

リングネット落石吸収柵の衝撃応答特性に関する解析的考察

IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF THE RING NET ROCK-FALL FENCE

園田佳巨*・村石尚**・門間敬一***・彦坂熙****

Yoshimi SONODA, Hisashi MURAISHI, Keiichi MONMA, Hiroshi HIKOSAKA

* 九州大学大学院助教授 工学研究院 建設デザイン部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 地盤防災研究室(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

*** リングネット落石吸収柵工法研究会 専務理事(〒160-0004 東京都新宿区四谷2丁目10-3)

**** 九州大学大学院教授 工学研究院 建設デザイン部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

キーワード: リングネット落石吸収柵, 衝撃応答解析, 個別要素法

(Ring net rock-fall fence, Impact response analysis, Distinct element method)

1. 緒言

国土の多くを急峻な地形が占める日本では、落石対策は斜面防災における重要な課題の一つである。現在、落石災害による事故を防止するためにロックシェッド(写真-1参照)や落石防護擁壁などの様々な対策工法¹⁾が施工されているが、コンクリート製の防護構造物は、重量が大きく建設コストも高価なため、交通量が少ない地方路線には適切な工法とは言えない場合がある。一方、鋼製の落石防護柵は、その柔軟な変形特性により巨大な落石を確実に受け止める事が可能(写真-2参照)で、既に吉田らの落石誘導ワイヤネットシステム²⁾やスイスのFATZER社が開発したリングネット落石吸収柵^{3), 4)}のような、エネルギー吸収効果を高めるための種々の工夫を施した装置の開発・実用化が行われている。しかし、これらネット構造全体系の衝撃挙動は複雑であり、限られた条件下での野外落石実験データを用いて有効性を検証しているのが現状である。今後、鋼製落石防護柵を適切な箇所に施工していくためには、その衝撃応答特性を把握可能な解析方法確立し、落石防護ネット構造の耐衝撃性能に関する評価基準について明確に規定していく必要があると考えられる。以上のことを背景に、本研究では3次元個別要素法を改良した衝撃応答解析プログラムを開発し、リングネット落石吸収柵を対象としたネ

ット構造の衝撃応答シミュレーションを試みた。

2. 個別要素法による鋼製落石防護柵の解析モデル

本研究では、3次元個別要素法を用いてリングネット落石吸収柵の衝撃挙動を再現可能なモデルの開発を行った。

2.1 リングネット落石吸収柵

本研究が対象とするリングネット落石吸収柵³⁾は、図-1に示すような鋼製のリングを組み合わせたネットを、基部がヒンジ構造の支柱と鋼製ロープで支えた図-2のような形式の構造である。実際のリングネット落石吸収柵は、ネットの動的な変形に対して粘性的な抵抗力を発揮するプレーキリング等の細部構造を有するが、本研究では基礎的な解析モデルとして、リングネット、支柱、ワイヤーロープの3主要部材のみをモデル化し、基礎的な検討を試みた。

2.2 各部材のモデル化

リングネット落石吸収柵を構成する主要部材(リングネット、支柱、ワイヤーロープ)は、それぞれ全く異なる変形抵抗メカニズムを有する。そこで、それぞれ異なるバネ要素でモデル化した個別要素法による衝撃応答解析を試みた。なお、落石との接触判定を容易に行うため、全ての部材を球状要素の集合体としてモデル化し、要素中心間距離をもとに接

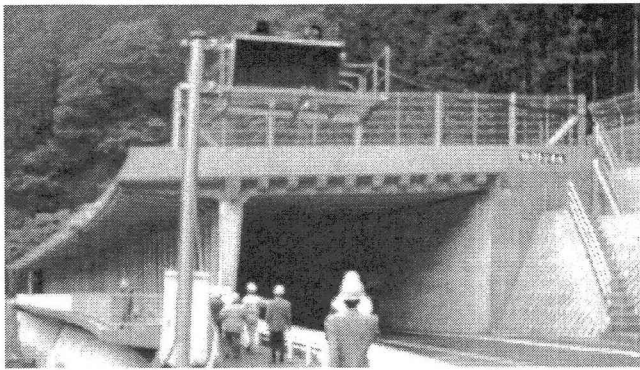


写真-1 ロックシェッド

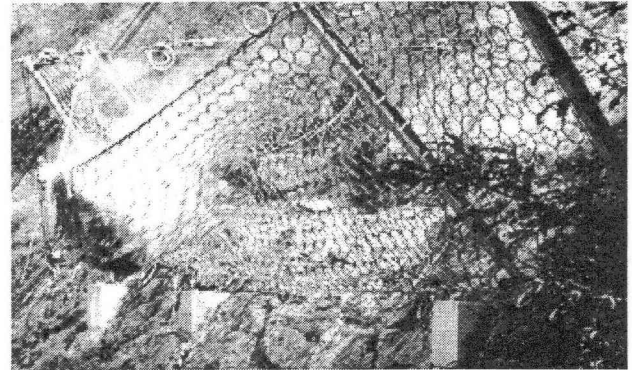


写真-2 鋼製落石防護ネット構造の野外実験状況

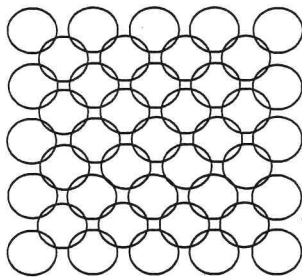
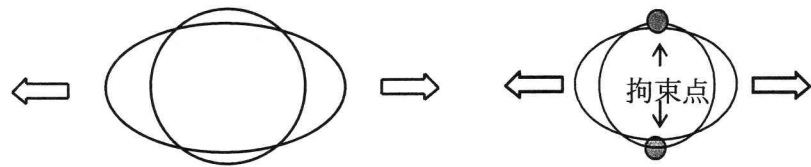


図-1 鋼製リングネット



(a) 二方向引張試験 (b) 側方拘束引張試験
図-3 鋼製リングネットの引張試験

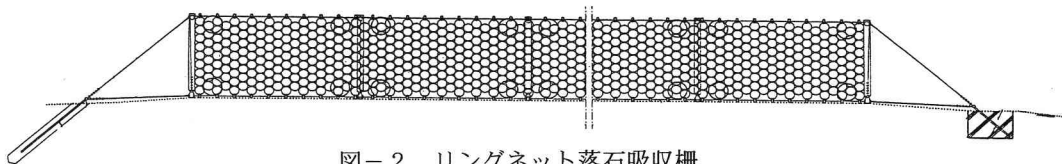


図-2 リングネット落石吸収柵

触判定を行った。

1) リングネット

鋼製リングを交差させたリングネットの変形抵抗特性を理論的に求めることは困難である。そこで、図-3に示すような引張試験で得られた結果を元に、要素間に簡易な変位の非線形関数として表したバネにより引張抵抗を与えることとした。図-4は、リング単体の引張試験結果と、交差する隣接リングの変形抵抗を考慮した側方完全拘束時の引張試験結果の2種類を示している。2種類の実験結果には、交差する隣接リングの抵抗により剛性が急増する変形量に大きな相違があることがわかる。実際のリングネットは、両者の中間的な性状を示すと考えられるが、過去の検討においてリングネット全体系の応答に与える影響は非常に小さいことが確認されているので、ここでは簡易な側方自由の場合の実験結果を用いて、引張荷重にのみ抵抗する法線方向バネ k_n および減衰係数 C_n を以下の式で与えた。

$$k_n = k_0 \quad (r_{ij} < r_e) \quad (1a)$$

$$= a \cdot e^{bx} \quad (r_{ij} \geq r_e) \quad (1b)$$

$$C_n = 2h\sqrt{m_1 k_n} \quad (1c)$$

ここに r_{ij} : 要素 i と j の相対変位, r_e : 剛性が急増する相対変位の閾値, $x = r_{ij} - r_e$: 硬化域における相対変位, h : 減衰定数, m_1 : リングネット要素質量, $k_0 = 27.7(kN/cm)$, $a = 0.0028$, $b = 0.9738$

なお、リングネットは支柱間に張った鋼製ロープに吊られ、図-5に示すように落石の衝撃力に応じて水平方向にスライド可能であるため、最隣ロープ要素と結合することを条件に接触要素の更新を行うことで、リング要素の水平移動をモデル化した。

2) 支柱

支柱にはH形鋼が用いられており、リングネットの面外変形が、主に支柱に曲げモーメントとして作用することから、振りを考慮しない2方向曲げ部材としてモデル化した。すなわち2方向別々に、図-6に示すような曲げバネ K_M を支柱要素

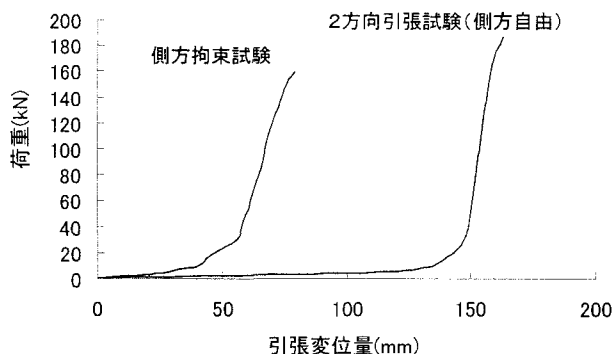


図-4 鋼製リングの引張試験結果

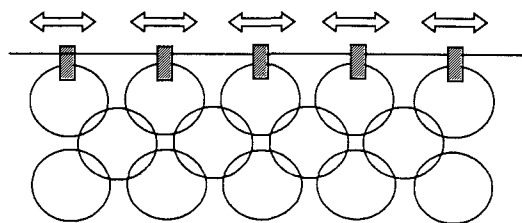


図-5 リングの水平スライド挙動

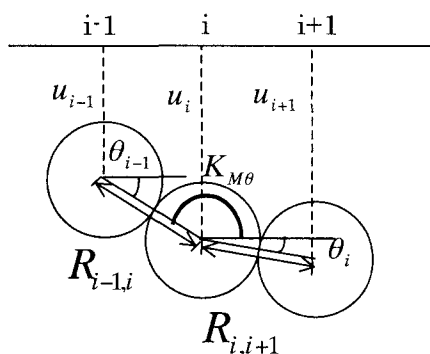


図-6 支柱要素モデル

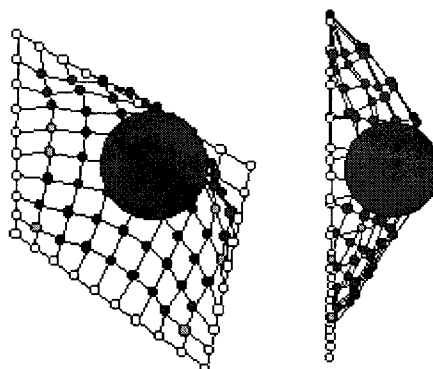


図-7 ネット単体モデルの応答状況
(100msec経過時)

表-1 数値解析に用いた諸元

	質量m(kg)	ヤング率E(N/cm ²)	減衰定数h	断面積A(cm ²)	断面2次モーメント
リングネット要	0.13	式(1)による	0.1	—	—
支柱要素	2.15	2.06×10 ⁷	0.1	53.85	5.4×10 ³
ロープ要素	0.71	2.06×10 ⁷	0.1	17.75	—

間に導入し、作用する曲げモーメントは、次式で求めることとした。

$$M_i = K_M \Delta \tau_i \quad (2)$$

ここに、 $K_M = \frac{EI}{\bar{R}}$ 、 I ：支柱（H形鋼）の断面二次モーメント、 $\bar{R} = \frac{1}{2}(R_{i-1} + R_i)$ ：隣接要素中心間距離、 $\Delta \tau_i = \theta_i - \theta_{i-1}$ ：相対回転角、 i ：要素番号

3) ワイヤロープ

ワイヤロープは、リングネット同様に引張荷重のみを伝達する構造要素としてモデル化した。したがって、要素間には、法線方向バネ k_n と減衰項 C_n を以下の簡易な式で与えた。

$$k_n = \frac{EA}{R_{ij}}, \quad C_n = 2h\sqrt{m_2 k_n} \quad (3)$$

ここに、 EA ：ロープの軸剛性、 R_{ij} ：ロープ要素

間距離、 m_2 ：ロープ要素質量

なお、本研究ではロープの破断や支柱の塑性化は想定せずに、それぞれ線形弾性要素とみなした。

以上の主要3部材のモデル化により、各要素に作用する法線方向力 f_n と2接線方向力 f_{sy}, f_{sz} を評価した部材座標系から全体座標系（ X, Y, Z ）に変換し、以下に示す運動方程式から加速度を求めた後に、オイラー法を用いて速度、変位を求め、時刻歴な応答計算を行った。

$$\begin{Bmatrix} \ddot{X}_i \\ \ddot{Y}_i \\ \ddot{Z}_i \end{Bmatrix} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^n [T] \begin{Bmatrix} (f_n)_j \\ (f_{sy})_j \\ (f_{sz})_j \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $[T]$ ： ij 要素間の部材系から全体系への座標変換マトリックス、 n ： i 要素に接触する要素数

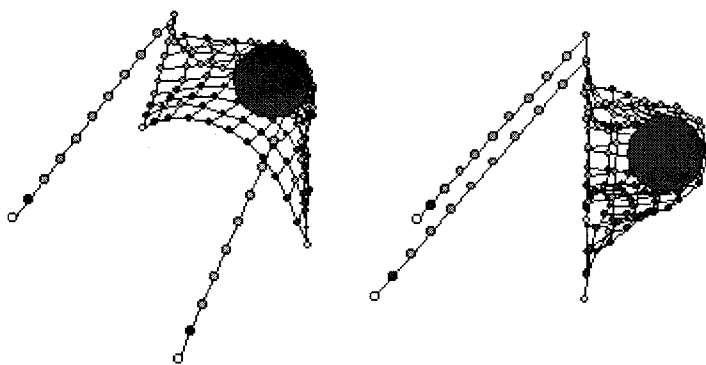


図-8 リングネット1パネルの応答状況(スライド無し:150msec経過後)

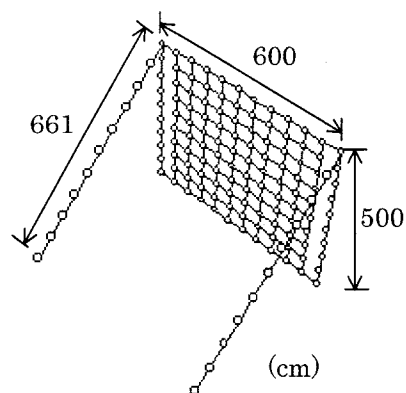


図-9 リングネット1パネルモデル
(水平スライド考慮)

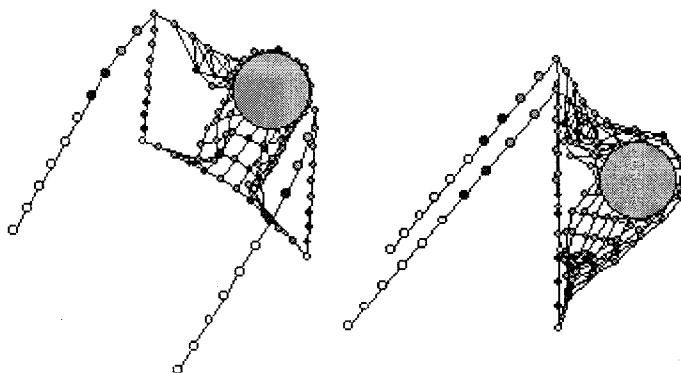


図-10 リングネット1パネルの応答状況(スライド考慮:150msec経過後)

3. リングネット落石吸収柵の衝撃応答解析

リングネット落石吸収柵の複雑な衝撃応答特性を把握するために、基本構造から段階的に複雑なモデル化を行いながら検討を試みた。なお、落石条件は、相互比較のためにいずれの場合もネット中央部に重量2tf、衝突速度20m/sで球状の落石が衝突するものとした。解析に用いた諸元を表-1に示す。

3.1 四辺を拘束したネット部単体の解析

図-7は、四辺を拘束したネット単体モデルの中央部に落石を衝突させ100msecが経過したときの状況を示したものである。この図より、3次元個別要素法を用いた簡易モデルにより、鋼製ネット構造の変形挙動の特徴をうまく捉えることができることがわかる。したがって、適切なリングネット間のバネ係数を設定することで、本手法により鋼製ネット構造の衝撃応答解析が十分に可能であることが確認された。

3.2 リングネット1パネル(スライド無し)の解析

図-8は、リングネット構造の主要3部材(支柱、ロープ、リングネット)で構成される1パネルモデルに対して、落石衝突後150msecが経過したとき(野外実験において計測された重錘加速度がほぼ最大値

を示す時刻)の変形状況を示したものである。本モデルでは、ネットの水平方向へのスライドの効果を把握するための比較モデルとして、ネットを支柱に結合している。この図より、3.1に示した四辺を拘束した場合と比較すると、ネットの上下辺が大きく変形し、落石をネット全体の大変形で受け止めていることがわかる。

3.3 リングネット1パネル(スライド考慮)の解析

図-9は、実際の構造を模して、ネットの水平方向スライドを許容した1パネルモデルを示している。本モデルでは、リングネットは支柱間に張られたロープに吊られた構造形式となっている。図-10は、図-8と同様に落石衝突後150msecの変形状況を示したものである。

この図より、ネットが落石の衝撃力によって中央部に大きく引き寄せられていることが認められる。実際のリングネット落石吸収柵は、3パネルで1ユニットを形成し、隣接する相互のパネル間でネットが結合されているので、図-10ほどの過度なスライドは発生しないと思われるが、リングネットの変位応答を正確に求めるには、スライドの影響を考慮する必要があることが推察される。

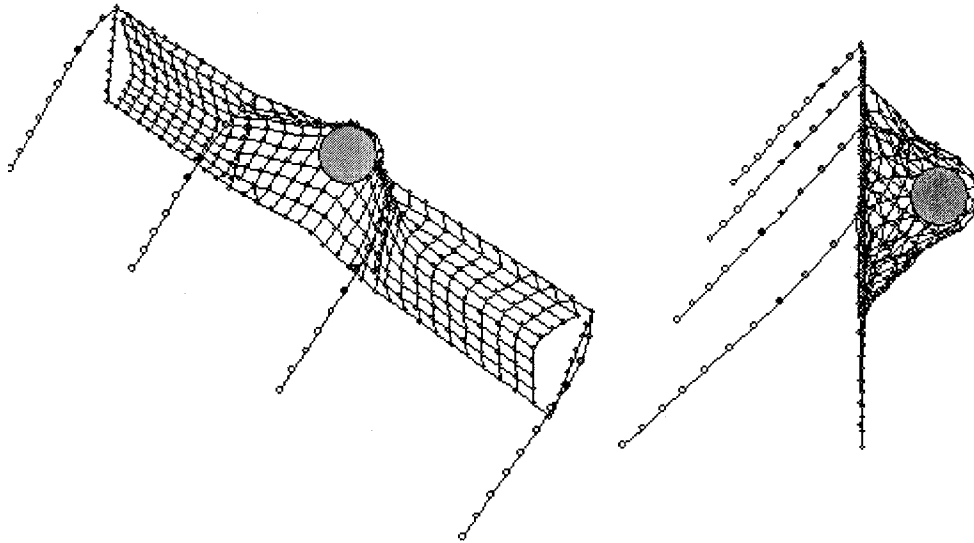


図-11 リングネット1ユニットの衝撃応答状況(150msec経過後)

表-2 各解析モデルの最大応答変位の比較(150msec経過時)

解析モデルの種類	ネット単体	1パネル(スライド無)	1パネル(スライド有)	1ユニット
最大応答変位量(cm)	140.0 (100msec)	269	283	276

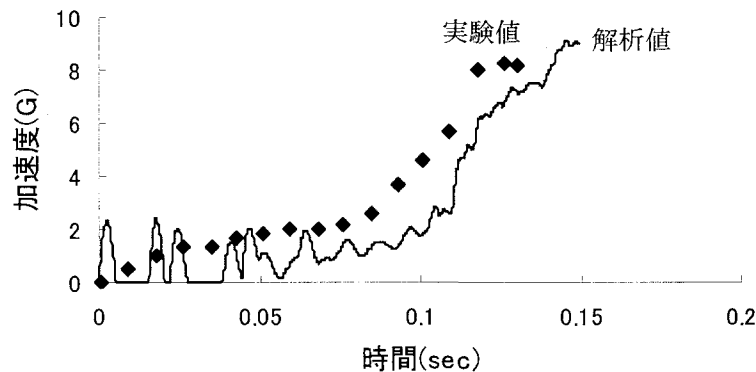


図-12 落石の応答加速度の比較

3.4 リングネット落石吸収柵の解析

図-11は、実際のリングネット落石吸収柵1ユニットを模したモデル全体系の応答状況を示したものである。この図より、落石の衝撃を受ける中央パネルの変形で左右の隣接パネルが引き寄せられることにより、落石の衝撃力を3パネル全体で受け止めていることが認められる。表-2は、各種モデルの最大応答値を比較したものである。

この表より、ネットの水平方向へのスライドが応答変位に有意な差を生じさせていることが確認された。現実には、水平方向への変位を制御するためのブレーキリングが配置されており、落石に対する抵抗力や吸収エネルギーを増加させるための構造面での改良を図るには、ブレーキリングの特性も含めた

最適なネットのスライド機能について検討を加えていく必要があると思われる。

野外衝撃実験では、重錘側の加速度の変化からリングネットの動的抵抗特性を評価していることから、実験で計測された重錘加速度と解析値の比較を試みた。図-12は、加速度の時間的変化を示したもので、両者は良好に一致していることから、本解析によりリングネットの動的抵抗特性をうまくシミュレートできることが確認された。

結 論

本研究で得られた成果を要約すると以下のようなになる。

- 1) 3次元個別要素法により、リングネット落石吸収柵の衝撃挙動を表現可能であることが確認された。
- 2) リングネットの水平方向スライドが、ネット全体系の応答に大きく影響することが認められた。

3) 野外実験による落石の応答加速度を、本解析で再現可能であることから、その妥当性が検証された。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，1983 年 7 月
- 2) 澤田直子，吉田博他：緩衝金具を配置した落石誘導ワイヤネットシステムの実規模実験について，

構造工学論文集 Vol46A，2000 年 3 月

- 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－Ring Nets工法－設計マニュアル，2000 年

- 4) 村石尚：エネルギー吸収型の落石防護柵，鉄道総研報告，12-12，1998 年