

## たわみ性落石防護柵のエネルギー吸収性能の数値解析による検討

NUMERICAL ANALYSIS OF THE ENERGY ABSORBING CAPACITY  
OF FLEXIBLE ROCKFALL FENCE

古賀泰之\*

Yasuyuki KOGA

\*工博 小野田ケミコ(株) 技術・開発本部副本部長(〒111-8637 東京都台東区柳橋 2-17-4)

キーワード: たわみ性落石防護柵、エネルギー吸収能、静的解析  
(flexible rockfall fence, energy absorbing capacity, static analysis)

## 1. 検討の背景及び目的

山岳道路沿い等における落石対策として種々の対策工が実施されている。落石の規模に応じて性能が高く経済的な工法の開発が各所で行われている。欧米諸国ではたわみ性の大きなワイヤネット類を用いた大きな落石エネルギー吸収能を有する落石防護柵が開発・施工されており、わが国においても一部の工法の導入・実施工が行われている<sup>1)</sup>。これらの工法は、多くの部材の複合的な挙動により、落石エネルギーの吸収・防護を図っている。このエネルギー吸収・落石防護性能は、基本的には実物柵に落石を衝突させる実験を数多く繰り返すことにより確かめられ、その結果に基づく設計手法を作成するという方法がとられている。

これに対して、従来わが国における落石対策工の設計法は、各部材の性能を個々に算定してそれらを積み上げ全体としての性能を評価するというものである<sup>2)</sup>。この小論は、このような立場に配慮し、たわみ性落石防護工の1工法を対象として、構成部材を簡略に数値モデル化し、各部材におけるエネルギー吸収能に基づいて全体としての落石エネルギー吸収能を算定することを試みたものである。

この試みは、対象防護工においてどのようにエネルギー吸収が行われるかを推定すること、落石載荷時に部材に作用する荷重を算定すること、防護工の部材や配置を変えた場合のエネルギー吸収能の変化

を算定して、さらに効率のよい防護工仕様の提案が行えるようにすること等を目標としている。

## 2. 解析モデル

## 2.1 防護柵の概要

対象防護柵はリングネット工と呼ばれるものである。その概略を図-1に示す<sup>3)</sup>。主要構成は以下のとおりである。

- 1) 落石を捕捉する主要部は多くの鋼線リング( $\phi = 30\text{cm}$ )をパネル状に結束したネットである。リングネットと呼ばれる。
- 2) このネットはある間隔に建てられた支柱の頭部・基部に吊られたワイヤロープに結合される。ロープはサポートロープと呼ばれる。
- 3) 各支柱は、基部において斜面方向に回転可能なヒンジ構造とされている。
- 4) 各支柱の転倒防止のために、支柱頭部はワイヤロープに結び付けられ、アンカーにより斜面に固定される。リテイニングロープと呼ばれる。
- 5) 端部の支柱については、支柱が大きく内側に引寄せられるのを防止するために、さらにラテラルロープと呼ばれるワイヤロープに結びつけられる。
- 6) 2)4)のロープはリング状に曲げられたパイプの中を挿通し、ロープに大きな張力が作用した場合にはロープが絞こまれ、パイプが塑性変形を生ずる。このパイプはブレーキリングと呼ばれる。

## 2.2 モデルの概要

この解析では、ネットへの落石衝突荷重を静的集中荷重とし、これが各部材へ静的に伝達され作用するものとし、ネット本体、ネットを懸吊するロープ、および支柱頭部を引き止めるロープ、ロープに取り付けられたブレーキリング等の部材の非線形挙動を考慮して、変形の適合条件ならびに力の釣合い条件を導き、このときに各部材で吸収されるエネルギーを算定する。

## 2.3 部材のモデル化

### (1) 支柱間隔・支柱高さ・支柱傾斜角度

これらは、主として多くの現地実験の経験に基づいた設計マニュアル<sup>3)</sup>により一定の設定が可能となる。解析においては、簡単化のために落石の衝突する中央スパンとその両側に隣接する端末スパンの3スパンから成るものとする。

### (2) リングネット

上下のサポートロープに吊られたネットに落石が衝突すると、ネットは3次元的なめり込み変形をするが、ここでは他部材への主たる影響はネットの変形に伴う上下のサポートロープへの引寄せ荷重にあると考え、ネットのめり込みによる上下方向の1次元的な引張り荷重～伸び変形をモデルに取り込む。この場合、ネットのある一定幅部が荷重を受けるものとする。1次元変形において、側方変形は拘束されているものとする。この場合、リングの線形弾性範囲の引張り荷重～伸び変形関係は、弾性リング解析理論により算定できる。しかし、リングのように容易に大きな変形に至る部材においては、幾何学的非線形によって荷重～変形関係も非線形になる。これを解析的に導くことは容易ではないが、素線が切断しない範囲での上限変形（リングが菱形になるものとする）との間を、双曲線関係で結ばれるものとした定式化は実験結果を比較的よく近似する。解析モデルでは、これをさらに簡単な3本の折れ線で表す（後出図-5参照）。

### (3) ロープ

ワイヤロープについては引張り載荷試験が行われており、若干の非線形性・載荷履歴性が見られるが、ここでは線形とする。

### (4) サポートロープ

リングネットから上下サポートロープを引寄せる荷重は中央スパンの中央における集中載荷重で近似する（図-2。各サポートロープは2本で構成され

る）。

### (5) リテイニングロープ・ラテラルロープ

リテイニングロープ及びラテラルロープの地山での固定位置は、基本的には設計マニュアルにより定められる。

### (6) ブレーキリング

前述したサポートロープ及びリテイニングロープに取り付けられたブレーキリングについては、引張り載荷試験が行われており、図-3のような硬化型の非線形特性を有する。解析モデルでは、簡単な3本の折れ線で表す。

### (7) その他

支柱基部の曲げ剛性（ネット張設方向）については、その構造から見て相対的に非常に小さいと考えられるため、支柱を剛体・基部をヒンジと見なす。

サポートロープは支柱に取り付けられた吊金具により懸吊される。サポートロープが大きく変形する場合には、吊金具とロープの間にずれが生じ、クーロン摩擦抵抗が作用するものとする。後述する今回の計算では、この摩擦は無視をしている。

## 2.3 全体釣合いの計算法

上述したようにこの防護柵を構成する各部材は非線形特性を有し、また変形も大きい。ここでは次のような手順で全体釣合いを求めるものとした。（図-4参照）

- 1) ネットへ一定の大きさの静的な落石荷重  $P$  を作用させる。
- 2) 1) と釣合うネット張力 ( $T_u$ ,  $T_l$ ) 及びめり込み量  $\delta p$ 、ネットたわみ角 ( $\gamma_u$ ,  $\gamma_l$ ) を求める。
- 3) 2) のネット張力と釣合うサポートロープ張力 ( $T_{su}$ ,  $T_{sl}$ ) を求める。サポートロープにおいてロープ張力の大きさに応じた伸び（ロープ本体およびブレーキリングの伸び）が生ずる。下部サポートロープにおいては支柱基部位置が固定されているので引寄せ角 ( $\alpha_l$ ) を未知数とし、上部サポートロープについては支柱頭部位置が移動するために、上部サポートロープの引寄せ角度 ( $\alpha_u$ )・支柱頭部変位が未知数となる。
- 4) 支柱頭部について力の釣合いが成立つが、このとき支柱頭部の変位に整合したリテイニングロープ、ラテラルロープの伸びに応じた張力でなければならない。
- 5) 以上の未知変量の解析のために、本解析ではネットめり込み量、上下部ネットの引寄せ角ならびに、

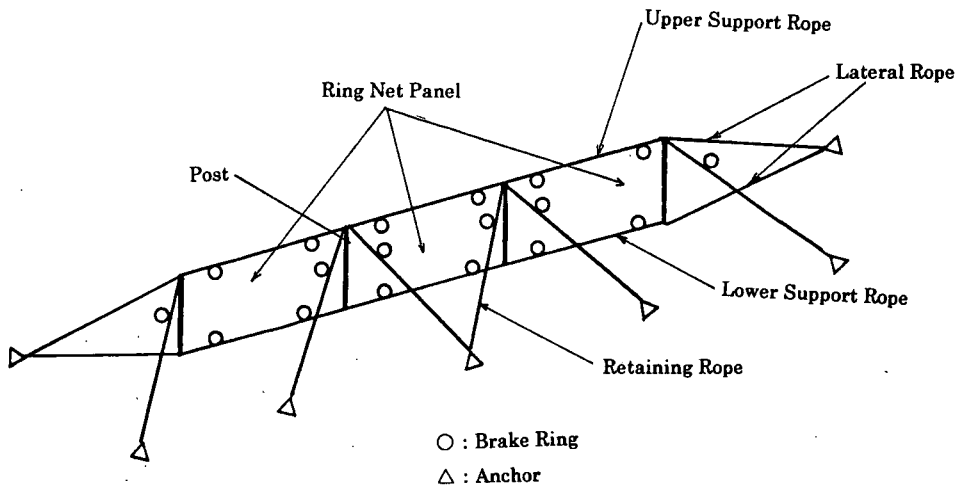


図-1 リングネット落石防護工の概要

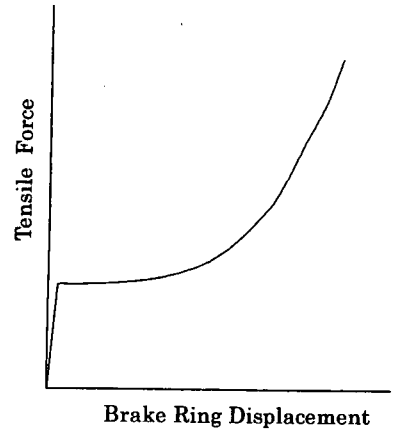
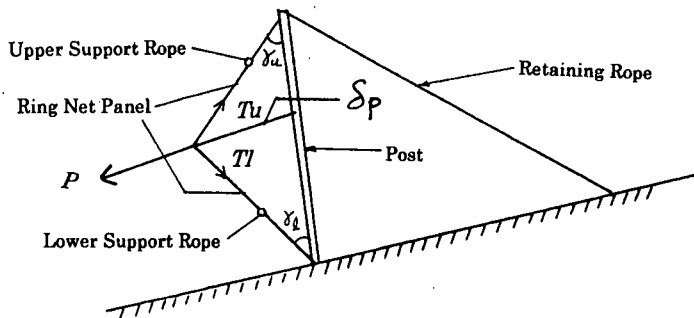


図-3 ブレーキリングの引張り～伸び関係

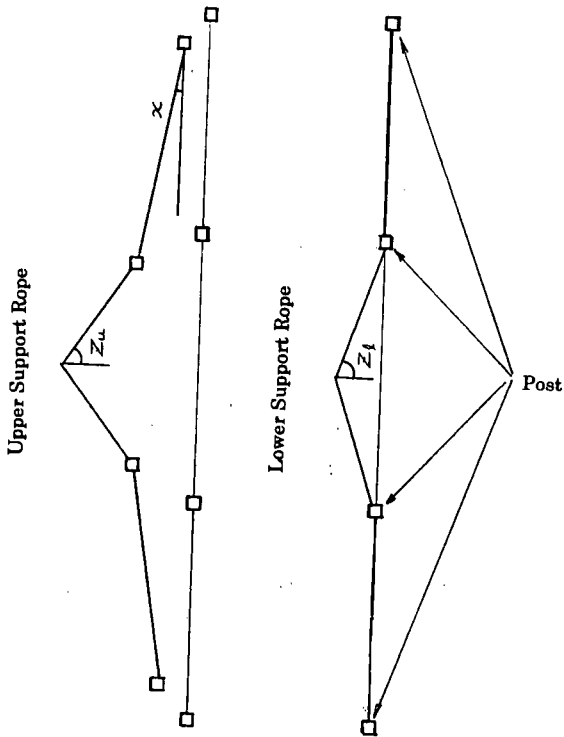


図-4 モデル部材の変形

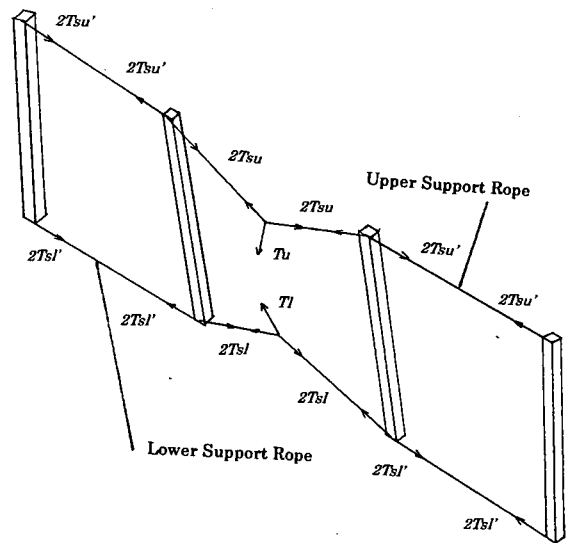


図-2 リングネットパネルからサポートロープへの作用力

端部スパンのサポートロープの傾斜角 ( $\alpha$ )、支柱頭部の変位と関連するリテイニングロープのずれ角を繰り返し変数とし、力の釣合いならびに変形の適合性が満たされる変数を求めるという方法を採用した。

6) なお、中間支柱については、2本のリテイニングロープが連結されているが、载荷条件によっては、一方のリテイニングロープに張力が作用しない場合もあり、この場合には解法が少し異なる部分がある。

### 3. 解析結果例と考察

#### 3.1 解析目的

本解析モデルは未だ多くの不十分な点があるが、以下の目的のために予備的な計算を行った。

- 1) ネットへの作用荷重が各部材にどのように伝播するかを明らかにする。
- 2) 各部材での吸収エネルギーが全体吸収エネルギーに占める割合を算定する。

#### 3.2 解析例のモデル条件

(全体モデル)

- 1) スパン構成：中央スパン = 7 m、端末スパン = 3 m
- 2) 支柱高さ・斜面勾配・支柱傾斜：3 m、40°、斜面上方に対して 75°
- 3) 载荷条件：支柱中間高さ・斜面傾斜方向に作用 (要素特性)
  - 1) リングネット：図-5 (これはリング1個の特性である。モデルにおいては、有効ネット幅を1 mとした。)
  - 2) サポートロープ：単位伸びひずみに対する1本の張力 = 1000 tf。上下とも2本のロープで構成される。
  - 3) リテイニングロープ：ブレーキリング特性で代用する。
  - 4) ラテラルロープ：サポートロープと同じ。
  - 5) ブレーキリング：図-6

#### 3.3 解析結果

##### (1) 载荷重とエネルギー吸収能

载荷重とエネルギー吸収量の関係を図-7に示す。ここにエネルギー吸収量は、ある許容値を設定して計算した結果の範囲を示している。同じ結果をネットめり込み量 (図-4における  $\delta p$ ) とエネルギー吸収量の関係として描いたものを図-8に示す。

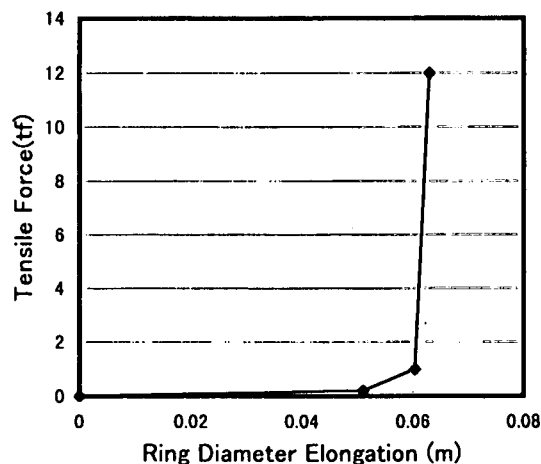


図-5 リングネットの引張り～伸び関係

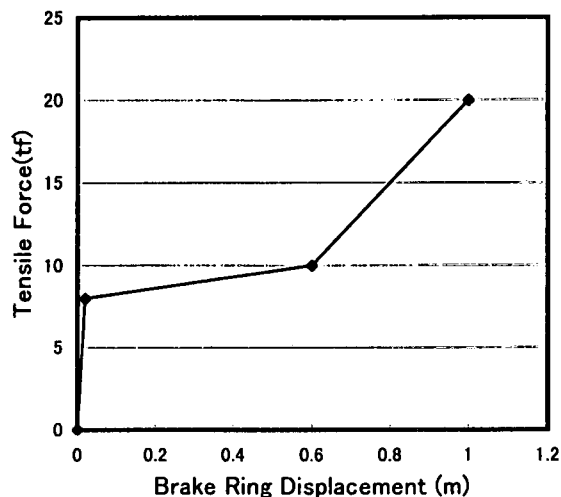
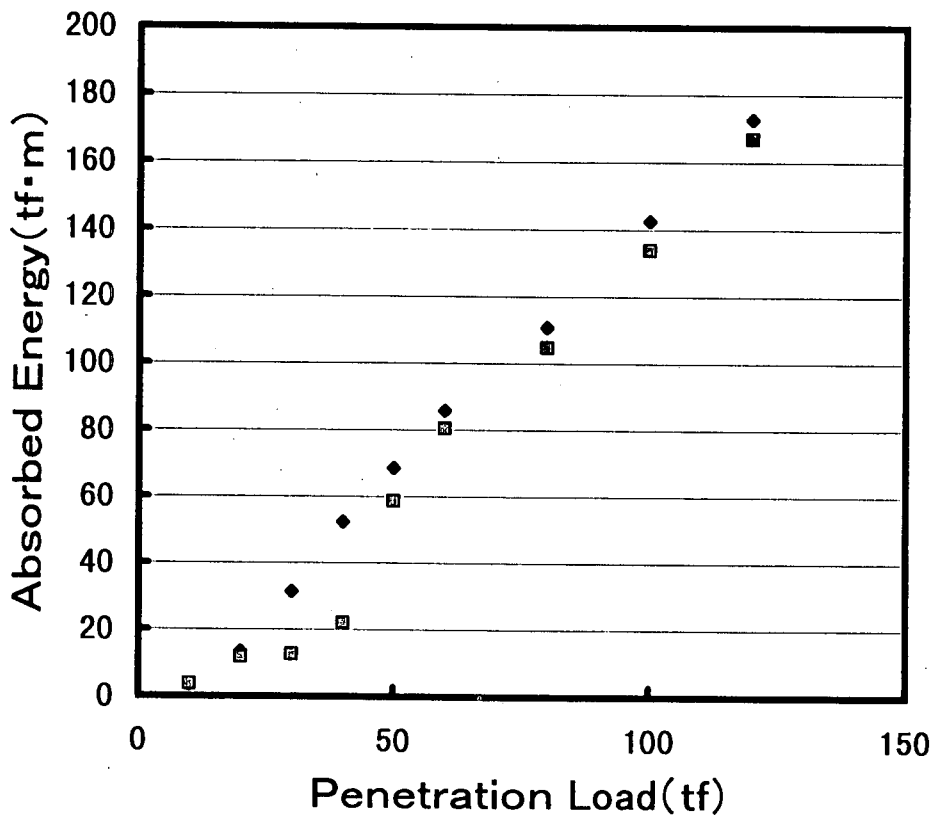


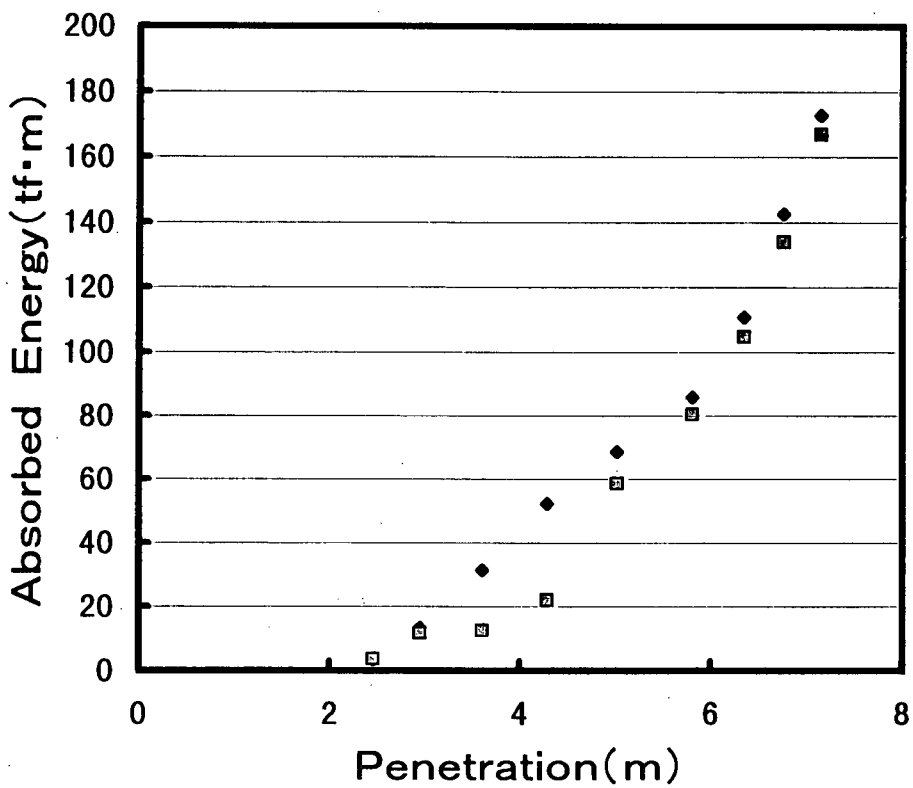
図-6 ブレーキリングの引張り～伸び関係

図-7によると、 $P=30, 40$  において若干前後の傾向と連続性に欠けるような結果 (結果の下限) が得られているが、全体的には载荷重のごく小さい範囲を除いて、载荷重に対して吸収エネルギーはほぼ一定の割合で増加する。一方、図-8によると、めり込み量に対しては吸収エネルギーの増加割合が増加している。これは、リングネットやブレーキリングが硬化特性を有するためである。

なお、解析モデルにおいては設計吸収エネルギーが 150 tf・m に相当する部材を使用しており、これに対するネットめり込み量は約 7 m である。これは偶々中間スパン長さと同じ。設計エネルギー状態において、どの程度の変形が生ずるかは、スパン長さ (中央・端末)、支柱高さを変えた計算が必要である。



図一7 载荷重～エネルギー吸収量の関係



図一8 めりこみ量～エネルギー吸収量の関係

表一 1 各部材におけるエネルギー吸収割合

落石荷重	P=20(tf)		P=100(tf)	
	エネルギー (tf・m)	割合 (%)	エネルギー (tf・m)	割合 (%)
エネルギー吸収総計	13.5	100	142.6	100
リングネット	3.1	23.0	15.2	10.7
上部サポートロープ	7.0	51.9	64.1	45.0
下部サポートロープ	2.6	19.3	50.1	35.1
中間支柱リテイニングロープ	0.0	0.0	9.7	6.8
端末支柱リテイニングロープ	0.15	1.1	0.1	0.0
端末ラテラルロープ	0.63	0.5	3.3	2.3

## (2) エネルギー吸収能の内訳

P=20、100 tf 時における各部材におけるエネルギー吸収割合を表一 1 に示す（図一 7 における上限値の場合）。この表は以下のことを示している。

- 1) 荷重が小さい場合（めり込み量が小さい場合）、エネルギー吸収合計に占める部材の順序は、上部サポートロープ、リングネット、下部サポートロープの順であり、リテイニングロープ等の寄与は小さい。サポートロープにおけるエネルギー吸収が大きいのは、サポートロープ設置時にゆるみがないものとしているため、載荷初期段階からサポートロープの作用張力が大きくなり、サポートロープに装着したブレーキリングの作動によるエネルギー吸収が生じやすいためならびに各サポートロープに 4 個のブレーキリングが装着されているためと考えられる。
- 2) 荷重が大きい場合、エネルギー吸収合計に占めるリングネットの寄与は減少する。最大寄与は依然として上部サポートロープであるがその割合は若干減少し、下部サポートロープの寄与が大きく増加する。リテイニングロープ等の寄与は依然小さい。
- 3) 文献 3) にはスイスにおいて行われた実物実験（中央スパン=10m、端末スパン=5 m）におけるブレーキリングの作動状況の 1 例が図示されているが、この場合、中央スパン下部サポートロープが最大寄与を示す、リテイニングロープの寄与は計算より大きい等が今回の解析とは異なっている。

実験と計算においては、防護柵の寸法、落石の衝突条件、サポートロープー吊金具部における摩擦、サポートロープやリングネット部の初期ゆるみ等多くの条件の違いがあり、実験結果に対する詳細な解析は今後の課題としたい。

## 4. あとがき

今後の課題として以下のような項目がある。

- 1) 現モデル計算における数値計算の効率化
- 2) 設計モデルとの対比
- 3) ネットの 3 次元変形効果を取り入れること
- 4) 荷重の動的効果を取り入れること
- 5) 他のエネルギー吸収要因（土中アンカー部他）の評価

末筆ではあるが、当該工法について様々な討議を交わしたリングネット落石吸収柵工法研究会（事務局長：佐野榮氏）設計・施工安全部会（部会長：田中紀朝氏）の各位および今回の解析プログラムの作成にあたって支援を頂いた当社情報システム室小林正和氏に謝意を表するものである。

## 参考文献

- 1) 村石尚ほか：エネルギー吸収型の落石防護柵、鉄道総研報告、12-12、1998。
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧、1982。
- 3) リングネット落石吸収柵工法研究会：高エネルギー吸収落石防護柵ーRing Nets 工法ー設計マニュアル、2000。