

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420456

研究課題名(和文) ポケット式落石防護網の設計法の課題に対する衝撃応答解析による解明

研究課題名(英文) Investigation by an impact response analysis into problems in the design procedure for a pocket-type rockfall protection net

研究代表者

前川 幸次 (MAEGAWA, KOJI)

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：00124024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ポケット式落石防護網の設計は切土工・斜面安定工指針や落石対策便覧等の設計法に基づいており、各構造要素の吸収エネルギーの累加方式やエネルギーロスの考え方は簡便であることから有益な設計手法である。しかし、エネルギーロスの評価について問題視されたが曖昧になっていた。本研究は、ポケット式落石防護網の多数の実設計例について衝撃応答解析を行い、エネルギーロスや累加エネルギー方式による性能評価を行ったポケット式落石防護網は安全性の観点から問題がないことを示した。

研究成果の概要(英文)：A design method of a pocket type rockfall-protection net is based on design guidelines such as Rockfall Mitigation Handbook, and the cumulative absorption-energy system of each structural element and the view of energy loss are useful design techniques for simplification in the design works. However, the evaluation of the energy loss has been regarded as questionable, since the parameters for calculating the energy loss are not defined clearly in the design guidelines.

Through impact response analyses of the energy absorption process in a pocket type rockfall-protection net, this research has found that there is no doubt of the safety in the pocket type rockfall-protection nets designed by the cumulative absorption-energy system and the view of an energy loss.

研究分野：工学

キーワード：ポケット式落石防護網 衝撃応答解析 吸収エネルギー エネルギーロス 道路土工指針 落石対策便覧

1. 研究開始当初の背景

(1) 一般的な落石対策工には、剛構造物であるロックシェッドと柔構造物である落石防護柵やポケット式落石防護網がある。前者は耐荷力（想定される落石衝撃力に対する主に許容応力度設計）、後者は可能吸収エネルギー（構造要素の吸収可能なエネルギーの累加エネルギー）に基づいて設計されている。異なる設計思想の構造物に優劣を付けることはできないが、吸収エネルギーに基づく設計では相対的に安価で見かけ上のコストパフォーマンスが優れているため、近年、高エネルギー吸収型の落石防護柵やポケット式落石防護網を採用・設置する傾向にある。

(2) ポケット式落石防護網の設計では、想定される衝突時の落石が限定区画の防護網と一体となって運動すると見なして運動量保存則を適用しつつ、衝突前後の運動エネルギーの差（エネルギーロス E_L という）を考慮していた。しかし、この E_L の考慮は不適切という疑義が唱えられたため、学術的な議論をすることもなく一部の設計基準（道路土工一切土工・斜面安定工指針）では E_L を排除したため設計現場が混乱した。ただし、本研究の申請とほぼ同時期に、国交省が実物模型実験による E_L の検討を始め、現在は従来型のポケット式落石防護網には E_L の使用が再度認められている。

2. 研究の目的

(1) ポケット式落石防護網の設計において問題視されている「エネルギーロス」の項は、落石とポケット式落石防護網の衝突時に落石と防護網の一部が一体となって運動するものと見なして運動量保存則を適用し、衝突前後の運動エネルギーの差として次式で評価される。

$$E_L = \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_W : \text{エネルギーロス}$$

m_1 : 落石質量, m_2 : 防護網質量(一部)

E_W : 落石の衝突エネルギー

(2) 設計指針や落石対策便覧における落石防護柵やポケット式落石防護網の設計では、捕捉できる落石のエネルギーを評価する際に、より柔な構造であるポケット式落石防護網に対してのみ上述のエネルギーロスが考慮されてきた。また、構造物の可能吸収エネルギーの算定においては、各構造要素の可能吸収エネルギーの累加法を用いており、懐疑的な面もある。

(3) 本研究は、道路土工一切土工・斜面安定工指針で問題ありとして排除された従来型ポケット式落石防護網の簡易設計法における“エネルギーロスの是非”を解明することが目的であり、簡易設計法により設計された複数の従来型ポケット式落石防護網についてその安全性を衝撃応答解析により確認する。

3. 研究の方法

(1) 既設の従来型ポケット式落石防護網につ

いて、設計書で算出した各構造要素の吸収エネルギーを調査し、衝撃応答解析による落石エネルギーの吸収過程と比較することにより、エネルギーロスの妥当性を検討する。そのための主要メーカーの既存の設計書を収集する。

(2) 衝撃応答解析コード LS-Dyna による解析モデルの構築と解析精度の向上のために、研究代表者らが開発を行ってきた高エネルギー吸収型ポケット式落石防護網の実験(図-1)および寒地土木研究所が実施した従来型ポケット式落石防護網の実験(図-2)をベンチマークとして利用した。



図-1 高エネルギー吸収型ポケット式落石防護網^[1]



図-2 従来型ポケット式落石防護網^[2]

(3) 欧州の落石防護柵に関する認証試験指針では、落石の衝突速度を 25m/s 以上に規定している。これは衝突エネルギーが同じであっても落石が小径・軽量で衝突速度が高速になると弾丸効果により網の損傷が起こり易くなることを考慮したものである。一方、ポケット式落石防護網のような超柔構造では、落石が小径・軽量になると設計指針におけるエネルギーロスが大きく算定されることになる。そこで、まず既設のポケット式落石防護網の解析モデルについて設計時の落石条件を用いて数値実験を行う。それにより、ポケット式落石防護網の性能（落石を捕捉できる）が確認できれば、エネルギーロスを考慮した設計手法が安全側過ぎるという理由で排除された

根拠が適切でないと言える。次に、ポケット式落石防護網の性能のさらなる確認のために、設計条件と同じ落石衝突エネルギーの下で、落石の衝突速度を 25m/s として落石径すなわち質量を変えた場合についての数値実験を行い、簡易設計手法の妥当性および結果の安全性を確認する。

4. 研究成果

(1) LS-Dyna による解析モデルの精度の検証

解析モデルの精度の確認は主に図-3 の従来型ポケット式落石防護網の実験²⁾を用いた。ここでは①ワイヤーロープ張力と②防護網の最大突出量について示す。解析モデルの詳細は割愛するが、網モデルの違い(図-4)による精度を実験 A (50kJ), 実験 B (95kJ) および実験 C (142kJ) により確認した。

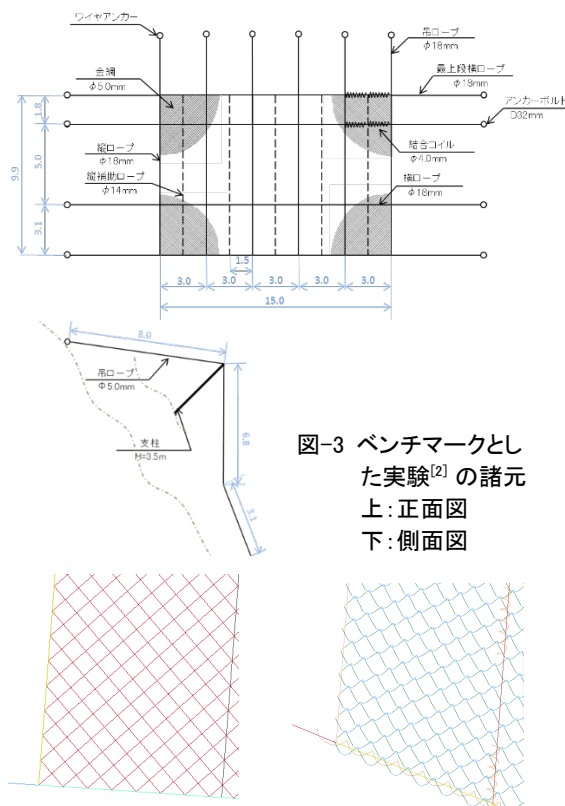


図-3 ベンチマークとした実験²⁾の諸元
上: 正面図
下: 側面図

図-4 網の平面モデル(左)と立体モデル(右)

① ワイヤーロープの最大張力

網のモデル化については、シェル要素による平板で近似を行っている研究もあるが、網の損傷を表現するには網の素線でのモデルが必要である。網の立体モデルでは素線の立体化と結合コイルによるロープとの連結を行っており実際的にはあるが、解析時間への負荷が大で、負荷が 1/60 程度になる平面モデルでの精度が許容できるならば、平面モデルの利用価値は高い。

図-5 は、上から順に解析モデルにおけるロープ張力の計測位置、実験 A, B, C での各ワイヤーロープの最大張力を示している。また、図-6 は実験 A (50kJ) のロープ (L3) を例とした張力の時刻歴である。ロープによっては実験値と解析値の差は大きいですが、主要ロープで

ある 3 段目 (L3, R3) の張力に着目すると平面モデルにより妥当な精度が得られている。

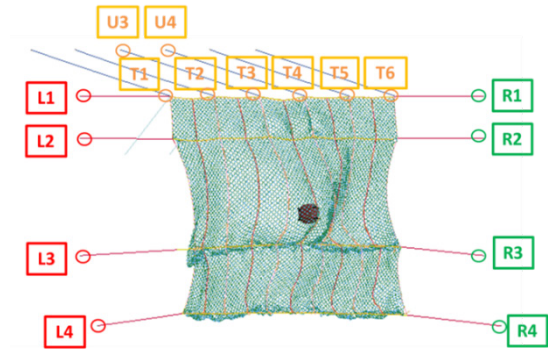


図-5 網モデルとワイヤーロープ最大張力の精度

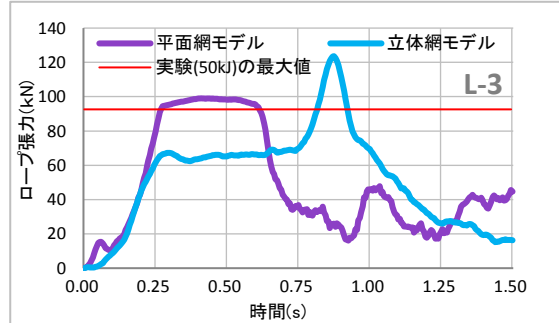


図-6 実験 A (50kJ) のロープ張力(L3)の時刻歴

② 防護網の最大突出量

各実験ケースにおける防護網の最大突出量の比較を表-1 に示す。実験値に比べて平面網モデルは大きくなり、立体網モデルは小さくなる傾向があり、解析値と実験値の差は ±10% 程度である。以上、①と②の結果を総

合的に判断すると平面網モデルの妥当な精度と解析時間の効率化を確認できた。

表-1 ポケット式落石防護網の最大突出量

実験	Energy	実験値	平面網モデル	立体網モデル
A	50 kJ	2.08 m	2.64 m	2.27 m
B	95 kJ	2.87 m	2.97 m	2.62 m
C	142 kJ	3.19 m	3.33 m	2.81 m

(2) ポケット式落石防護網設計例の解析結果
 表-2 は収集した設計事例(No.1~No.7)の諸元を表し、図-7 はそれらの概略形状と設計落石エネルギー E で解析を行った最大突出時の突出量コンターを表す。表中の E_N は金網の最大強度時の作用力と金網の想定変形量により算出される吸収エネルギー、 E_R は衝突範囲の1段目および2段目の横ロープの吸収エネルギー、 E_P と E_{HR} は支柱と吊ロープの吸収エネルギー、 E_L は衝突後の落石と防護網の影響範囲(幅 $a \times$ 高さ b) が一体となって運動するものとして運動量保存則の下で得られる衝突前後のエネルギー差(ロス)、 $E_T (=E_N + E_R + E_P + E_{HR} + E_L)$ は可能吸収エネルギーである。なお現在は、道路土工指針の簡易設計式の適用範囲として、 E_T は 150kJ 以下、防護網の影響範囲は幅 12m 以下 \times 高さ 12m 以下に定められている。

表-2 ポケット式落石防護網設計例の諸元

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
落石重量 W (kN)	1.64	2.41	2.41	0.11	0.11	2.08	1.41
落石径 D (m)	0.5	0.56	0.56	0.2	0.2	0.54	0.47
落石エネルギー E (kJ)	58.7	95.5	33.3	3.08	1.88	26.2	39.4
$E_N + E_R + E_P + E_{HR}$ (kJ)	43.3	31.9	19.0	6.5	6.5	18.1	26.5
金網影響範囲 $a \times b$ (m ²)	12x20	12x10	12x12	12x20	12x20	12x10	12x7
金網索線径 (mm)	$\phi 5$	$\phi 4$	$\phi 3.2$	$\phi 3.2$	$\phi 3.2$	$\phi 3.2$	$\phi 4$
エネルギーロス E_L (kJ)	54.8	72.1	23.5	3.0	1.9	17.9	30.2
可能エネルギー E_T (kJ)	98.1	104	42.5	9.5	8.4	36.0	56.7
主ロープ 3x7G/O	$\phi 18$	$\phi 16$	$\phi 14$	$\phi 14$	$\phi 14$	$\phi 14$	$\phi 16$
横ロープ長 L_h (m)	42	81	36	25-110	55	37	91
縦ロープ長 L_v (m)	65	10	25	25-45	40	10	7

横ロープ間隔 5m, 縦ロープ・柱間隔 3m, 吊ロープ長 10mは同じ

表-2 の落石エネルギー E および可能吸収エネルギー E_T を与えた衝撃応答解析では、防護網の応答は落石エネルギーや防護網の寸法によって異なるが、全事例で金網の貫通はなく落石は捕捉された。したがって、本研究の目的(エネルギーロス E_L を考慮する従来型ポケット式落石防護網の簡易設計法の安全性の確認)について、簡易設計法が安全であることが衝撃応答解析による複数の事象により間接的に示された。以下にそれらの詳細を示す。

図-7 は設計落石エネルギー E の下での最大突出時の突出量コンターを表す。ポケット式落石防護網の縦ロープ下端は最下段の横ロープと三方クリップで結合されているが地盤アンカーがないため、特に防護網の延長が長く高さが低い No.2 や No.7 では最下段横ロープが大きく迫り上がる。

表-3 は各事例の設計落石エネルギー E と可能吸収エネルギー E_T の下での衝撃応答解析による1段目と2段目横ロープおよび左右吊ロープの最大張力を表す。設計では安全率を縦・

横ロープでは 2.0, 吊ロープでは 3.0 とした許容張力で制限し、解析では弾性、降伏点、破断強度をバイリニアで仮定しているために、解析では赤字のように許容張力を超過するロープもあるが、可能エネルギー E_T の作用時でも破断には至らない。

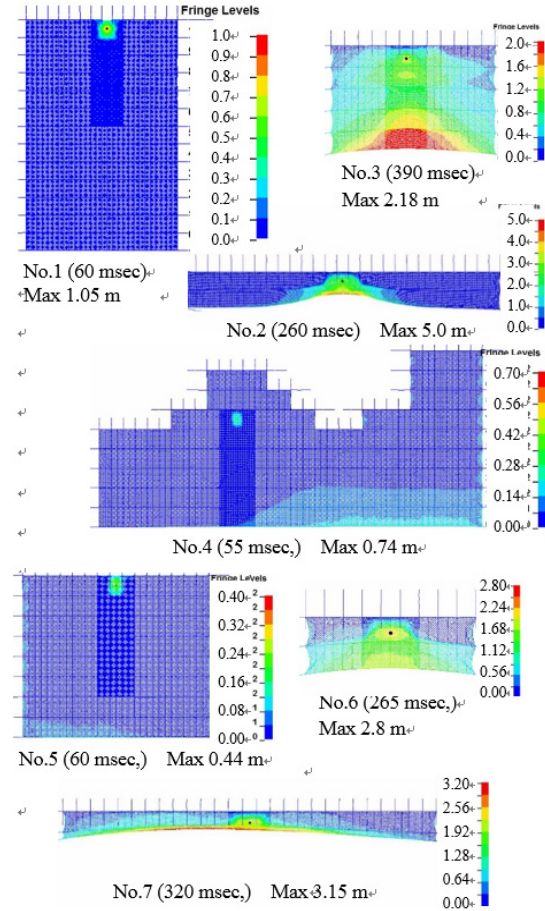


図-7 設計条件 (E) による解析突出量コンター

表-3 1, 2段横ロープ・左右吊りロープの最大張力

No.	E (kJ)	設計エネルギー E による				E_T (kJ)	可能エネルギー E_T による			
		1段横	2段横	左吊	右吊		1段横	2段横	左吊	右吊
1	59	36	54	113	111	98	51	62	130	131
2	96	36	46	36	36	104	39	51	39	39
3	33	26	37	32	31	43	27	33	36	36
4	3	33	41	10	11	10	33	40	12	12
5	2	26	22	12	12	8	28	20	21	21
6	26	23	53	11	12	36	26	59	14	15
7	39	54	54	8	8	57	47	63	20	20

No.* (ロープ破断強度(kN), 横・吊ロープ許容張力(kN)の公称値)
 No.1(157, 79・52), No.2,7(120, 60・40), No.3-6(100, 50・33)

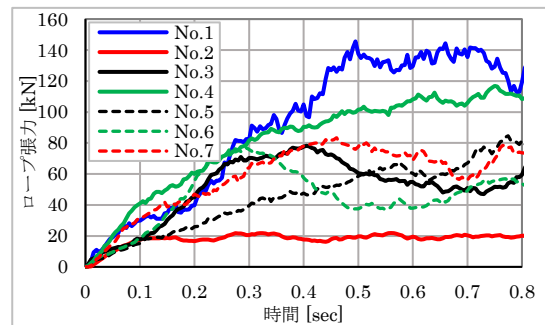


図-8 設計条件 (E) による最下段横ロープ張力時刻歴

一方、実験④においては最下段横ロープの張力が衝突範囲の上・下横ロープの張力に比べて無視できない値が計測されている。最下段横ロープは設計では照査されないが、落石エネルギー E の下での解析結果でも図-8のようであり、破断はしていないがNo.2以外は許容張力を超えており、No.4では破断強度（公称値）に等しい。したがって、図-7で指摘したように最下段横ロープが大きく迫り上がる現象もあり、防護網の下端へ誘導された落石が抜け出す危険性もあることから従来型ポケット式落石防護網の最下段横ロープへの対策が必要である。

表-4は、衝突エネルギーを主として衝突速度により50kJずつ増加させた衝撃応答解析から推定した各防護網の終局限界エネルギー E_U とその状態を示している。 E_U は E_T の4~26倍もあり、終局状態ではロープが破断するのではなく、主に落石が金網を貫通している。

表-4 終局限界エネルギー E_U とその状態(○は捕捉)

No.	E_T (kJ)	限界 E_U (kJ)	E_U/E_T	状態
1	98.2	400○-450×	4.1	網貫通×
2	104.0	800○-850×	7.7	下部迫り上がり・網大破×
3	42.5	400△-450×	9.4	捕捉・網大破△
4	9.5	250△-300×	26.4	捕捉・網大破△
5	8.4	100○-150×	12.0	網貫通×
6	36.0	300○-350×	8.3	網貫通×
7	56.7	350△-400×	6.2	停止・下部迫り上がり△

(3) その他

落石が小径・軽量で衝突速度が高速になると網の損傷が起こり易くなるという弾丸効果については、図-3のモデル④をより一般化した寸法(網の幅15m×高さ10m,横ロープ27m×4本)で衝撃応答解析を行った。その結果、落石速度の一般的な上限値(25m/s)以下で、落石エネルギーが道路土工指針の適用範囲(150kJ以下)であれば、弾丸効果は確認できないが、400kJ程度になると網を貫通することがわかった。網の貫通と最大衝撃力や作用時の力積との関係は確認できなかった。

<引用文献>

[1]難波正和,他:高エネルギー吸収型ポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験,第30回日本道路会議一般論文集,論文番号2018,2013.10.

[2]山口悟,他:従来型ポケット式落石防護網の実規模実験,鋼構造年次論文報告集,第21巻,pp.104-110,2013.11.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

- ① 難波正和, 前川幸次, 濱晃子, 小池拓真, 実斜面を用いた実規模重錘衝突実験によるポケット式落石防護網のシミュレーション解析に関する研究, 鋼構造論文集, 査読有, 第22巻88号, pp. 23-33, 2015.

[学会発表](計 3件)

- ① 上杉拓矢, 徐紳翔, 前川幸次, 金網付きEPS鋼格子部材および砂による落石緩衝材に関する研究, 土木学第71回年次学術講演会, I-499, 東北大学川内キャンパス(宮城県・仙台市), 2016年9月7日.
- ② A. Hama, M. Namba, K. Maegawa, Finite Element Analysis of the Capacity and Behavior of a New Pocket-type Rockfall Protective Net, Proceedings of the 14th EASEC, ホーチミン市(ベトナム), Vol.14, pp.1512-1520, 2016年1月8日.
- ③ 上杉拓矢, 前川幸次, 小野健弘, 難波正和, 従来型ポケット式落石防護網の実施例に対する衝撃応答解析, 土木学第70回年次学術講演会, I-284, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市), 2015年9月18日.

[図書](計 0件)

[産業財産権]

○出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者
前川 幸次 (MAEGAWA KOJI)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号: 0 0 1 2 4 0 2 4

(2)研究分担者
なし()

研究者番号:

(3)連携研究者
なし()

研究者番号:

(4) 研究協力者
なし ()