

エネルギー吸収ネットを用いた既設落石防護柵の機能向上に関する現場実験と数値解析

辻慎一郎¹・原隆史²・八嶋厚³・吉田眞輝⁴

山間部の多いわが国ではこれまで膨大な落石防護柵が構築されてきた。しかしながら、落石調査の際に、既設落石防護柵の可能吸収エネルギー以上の落石発生源が新たに発見されることも少なくなく、既設落石防護柵が機能不足となっている例も多い。これに対し、その都度新たな落石防護柵を再構築することは費用の観点から現実的ではないため、合理的な対策工の開発が急務となっている。本論文では、繊維製のエネルギー吸収ネットを用いて、既存の落石防護柵を有効に活用し、既設落石防護柵の不足する機能の向上をはかる合理的な対策を提案する。

キーワード：落石，エネルギー吸収ネット，既設落石防護柵

1．はじめに

山間部の多いわが国では、山間部における落石に対して交通の安全を確保するため、これまで膨大な数の落石防護柵が構築されてきた。しかしながら、落石調査の際に、既設落石防護柵の可能吸収エネルギー以上の落石発生源が新たに発見されることも少なくなく、既設落石防護柵が機能不足となっている例も多い。これに対し、その都度新たな落石防護柵を再構築することは費用の観点から現実的ではないため、合理的な対策工の開発が急務となっている。そこで、本論文では、既設落石防護柵の山側背面に、可能吸収エネルギー以上の落石エネルギーを減衰させるための繊維性のエネルギー吸収ネットを設置して、既設落石防護柵の機能を向上させる対策工を提案する。この対策は、既設落石防護柵に可能吸収エネルギー以上の落石が衝突する前に、エネルギー吸収ネットが落石エネルギーを減衰させて、落石エネルギーを既設落石防護柵の可能吸収エネルギー以下に低下させることを目的としている。この対策の有効性を検証するため、既設落石防護柵を模擬した構造物を構築して落石エネルギーを衝突させる現場実験を行い、エネルギー吸収ネットの設置により、既設落石防護柵は可能吸収エネルギー以上の落石エネルギーを吸収できることを示す。また、エネルギー吸収ネットの挙動を数値解析で再現し、数値解析の設計への適用性を検討する。本論文では、機能向上対策の詳細、現場実験結果と数値解析に基づく実際の既設落石防護柵の適用性の検討結果について述べる。

2．エネルギー吸収ネットを用いた対策工

(1) 対策工の概要

図-1に本論文で提案するエネルギー吸収ネットを用いた既設落石防護柵の機能向上対策を示す。既設落石防護柵の支柱から地山に向かってロープを通して地山に設置したアンカーに接続し、エネルギー吸収ネットを吊下げ、その下端をロープでアンカーに接続する構造である。落石防護柵の吸収エネルギーが不足していることが判明した場合、従来は、対象とする落石エネルギーに対応できる落石防護柵を新設するか、既設落石防護柵の背面に新たに支柱を設置して高エネルギー吸収柵を設置するなどの対策がとられていた。しかし、本研究で提案する方法は、既設落石防護柵の支柱を活用するため、新たな支柱の設置を必要とせず、安価な対策が可能と考えられる。

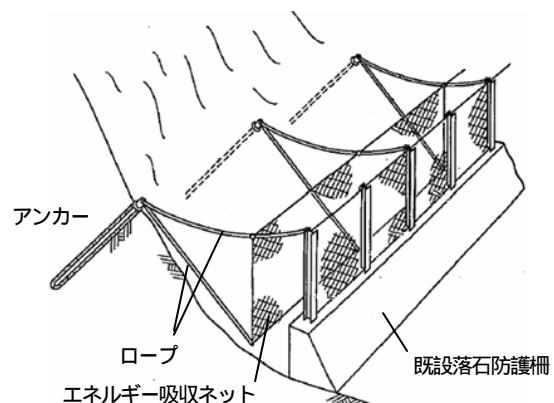


図-1 既設落石防護柵の機能向上対策

¹正会員，岐阜大学工学部 社会基盤工学科，助教（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

²正会員，岐阜大学工学部 社会基盤工学科，准教授（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

³正会員，岐阜大学工学部 社会基盤工学科，教授（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

⁴正会員，前田繊維株式会社 技術部（〒919-0422 福井県坂井市春江町沖布目38-3）

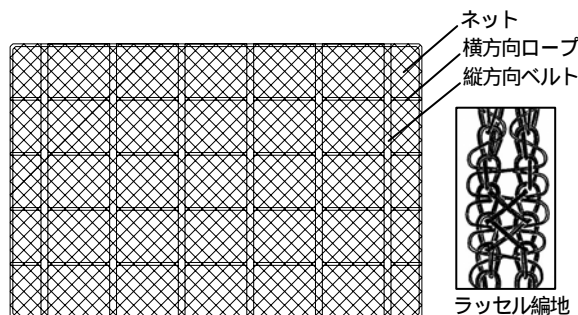


図-2 エネルギー吸収ネットの構造

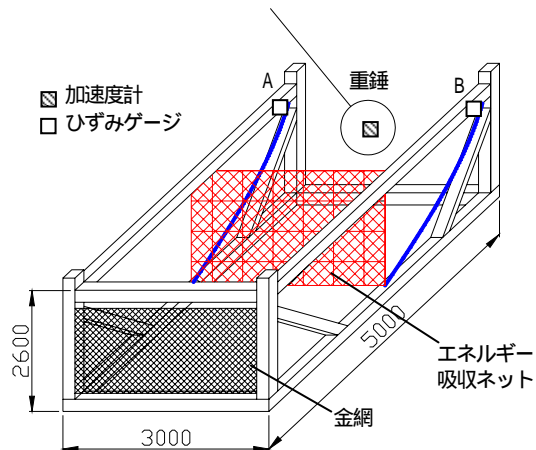


図-3 現場実験の模型

この対策は、設計落石エネルギーより大きな落石エネルギーが既設落石防護柵に衝突する前に、エネルギー吸収ネットによって落石エネルギーを減衰させて、落石エネルギーを既設落石防護柵の設計エネルギー以下に低下させることを目的としている¹⁾。

本論文で用いるエネルギー吸収ネットの構造を図-2に示す。エネルギー吸収ネットはポリエステル繊維製で、ラッセル編地による衝撃吸収性に優れたネット（目合い：10cm×10cm）の背面に、縦50cm×横50cmの格子状に組まれたポリエステル製ベルト（縦方向）と伸度100%の高伸度ロープ（横方向）が配置されるネットをラッセル編地とすることで、ネットを構成する素線の交点が編みこまれているため、落石の衝突時や破損時の抜け広がりがなく、伸縮性があるため衝撃吸収性能に優れる、などの利点がある。また、エネルギー吸収ネットの紫外線劣化が懸念されたが、耐候性試験の結果、紫外線照射から7500時間後（300時間が1年に相当）も、約70%以上の強度を保持していることが確認されている。

(2) 現場実験

図-1に示す対策工をモデル化した現場実験を行った。現場実験の概要を図-3に示す。地山と既設落石防護柵を模擬した構造物をH型鋼で構築し、前面の2本の支柱（スパン：3.0m）に金網（直径：3.2mm、目合い：50mm×50mm）を取り付け、金網の背面2.5mの位置にエネルギー吸収ネットを設置した。落石エネルギーの载荷は、直径90cm、重量9kNの重錘を用いて100kJの落石エネルギーを作用させた。実験は、対策なし（重錘を金網に直



(a) 対策なし

(b) 対策あり

写真-1 実験結果

接衝突させる）、対策あり（エネルギー吸収ネットを介して重錘を金網に衝突させる）について行った。また、計測項目は、重錘の衝撃加速度、ネットを吊下げるロープに作用する引張力とした。

(3) 実験結果

高速度ビデオカメラで撮影した重錘が金網に衝突する状況を写真-1に示す。エネルギー吸収ネットによる対策がない場合、金網は落石エネルギーを吸収できず、重錘は金網を破って前方へ飛び出した。一方、エネルギー吸収ネットによる対策を施した場合、重錘が金網に衝突する前に、ネットを吊下げているロープとネットが大きく伸びることによって落石エネルギーを大きく低減させたため、金網は重錘を捕捉できた。以上の結果、エネルギー吸収ネットを用いることにより、既設落石防護柵の吸収エネルギーを向上させることができることを確認した。

3. 現場実験の数値解析

(1) エネルギー吸収ネットの物性

落石衝突時のエネルギー吸収ネットの挙動を再現するため、過去に行われたエネルギー吸収ネットを落石防護柵として用い、150kJの落石エネルギーを与えた現場実験²⁾を再現するように、エネルギー吸収ネットの物性定数を設定した。数値解析には動的衝撃応答解析プログラムLS-DYNAを用いた。有限要素分割図を図-4に示す。ネットを構成する各繊維材料は引張力のみに抵抗するビーム要素、支柱は通常のビーム要素でモデル化した。本論文で設定したエネルギー吸収ネットを構成する繊維材料の物性定数を後述の表-1に示す。ネットを構成している素線の剛性をそのまま用いると、ネットの変形を再現できなかった。これは、実際のネットのたるみ、素線の交点のモデル化が十分でないためと思われる。そこで、現場実験のネットの変形に合うように剛性のキャリブレーションを行った。表-1の値は、各繊維材料自体の弾性係数の0.2倍の値であるが、表-1の物性定数を用いたときのエネルギー吸収ネットの挙動の解析結果と実験結果の比較を図-5に示すように、実際のネットの挙動をほぼ再現できている。以降の数値解析では表-1の物性定数を用いることとする。

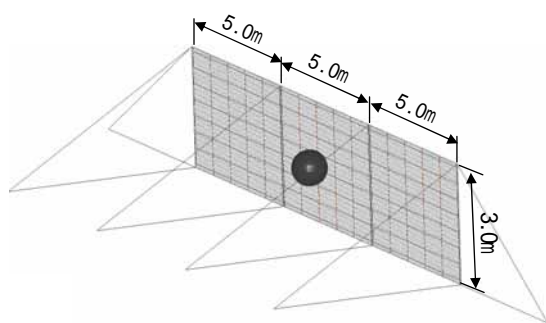
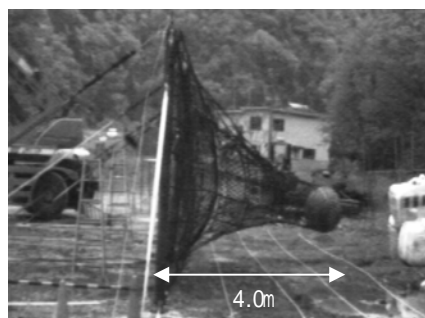
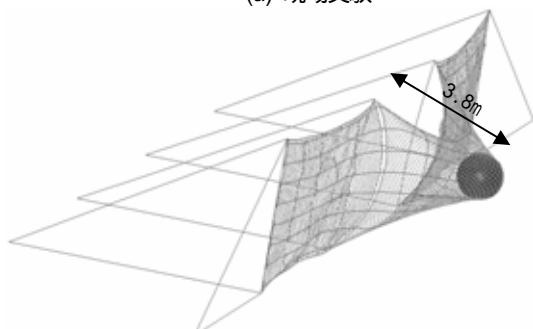


図-4 有限要素分割図



(a) 現場実験²⁾



(b) 数値解析

図-5 エネルギー吸収ネットの挙動の再現

(2) 現場実験の数値解析

既設落石防護柵の機能向上に関する現場実験の数値解析に用いる物性定数を表-1に示す。エネルギー吸収ネットは引張力のみに抵抗するビーム要素、H型鋼と金網を構成する素線は通常のビーム要素でモデル化した。エネルギー吸収ネットの挙動を図-6に、重錘の衝撃加速度とネットを吊下げているロープに作用する引張力の計測結果と解析結果の比較を図-7に示す。数値解析で、エネルギー吸収ネットの挙動とで加速度の最大値をほぼ再現できている。また、ロープに作用する引張力の計測結果は、ネット背面の格子状に配置されたベルトとロープがずれることによって格子の大きさが広がり、重錘が通り抜けたため引張力が一度低下した。その後、目合い10cm×10cmのネットで重錘を受け止めたため、再度引張力が増加した。数値解析では、格子状に組まれたベルトとロープがずれるようなモデル化ができないため、ロープに作用する引張力を十分には表現できていない。しかし、数値解析でエネルギー吸収ネット全体の挙動を概ね再現できていることから、数値解析に基づいた既設落石防護柵の機能向上対策工の検討が可能と考えられる。

表-1 物性定数

	弾性係数 (kN/m ²)	断面積 (m ²)	断面2次 モーメント (m ⁴)
ネット素線	4.27×10^4	6.36×10^{-5}	-
縦ベルト	5.56×10^5	2.40×10^{-4}	-
横ロープ	2.12×10^5	3.14×10^{-4}	-
吊下げロープ(上)	1.06×10^6	3.14×10^{-4}	-
吊下げロープ(下)	1.50×10^5	3.14×10^{-4}	-
金網素線	1.0×10^8	8.04×10^{-6}	5.15×10^{-12}
H型鋼	2.0×10^8	1.55×10^{-3}	2.34×10^{-7}

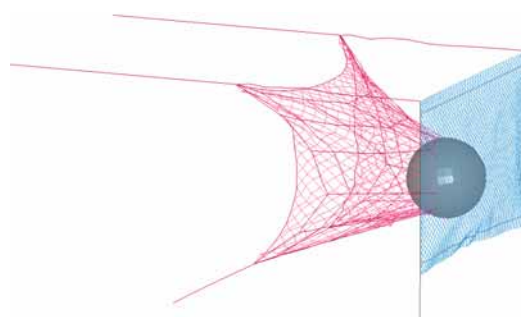
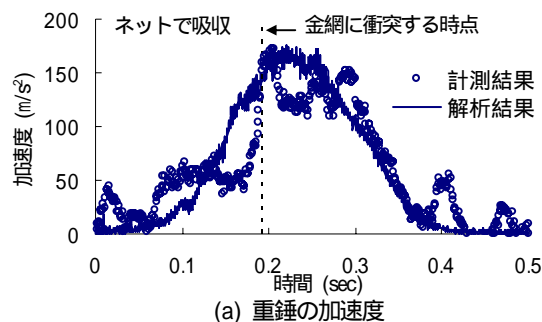
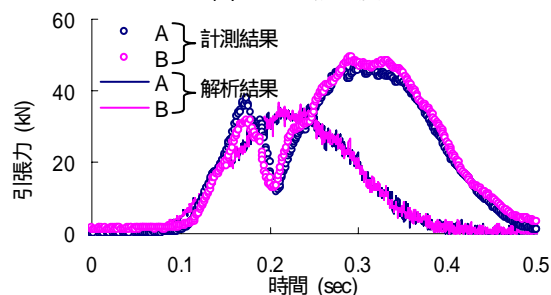


図-6 エネルギー吸収ネットの挙動



(a) 重錘の加速度



(b) ロープに作用する引張力

図-7 計測結果と解析結果の比較

4. 数値解析による実際の既設落石防護柵への適用性の検討

本論文で提案する対策の実際の既設落石防護柵への適用性を数値解析により検討した。ここで対象とする既設落石防護柵は、支柱、金網、ワイヤーロープで構成され、可能吸収エネルギーは、落石が金網に衝突する場合は56kJ、支柱に衝突する場合は70kJである³⁾。ここでは、可能吸収エネルギーが70kJ程度の既設落石防護柵に、可能吸収エネルギーの2倍のエネルギーを持つ落石が衝突する状態を想定する。既設落石防護柵のモデル化にあたり、落石防護柵の塑性挙動に対して、エネルギー一定則に基づいた等価剛性を持つ弾性体とした。検討手順を以下に

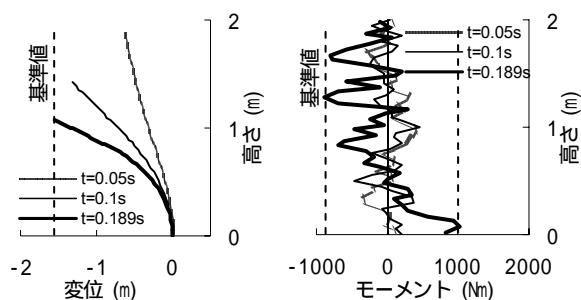


図-8 既設落石防護柵の挙動 (基準値)

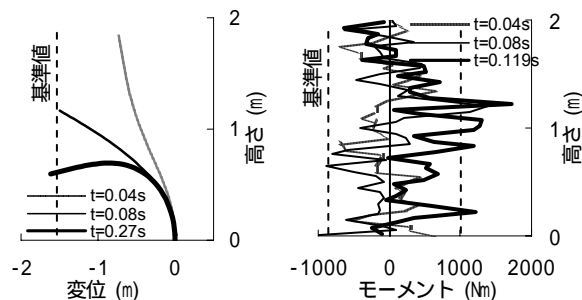
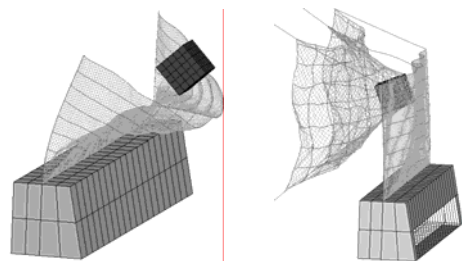


図-10 既設落石防護柵の挙動 (対策なし)



(a) 対策なし (b) 対策あり

図-9 既設落石防護柵の変形

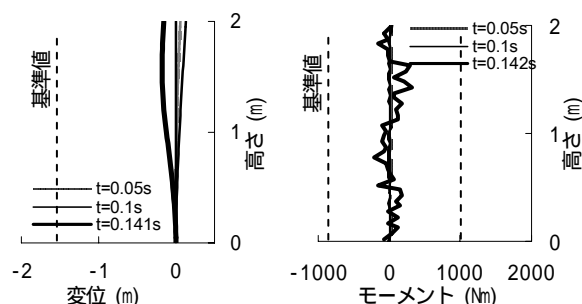


図-11 既設落石防護柵の挙動 (対策あり)

示す．無対策の既設落石防護柵の支柱に、既設落石防護柵の可能吸収エネルギーに等しい落石エネルギーを作用させた時の支柱の変位およびモーメント分布を基準値とする（図-8）．エネルギー吸収ネットによる対策を施した既設落石防護柵の支柱に、可能吸収エネルギー以上の落石エネルギーを作用させた時の落石防護柵の挙動が基準値以下であるかを照査する．可能吸収エネルギーの2倍の落石エネルギーを、対策なしとエネルギー吸収ネットによる対策を施した既設落石防護柵に作用させた時の防護柵の挙動と支柱の変位およびモーメントの分布を図-9～11に示す．対策ありの場合、既設落石防護柵の挙動は図-8の基準値よりも小さく、エネルギー吸収ネットによる対策は有効であると考えられる．

5. 結論

本論文では、吸収エネルギーが不足する既設落石防護柵にエネルギー吸収ネットを付加することにより、その機能向上をはかる対策を提案した．本論文で得られた

結論を以下に示す．現場実験の結果、落石が金網に衝突する前に、エネルギー吸収ネットが大きく変形することによって落石エネルギーを大きく低減させたため、金網は可能吸収エネルギー以上の落石を捕捉できた．数値解析により、現場実験におけるエネルギー吸収ネットの挙動を概ね再現できることを示した．実際の既設落石防護柵への適用性を検討した結果、エネルギー吸収ネットによる対策を施すことにより、既設落石防護柵の機能を向上できることを示した．今後、設計方法を検討する．

参考文献

- 1) Tsuji, S., Hara, T., Yashima, A., Sawada, K. and Yoshida, M.: Upgrade of stone-guard fence with using high-energy absorption net, Proceeding of the international symposium on prediction and simulation methods for geohazard mitigation (IS-KYOTO 2009), pp.465-471, 2009.
- 2) 吉田眞輝, 小林洋文, 荒川源臣, 奥村久雄: 繊維製ネットおよびロープを使用した落石防護柵の耐衝撃性試験, ジオシンセティックス論文集, Vol.23, pp.113-118, 2008.
- 3) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.

FIELD TEST AND NUMERICAL ANALYSIS FOR PERFORMANCE UPGRADE TECHNIQUE OF EXISTING ROCKFALL PROTECTION FENCE

Shinichiro TSUJI, Takashi HARA, Atsushi YASHIMA and Masaki YOSHIDA

This paper proposes a new technique, which uses the high energy absorption net, to upgrade the performance of existing rockfall protection fence. The high energy absorption net is set at the mountain side of the existing rockfall protection fence in this technique. In order to confirm the applicability of the proposed technique, field tests and numerical analyses are carried out. This paper describes the detail of the proposed technique and the results of the field tests and the numerical analyses as well as the effectiveness of the high energy absorption net to upgrade the performance of the existing rockfall protection fence.