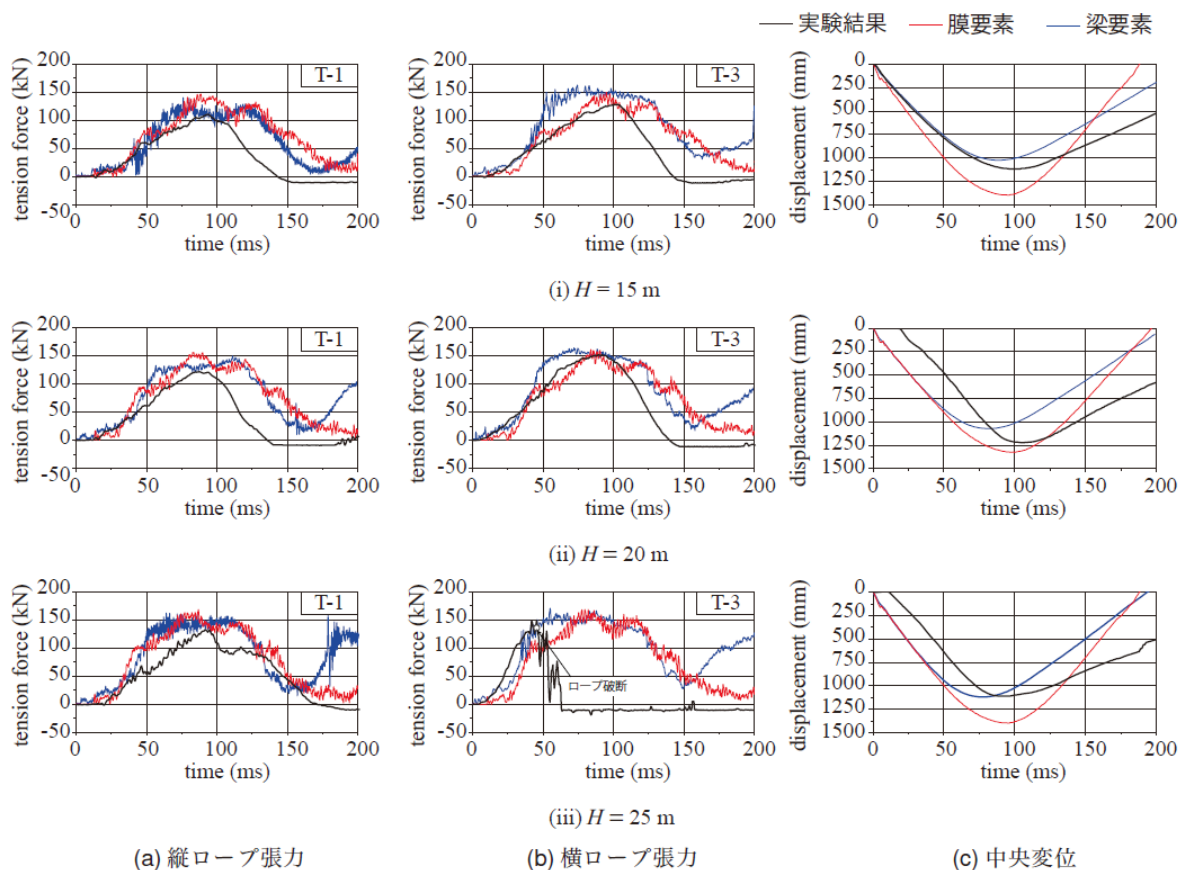


図-4.9 各種応答波形

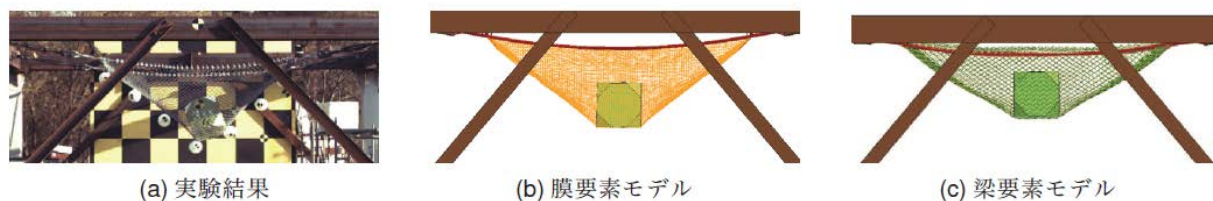


図-4.10 最大変位時における金網の変形状況(H=15m)

#### 4.4.2 材料構成則

図-4.8(a)には、ワイヤロープの応力-ひずみ関係を示している。ここでは、引張側をトリリニア型とする非線形弾性体モデルを適用した。なお、各ロープの一次弾性係数 $E_1$ および強度特性(降伏応力および破断強度)は、落石対策便覧<sup>1)</sup>を参考に決定し、破断ひずみを5%と設定した。(b)図には、膜要素モデルで使用した金網の応力-ひずみ関係を示している。金網に関しては、重錘衝突位置近傍において局所的な塑性化が生じるものと考えられるが、実験では金網が破断すること無く、重錘を捕捉していることから等方弾性体としてモデル化した。なお、弾性係数は既往の研究成果を参考に $E_1 = 400 \text{ MPa}$ と設定した。(c)図には、梁要素モデルで使用した金網の応力-ひずみ関係を示している。ここでは、塑性硬化係数 $H'$ を弾性係数の1%と

するバイリニア型の等方硬化則を適用した。なお、降伏の判定にはvon Misesの降伏条件式を採用している。鋼製型枠、鋼製治具、ターンバックル、梁要素モデルのU字ボルトおよびクロスクリップに関しては、実験時に塑性化が生じていないことより、弾性体と仮定した。また、重錘に関しても弾性体と仮定し、質量300 kgとなるように単位体積質量を換算している。

#### 4.4.3 数値解析結果および考察

図-4.9には、ロープ張力(T1, T3)および試験体中央の変位の実験結果と解析結果を比較して示している。なお、時間軸のゼロは、重錘が金網に衝突した時刻を意味する。(a)および(b)図に示す縦および横ロープ張力に着目すると、両モデルの数値解析結果は、実験結果の波形の立ち上がりおよび最大値をほぼ適切に再現している。なお、金網について膜要素を使用し

てモデル化した場合には、縦ロープ張力を実験結果と比較して大きく評価する傾向にあることを確認<sup>2)</sup>しており、その要因として、金網が有する剛性の異方性を考慮していないこと、実験ではロープと金網の結合に結束コイルを用いているのに対して数値解析では完全結合と仮定していることが挙げられている。

一方、本解析では、各ロープと金網の接合に素線の一山ごとにU字ボルトを使用して結合していることから、金網の異方性の影響が小さく、結果として両モデルにおける解析結果に大きな差が生じていないものと推察される。なお、ロープ張力の作用継続時間は、落下高さが大きくなるほど長くなる傾向にある。また、解析結果はH=25mを除き、各ケースの実験結果より作用時間が長くなっている。なお、H=20,25mにおける実験結果の波形の立ち上がり時刻が遅れている原因は、重錘が傾いた状態で金網に衝突すること、および重錘が金網中央部に落下していないことなどによるものと判断している。

(c) 図に示す金網のたわみ量に着目すると、膜要素モデルも梁要素モデルにおいても、波形の立ち上がり勾配(初期勾配)は、実験結果とほぼ一致している。一方で最大変位量を見ると膜要素の場合には、実験結果よりも大きくかつ除荷時の勾配も急であるのに対し、梁要素の場合には、最大値および除荷勾配ともに実験結果とよく一致している。

図-4.10には、h=15mにおける最大変位時刻の金網の変形状況を比較して示している。(a) 図に示す実験結果に着目すると、重錘が左側に回転し、かつ金網中央部に落下しておらず、金網は非対称な変形状況となっていることが分かる。一方、(b) 図に示す膜要素モデルの場合には、重錘端部からほぼ直線状に金網が変形している。また、梁要素の場合には、膜要素と比較して金網が曲線状に変形していることが分かる。

図-4.11には、落下高さh=25mにおける両モデルの最大変位発生時刻における金網の応力分布を比較して示している。なお、膜要素はMises応力、梁要素は梁軸方向に発生する応力である。図より、膜要素モデルに関しては、重錘衝突位置から同心円状に応力が分布していることが分かる。また、金網の端部の変形も縦・横で対称であることが分かる。一方、梁要素モデルの場合には、比較的大きな応力が重錘衝突位置からワイヤロープ交点に向かって分布しており、重錘衝突位置には、降伏応力を超える応力が発生している。さらに金網端部の変形を見ると横ロープの方が縦ロープの方よりも大きく変形していることが分かる。これ

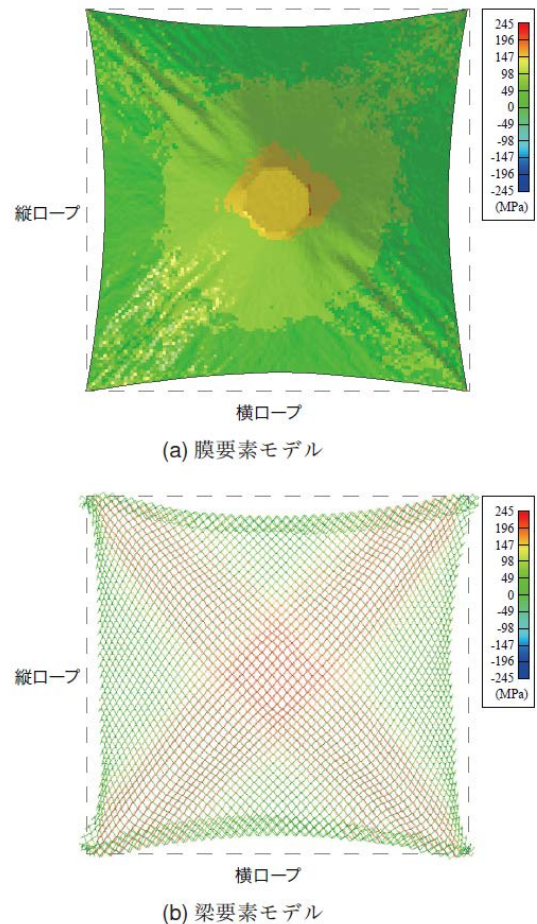


図-4.11 金網応力分布(H=25m)

より梁要素を用いることによって金網の異方性を再現可能であることが分かる。なお、解析時間に関しては、梁要素モデルは膜要素モデルの約1.8倍程度である。

#### 4.5 まとめ

- 静的載荷実験より、
  - 1) 素線径 3.2mm のひし形金網に対する 75kN 載荷時の載荷点変位は約 1,100mm であり、この時点までのエネルギー吸収量は約 20kJ と算定される。
- 重錘落下実験より、
  - 2) 金網の載荷点変位およびロープ張力は、落下高の増加に対応して大きくなり、素線径が小さいほど変位量が大きくなる。また、ロープ張力は、金網の異方性の影響により横ロープの方が縦ロープよりも大きい。
  - 3) 全衝突エネルギーが同一の場合、重錘の回転が有る場合、並進エネルギーが減少するためか回転無しに比較して載荷点変位は小さく示される傾向にあるが、ロープ張力に関しては明瞭な違いは見られなかった。

- ・ 数値解析より、
  - 4) 提案の材料構成則および解析手法を用いることにより、縦・横ロープ張力および荷点中央変位の作用時間に若干の差異が見られるものの波形の立ち上がり勾配および最大値について実験結果を適切に評価可能である。
  - 5) 梁要素モデルについては、中央変位の除荷勾配および実験の金網の最大変位時の金網の変形状況を再現可能である。また、金網の実際の形状を忠実にモデル化することで、金網の異方性を再現可能である。

## 5. 構造全体系の性能照査技術に関する検討

### 5.1 目的

従来型のポケット式落石防護網に対し、エネルギー吸収機構等を詳細に検討するための実規模重錘衝突実験を実施し、耐衝撃挙動について検討を行った。また、数値解析により、解析手法の妥当性について検証した。

### 5.2 重錘衝突実験の概要

#### 5.2.1 供試体

図-5.1 に実験供試体の正面図および側面図を、表-5.1 に供試体の設計条件を示す。

落石防護網を構成する部材の諸元は、表に示すように、落石対策便覧<sup>1)</sup>における設計法を参考に、落石の衝突前後のエネルギー差  $E_L$  を考慮し決定した。

供試体の形状寸法は、従来型のポケット式落石防護



写真-5.1 実験状況

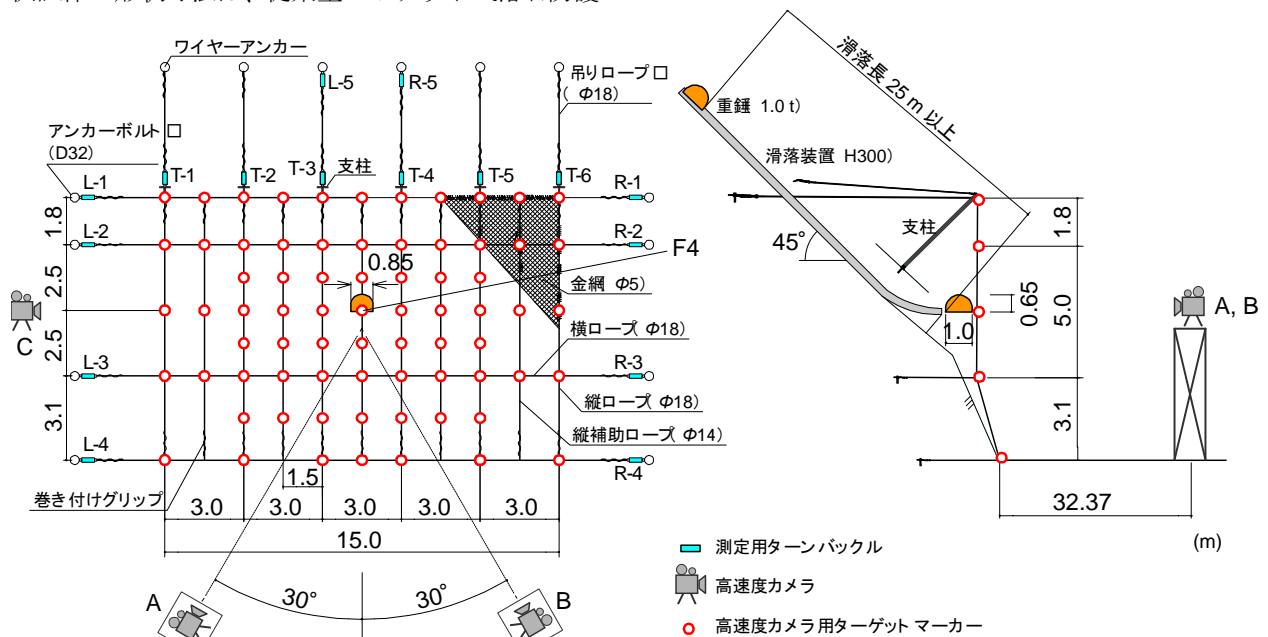


図-5.1 供試体の正面図および側面図

網で標準的な支柱間隔 3m を基本として、金網全幅を 5 スパン分の 15m とし、実験施設規模から金網高さを 10m に、支柱高さを 3.5m に設定している。従来型における金網としては、一般にひし形金網  $\phi 3.2 \sim 5.0 \times 50 \times 50$  mm が用いられているようであるが、本実験では  $\phi 5.0$  mm のものを選定している。なお、金網は幅 3.3m のものを重ね代 0.3m でラップさせて設置している。吊りロープおよび縦・横ロープには  $\phi 18$  mm を、アンカーボルトには D32 (M30)  $\times 1000$  用いている。なお、縦ロープの間隔は 1.5 m、横ロープの間隔は 5.0 m を基本に考えたが、重錘衝突の設定位置と重錘滑落装置の高さの関係から、横ロープは図に示すように変則的な配置としている。ワイヤロープの各交点にはクロスクリップを、ワイヤロープと金網の結合には  $\phi 4.0$  mm の結合コイルを縦 (横) ロープには 5 (3) m に 8 (4) 個を使用している。横ロープの端部処理には、一般に採用されている巻付グリップを用いているが、巻付グリップの引き抜けを防止するためワイヤクリップを併用した。また、巻付グリップとアンカーボルトの連結には、ターンバックルおよび取付け金具を使用している。

### 5.2.2 実験方法

実験は図-5.1 に示すように、実験施設内の傾斜角度約  $45^\circ$  の法面に固定された重錘滑落装置に、所定の高さで設置した重錘を滑落させて、供試体に衝突させることにより実施した。写真-5.1 に実験状況を示す。

便覧における設計上の落石の作用位置は、上端横ロープと 2 段目の横ロープの中央、縦ロープ方向については支柱間隔中央とされている。しかしながら、本実験においては、重錘滑落装置との位置関係から前述のように 2 段目と 3 段目横ロープの中央位置に重錘を衝突させている。重錘の質量は 1.0 ton、形状は幅 80 cm  $\times$  高さ 75 cm  $\times$  長さ 95 cm であり、衝突部が球面形状となっている。

本実験における測定項目は、ロープ端部のターンバックルに貼付した歪ゲージによるロープ張力、支柱 H 形鋼の基部に貼付した歪ゲージによる軸力、高速度カメラによる金網の二次元及び三次元変位等である。実験時のロープ張力等の応答波形は、サンプリングタイム 0.1ms でデータレコーダにて一括収録を行っている。

表-5.2 に実験ケースの一覧を示す。落下条件は落石持込みエネルギー  $E_W$  が、エネルギー差  $E_L$  を除く可能吸収エネルギーを下回る落下高さ  $H=6$  m を基準として設定したものである。なお、重錘衝突により金

表-5.1 供試体の設計条件

	(kJ)	諸元
落石持込エネルギー $E_W$	150.10	$W = 1 \text{ t}, H = 17 \text{ m}, \theta = 45^\circ$
吸収可能エネルギー $E_T$	151.26	$E_N + E_R + E_P + E_{ER} + E_L$
(a) 菱形金網 $E_N$	61.49	$5.0\phi \times 50 \times 50 \text{ mm}$
(b) 横ロープ $E_R$	14.78	$18\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 27 \text{ m}$
(c) 支柱 (ピン構造) $E_P$	0.00	$H100 \times 100 \times 6 \times 8, L = 3.5 \text{ m}$
(d) 吊りロープ $E_{ER}$	0.71	$18\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 8 \text{ m}$
(e) 縦ロープ	-	$18\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 10 \text{ m}$
(f) エネルギー差 $E_L$	74.28	
横ロープ端部アンカー		D32 (M30) $\times 1000$

$E_T > E_W$  となるように設計

網およびワイヤロープの一部には塑性変形が生じることになるが、金網の交換を行ったのは実験ケース No.1-3 の終了後のみであり、No.1-と No.2-では、それぞれ同一の金網を使用している。

### 5.2.3 挙動計測方法

本実験では、金網の挙動を詳細に把握するため、2 台の高速度カメラ (A, B) を用いた三次元挙動計と、重錘による入力エネルギーや最大変位量を確認するため 1 台の高速度カメラ (C) で側面からの二次元挙動計測を行った。三次元計測に用いたカメラ A, B は、実験条件を踏まえて冬期の屋外で使用できること、撮影距離が 20 m 以上で 1ms 程度の分解能を有することなどを条件に選定した。カメラ A, B は時刻歴変位を一致させるため同一有効画素数  $1,024 \times 1,024$  とし、フレームレート 250 コマ/秒 (1 / 250 sec) にて収録している。一方、二次元計測においては、有効画素数  $640 \times 480$ 、フレームレート 400 コマ/秒 (1 / 400 sec) にて収録している。

全ての撮影は、解析精度向上のためにモノクロとした。なお、三次元計測用高速度カメラとデータレコーダとの同期に関しては、カメラから出力される 5V のマーカーをデジタルデータレコーダにて収録することによって対応した。図-5.1 に示すように、高速度カメラ撮影用のターゲットマーカーとして、白色の EPS (発泡スチロール) 製球体 ( $\phi 200$  mm) を金網上の縦横ロープの交点を中心に 72 点 (図中○印) 設置している。

## 5.3 重錘衝突実験結果および考察

### 5.3.1 損傷状況等の概要

表-5.2 に損傷状況の概要を、写真-5.2 に実験後の横ワイヤ端部およびアンカー破断部の状況を、また、表-5.3 に全実験ケースにおけるワイヤロープの最大張力の一覧を示す。

表-5.2 実験ケースと損傷状況の概要

ケース名	H(m)	$E_{wd}$ (kJ) (設計※)	$E_{we}$ (kJ) (計測※※)	損傷状況の概要	備考
No.1-1	6.0	53	50	重錘衝突部の金網の塑性変形	金網新材
No.1-2	12.0	106	95	3段目横ロープ左側の取付け金具の破断・右側アンカーボルト周辺の岩盤の局部破壊・巻付グリップの緩み	金網再利用
No.1-3	6.0	53	49	3段目横ロープ左側のアンカーボルトの破断	金網再利用, 取付金具撤去
No.2-1	6.0	53	45	最下段(4段目)横ロープ右側のアンカーボルトの破断・横ロープの緩み	金網新材(交換)
No.2-2	18.0	159	142	3段目横ロープ右側のアンカーボルトの引抜	金網再利用

落石持込エネルギー算出時の重錘速度 ※:理論速度, ※※:二次元高速度カメラ計測結果より

本実験で使用したワイヤロープ  $\phi 18$  mm のミルシートによる破断荷重は 190 kN、アンカーボルト D 32 (M30) の設計せん断耐力は 111kN であることから、横ロープに想定以上の張力が作用したことによって、ロープの破断には至らずにアンカーボルト部での損傷が生じたものと考えられる。

なお、各ケースにおいて、特に下段横ロープ端部の巻付グリップには緩み(抜け出し)が確認されているが、巻付グリップの動的耐荷性状については3章で別途検討を行っている。

### 5.3.2 ワイヤロープ張力

図-5.2に、実験ケース(No.1-1:青実線、No.1-2:赤実線、No.2-1:青破線、No.2-2:黒実線)におけるワイヤロープ張力の時刻歴波形を示す。L-1~4は横ロープ左端、R-1~4は横ロープ右端、T-2~5は吊りロープの張力である。ここで、表-3に下線で示している、実験ケース No.1-1のL/R-3, 4, No.2-1のR-4は40kN程度でレンジオーバーのため頭打ちとなっている。吊りロープの応答波形には一部に高周波成分が確認できるが、全データについてフィルター処理等は行っていない。なお、No.2-1はNo.1-1と同一の落石持込エネルギーの実験ケースであるが、両者はほぼ類似の波形性状となっており、比較的再現性の高い実験を実施できたと考えられる。

図より、横ロープ張力に着目すると、左右で概ね等しい応答波形となっていること、重錘衝突点より下方L/R-3/4の張力が上方L/R-1/2に比較して大きな値を示していることがわかる。縦ロープ張力に着目すると、衝突位置を中心として左右で概ね対象な応答波形となっており、重錘衝突点の近傍のT-3/4が大きな値



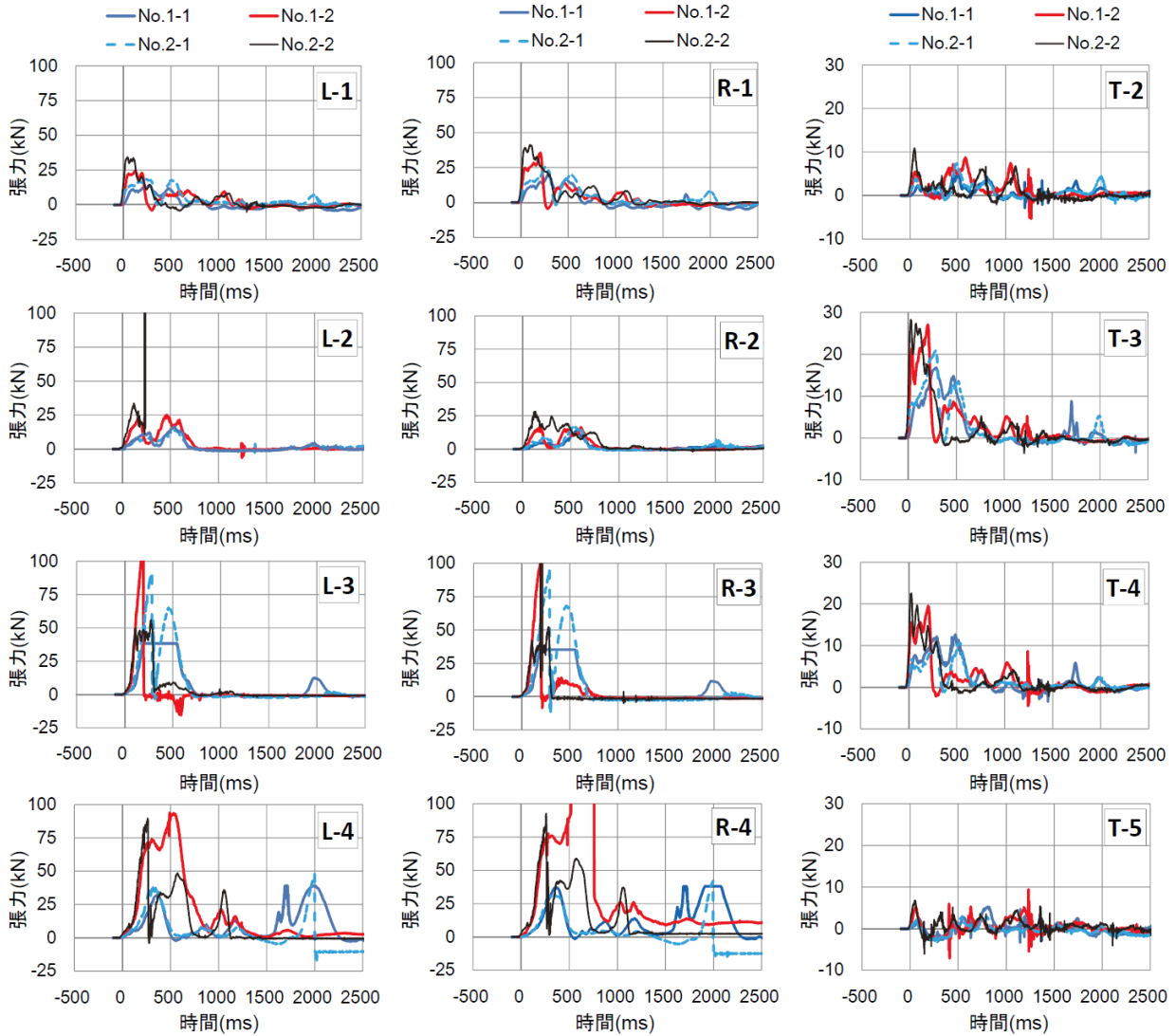
写真-5.2 アンカー破断状況

を示していることがわかる。縦ロープ張力の応答波形は重錘衝突直後に急な立ち上がりを示しているが、特に落石持込エネルギーが大きくなるとより急激な立ち上がりとなっている。一方、横ロープ張力はL/R-1で入力エネルギーが大きい場合には縦ロープと同じように急な立ち上がりであるが、下方のロープほど緩やかな立ち上がりとなっている。

各実験ケースの波形性状は、No.1-1/2-1においては二つの大きなピーク(300 ms と 2000 ms 前後)がみられるが、二つ目のピークは回転する重錘が地盤面に着地し、リバウンドすることに伴って、最下段のロープに大きな張力が作用しているものと考えられる。No.2-1ではこの二つ目のピーク時点でR-4箇所において部材が破断している。また、L/R-3やT-3/4で顕著であるが、一つ目のピークでは急激な張力の増加後、急激な低下と急激な増加が生じているが、これはワイヤロープ端部の振れに伴う張力変化が計測されたことによるものと考えられる。

実験ケース No.1-2においては、金網の最大変位発生前後で、重錘が3段目の横ロープ位置に達する前にL-3位置で部材の破断が発生している。これに対応してL/R-3の応答波形は200 ms経過時点でピークに

2.5 規模の大きな落石に対応する斜面对策工の性能照査技術に関する研究



(a) 横ロープ左端 (b) 横ロープ右端 (c) 吊りロープ

図-5.2 ワイヤロープ張力の時刻歴波形

表-5.3 ワイヤロープの最大張力一覧

ケース (落下高さ)	横ロープ張力(kN)				吊りロープ張力(kN)					
	L-1/R-1	L-2/R-2	L-3/R-3	L-4/R-4	T-1	T-2	T-3/L-5	T-4/R-5	T-5	T-6
No.1-1 (H=6m)	14.2	14.2	<u>38.3</u>	<u>39.1</u>	6.1	5.3	16.9	12.7	5.3	18.8
	20.0	14.1	<u>35.3</u>	<u>38.1</u>			16.8	12.3		
No.1-2 (H=12m)	24.5	25.2	<b>111.2</b>	94.0	13.7	8.8	27.1	19.6	9.4	16.4
	35.6	16.6	101.3	—			27.7	20.3		
No.1-3 (H=6m)	17.7	14.5	—	51.5	7.3	6.8	23.0	19.9	4.8	11.8
	26.3	7.6	83.8	46.7			23.3	20.9		
No.2-1 (H=6m)	18.4	16.3	92.6	48.0	6.7	7.4	20.9	10.7	3.0	11.6
	25.5	17.1	96.6	<b>42.2</b>			20.8	10.6		
No.2-2 (H=18m)	34.4	—	56.1	89.8	14.2	10.9	28.3	22.6	6.8	29.3
	41.3	28.3	—	92.7			28.3	22.9		

※赤字は部材破断箇所，下線はレンジオーバー，— は異常値により評価から除外

達した後、ほぼ零レベルまで急激に低下している。その後、500 ms 経過時点で L/R-4 の張力がピークに達している。

実験ケース No.2-2 では、R-3 箇所ではアンカーの引き抜けが生じているが、これに対応して L/R-3 において約 300 ms 経過時点で張力の低下が生じている。L/R-4 の張力は、L/R-3 よりも若干早くピークを迎え、一度零レベルまで低下した後、約 600 ms 経過時点で 50 kN、1,100 ms 経過時点で 40 kN 程度に達している。

本実験で用いた横ロープの設計張力は約 83 kN であり、落下高さ 6 m の条件においても、重錘の衝突状況によっては同程度以上の張力が作用するケースがあること、このことよりロープ端部の定着箇所には大きな損傷が生じることを確認できた。一方、縦ロープの設計増加張力は約 30 kN であるのに対し、設計上とほぼ落石持ち込みエネルギーの等しい実験ケース No.2-2 の T-3 で約 30 kN となっており、ほぼ等しい張力となっていることが分かった。

5.3.3 部材の三次元挙動

図-5.3 に実験ケース No.1-1 における高速度カメラ

C による左側面からの二次元挙動計測例、図-5.4 に三次元挙動計測例、図-5.5 に三次元挙動による金網の変位分布、図-5.6 に時刻歴変位波形(図-5.4 中の F4 点の Y 方向) の解析例を示す。

各実験ケースとも、挙動計測によって重錘の金網への衝突から地盤面に落下していくまでの様子を把握できており、最大変位は衝突より概ね 0.5 sec 程度で、3 段目の横ロープ位置において発生していることなどが画像からも確認できている。

表-5.4 には、金網の重錘衝突位置(横方向の中心線)

表-5.4 最大変位量

ケース名	H (m)	二次元計測による最大変位量(m)	三次元計測による最大変位量(m)
No.1-1	6.0	2.05	1.86
No.1-2	12.0	2.94	2.77
No.1-3	6.0	2.44	2.30
No.2-1	6.0	2.00	2.16
No.2-2	18.0	3.26	3.11

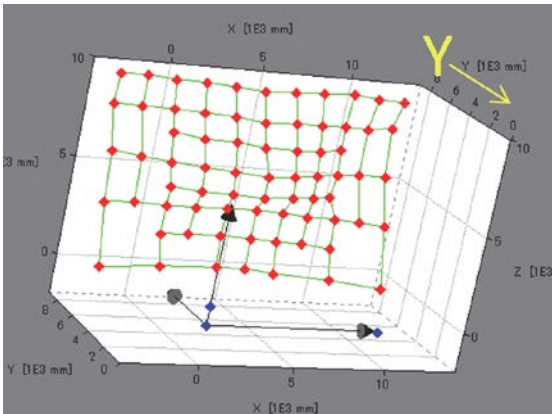


図-5.3 二次元挙動計測例

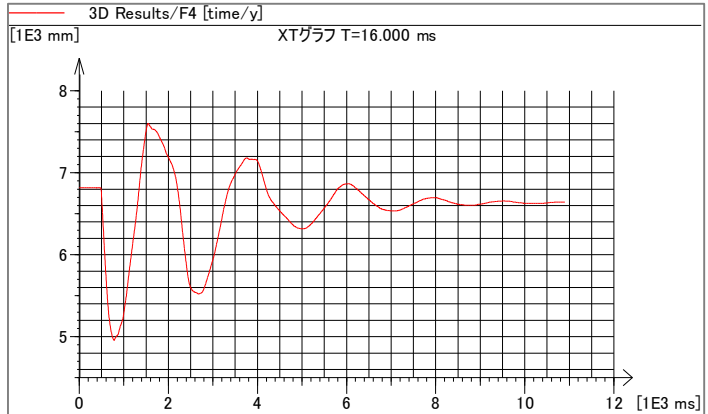


図-5.4 三次元挙動計測例

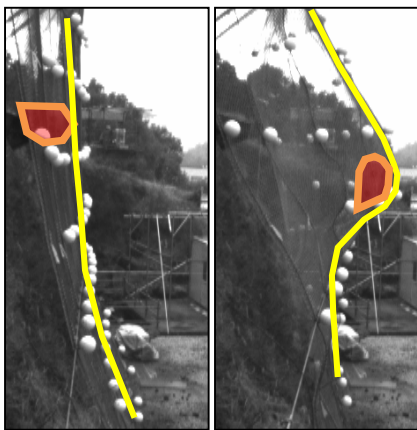


図-5.5 三次元変位分布解析例

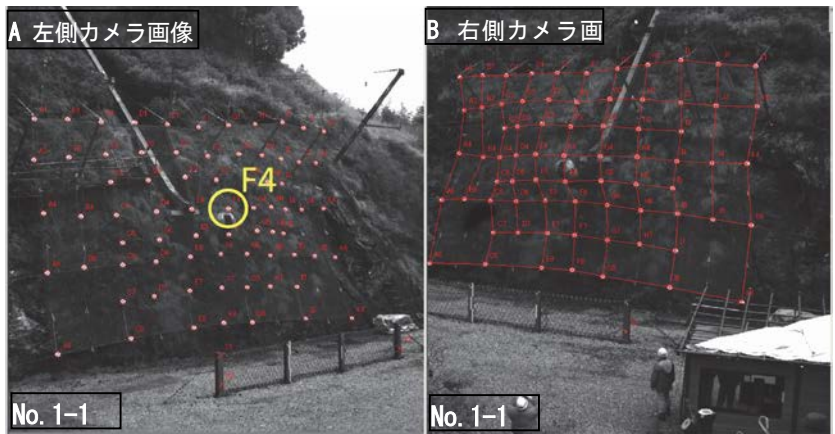


図-5.6 三次元計測による時刻歴波形例 (F4, Y方向)



の二次元計測と三次元計測による最大変位量を示している。なお、二次元計測では側面から見た最大変位量を示しているのに対して、三次元計測では、ターゲットマーカ位置での最大変位量を示していることから、両者は一致していない。

今回、従来から用いられている二次元的な最大変位量計測に加えて、斜め2方向からの高速度カメラを用いた三次元挙動計測により、ポケット式落石防護網のように荷重作用時において部材に大変形を伴うような構造物の金網全体系の変位分布や着目点の時刻歴波形を取得できることが確認できた。これらのデータを活用することにより、落石防護網の耐衝撃挙動やエネルギー吸収機構等の詳細な検討を行うことが可能になるものと考えられる。

### 5.4 数値解析の概要

#### 5.4.1 解析モデルおよび解析手法

写真-5.1 に示すように、実際の試験体は三次元的に複雑な形状を示しているが、それらの形状を全て数値解析モデルに反映させることは煩雑かつ困難であることより、本数値解析では二次元平面としてモデル化を行った。なお、本解析には LS-DYNA<sup>3)</sup> を使用している。図-5.7 には、数値解析に用いた要素分割状況を示している。金網の寸法は縦 10 m、横 15 m とし、横ロープの長さは 27 m とした。金網に関しては 4 節点シェル要素を、ワイヤロープに関しては圧縮力を伝達しない 2 節点ケーブル要素を用いた。ワイヤロープ要素の積分点に関しては、計算精度を向上させるために  $2 \times 2$  Gauss 積分を用いている。本検討では金網を便宜的に二次元として考え、シェル要素を用いて簡略化したモデルを使用した。

境界条件は、図-5.7 に示すようにワイヤロープ端部をピン支持としている。また、金網とワイヤロープは完全付着と仮定している。重錘と金網の間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。なお、接触面における摩擦は考慮していない。

数値解析は、重錘に高速度カメラから算出された衝突速度を初期速度として与えることにより行っている。解析時間は 1,000 ms とした。なお、減衰に関しては考慮していない。

#### 5.4.2 材料構成則

図-5.8 には、ワイヤロープおよび金網の材料構成則を示している。(a) 図にはワイヤロープに用いた応力-ひずみ関係を示している。応力-ひずみ関係は、

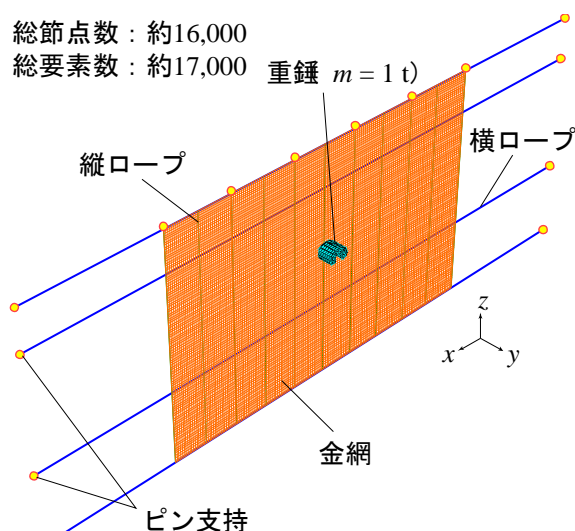


図-5.7 要素分割状況

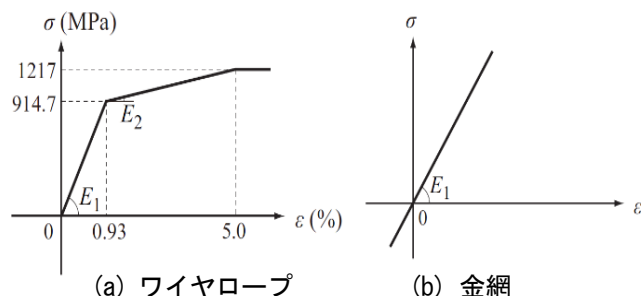


図-5.8 材料構成則

表-5.5 材料物性値

材料	単位体積質量 $\rho$ ( $t/m^3$ )	降伏応力 $f_y$ (MPa)	引張強度 $f_u$ (MPa)	一次弾性係数 $E_1$ (GPa)	二次弾性係数 $E_2$ (GPa)	ポアソン比 $\nu$
ロープ	7.85	915	1,270	98	7.43	0.3
金網	6.20	-	-	0.4	-	0
重錘	-	-	-	206	-	0.3

表-5.6 重錘衝突位置における最大水平変位一覧

実験ケース	落下高さ $H$ (m)	最大水平変位 (出力点: F4) (mm)		
		解析結果 $\delta_{a\max}$	実験結果 $\delta_{e\max}$	$\delta_{a\max} / \delta_{e\max}$
1-1	6	1,748	1,858	0.94
1-2	12	2,003	1,974	0.98
2-2	18	2,157	2,206	1.01

表-5.5 に示す材料物性値一覧の公称値を基本とし、破断ひずみを 5% と仮定して設定した。

(b) 図には金網に用いた応力-ひずみ関係を示している。金網に関しては弾性体と仮定し、弾性係数  $E_1$  に関しては、既往の研究成果を参考に決定した。

なお、重錘に関しては、鋼弾性体と仮定し質量 1t となるように単位体積質量を換算している。

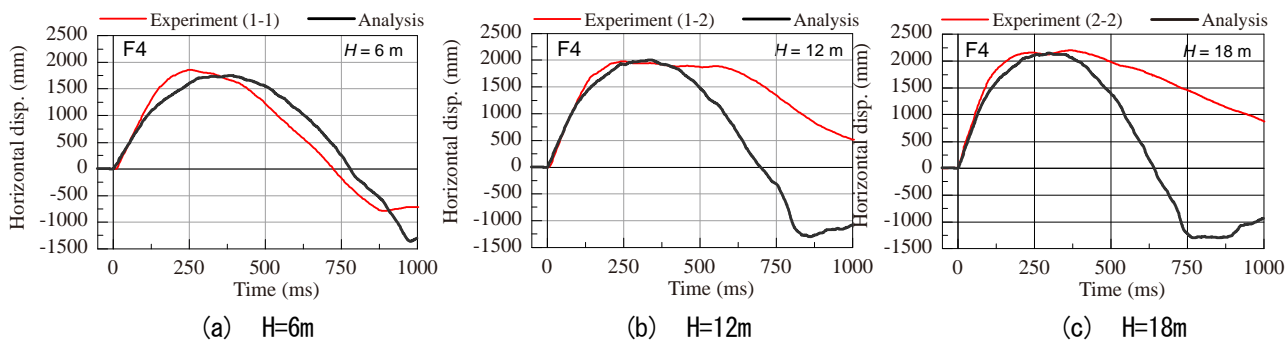


図-5.9 重錘衝突位置における水平変位の時刻歴波形

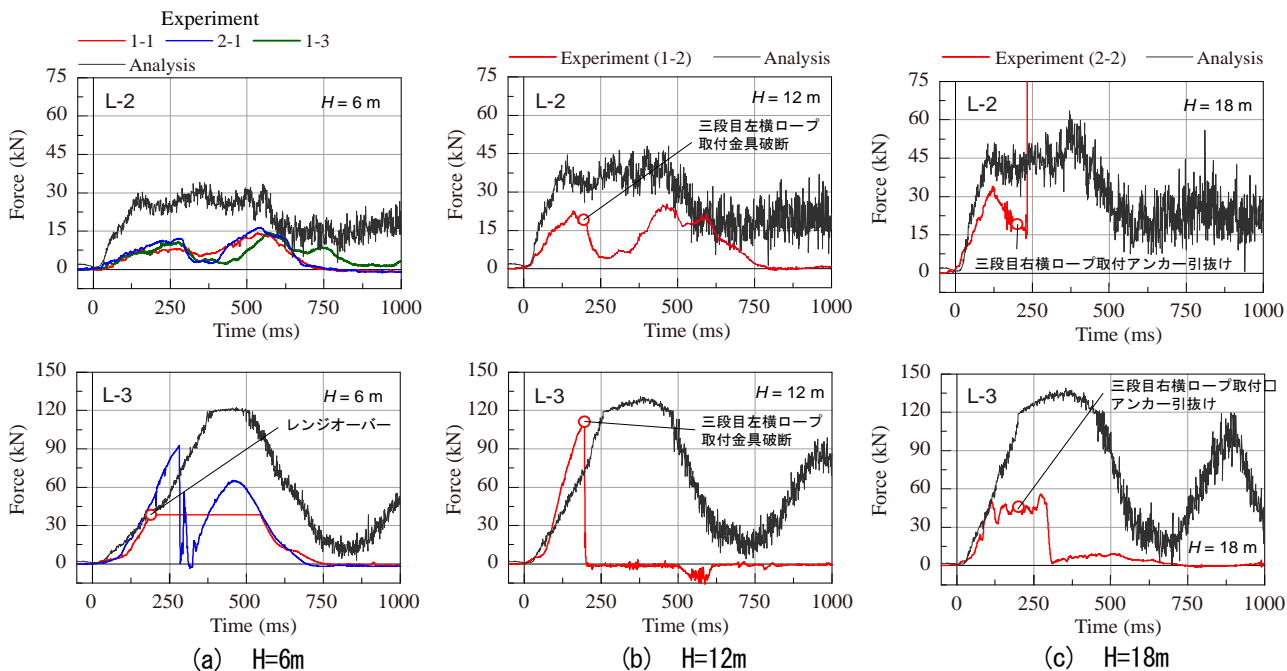


図-5.10 横ワイヤロープ張力の時刻歴波形(L-2, L-3)

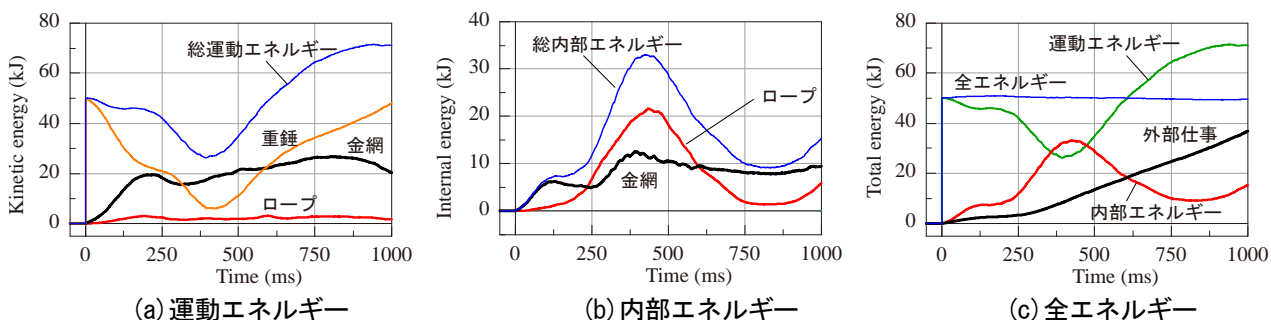


図-5.11 エネルギーの経時変化(H=6m)

5.5 数値解析結果と考察

5.5.1 変形状況

図-5.9 には、解析結果から得られた重錘衝突位置(図-5.1, F4 参照)における水平変位の時刻歴波形を実験結果と比較して示している。図より、落下高さ H にかかわらず、数値解析結果は、重錘衝突初期から最大変位に至るまで非常によく一致していることが分かる。一方、落下高さが大きいほど最大変位以降のリ

バウンド状態において、数値解析結果は実験結果と異なる挙動を示している。これは、実験では 3 段目ロープ取付金具の破断(H=12m)やアンカーボルトの引き抜け(H=18m)が生じていることが要因と考えられる。

表-5.6 には、重錘衝突位置における最大水平変位について、数値解析結果を実験結果と比較して示している。表より、数値解析結果と実験結果の比は 5%以

内であり、数値解析結果は実験結果の最大変位を精度よく再現できることが分かる。

### 5.5.2 ワイヤロープ張力

図-5.10には、横ワイヤロープ張力の時刻歴波形について、実験結果と数値解析結果を落下高さごとに比較して示している。着目した箇所は、重錘衝突位置を中心にその上下に位置する2段目および3段目の横ロープ左側(L-2, L-3)である。

(a)図に示す落下高さ  $H=6\text{ m}$  について着目する。 $H=6\text{ m}$  に関しては同一条件で計3回の実験を実施していることより、それらの実験結果を全て記載している。なお、実験ケース1-1のL-3に関しては、40 kN程度でレンジオーバーのため張力が頭打ちとなっている。図より、重錘衝突位置よりも上方に位置するL-2の張力に関しては、数値解析結果が実験結果を過大に評価していることが分かる。最大張力を比較すると、実験結果では14 kN程度であるのに対し、数値解析結果は約34 kNと約2.8倍大きい。さらに、重錘衝突後における張力の増加率においても、実験結果と比較して数値解析結果は大きく示されている。一方、重錘衝突位置よりも下側に位置するL-3を見ると、数値解析結果は重錘衝突後における張力の増加傾向など、実験結果を非常に良く再現できている。さらに、張力の作用継続時間に関しても、数値解析結果は実験結果と比較して若干大きく評価しているものの、除荷勾配は両者でよく一致していることが分かる。

次に落下高さ  $H=12\text{ m}$  の結果(b図参照)について考察する。L-2における張力の時系列波形を見ると、数値解析結果は  $H=6\text{ m}$  の場合と同様に実験結果を過大に評価していることが分かる。また、L-3に関しても、 $H=6\text{ m}$  の場合と同様、数値解析結果は取付金具が破断するまでの実験結果を精度よく再現しているものと考えられる。また、(c)図に示す  $H=18\text{ m}$  の場合においても、 $H=6, 12\text{ m}$  の場合と同様な傾向を示していることが分かる。ただし、L-2の張力に関しては、落下高さ  $H$  が大きくなるほど、数値解析結果は実験結果に近づく傾向にある。

なお、L-3の張力に関しては、落下高さ  $H$  にかかわらず、数値解析結果における張力が118 kN程度で横ばいとなっているが、これはワイヤロープの降伏張力と一致していることより、数値解析上ではワイヤロープが降伏状態にあることを示唆している。

### 5.5.3 エネルギーの経時変化

重錘の衝突過程におけるエネルギー収支の解明という観点から行われた検討事例<sup>4)</sup>は、ごく限られてい

る現状にある。

図-5.11には、エネルギーの経時変化の一例として  $H=6\text{ m}$  における運動、内部および全エネルギーについて示している。(a)図より、重錘の運動エネルギーは金網に衝突後徐々に減少し、金網が最大変位を示す400 ms前後で最小値を示し、その後重錘のリバウンドとともに運動エネルギーが増加している。また、金網の振動に伴う運動エネルギーが増加していることが分かる。一方、ワイヤロープの運動エネルギーはそれらに比較して小さい。

次に、(b)図に示す内部エネルギーに着目すると、ワイヤロープの内部エネルギーは、400 ms前後で最大値を示し、その後減少傾向にあることが分かる。なお、内部エネルギーが最大値を示す時刻における金網とワイヤロープの分担率を比較すると、後者が約2/3程度となることが確認される。(c)図より、解析時間内における全エネルギーは入力エネルギーである50 kJを示しており、本数値解析におけるエネルギー収支は適切であることが確認される。なお、外部仕事に関しては系全体の重力による仕事を意味する。

## 5.6 まとめ

- ・重錘衝突実験より、
  - 1) 落下高さ6mの条件において横ロープの設計張力と同程度以上の張力が作用するケースがあること、このことよりロープ端部の定着箇所に大きな損傷が生じることを確認した。一方、縦ロープの設計張力と実験結果は、ほぼ等しい張力となっている。
  - 2) 横ロープ張力は重錘衝突点より下方で大きく、重錘の地盤面への着地の状態によっては最下段でも大きくなる。
  - 3) 金網の変形は設計で想定しているような局所的なものではなく、全体的な応答となっている。
  - 4) 落石防護網のように大変形を伴う三次元動的挙動の把握には、斜め2方向からの高速度カメラ計測手法が有効である。
- ・数値解析より、
  - 5) 提案の材料構成則および解析手法を用いることにより、重錘衝突を受ける金網の変形性状をほぼ適切に再現可能である。
  - 6) ワイヤロープの張力に関しては、衝突位置より上側横ロープの張力を過大評価する傾向にある。

## 6. 従来型ポケット式落石防護網の設計に関する検討

### 6.1 概要

従来型ポケット式落石防護網の設計を行う場合は、一般的に以下に示す簡易式による手法が用いられているが、その適用にあたっては、部材の強度特性、防護網の構造を十分に踏まえる必要がある。

本章では、本研究における実験結果や既往研究成果を基に簡易式における適用範囲等についての検討を行った。

### 6.2 ポケット式落石防護網の簡易式

#### (1)安全性の照査

従来型ポケット式落石防護網の可能吸収エネルギー $E_T$ が落石エネルギー $E_W$ を上回ることを確認する。

$$E_T \geq E_W$$

ここに、 $E_W$ ：落石エネルギー

$E_T$ ：落石エネルギー

#### (2)落石エネルギーの算出

落石の衝突位置は、上端横ロープと2段目の横ロープの中心かつ支柱間の中心とし、落石防護網に作用する落石エネルギー $E_W$ は、落石防護網の傾斜を考慮して金網に直角の分力について算出する。

$$E_W = \frac{1}{2} m(V \sin \theta_0)^2$$

ここに、 $E_W$ ：落石エネルギー

$m$ ：落石質量

$V$ ：落石速度

$\theta_0$ ：ネットの傾斜角

#### (3)可能吸収エネルギーの算出

ポケット式落石防護網の可能吸収エネルギー $E_T$ は次式により算出する。

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

ここに、 $E_N$ ：金網の吸収エネルギー

$E_R$ ：上端横ロープ及び2段目の横ロープの吸収エネルギー

$E_P$ ：支柱の吸収エネルギー

$E_{HR}$ ：吊ロープの吸収エネルギー

$E_L$ ：衝突の前後におけるエネルギー差

#### (4)エネルギー差の算出

落石の衝突前後におけるエネルギー差 $E_L$ は、次式により算出する。

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

ここに、 $E_W$ ：落石の持ち込む運動エネルギー

$m_1$ ：落石質量

落石（重錘）持込エネルギー  
 $E_W$ (KJ)

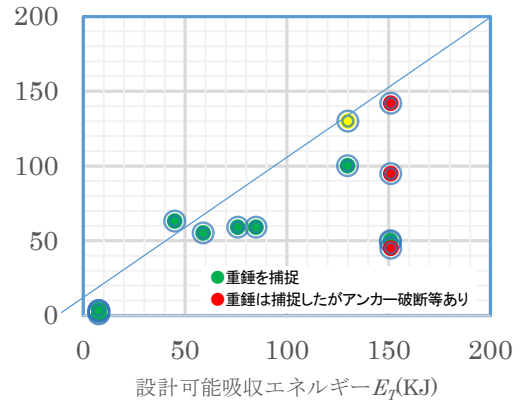


図-6.1 実規模実験における落石エネルギーと可能吸収エネルギー

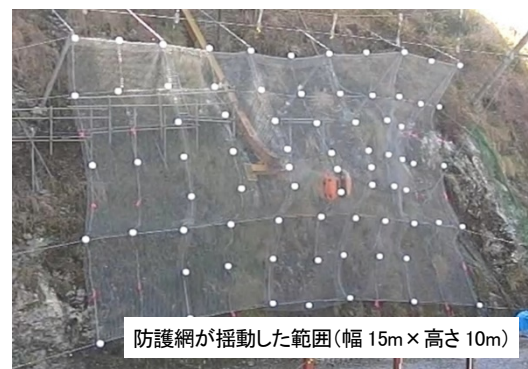


写真-6.1 実規模実験状況

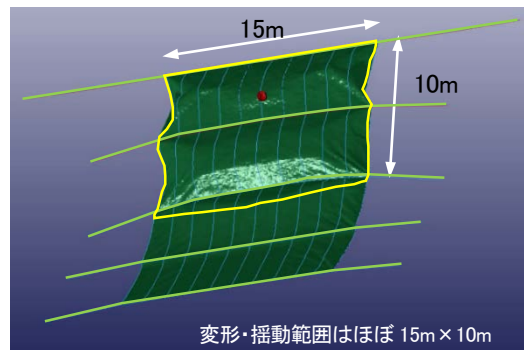


図-6.2 数値解析による金網の揺動範囲 (横ロープが損傷しないと仮定する条件)

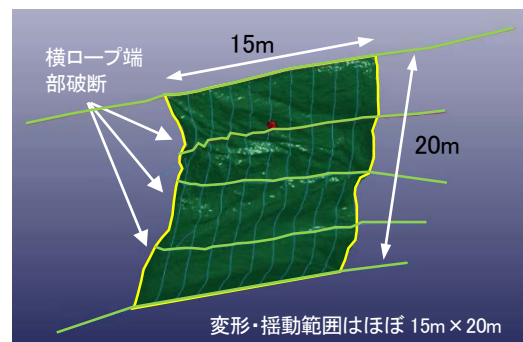


図-6.3 数値解析による金網の揺動範囲 (横ロープが損傷したと仮定する条件)

$m_2$  : 落石防護網質量

### 6.3 簡易式の可能吸収エネルギーの適用範囲

前述のように従来型ポケット式落石防護網の耐衝撃挙動に関する研究事例は少なく、特に実規模かつ設計可能吸収エネルギーを超える条件での実験はほとんど行われていない。既往の緩衝装置類のないポケット式落石防護網の重錘衝突実験において、簡易式で求めた設計可能吸収エネルギー $E_T$ と落石（重錘）の持ち込みエネルギー $E_W$ の関係を図-6.1に示す。これらの実験結果から、重錘エネルギー150 kJ程度までは、部材損傷等が一部に認められる場合があるものの、 $E_W$ が $E_T$ 以下の条件であれば重錘は捕捉されていることがわかる。

### 6.4 エネルギー差の計算に用いる金網の有効範囲

実規模実験の映像（写真-6.1）を分析した結果、ほぼ15m×10mの範囲で防護網が変形・揺動して重錘を補足していることがわかる。また、数値解析においても、図-6.2に示すようにほぼ15m×10mの範囲で、防護網が重錘を捕捉していることがわかる。

これらの結果から、ポケット式落石防護網の構成部材が損傷しない条件における金網の影響範囲は、15m×10m = 150m<sup>2</sup>程度までの大きさであれば安全であるとみなされ、 $E_L$ の計算で考慮する金網の有効範囲については、150m<sup>2</sup>程度を上限として設計することが望ましいものと考えられる。この面積は、支柱の一般的配置の4スパン分の幅12mに換算すると、ほぼ12m×12m = 144m<sup>2</sup>に相当する。

一方、落石衝突位置近傍の金網変形や横ロープを固定するアンカーの外れ等、落石防護網に一定の損傷を認めつつ落石を捕捉する条件を仮定すると、数値解析においては図-6.3に示すように15m（縦ロープ5スパン分）×20m（横ロープ4スパン分）= 300m<sup>2</sup>の範囲で防護網が重錘を捕捉していることが確認できた。

以上のことから、金網の影響範囲を300m<sup>2</sup>程度まで想定し設計することは、特段の問題はないと考えられるが、こうした条件で設計したポケット式落石防護網については横ロープやアンカー等の損傷を定期点検等により確認し、必要に応じて補修等を行うことが求められることに留意が必要である。

## 7. 性能照査手法の検討

### 7.1 概要

本検討で得られた知見を基に、落石防護工（落石防

護網、柵）の要求性能等の考え方や、実験による性能照査手法についてとりまとめを行った。

### 7.2 求められる性能と限界状態

他の構造物の要求性能等を参考に、落石の作用に対する落石防護網・柵の要求性能や限界状態の考え方等について整理した。

- ・落石防護工の要求性能
  - (1) 落石防護工の要求性能の考え方
  - (2) 落石防護工の重要度
  - (3) 個々の作用に対する落石防護工の要求性能の設定
- ・性能の照査
- ・落石防護工の限界状態

### 7.3 性能照査手法

#### 7.3.1 海外における性能照査基準

我が国においては、高エネルギー吸収型落石防護工に対する性能照査規定は現在のところ整備されていないが、海外における同種構造物に対する認証指針としては以下のものがあげられる。

- ・日本：特に定められていない。
- ・EU：Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (EOTA、落石防護柵の欧州技術認証のための指針)
- ・スイス：Guideline for the Approval of Rock-fall Protection Kits (SAEFL、落石防護柵の認証指針)
- ・米国：Recommended Procedures for the Testing of Rock-Fall Barriers (TRB、スイスに準拠)

上記のSAEFLにおける認証指針の目的として以下のことが記述されている。

落石防護網に対する落石の影響は非常に異なっている。予期しない事象に頻繁に直面し、注意深い観察および測定にもかかわらず、これらの不確定な因子を完全に除去することはできない。指針のユーザーは、この意味において必要とされる高い要求に配慮しなければならない。指針は、次のより高度な目的を満たすように意図されている。

- ・認証手順の定義
- ・同じエネルギー区分で異なる落石防護装置の客観的な比較を可能にする根拠を提供する
- ・落石防護工の有効性の改善
- ・落石防護工の計画作業、建設およびメンテナンスの担当者への有用な情報を提供する
- ・落石防護工を設置するために必要な条件を作成する。

認証指針の構成は以下の通りである。

- (1) 序論
- (2) 指針の目的
- (3) 適用範囲
- (4) 関連する専門家の役割
- (5) 定義および記号名
- (6) 認証
- (7) 基礎
- (8) 耐荷力性能
- (9) 性能規定

さらに、「(6)認証」では、落石防護柵に適用される必要条件や試験のための施設、各試験に関する条件などが細かく規定されている。

### 7.3.2 実験による性能照査手法の提案

各種落石防護網・柵の性能を横並びで比較ができるように、捕捉性能を照査するための必要最小限の統一の実験による性能照査手法を以下のような項目でとりまとめた。

各種工法の適用現場における設計落石条件や設置条件等が実験条件と異なることも想定される。このような条件の相違に対しても各種工法が要求性能を確保できることを明らかにする必要があることから、現場適用にあたっての留意事項についても整理した。

・実験による性能照査手法

- (1) 実験目的
- (2) 照査項目
- (3) 実験方法
- (4) 実験結果とりまとめ
- (5) 現場への適用

## 8. まとめ

本研究では、斜面对策工の一つである落石防護工の要求性能の考え方について、海外基準や他の構造物の要求性能等を参考に提案を行った。

また、落石防護工の落石作用に対する部材・要素レベルおよび構造全体系の性能照査手法について、実規模実験や数値解析結果等を踏まえた検討により提案を行った。

さらに、従来型ポケット式落石防護網に関して、従来設計法に関する実験的・解析的検討により簡易式の適用範囲等を整理した。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧、2000年6月
- 2) 小室雅人，西 弘明，今野久志，荒木恒也，佐々木 哲也：水平に設置された落石防護網の耐衝撃挙動に関する衝撃応答解析，鋼構造年次論文報告集，Vol.23, 657-6630, 2015.
- 3) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Liv-ermore Software Technology Corporation, 2012.
- 4) 原木大輔，香月 智，田代元司：円柱形要素を用いた 個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析，土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.536-553, 2009.

## STUDY ON PERFORMANCE VERIFICATION TECHNOLOGY FOR SLOPE STABILIZATION TO REDUCE THE RISK OF LARGE ROCKS FALLING

**Budget:** Grants for operating expense General account

**Research Period:** FY2011 – 2015

**Research Team:** Cold-Region Construction

Engineering Group (Structures)

**Author:** NISHI Hiroaki

KONNO Hisashi

ARAKI Nobuya

YAMASAWA Fumio

**Abstract:** As a part of slope stabilization, this study aims at elucidating the functions required of rock-fall protection structures with high-energy-absorption capacities, which have been increasingly adopted in recent years, and also at establishing a technique to verify the performance of such structures, because there are no unification indexes and developers make the experiment and the analysis originally.

A way of thinking of the required performance of the rock fall protection structures proposed by making reference to the overseas standard and the required performance of the other structures.

Coverage of simplified style of usual design way was put in order by experimental consideration and analytic consideration about conventional pocket-type rock-fall protection nets.

Additionally, a performance verification way of whole part, element and structure to a falling rock action of rock-fall protection structures was proposed from consideration based on full-scale falling-weight impact tests results and numerical value analysis results.

**Keywords:** rock-fall protection structures, rock-fall protection net, technique for verifying performance, static loading test, impact loading test, energy absorbing mechanism