

2.6 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、宮川智史

【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の落石防護工に求められる機能を明らかにするとともに、性能照査技術を確認することを目的に実施している。

落石防護工に求められる機能の提案に関する研究では、高エネルギー吸収型落石防護柵に対する海外の性能照査基準を収集し照査項目等について調査を行った。また、国内の各種工法については、NETIS に登録されている工法について、性能照査のために実施された実験手法あるいは数値解析手法について調査を行った。これ等の調査結果より、実験的あるいは解析的な性能照査手法において策定すべき照査項目等について検討を行った。

部材・要素レベルの性能照査技術の開発に関する研究では、実験および解析による性能照査手法策定に向けた基礎的検討として従来型の落石防護柵を対象として、金網部に対する静的および衝撃載荷実験を実施するとともに、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、エネルギー吸収機構に関する検討を行った。

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

1. はじめに

近年、高エネルギー吸収型といわれるような様々な落石防護工（落石防護柵、網）が開発され、従来からの落石対策工の一つであるロックシェッド等の適用範囲と同様な落石エネルギー範囲までの採用事例も増加してきている。それらの性能評価については、開発者独自の実験や解析に委ねられており、統一的な指標が無く従来型との性能比較も曖昧で安全余裕度も不明確である。落石防護工の性能（安全性）は、道路交通や人命に直接的に関わるものであることから、落石対策工として求められる機能を明らかにするとともに、その性能照査技術を確認し、具備すべき安全性の確保や新技術開発に寄与することが求められている。

以上の背景より、本研究では、従来型の落石防護柵および現在提案されている高エネルギー吸収型の各種落石防護工の設計法について調査整理を行う。さらに、要素・部材レベルおよび全体構造系での実験・数値解析の実施により、落石防護工として求められる機能や性能評価に関する検討を行う。これらより、高エネルギー吸収型落石防護工の性能照査技術や安全余裕度照査技術を確認する。

2. 落石防護工に求められる機能に関する検討

2.1 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)

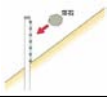
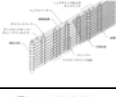
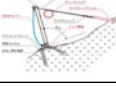
上記認証指針の SAEFL における指針の目的として以下のことが記述されている。

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。ガイドラインのユーザーは、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。ガイドラインは、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

2.6 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

表ー2.1 NETIS 登録されている高エネルギー吸収型落石防護柵の例

NETIS 登録番号	工法名	規格	可能吸収 E (kJ)	工法 イメージ	特 徴	雪圧に 対する 対応	実績件数			建設 技術 審査 証明
							国土 交通省	公共 機関	民間等	
HR-010010-A	HSF工法		250		落石防護と雪崩予防の兼用柵として開発された工法であり、雪崩予防柵単独としての適用も可能である。 支柱は鋼管内部に三角形を有した補強板を配置し、無収縮モルタルを充填しており、これにワイヤロープ、金網を取付ける構造となっている。	◎	8	40	4	-
CB-980032-A	RSS工法	レギュラー	1000		支柱は内部にP.C鋼棒が配置された高流動コンクリート充填鋼管となっており、ワイヤロープには定着緩衝装置、中間緩衝装置の2段階の緩衝装置を取付け、ワイヤロープ端部には端ストッパーが取り付けられた構造となっている。	○	27	210	7	-
		M400	400							
		SI500	1500							
SK-020001-V	ルーフフェンス		600		支柱は鋼管内に鉄筋を配置し、高流動コンクリートを充填したコンクリート支柱を用い、ワイヤロープを隣接する支柱に環状に巻き付け、両端の重台部のみに設置した緩衝金具をディスタンスキーパーにより落石の衝撃力を柵全体に分散させながら落石エネルギーを吸収する構造。	△	23	98	0	-
HR-990001-V	リングネット工法	RX-Q25 RX-Q75 RX-100 RX-150 RX-200 RX-300	250 750 1000 1500 2000 3000		リング状に編まれた特殊な金網と、金網を吊っている特殊なサポートロープ、支柱の頭部から地山に連結している特殊ワイヤロープにて構成され、落石による荷重は金網の伸び、ブレイキワイヤーの収縮、支柱の変形等により段階的にエネルギーを吸収する構造となっている。	△	84	350	18	(財)砂防地すべり技術センター
SK-010023-V	MJネット工法	C-015 C-025 C-10 C-15 C-30	150 250 1000 1500 3000		ネットと支柱は独立しており、落石時支柱には大きな力は作用しない構造になっている。また、ネットとブレイキシステムを連結しているワイヤロープは上下とも同量スリップする。この構造により、落石の回転運動によるかけ上がりや、こぼれを防ぐことが出来る。	△	8	93	0	-
QS-080010-A	ハイスジュールネット工法	HJN-250 HJN-500 HJN-1000 HJN-1500 HJN-2000 HJN-3000	250 500 1000 1500 2000 3000		支柱間の上部、下部に張られた二重平行ケーブルの間にワイヤケーブルを交差グリップにて編んだケーブルネット、支柱を支える保持ケーブル及び上下部ケーブルに設置されるブレイキエレメントにより構成され、大きな落石エネルギーに対し、各部に配置されたブレイキエレメントにより衝撃力の緩和、エネルギーを吸収する構造となっている。	△	1	5	2	(財)日本建設機械化協会
HR-090007-A	マクロフェンス	500kJ 1000kJ 2000kJ 3000kJ 5000kJ	500 1000 2000 3000 5000		ネットと緩衝装置の変形によって、エネルギー吸収させる構造である。緩衝装置は、あらかじめワイヤロープとセットになった鋼管状の装置で、一定以上の張力が働くと装置が圧縮され、つぶれることでエネルギー吸収を行う。	△	0	0	0	-

- ・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。また、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。

今後、国内において同種指針を作成するためには、上記3種類の認証指針について各種規定を設定した背景など詳細に調査する必要があるものと考えられる。

2.2 国内における各種落石防護工

国内における高エネルギー吸収型落石防護工の開発状況を把握するために、NETIS 登録されている高エネルギー吸収型落石防護工に関する資料収集を実施した。

表ー2.1 に、NETIS 登録されている高エネルギー吸収型落石防護工の一例を示す。さらに、各工法について性能照査のために実施された実験手法あるいは数値解析手法についてアンケート調査を実施した。

調査項目は以下の通りである。

Q01. 高エネルギー吸収柵の実験は実施されているか

Q02. 可能吸収エネルギーの根拠はなにか

- ・部材吸収エネルギーの足し合わせ
- ・実験あるいは解析

Q03. 全体系の実験か

- ・実験方法（静的 or 動的）
- ・実験条件（場所、荷重載荷方法、載荷位置、固定方法）
- ・落体の重量・形状・大きさ
- ・準拠されている指針はあるか
- ・カタログに記載されているスペック全ての実験を実施されているか

Q04. 柵の構成部材

- ・エネルギー吸収する主たる部材
- ・部材実験は実施されているか
- ・どの部材について実験しているか
- ・実験方法（静的 or 動的）

Q05. 実施されている実験に対して数値解析は行っているか

いるか

- ・数値解析の内容（全体 or 部材、二次元 or 三次元）
- ・実験と解析の結果は整合しているか
- ・可能吸収エネルギーの根拠に解析は絡むか

Q06. 「落石対策便覧」によると、落石エネルギーは線速度エネルギーと回転エネルギーを合計した値で算定されるが、落石の回転による影響をどのように考えているか

Q07. 積雪地域で用いるにあたり、積雪に対する影響をどのように考えているか

Q08. 近年全国的に多発している土砂崩壊に対してはどのように考えているか

今後、国内で採用されている高エネルギー吸収型落石防護工について、現地調査を実施し、経過年数や落石の履歴、部材の健全性等について整理するとともに、問題点を抽出し同種防護工が具備すべき仕様や性能についてさらに詳細に把握する。

3. 部材・要素レベルの性能照査技術の開発に関する検討

3.1 検討目的

実験および数値解析による性能照査手法策定に向けた基礎的検討として、従来型の落石防護柵を対象として、金網部に対する静的および衝撃载荷実験を実施した。さらに、落石防護網のエネルギー吸収を適切に評価可能な数値解析モデルの構築を目的に、金網単体を対象とした弾塑性衝撃応答解析を実施した。なお、本数値解析には非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA(ver.971)を用いている。

3.2 落石防護柵金網部の耐荷性状に関する実験的検討

3.2.1 実験概要

図-3.1～3.2 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、レーザ式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、 $\phi 3.2\text{mm} \times 50 \times 50\text{mm}$ の菱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载荷にて行っている。静载荷実験については、重錘先端部を载荷版とし油圧ジャッキを用いて実施している。

3.2.2 実験結果

(1) 静载荷実験

図-3.3 には、静载荷実験における荷重変位関係を

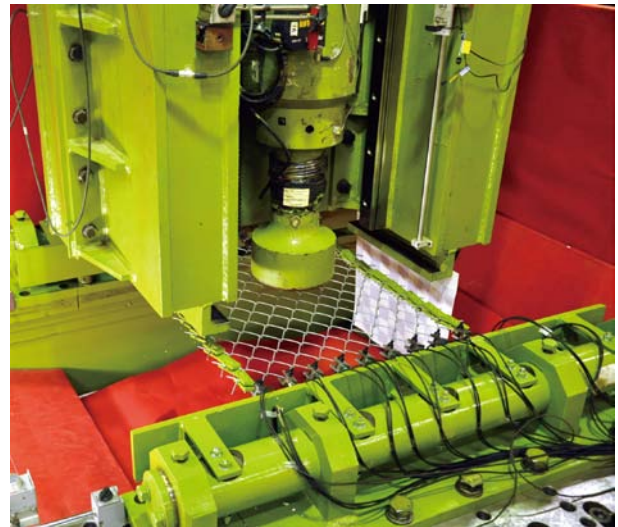


図-3.1 実験状況

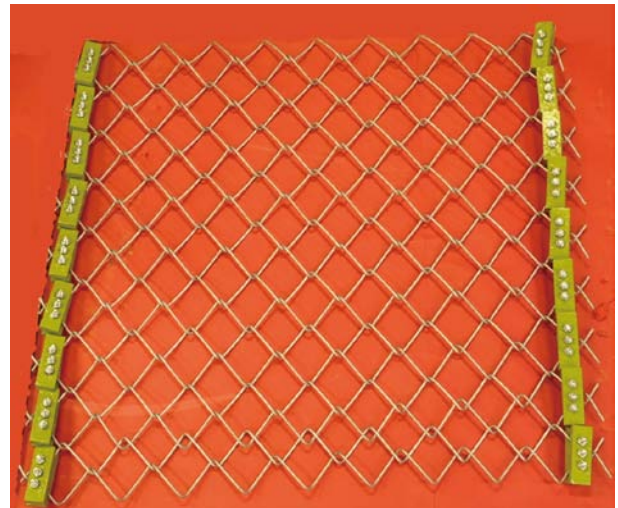


図-3.2 実験に使用した金網

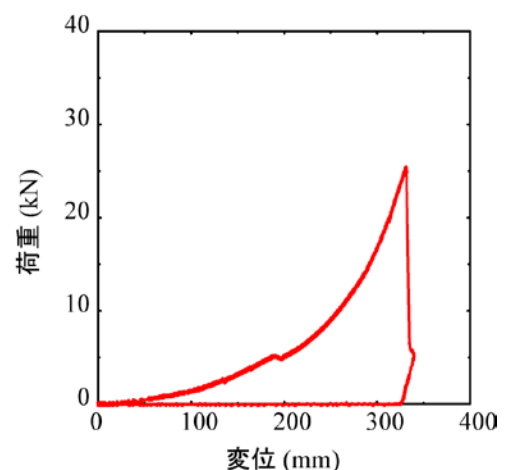


図-3.3 静载荷実験結果

を示す。载荷荷重は、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。

表-3.1 試験体一覧

試験体名	荷重方法	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 回目の荷重時には破断なし 2 回目の荷重時に破断, 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	載荷点近傍にて一部破断
NL-IS-1.0	衝撃 単一	1400	1.0	破断なし 重錘落下防止用 EPS に衝突

(2) 重錘落下衝撃実験

表-3.1 には、重錘落下衝撃実験における試験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-3.4 に示す。

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-3.2 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。

3.3 落石防護柵の金網の耐荷性状に関する解析的検討

3.3.1 数値解析概要

図-3.5 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 2×2 Gauss 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ため、それらを詳細にモデル化することは、計算時間の観点から現実的ではない。従って、本研究では、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-3.6 には、本数値解析における境界条件を示している。境界条件に関しては、ロードセル部分の節点

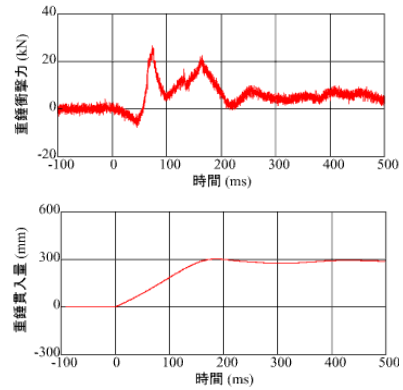


図-3.4 時刻歴応答波形 (N-IS-1.42)

表-3.2 衝撃実験応答値一覧

試験体名	荷重方法	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	-

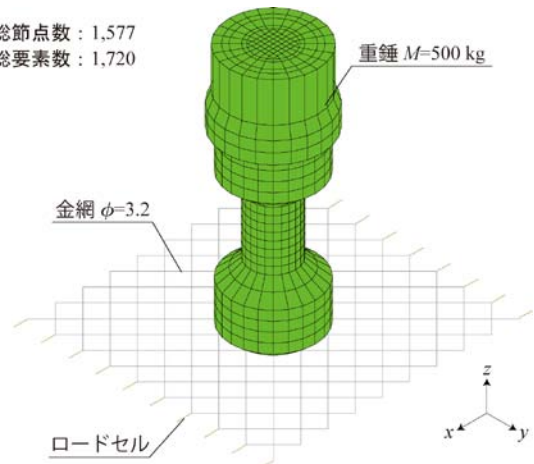


図-3.5 解析モデルの要素分割状況

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、衝突体一金網間には、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-3.3 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-3.7 には、事前に実施された金網の引張試験より得られた応力-ひずみ関係および数値解析で適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-ひずみ関係をトリ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。

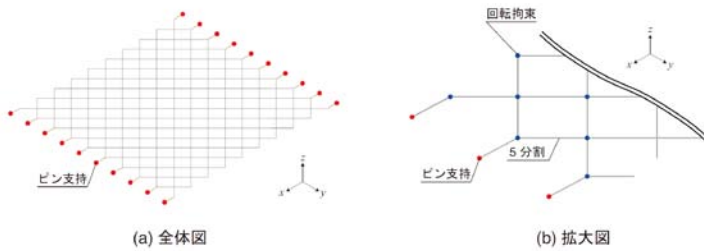


図-3.6 境界条件

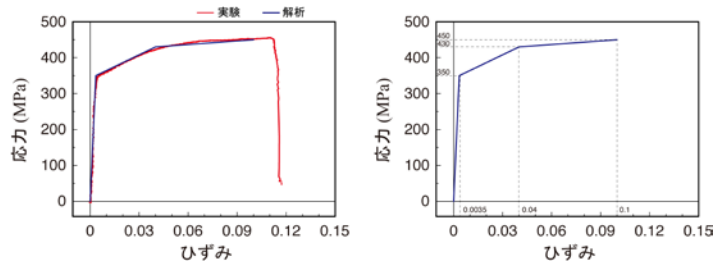


図-3.7 金網の応力-ひずみ関係

表-3.3 物性値一覧

材料	密度 ρ (t/m ³)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
鉄衝ネット (φ3.5mm)	7.85	350	450	100	0.3
鋼材	7.85	-	-	103	0.3
重錘	-	-	-	206	0.3

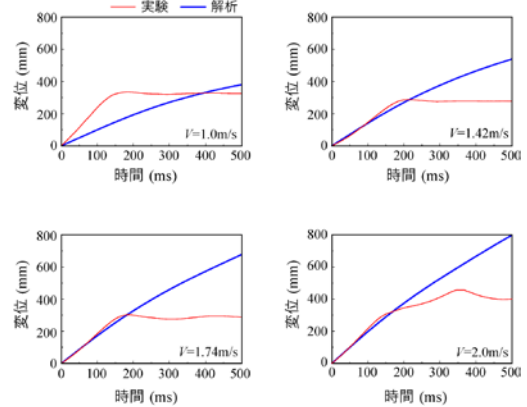
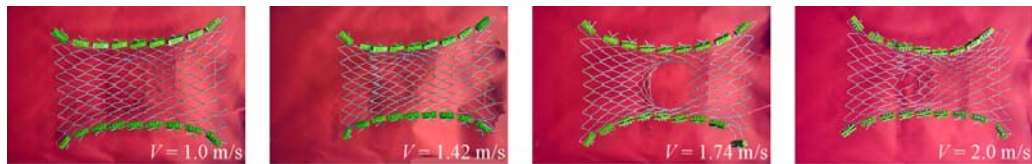
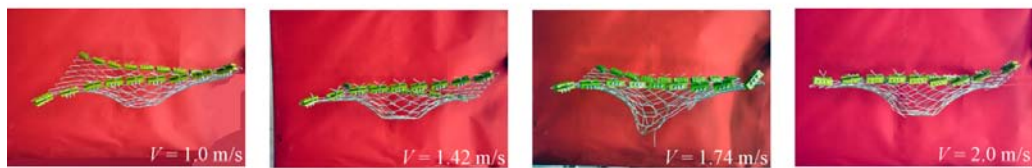


図-3.8 重錘貫入量波形

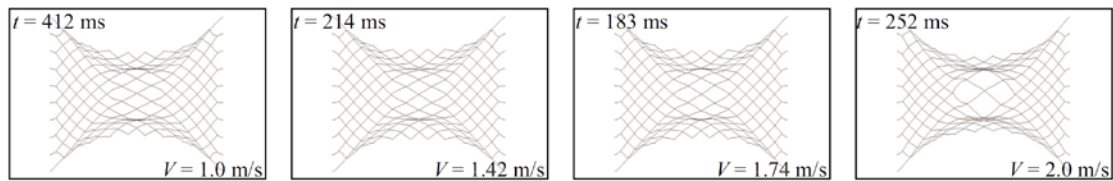


(a) 平面図

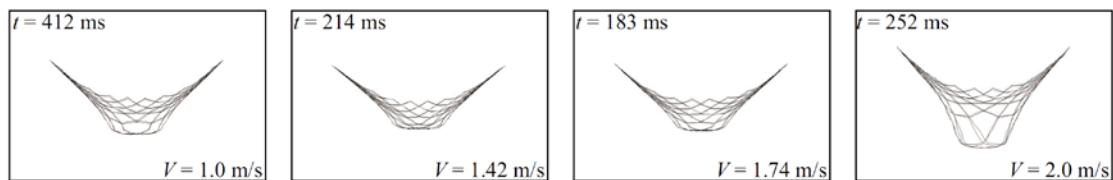


(b) 側面図

図-3.9 実験終了後の変形状況 (実験結果)



(a) 平面図



(b) 側面図

図-3.10 最大変位発生時刻の変形状況 (解析結果)

3.3.2 数値解析結果

図-3.8 には、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ことからこの原因について再検討する必要がある。

図-3.9、3.10 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、重錘载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载荷点部に至るまでの形状等両者は良く対応している。

4. まとめ

本研究により得られた成果をまとめると以下の通りである。

- 1) エネルギー吸収型落石防護柵に対する海外の性能照査基準を収集し照査項目等について調査を行った。
- 2) 国内の各種工法については、NETIS に登録されている工法について、性能照査のために実施された実験手法あるいは数値解析手法について調査を行った。
- 3) 実験および解析による性能照査手法策定に向けた基礎的検討として従来型の落石防護柵を対象として、金網部に対する静的および衝撃载荷実験を実施した。
- 4) 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ことが分かった。

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

MIYAGAWA Tomofumi

Abstract: This study was conducted to clarify the functionality required in high-energy-absorption rockfall protection structures which have been increasingly adopted in recent years and to establish performance verification technology for the purpose of developing countermeasures against large-scale landslide incidents. To identify the functionality required in rockfall protection structures, performance verification criteria on high-energy-absorption rock fences were collected from overseas to determine their characteristics and clarify other related details. In regard to methods used in Japan, NETIS-registered experimentation and numerical analysis methods employed for performance verification were examined. Based on the study results matters to be considered and other details of experimental or analytical performance verification methods were examined.

Concerning the development of component/element-level performance verification technologies, static and impact loading tests of wire parts were conducted for conventional-type rock fences as a basic study toward the formulation of experiment- and analysis-based performance verification methods. Three-dimensional elastoplastic impact response analysis was also conducted to examine the energy absorption mechanism.

Keywords: rock-fall protection structures, high-energy-absorption structures, performance verification technology, impact loading test, energy absorption mechanism