

## 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、山口 悟、角間 恒

### 【要旨】

本研究は、大規模土砂災害等に対する対策技術の構築に係る研究として、近年、採用事例が増加している高エネルギー吸収型を含めた落石防護工（網・柵）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を目的に実施している。

H26年度は、従来型のポケット式落石防護網の構成部材であるひし形金網のエネルギー吸収量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。また、過年度に実施したポケット式落石防護網の実規模重錘落下衝撃実験を対象に、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証するとともに、エネルギー吸収機構等についても検討を行った。

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。このような背景のもと、本プロジェクト研究では従来型落石防護工も含めて、落石対策工として求められる機能の明確化と性能照査技術の確立に向けた検討を行っている<sup>1)～6)</sup>。

落石防護工の一つであるポケット式落石防護網は、吊りロープや支柱、金網、ワイヤロープ等の部材を組み合わせた構造であり、規模の比較的小さい落石に対して適用されている。ポケット式落石防護網は落石荷重の作用時において、金網やワイヤロープ等の構成部材に大きな変形を伴う柔構造であることから、これらの検討を進めていくため、特に数値解析的検討のためには荷重作用時の構造部材の挙動を正確に把握することが重要である。

本研究では、従来型のポケット式落石防護網について、構成部材の一つであるひし形金網に着目し、素線径の異なる金網に対するエネルギー吸収量の算定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。また、過年度に実施した実規模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証するとともに、エネルギー吸収機構等についても検討を行った。

### 2. 静的載荷実験

#### 2.1 実験概要

本実験の概要を図-2.1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。

#### 2.2 実験方法

写真-2.1、2.2、2.3に実験状況および部材の固定状況等を、図-2.1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、

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

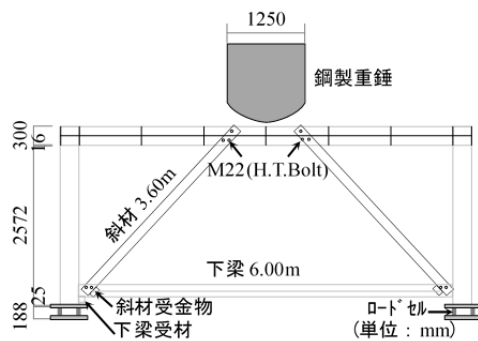
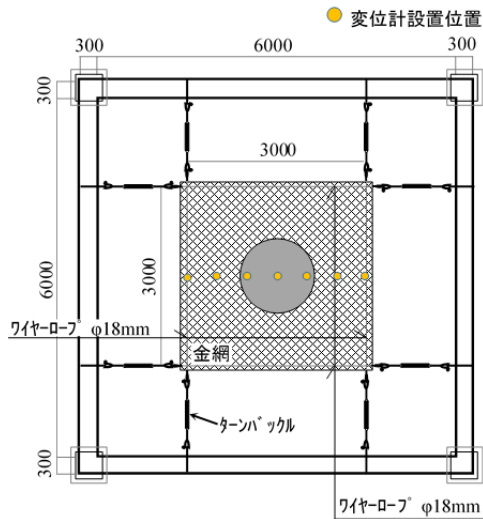


図-2.1 荷重実験の概要

表-2.1 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 (—) kN

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。荷重位置は、金網中

写真-2.1 静的荷重実験状況

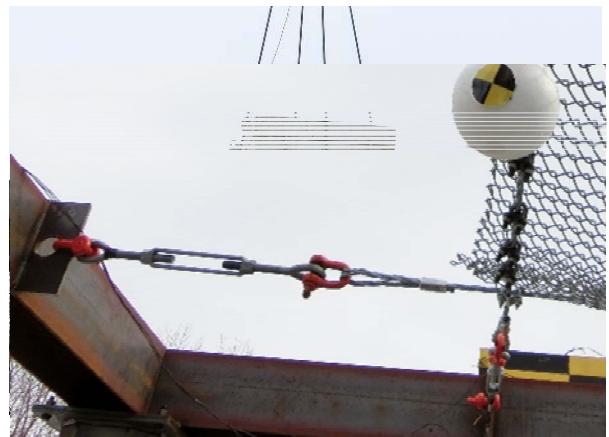


写真-2.2 ワイヤロープの固定状況



写真-2.3 金網の固定状況

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。

## 2.3 実験結果および考察

### 2.3.1 金網鉛直変位

図-2.2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

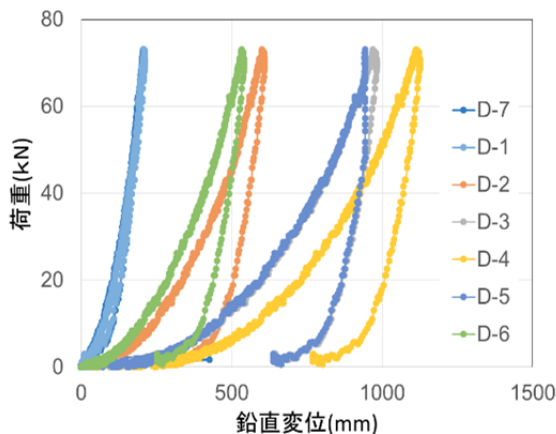


図-2.2 荷重-変位関係(3.2φ)

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(写真-2.4)やロープ張力等から判断して、約75kN(変位約1,100mm)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20kJと算定される。なお、除荷時の残留変位は750mm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500mm、残留変位は250mm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、変形状況についてはφ3.2のケースと類似なものであることを確認している。

### 2.3.2 ワイヤロープ張力

図-2.3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10~15kN)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。

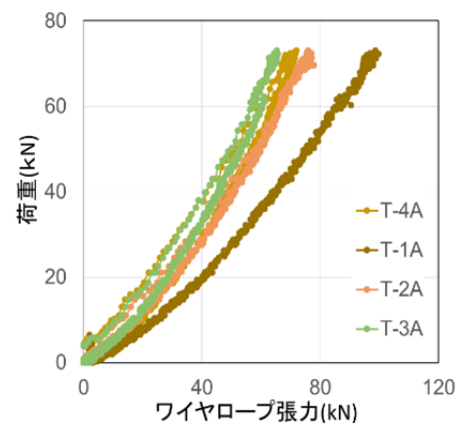


図-2.3 荷重-ロープ張力関係(3.2φ)



写真-2.4 実験終了後の状況

3. 重  
錘  
落  
下  
衝  
撃  
実  
験

図-3.1 金網の载荷点変位およびロープ張力の時刻歴応答波形(D5.0W3H10)

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体は図-2.1 に示すとおり、静的载荷実験と同一である。

3.2 実験方法

写真-3.1 には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。また表-3.1 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载荷点直下の鉛直変位量である。なお、表-3.1 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。



写真-3.1 衝撃実験の状況

3.3 実験結果および考察

3.3.1 各種応答波形

図-3.1 (a), (b) には、一例として実験ケース D5.0W3H10における金網の载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。

表-3.1 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

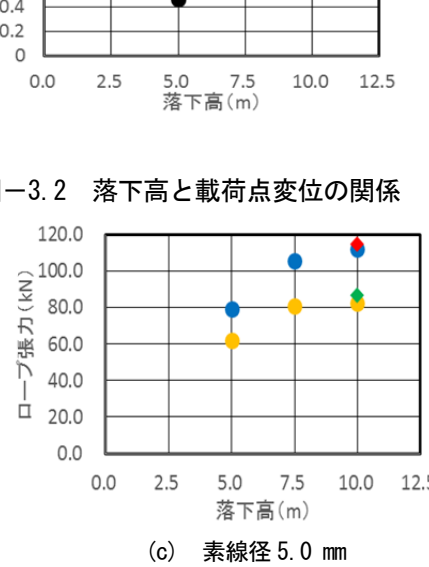
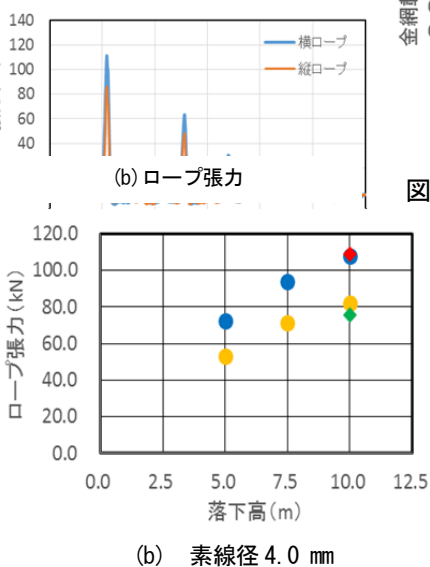
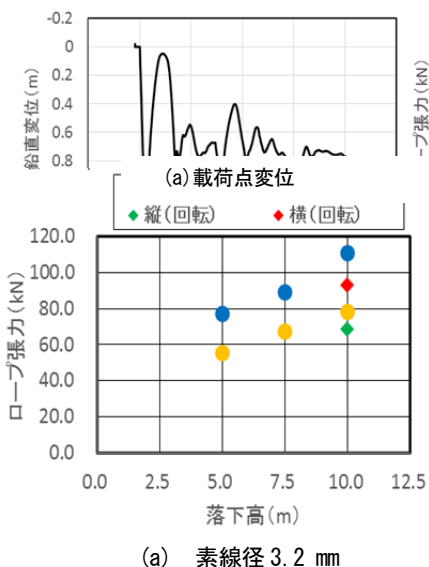
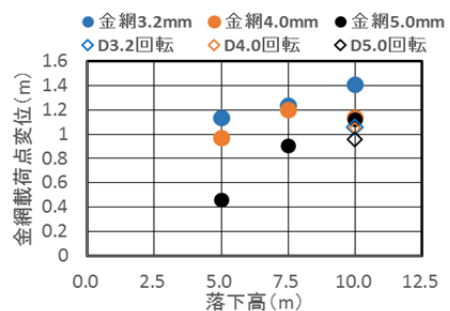


図-3.3 落下高とロープ張力の関係



(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、金網の載荷点変位波形に対応した波形形状を示しており、載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載荷点側に引き寄せられるためと推察される。

### 3. 3. 2 重錘落下高と金網の最大変位・ワイヤロープ

#### の最大張力の関係

図-3.2には、重錘落下高と金網の載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載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か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-3.3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. 耐衝撃性能に関する数値シミュレーション

### 4. 1 実験概要

#### 4. 1. 1 試験体概要

本実験に用いた試験体の上面図および重錘落下位置を図-4.1に示す。試験体の形状寸法は、縦10m、金網幅15mである。

表-4.1に、試験体材料の諸元を示す。金網には

菱形金網5.0φ×50×50mmを、縦ロープおよび横ロープには18φを、縦補助ロープには14φを用いている。縦(補助)ロープの間隔は3.0(1.5)m、横ロープの間隔は5.0m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結合コイルを使用している。縦・横ロープの末端処理には、現地施工では一般に巻付グリップが用いられているが、本実験では両端をアルミロック(圧縮)加工とした。縦補助ロープについては両端部を1.5m程度折り返し、ワイヤクリップ4個を用いて固定した。また、縦・横ロープ端部と鋼製枠架台との連結には、張力調整のためにターンバックルを使用している。

### 4. 1. 2 実験方法

図-4.1に試験体形状を、写真-4.1に実験状況と変位計測状況を示す。実験は堀込式の試験ヤード外周に配置したH形鋼の鋼製枠架台上に水平に設置した試験体に、トラッククレーンで所定の高さに吊り上げた重錘を自由落下衝突させることにより実施した。

衝撃載荷には、質量1t(直径50cm、高さ61cm、底部より高さ6cmの範囲が半球状)の重錘を使用している。本実験における測定項目は、重錘に取り付けた加速度計による重錘衝撃力、縦・横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、高速度カメラ撮影による金網の重錘載荷点直下の鉛直変位量である。各センサーの応答波形は、データレコーダにてサンプリングタイム1msで一括収録を行っている。

実験は、表-4.2に示す計6ケースを実施した。載荷位置は、落石対策便覧<sup>7)</sup>に示されている作用位置(縦位置:横ロープ間中央、横位置:縦補助ロープ上)を基本ケースとして設定している。ロープの初期張力については、試験体設置後の張力を基準とし、各実験ケース終了後にはロープの位置および張力の調整を行っている。

## 4. 2 数値解析の概要

### 4. 2. 1 解析モデルおよび解析手法

図-4.2に本数値解析で用いた試験体および実験装置の要素分割状況を示している。ここでは、実験状況を可能な限り正確に再現するために、鋼製治具も含めて詳細にモデル化した。金網、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、コンクリート基礎は8節点固体要素

を用いた。ターンバックル端部は、実験条件と同様にピン支持としている。接触面は重錘一金網間に面と面との接触および剥離・すべりを伴うように設定した。なお、接触面における摩擦については考慮していない。また、金網とワイヤロープの接合に関しては、実験では結合コイルを用いて両者を結合しているが、解析ではこれらのモデル化が困難であることより、完全結合と仮定している。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 としており、減衰に関しては考慮していない。

なお、本解析には LS-DYNA<sup>8)</sup> を使用している。

重錘(質量 1t)

写真-4.1 実験状況(衝撃実験)

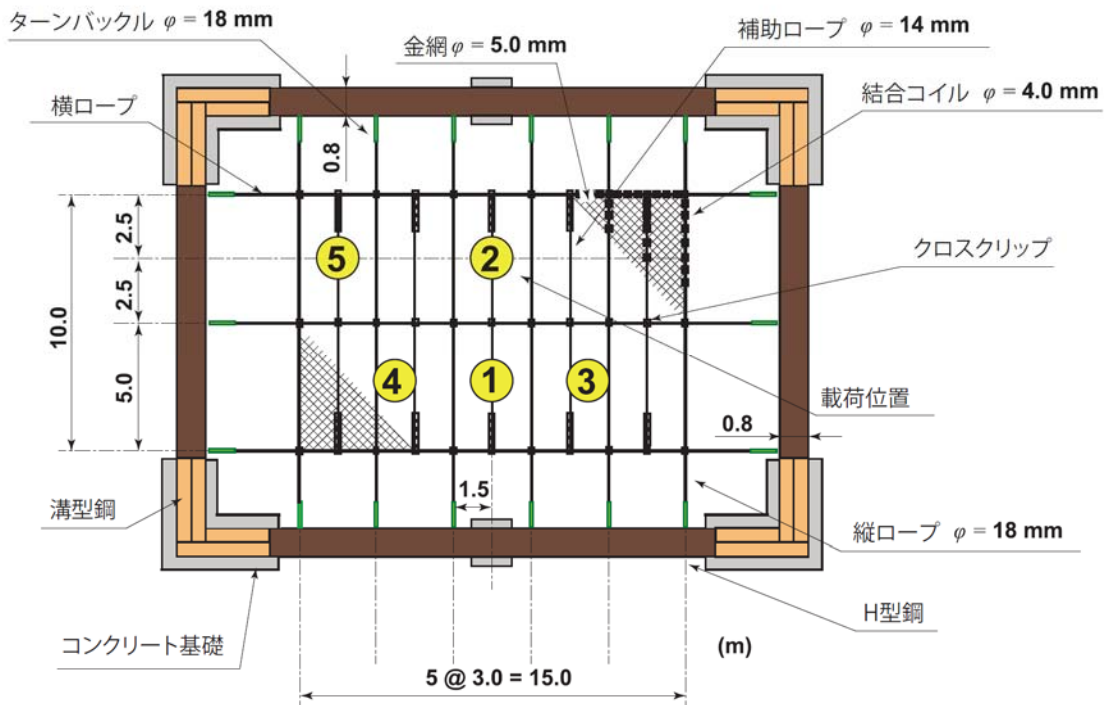


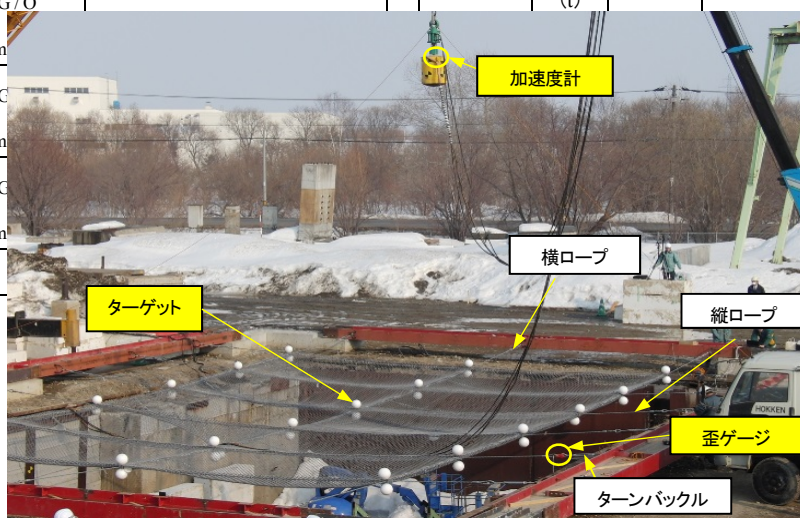
図-4.1 試験体の形状寸法および重錘落下位置

表-4.1 試験体材料諸元

	諸元	部材耐力 [ミルシートより]
ひし形金網	5.0φ×50×50 mm	引張強さ:290~540 [405] N/mm <sup>2</sup>
縦ワイヤロープ	18φ3×7 G/O L=20.4 m	
横ワイヤロープ	18φ3×7 C L=13.5 m	
縦補助ワイヤロープ	14φ3×7 C L=13.0 m	
ターンバックル	両アイ型	

表-4.2 実験ケース一覧 (衝撃载荷実験)

実験ケース	重錘質量 (t)	落下高 (m)	载荷位置	備考
			ロープ上	連続载荷
			網上	中央スパン 金網交換後
			ロープ上	連続载荷



成則を示している。図-4.3(a)にはワイヤロープおよび補助ロープの応力-ひずみ関係を示している。また、表-4.3には各ロープの断面積および材料物性値を示している。ワイヤロープ要素については、非線形弾性体モデルとして、道路橋示方書に準拠して引張側をトリリニア型とした。また、ワイヤ（補助）ロープの強度特性に関しては、公称値を用いた。図-4.3(b)には、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獲していることや、計算の煩雑さを避けるために、ここでは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予備解析を実施し、400 MPaと設定した。金網および横・縦ロープを接続しているH型鋼およびターンバックルに関

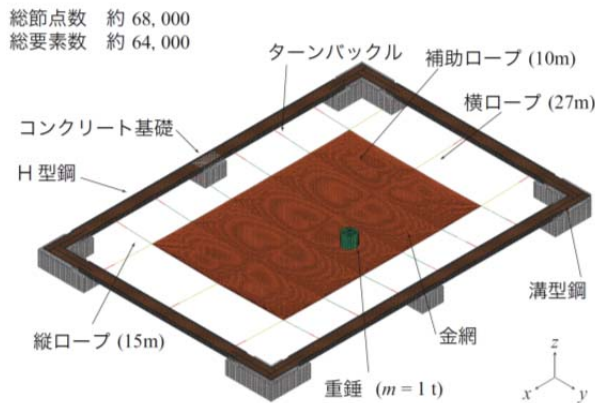


図-4.2 要素分割状況

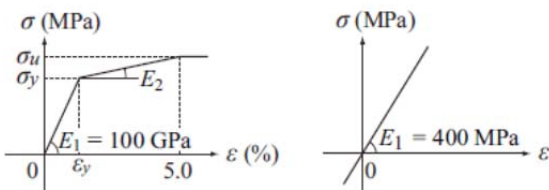


図-4.3 材料構成則

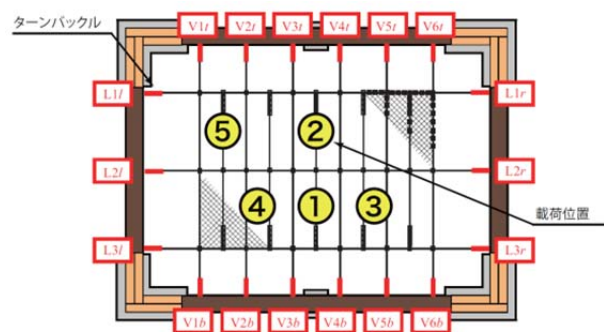
表-4.3 ワイヤロープの材料物性値

ロープ径	断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ $\epsilon_y$ (%)	降伏応力 $\sigma_y$ (MPa)	引張強度 $\sigma_u$ (MPa)
14φ	78.1	0.943	943.6	1257.7
18φ	128	0.914	914.7	1217.1

#### 4.2.2 材料構成則

図-4.3には、ワイヤロープおよび金網の材料構

図-4.4 ワイヤロープ張力名称一覧



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1tとなるように単位体積質量を換算している。

### 4.3 数値解析結果と考察

#### 4.3.1 重錘衝撃力および載荷点変位波形

図-4.4には、ワイヤロープ張力名称を示している。図-4.5から図-4.10には、実験ケースごとの各種応答波形について、実験結果と数値解析結果を比較する形で示している。なお、(c)および(d)図に

示すワイヤロープ張力に関しては、载荷点近傍の縦ロープおよび横ロープについて示している。

(a) 図に示す重錘衝撃力波形に着目すると、载荷位置および落下高さにかかわらず、数値解析結果は実験結果と比較して最大値に多少の差異が見られるものの、波形の立ち上がり勾配や衝撃力継続時間に関しては、ほぼ適切に再現していることが分かる。

(b) 図に示す载荷点変位波形に着目すると、载荷位置および落下高さにかかわらず、数値解析結果は実験結果の波形の立ち上がりをほぼ適切に再現していることが分かる。一方、数値解析結果における最大変位量は実験結果に比べて若干小さい。この両者の差は、重錘落下位置が供試体の中央に近づくほど大きくなる傾向にあることが分かる。さらに、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、実験では金網とワイヤロープの接続に結合コイルを部分的に使用しているのに対して、本数値解析では両者を完全結合と仮定していることが一つの要因であるものと推察される。以上より、本数値解析手法を用

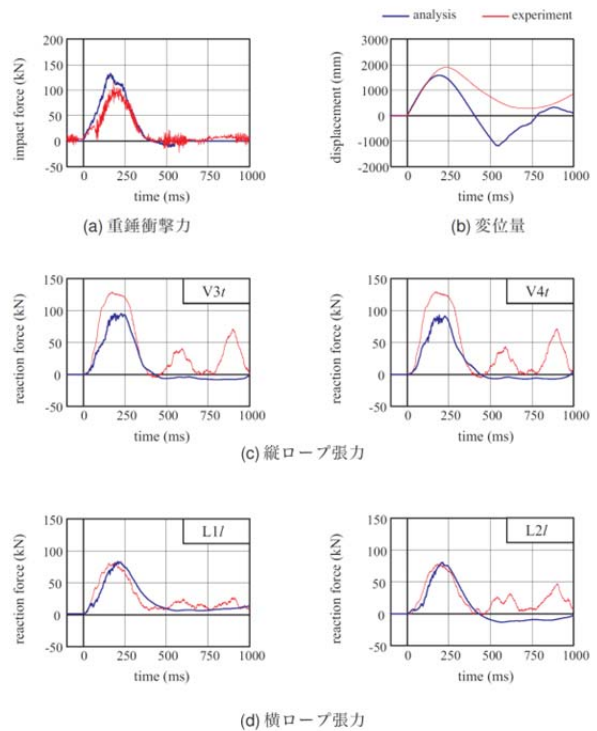


図-4.6 各種応答波形 (D1-w7.5)

図中の縦軸の単位は、(a) 衝撃力 (kN)、(b) 変位 (mm)、(c) 縦ロープ張力 (kN)、(d) 横ロープ張力 (kN) である。重錘落下位置の変位に関しては概ね実験結果を再現できるものと考えられる。

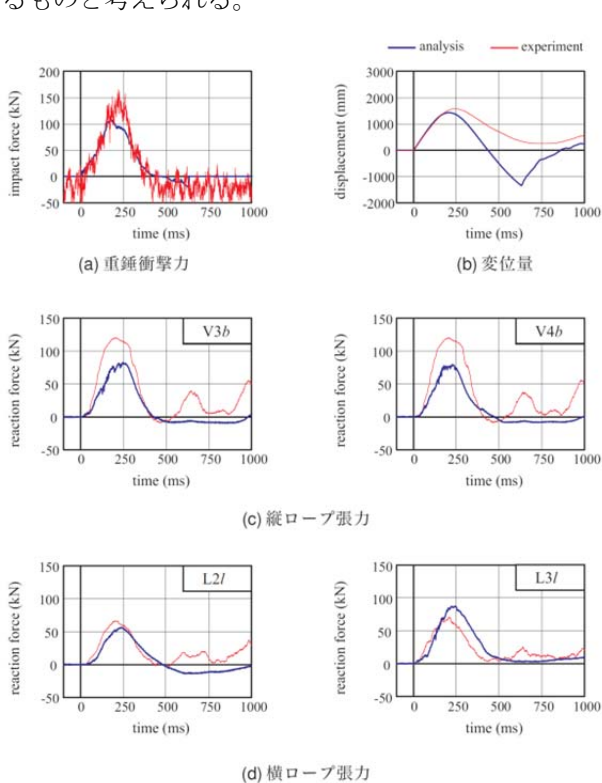


図-4.5 各種応答波形 (D1-w5.0)

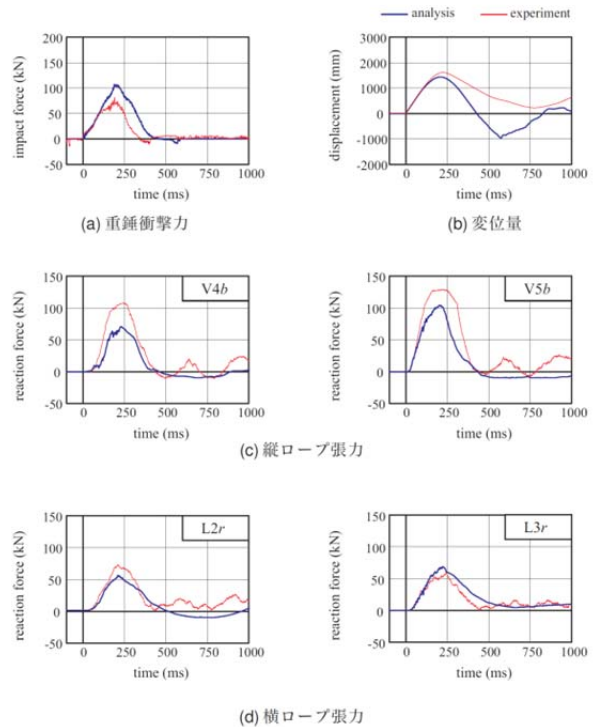


図-4.7 各種応答波形 (D2-n5.0)



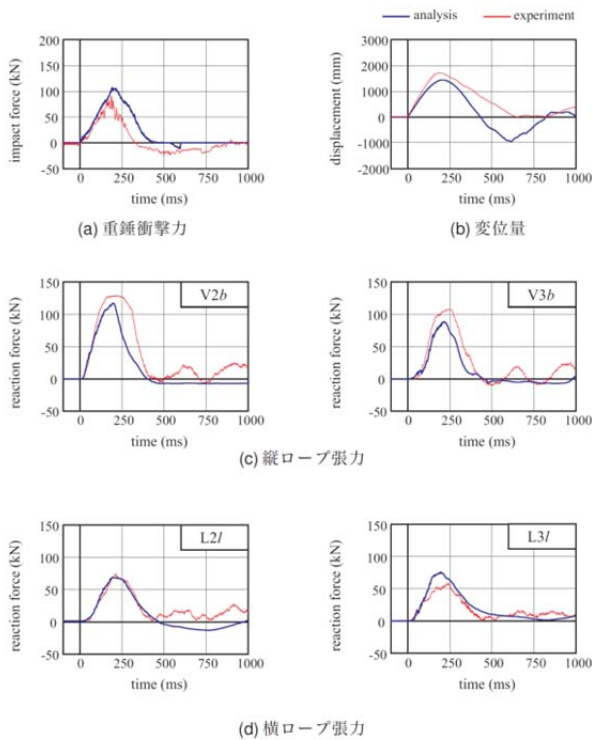


図-4.8 各種応答波形 (D2-n7.5)

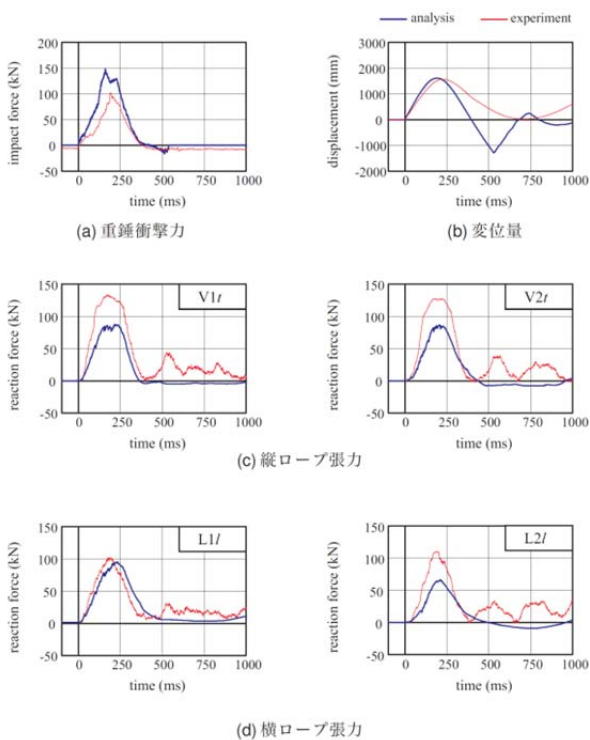


図-4.9 各種応答波形 (D3-w5.0)

解析結果は、いずれの場合も数値解析結果が実験結果の最大張力を大きく評価する傾向にある。しかしながら、張力の作用継続時間に関しては、両者おおよそ一致していることが分かる。なお、数値解析結果が実験結果と比較して大きく示される理由は、試験体の縦ロープ本数が多く、かつ金網とロープを完全結合と仮定していることから、実際の試験体の剛性を過大に評価していることによるものと推察される。

一方、(d)図に示す横ロープ張力波形に着目すると、数値解析結果は、D3-w5.0のL2ロープの場合を除いて、落下高さや重錘落下位置にかかわらず、張力の立ち上がりや最大値、および作用継続時間をほぼ適切に再現していることが分かる。なお、D3-w5.0の数値解析結果が実験結果と異なる要因の一つとしては、重錘落下位置が金網の端部であることより、金網とロープを完全結合と仮定している影響が、他の重錘落下位置よりも大きいことによるものと推察される。

#### 4.3.3 エネルギーの経時変化

図-4.11から図-4.13には、数値解析結果より得られた各エネルギーの経時変化の結果を示している。なお、全エネルギーは運動エネルギーとひずみエネルギーの和から外部仕事を引いたものを意味する。

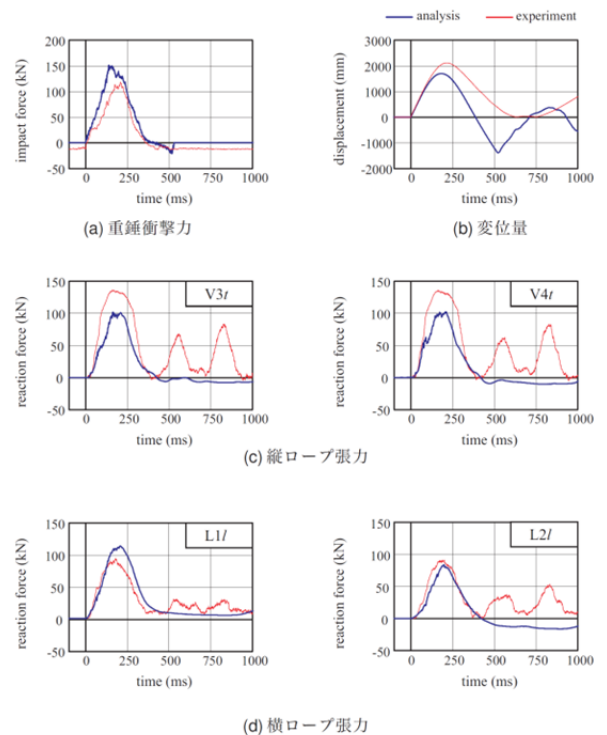


図-4.10 各種応答波形 (D1-w10.0)

#### 4.3.2 ワイヤロープ張力波形

(c)図に示す縦ロープ張力波形に着目すると、数値

(a) 図より、ひずみエネルギーの最大値は、重錘落下点直下の金網変位が最大値を示す 200ms 前後で生じていることが分かる。また、その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 1 : 2 程度である。この分担率は落下高さ、载荷位置によらずほぼ同様な傾向を示している。

(b) 図に示す運動エネルギーに着目すると、重錘の運動エネルギーは、重錘が金網に衝突した後に徐々に減少し、金網が最大変位を示す 200 ms 前後で最小値を示している。また、重錘の衝突直後から金網の振動による運動エネルギーが増加していることが分かる。一方、ワイヤロープに関しては、その運動エネルギーは小さく、金網のそれに比較して非常に小さい。

(c) 図に示す全エネルギーを見ると、時間の経過とともに入力エネルギーよりも若干小さくなる傾向が見られるものの、その差は小さく、本数値解析におけるエネルギー収支には問題がないことが分かる。

#### 4. まとめ

本研究では、ポケット式落石防護網の構成部材の一つであるひし形金網に着目し、エネルギー吸収量の算定や数値解析における材料構成則等の設定を目的として、静的载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。また、過年度に実施

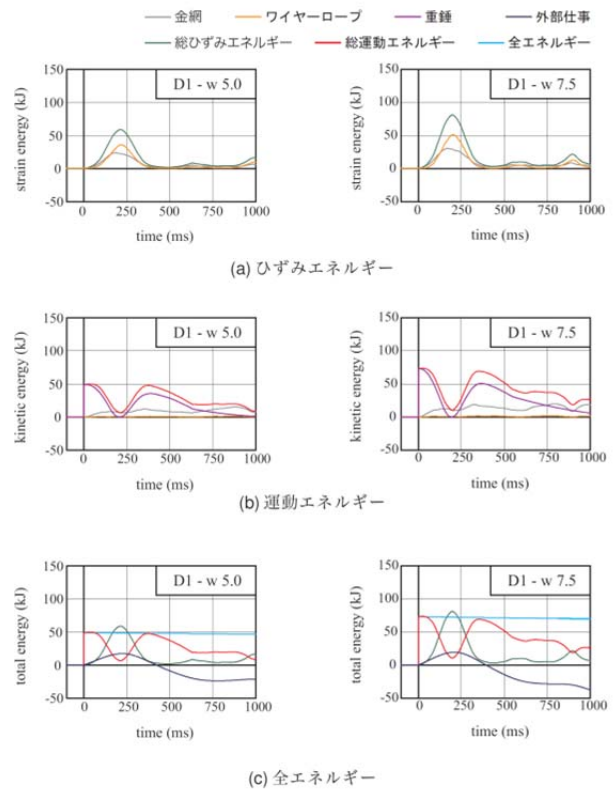


図-4.11 エネルギーの経時変化 (D1-w5.0/w7.5)

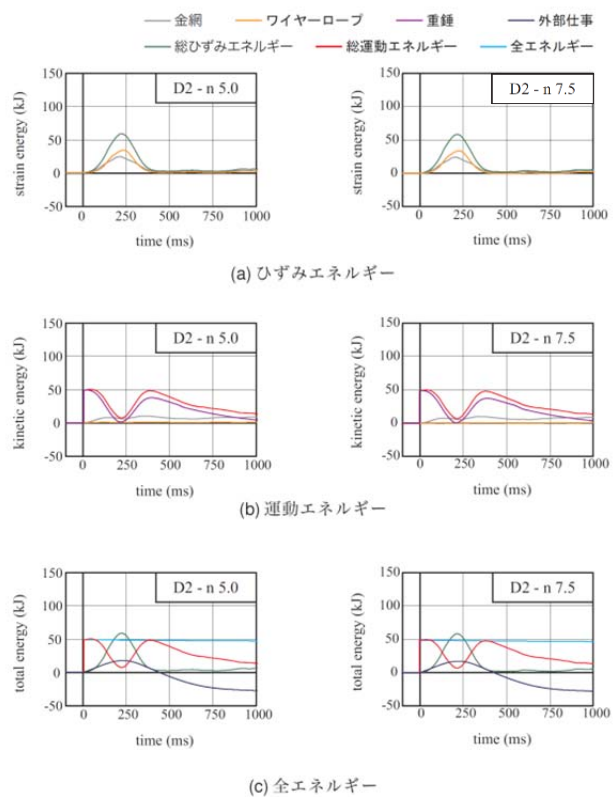


図-4.12 エネルギーの経時変化 (D2-n5.0/n7.5)

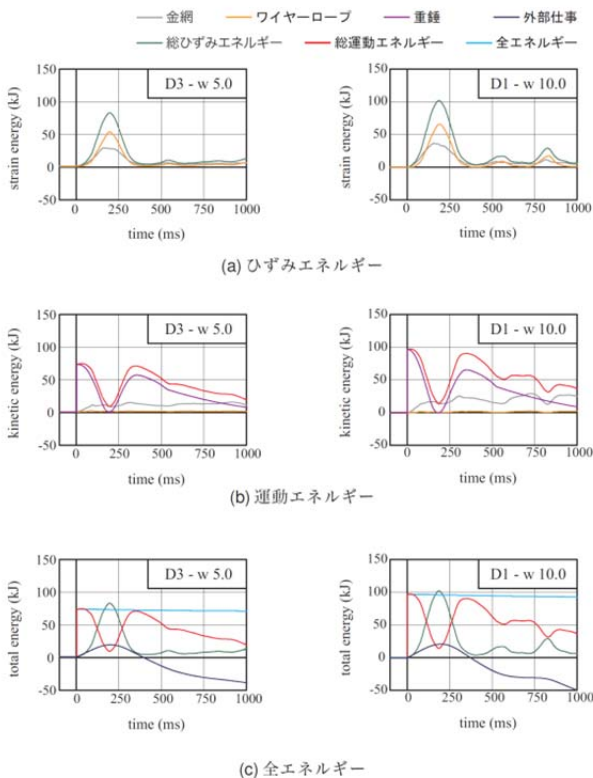


図-4.13 エネルギーの経時変化 (D3-w5.0/D1-w10.0)

した実規模重錘衝突実験を対象に、その耐衝撃性能を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的に、LS-DYNA を用いた三次元弾塑性衝撃解析を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようなになる。

・静的載荷実験に関して、

- 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。

・重錘落下衝撃実験に関して、

- 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は、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。

・三次元弾塑性衝撃解析に関して、

- 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、実験結果の重錘衝撃力および縦ロープ張力は若干過大に評価する傾向にあるものの、重錘落下位置における金網の変位量および横ロープ張力はほぼ適切に再現可能である。

- 5) 入力エネルギーに関わらず最大変位時における金網とロープのひずみエネルギーの分担率は 1 : 2 程度である。

## 参考文献

- 1) 山口 悟, 今野久志, 西 弘明, 佐々木哲也, 小室雅人: 従来型ポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験, 鋼構造年次論文報告集, 巻 21 巻, pp.104-110, 2013 年 11 月
- 2) 西 弘明, 今野久志, 山口 悟, 加藤俊二, 栗橋祐介: 従来型ポケット式落石防護網の耐衝撃性能に関する実規模実験, 土木学会北海道支部平成 25 年度論文報告集, 2014.2

- 3) 小室雅人, 山口 悟, 平田健朗, 西 弘明, 今野久志, 佐々木哲也: 従来型ポケット式落石防護網の耐衝撃性能に関する数値シミュレーション, 土木学会北海道支部平成 25 年度論文報告集, 2014.2
- 4) 西 弘明, 今野久志, 山口 悟, 佐々木哲也, 小室雅人: 従来型ポケット式落石防護網の重錘衝突実験, 第 11 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2014.10
- 5) 山口 悟, 今野久志, 西 弘明, 加藤俊二, 小室雅人: 落石防護網の実規模模型実験, 鋼構造年次論文報告集, 巻 22 巻, pp.137-143, 2014 年 11 月
- 6) 平田健朗, 小室雅人, 西 弘明, 今野久志, 山口悟: 従来型ポケット式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, 巻 22 巻, pp.131-136, 2014 年 11 月
- 7) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧、2000 年 6 月
- 8) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Liv-ermore Software Technology Corporation, 2012.

## A 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

YAMAGUCHI Satoru

KAKUKA Ko

**Abstract:** As a part of studies for establishing measures against large-scale landslide disasters, this study aims at elucidating the functions required of rock-fall protection structures (i.e., nets and fences) 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.

In FY 2014, static loading tests and falling-weight impact tests were performed for analyzing the behavior of conventional pocket-type rock-fall protection nets with the aim of calculating the amount of energy absorbed by rhombic wire mesh (i.e., a component of conventional pocket-type rock-fall protection nets) as well as of identifying a constitutive law for materials that was applicable to numerical analysis of energy absorption. Additionally, three-dimensional elastic-plastic impact response analysis was conducted regarding full-scale falling-weight impact tests that had been performed in previous fiscal years for simulating the behavior of pocket-type rock-fall protection nets, and the validity of the analytical technique was assessed. The energy-absorbing mechanism of the pocket-type rock-fall protection nets was also analyzed.

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