

支柱強化型高エネルギー吸収落石防護柵実物実験の数値解析

Numerical analysis of the Full-scale test on the high-energy absorbing rockfall guard fence with the strengthened posts

手嶋良祐*, 福永一基**, 二見豪***, 松本葉***

Ryousuke Teshima, Kazuki Fukunaga, Gou Futami, Shiori Matsumoto

*ゼニス羽田(株), 技術部グループリーダー (〒102-0083 東京都千代田区麴町 5-7-2)

**博 (工), ゼニス羽田(株), 技術部担当部長 (〒102-0083 東京都千代田区麴町 5-7-2)

***ゼニス羽田(株), 技術部 (〒102-0083 東京都千代田区麴町 5-7-2)

Key Words : high-energy absorbing rockfall guard fence, Full-scale test, dynamic analysis

キーワード：高エネルギー吸収落石防護柵，実物実験，動的解析

1. はじめに

平成 29 年 12 月に「落石対策便覧」¹⁾(以下、「便覧」という)が改訂され、山間部の道路脇コンクリート擁壁頂部等に設置する一般的な従来型落石防護柵以外の落石防護柵については、実物実験により要求性能に対する性能検証が必要とされ、その方法が規定された。現状、従来型落石防護柵が対象としていない 150~3000kJ の高いエネルギーを持つ落石に対して開発した高エネルギー吸収落石防護柵(以下、「高エネ柵」という)は、表-1 の便覧の実験条件に従い、開発各社において実物実験による性能検証が行われている。一方で、実設計における高エネ柵の設置条件には多様性があり、特に柵高、スパン幅、落石衝突位置に対して実験で全てを網羅することは難しい。そこで、便覧では性能確認実験と異なる設置条件の性能検証について、部分的な実験や実物実験での性能確認実験を含む、複数の実験との整合性を確認した数値解析的手法等を用いて補完することとしている。

本研究は自立支柱式の高エネ柵のうち、特に高耐力、高靱性を持たせた支柱を使用する支柱強化型²⁾高エネ柵を対象として、実設計で使用するために実施した数値解析的手法までの流れとその結果について述べる。

2. 支柱強化型高エネルギー吸収落石防護柵の概要

対象とする支柱強化型高エネ柵は構成する主要部材の変形能に期待して落石エネルギーを吸収する防護柵である。概要図を図-1 に示し、変形能を期待する主要部材とその役割を以下に述べる。

(1) 支柱

地中や擁壁等に固定した支柱は、高耐力・高靱性を担保するために図-2 のように構造用鋼管の内部に鉄筋を配置し、コンクリートを充填した充填鋼管柱である。落石時にワイヤロープから伝わる落石エ

表-1 実験供試体および実験条件

項目	内容	
供試体	構造体の標準的外形寸法の実物大を原則とする。	
スパン数	3 スパン(支柱 4 本)を標準とする。	
支柱間隔	任意とする。ただし供試体の延長が現地における最低設置延長とする。	
実験方式	斜面滑走式、転落式、振り子式、鉛直落下式等	
重錘形状, 材質	多面体コンクリート(密度 2,300~3,000kg/m ³)を基本とする。	
衝突速度	25.0m/sec 以上を標準とする。	
入射角度	阻止面に対し垂直を基本とする。	
衝突位置	水平方向	スパン中央を基本とする。
	鉛直方向	実験精度を踏まえ鉛直高さ中央から最大衝突高さの間で設定する。

エネルギーにより支柱が塑性変形することでエネルギーを吸収する。

(2) ワイヤロープおよび緩衝装置

支柱間に張設されたワイヤロープは、1本のワイヤロープを隣接する2本の支柱に巻き付けて環状とし、その重合箇所には一定の張力が作用するとスリップする摩擦型の緩衝装置（図-3 参照）を設置している。スリップ張力×スリップ量により落石エネルギーを吸収するとともに、支柱へ伝達する荷重を制御する役割も持っている。

(3) 金網及び間隔保持材

金網はひし形金網を用いている。ひし形金網は素線交点が1回の捩れによりルーズに絡んだ状態になっており変形能に優れており、この変形能により落石エネルギーを吸収する。また間隔保持材とともにワイヤロープの間隔を一定以上開きにくくする間隔保持機能を有している。

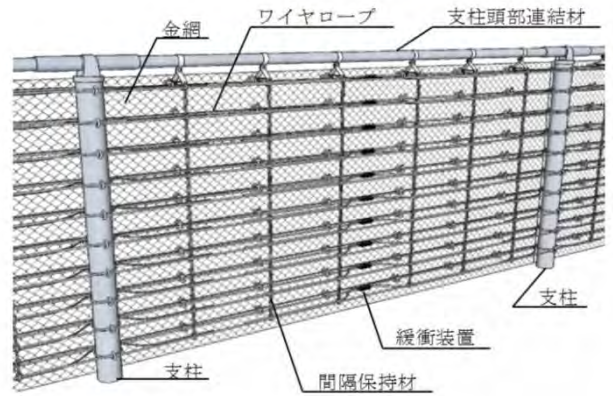


図-1 支柱強化型高エネルギー吸収落石防護柵

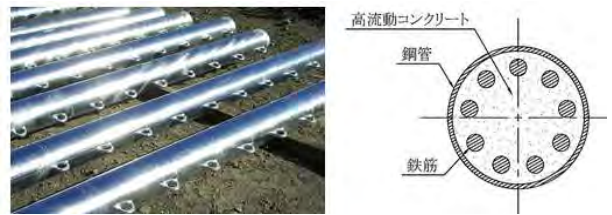


図-2 支柱の構造

3. 本研究の流れ

本研究のフロー図を図-4に示す。支柱強化型高エネ柵に使用する各主要部材について特性確認試験と、特性確認試験をモデル化した数値解析を行い、両者の結果を比較して各主要部材の数値解析モデルを検証する。

その後、支柱強化型高エネ柵の実物実験結果と主要部材の数値解析モデルを組み合わせた支柱強化型高エネ柵の数値解析を行い、支柱強化型高エネ柵では特に重要視される張出量の結果を比較した。

本論文では解析に用いる素材自体の特性値についてはミルシート等の素材試験結果で確認することから省略する。なお、本研究の数値解析はANSYS社のLS-DYNAを用いている。

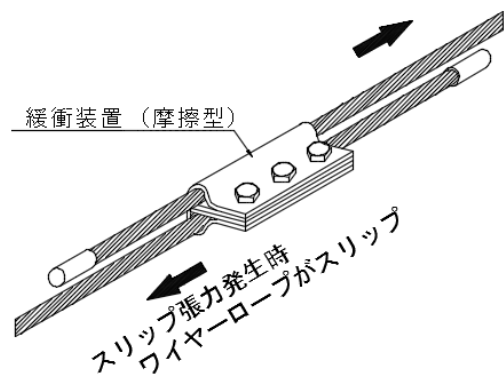


図-3 緩衝装置の概要

4. 主要部材の特性確認試験と数値解析

4.1 支柱

(1) 特性確認試験方法と数値解析モデル

支柱の特性値を曲げ性能とし、図-5に示すように4.0mスパン単純支持の3点曲げ静的曲げ試験を実施した。一方で数値解析に使用する支柱のモデルは図-6に示すように鋼管と鉄筋コンクリートをそれぞれ弾塑性体の梁要素とし、節点を共有させることで充填鋼管全体をモデル化した。荷重作用および

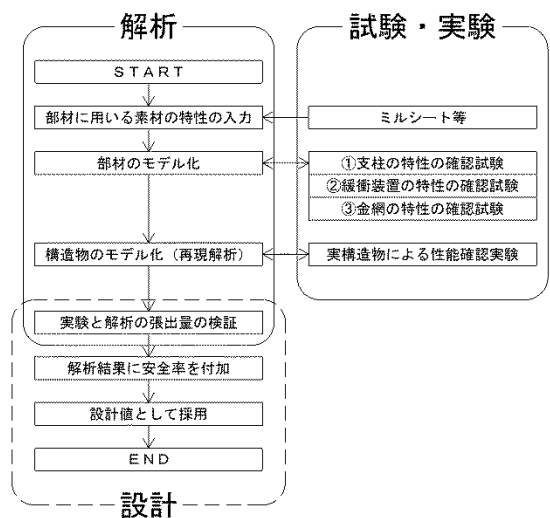


図-4 本研究のフロー

境界条件は特性確認試験同様に 4.0m スパン単純支持とし、スパン中央に強制変位を与え、強制変位による支点反力の合計から支柱に作用した荷重を用いてM-回転角度曲線を求めた。

(2) 支柱モデルの検証

試験結果と数値解析結果を比較したM-回転角度曲線を図-7 に示す。試験結果より支柱の塑性抵抗モーメントは 180kN・m 程度と判断した。一方、解析値の塑性抵抗モーメントは 140kN・m 程度と試験値より小さい値が出る結果となった。今回示したモデル以外の鋼管厚さや鉄筋の径・本数が異なる充填鋼管の支柱の数値解析も行ったが、一様に塑性抵抗モーメントは実験を下回る結果であり、これは鋼管による鉄筋コンクリートの拘束効果が反映できていないためだと考えられる。本来であれば鋼管に鉄筋コンクリート充填した状態を忠実にモデル化するか、一つの部材として試行錯誤的な手法により試験結果に合う支柱の剛性や変形性能等を設定する方が試験結果と数値解析結果が近くなると思われるが、本研究では本モデルが、実設計において安全側になると考え、支柱のモデルとして採用することとした。

4.2 ワイヤロープおよび緩衝装置

(1) 性能確認試験方法と数値解析モデル

緩衝装置の特性値をスリップ張力とし、図-8 のように両端支点をヒンジとし、両側から1本ずつワイヤロープを張設し、重合部を緩衝装置で把持した

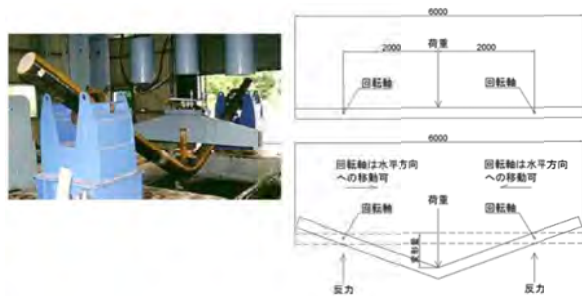


図-5 支柱の試験方法

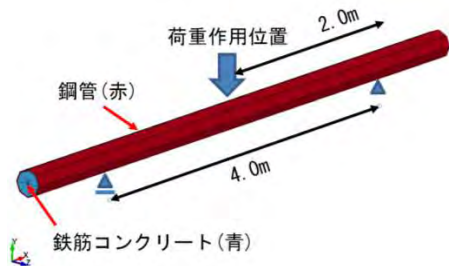


図-6 支柱のモデル化

状態に、重錘を高さ H1 より自由落下させ、ワイヤロープに衝突させる。実験結果として静止高さ H2 と緩衝装置部のスリップ量(L1+L2)を計測し、重錘の位置エネルギーの変化が緩衝装置の仕事量と等しくなるとして緩衝装置のスリップ張力を算出した。

一方で、数値解析に使用するワイヤロープは弾塑性体の梁要素としてモデル化した。緩衝装置は構成する鋼板やボルトがモデル化するには複雑な構造のため、簡易モデルとして降伏荷重=スリップ荷重となる完全弾塑性体の梁要素としてモデル化した。

(2) ワイヤロープ、緩衝装置モデルの検証

試験結果と解析結果を表-2 に示す。静止高さ H2、緩衝装置モデルの伸び量 (=スリップ量) は試験結果に対して解析結果は 5%程度の誤差となっていることから、本モデルをワイヤロープと緩衝装置のモデルとして採用することとした。

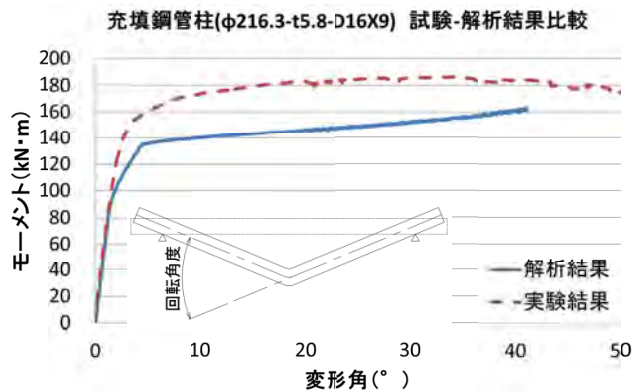


図-7 支柱のM-回転角度曲線

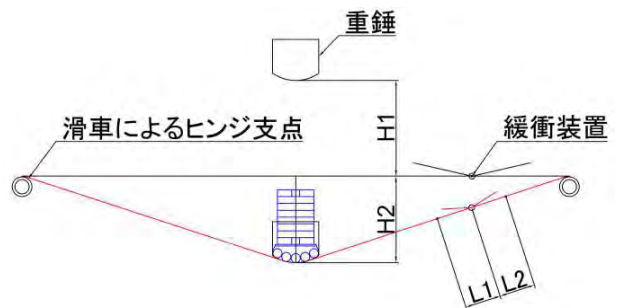


図-8 緩衝装置

表-2 緩衝装置の性能確認試験結果

	落下高さ H1(m)	静止高さ※ H2(m)	スリップ量※ L1+L2(m)	スリップ張力 (kN)
1	1.053	1.464 1.458	0.4 0.697	24.18
2	1.050	1.362 1.424	4.6 0.664	25.04
3	1.050	1.288 1.267	1.6 0.527	29.48

※左上段は実験値、左下段は解析値、右中段は誤差 (%)

4.3 金網

(1) 性能確認試験方法と数値解析モデル

金網の特性値を面内方向の引張荷重—変位関係とし、図-9のように金網の片方の端部をFIX側、他方の端部をMOVE側とし、MOVE側に引張荷重を与え、金網の面内方向の変位量を求めた。固定側のボルトの数を7,9,11本と変化させて試験した。

一方で、図-10の通り金網は2種類のモデル化を行った。1つは、実際の金網を模擬し、複数本の鉄線を3次的に加工して編んだひし形金網形状を忠実に再現したモデル（以下、模擬モデルという）、もう一つは、モデルの簡略化を目的として鉄線と鉄線の交点を剛結合としてモデル（以下、簡易モデルという）である。簡易モデルを例に数値解析の境界条件の設定を図-11に示す。試験のFIX側に当たる点を固定点とし、MOVE側は試験の固定ボルト数と同数の点を強制変位させ、固定点の反力から金網に作用した引張荷重を求めた。なお、試験装置の都合により実験での変位量は350mmまでとなっている。

(2) 金網モデルの検証

図-12は金網の静的引張試験結果を点線、模擬モデル数値解析結果を実線、簡易モデル数値解析結果を破線で示している。固定点の数に関わらず金網の引張荷重—変位関係は試験と両モデルの数値解析結果とほぼ一致する。模擬モデルは要素同士の接触が多いため解析コストが大きく、数値解析に時間が掛

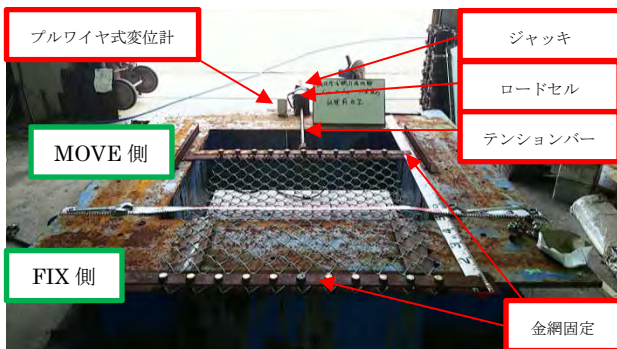


図-9 金網面内方向引張試験

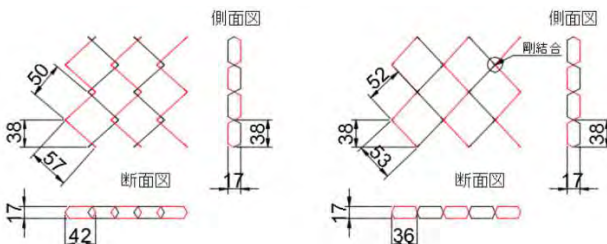


図-10 金網のモデル化

(左が模擬モデル、右が簡易モデル)

かってしまう一方で、簡易モデルは解析コストが小さいながら模擬モデルと同等のレベルで評価できると考え、簡易モデルを金網のモデルとして採用することとした。

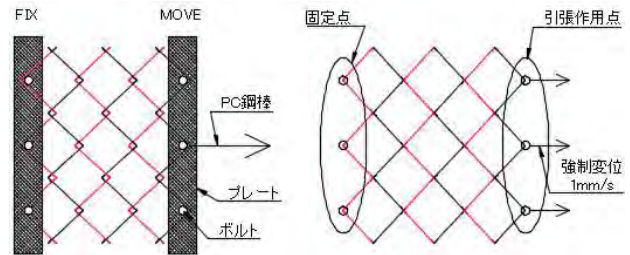


図-11 解析における境界条件
(左が特性確認試験、右が簡易モデル)

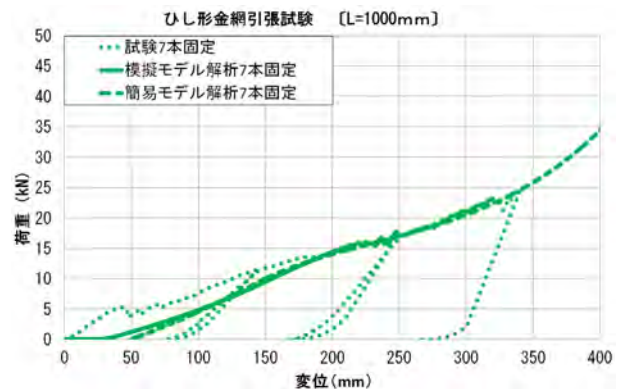
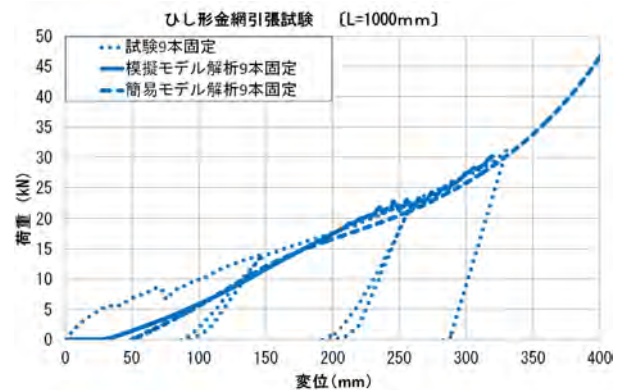
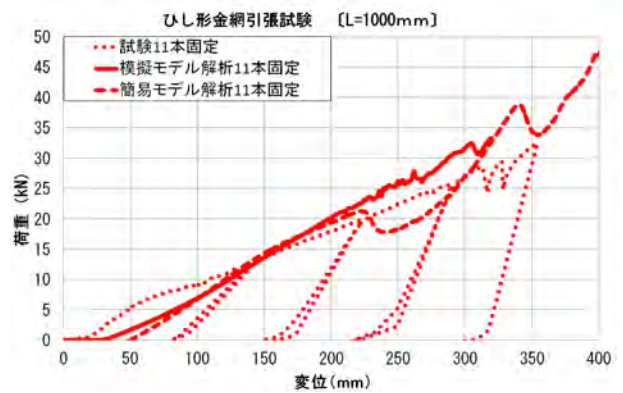


図-12 金網の面内方向引張荷重—変位関係比較
(上から固定点が11, 9, 7本)

5. 構造物としての実物実験と数値解析の比較

5.1 実物実験と数値解析モデル

実物実験は表-1の実験条件に合わせ、鉛直落下式で4種類の落石エネルギーについて実施した。

一方で支柱強化型高エネ柵の数値解析モデルは4.でモデル化した主要部材を組み合わせて作成し、実験条件と同様に鉛直落下式で4種類の落石エネルギーについて解析した。

5.2 支柱強化型高エネ柵の張出量に対する検証

主に道路脇に設置される支柱強化型高エネ柵の設計では、落石衝突時に張出した金網等が道路の建築限界を侵さない位置に設置することが求められる。そのため、実設計では数値解析結果に求められるの

は捕捉の有無は当然であるが、張出量が重要視されることが多い。張出量に着目した実物実験結果と数値解析結果を図-13および表-5に示す。図-13の重錘停止時の変形形態は数値解析により得た画像と比較して違和感無く、良くシミュレートできているのではないかと考える。実際に張出量を比較した表-3では解析値/実験値がケースDを除き、概ね $\pm 7\%$ に収束している。ケースDについては若干誤差の増加が見られるが、間隔保持材本数が他のケースより大幅に増加していることから、誤差が累積されやすい傾向にあるのではないかと考える。いずれにせよ、張出量に関しては安全率を乗じて安全側に設計を担保できるレベルであり、便覧に示されている数値解析的手法として耐え得るものであると考える。

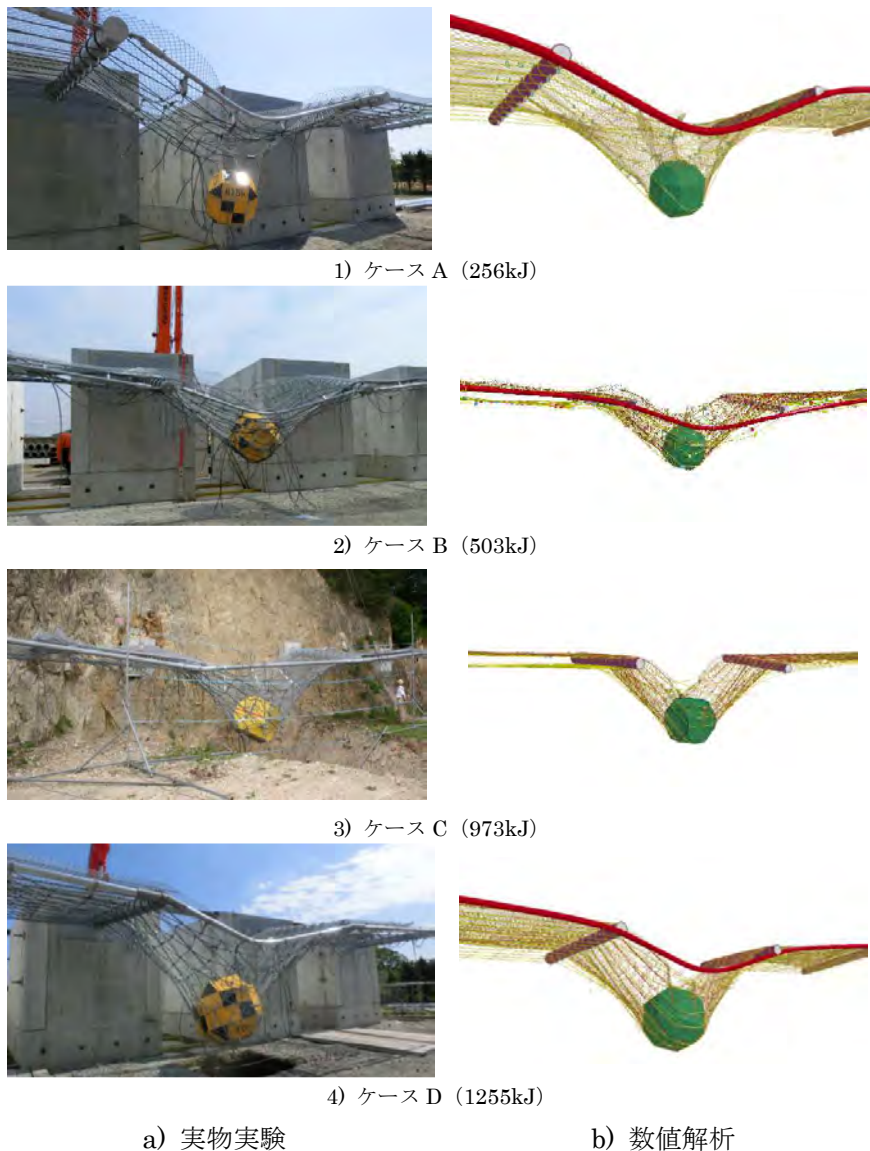


図-13 実物実験と数値解析の最大張出状況比較

表-3 実物実験と数値解析の張出量比較

ケース	A	B	C	D	
落石エネルギー	256kJ	503kJ	973kJ	1255kJ	
柵高	3.0m	3.0m	3.0m	3.0m	
スパン長	5.0m	5.0m	6.0m	5.0m	
落石位置	スパン位置	中間	中間	中間	中間
	スパン内	中央	中央	中央	中央
張出量	①実験値	2.1	2.3	2.864	2.93
	②解析値	2.178	2.149	2.668	2.666
	②/①	103.7%	93.4%	93.2%	91.0%
	誤差	3.7%	-6.6%	-6.8%	-9.0%

6. まとめ

本論文のまとめは以下の通りである。

- ・ 便覧に示される実物実験を補完するための数値解析的手法として LS-DYNA による計算を試みた。
- ・ 部材の数値解析モデル化は個別の特性確認試験結果を基にできるだけ簡易化した結果、模擬モデルとほぼ同等の結果を得られた。
- ・ 数値解析結果より支柱強化型高エネ柵への落石衝突時の張出量は安全率を乗ずることで設計に用いることができると考える。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会, 落石対策便覧 2017.12
- 2) 土木学会, 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—規準体系の指針—, 平成 25 年 1 月
- 3) 国立研究開発法人土木研究所他: 高エネルギー吸収型落石防護工等の性能照査手法に関する研究 共同研究報告書 平成 29 年 3 月
- 4) 西弘明, 今野久志, 荒木恒也, 山澤文雄: 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, 土木研究所 平成 27 年度プロジェクト研究
- 5) 荒木恒也, 今野久志, 弘明, 室雅人, 中優貴: 落石防護網に使用するひし形金網の重錘落下衝撃実験, 土木学会構造工学論文集 Vol.63A 2017 年 3 月
- 6) 難波正和: 緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の防護性能に関する研究, 金沢大学, 博士論文 平成 28 年 3 月
- 7) ループフェンス研究会, 高エネルギー吸収落石防護柵 Loop フェンス設計・施工・積算要領 平成 27 年 11 月 1 日