

鋼製落石防護ネット構造の衝撃応答解析

IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF THE FLEXIBLE STEEL ROCK-FALL FENCE

園田佳巨^{*}・石井慎二^{**}・彦坂熙^{***}・村石尚^{****}

Yoshimi Sonoda, Shinji Ishii, Hiroshi Hikosaka, Hisashi Muraishi

^{*} 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)^{**} 九州大学大学院修士課程 工学府 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)^{***} 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)^{****} 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)

Rock-fall is one of the serious disasters for mountainous countries like Japan. Thus, protective structure that has good cost performance have been expected. Although the flexible rock-fall fence is possible to absorb large kinetic energy of a falling rock, its dynamic behavior under the impact load was only confirmed by the full-scale field test. This study aims at simulating the impact response of flexible rock-fall fence by using the 3-dimensional distinct element method. It is confirmed that impact response of flexible rock-fall fence could be simulated well by the presented method.

Keywords : flexible rock-fall fence, distinct element method, impact response analysis

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)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、一般に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になるため、交通量が少ない地方路線等では採用しづらい場合がある。したがって、より経済性に優れた落石防護工の開発を目的としたさまざまな検討^{2), 3)}が行われており、その一つとして鋼製落石防護柵に関する研究^{4), 5), 6)}も行われている。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で、吉田らの落石誘導ワイヤネットシステム⁵⁾やスイスの FATZER 社が開発したリングネット落石防護システム^{6), 7)}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、落石の衝突を受けた際のネット全体系の挙動は非常に複雑であり、理論的な検討としては落石防護柵の数値モデルを構築して行った古賀の研究⁸⁾が存在するのみで、限られた条件下での衝撃実験データを用いてその有効性について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、衝撃応答特性を把握する解析方法を確立し、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も明確に規定していく必要があるものと考えられる。以上のことを背景に、本研究では3次元個別要素法(3DDEM)を改良した衝撃応答解析プログラムを作成し、リングネット落石防護システムを対象としたネット構造全体系の衝撃挙動のシミュレーションを試みた。その結果、複雑なリングネット落石防護システムを、基本構造から段階的にモデル化を試みることで、システム全体の衝撃挙動に対する各構造要素の影響を考察するとともに、個別要素法を用いてリングネット落石防護システムの衝撃応答を概ね再現できることを確認した。

2. 個別要素法を用いた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鋼製落石防護柵の複雑な衝撃挙動を表現可能なモデルの開発を試みた。

2.1 リングネット落石防護柵

本研究で解析対象とした落石防護柵は、リングネット落石防護柵⁶⁾と呼ばれるもので、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

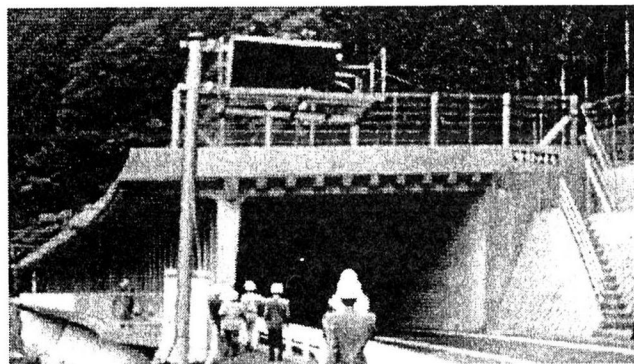


写真-1 ロックシェッド

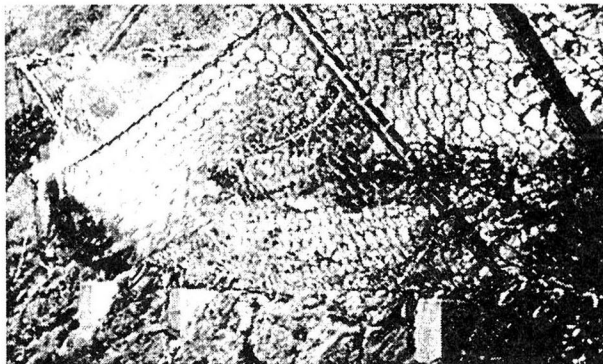


写真-2 鋼製落石防護ネット構造の野外実験状況

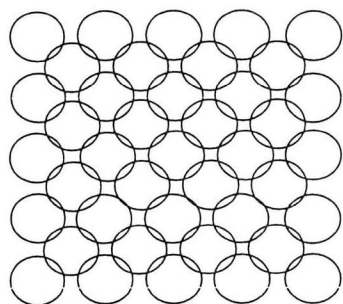
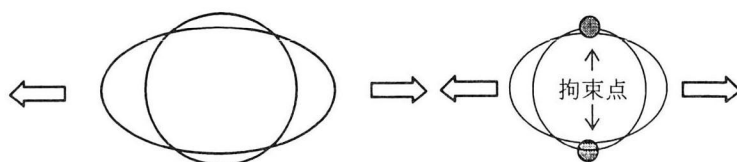


図-1 鋼製リングネット



(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

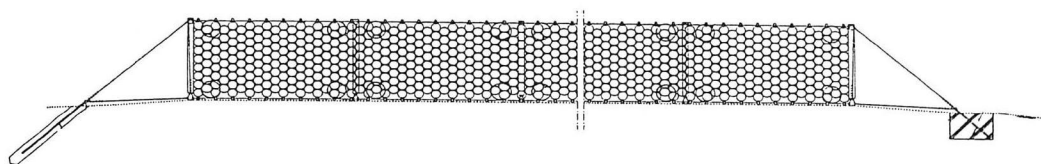


図-2 リングネット落石防護柵1パネル

支柱と鋼製ロープで支える構造形式を有している。これを図-2のように組み合わせたものが1ユニットとして施工される。実際のリングネット落石防護柵は、ネットの動的な変形に対して粘性的な拘束力を発揮するブレーキリング等の細部構造を有しているが、ここ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て検討を試みた。

2.2 各部材のモデル化

リングネット落石防護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ため、個別にモデル化する必要がある。そこで、以下に示すように主要部材別に異なるパネ要素でモデル化した個別要素法を用いた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、全ての部材を球形要素の集合体としてモデル化した。

1) リングネット

鋼製リングを組み合わせたネット構造の変形に対する抵抗特性を理論的に求めることは非常に困難である。そこで、本解析では図-3に示すような鋼製リングの引張試験

で得られた結果⁷⁾を元に、球状の個別要素間に簡易な変位の非線形関数として表されるパネを用いて引張抵抗を与えることとした。図-4は、リングの単軸引張試験結果と、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。この図より、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認められる。現実のリングネットは、両者の中間的な性状を示すものと考えられるが、ここではリング要素間に引張荷重にのみ抵抗する法線方向

パネ k_n として、図-4の結果から求めた変位に関する回

帰式の接線勾配を求め、以下に示す減衰係数 C_n とともに与えた。

$$k_n = f(\delta) = \frac{dP}{d\delta}, \quad C_n = 2h\sqrt{m_1 k_n} \quad (1)$$

ここに、 P : 引張荷重, δ : 要素間変位, h : 減衰定数, m_1 : リングネット要素質量

また、リングネットは支柱間に張った鋼製ロープに吊られる形で設置され、図-5に示すように落石の衝撃力に

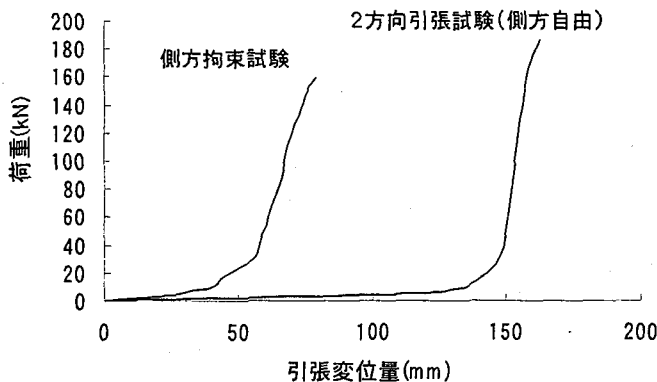


図-4 鋼製リングの引張試験結果

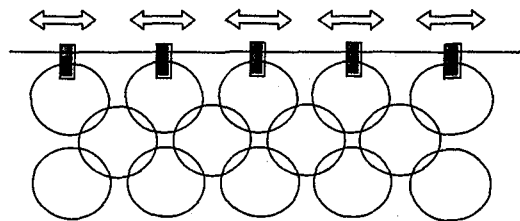


図-5 リングの水平スライド挙動

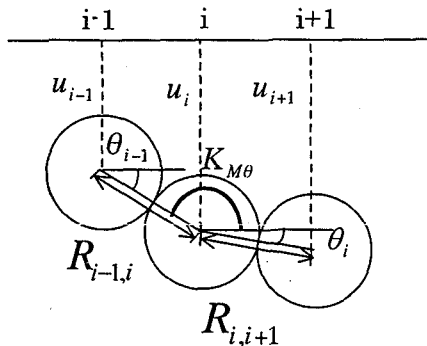


図-6 支柱要素モデル

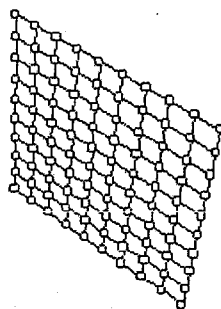


図-7 ネット単体モデル
(四辺拘束状態)

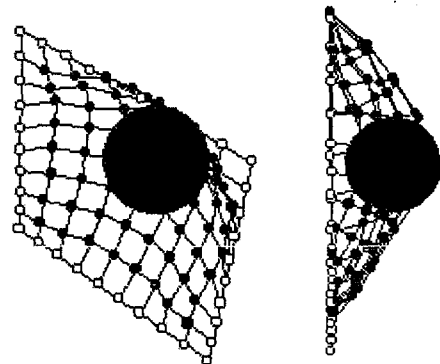


図-8 ネット単体モデルの応答状況
(100msec 経過時)

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 I(cm ⁴)
リングネット要素	0.13	式(1)による	0.10	—	—
支柱要素	2.15	2.06×10 ⁷	0.10	53.85	5.4×10 ³
ロープ要素	0.71	2.06×10 ⁷	0.10	17.75	—

応じて水平方向にスライドすることが可能であるため、リングネット部の上下辺につながれた要素は水平方向へ自由に移動できるようにモデル化した。

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方向への変形が、主に支柱に曲げモーメントとして作用することから、振りは考慮せず 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

なお、実物大落石衝突実験によると、支柱に落石が直接衝突しない限り、支柱に塑性変形は発生しないことから、

ここでは線形弾性要素とみなした。

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部材とみなし、引張軸力のみを伝達する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

ワイヤロープに関しても、ロープの破断が生じるケースは報告されていないことから、支柱同様に線形弾性要素とみなした。以上のモデル化により、各要素間に作用する力を法線方向力 f_n と 2 接線方向力 f_{sy}, f_{sz} で評価した部材座標系から全体座標系 (X, Y, Z) に変換を行い、

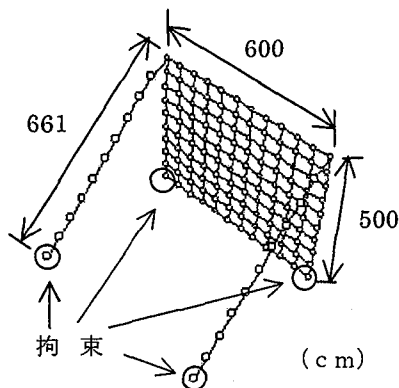


図-9 リングネット1パネルモデル
(水平スライド無し)

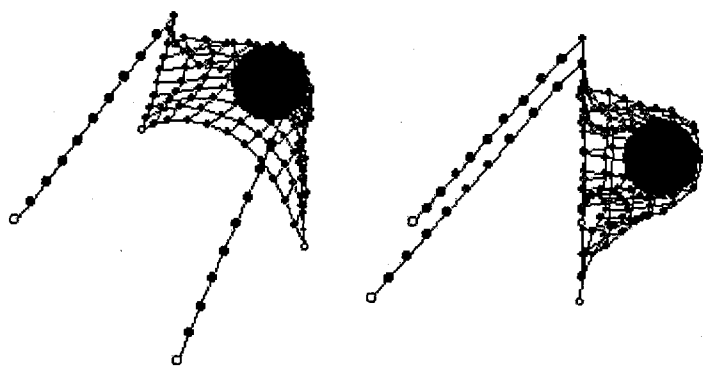


図-10 リングネット1パネルモデルの衝撃応答状況 (150msec 経過後)
(水平スライド無し)

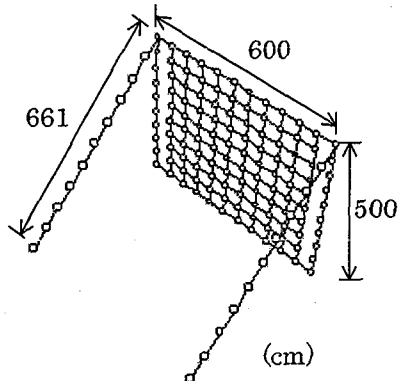


図-11 リングネット1パネルモデル
(水平スライド考慮)

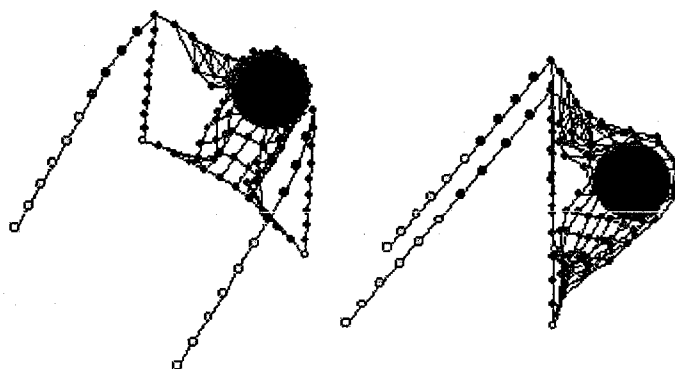


図-12 リングネット1パネルモデルの衝撃応答状況 (150msec 経過後)
(水平スライド考慮)

全ての結合（接触）要素間に作用する合力をもとに、以下に示す運動方程式から加速度成分を求め、時刻歴な計算を行った。

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

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

3. リングネット落石防護柵の衝撃応答解析

リングネット落石防護柵の複雑な衝撃応答特性を把握するために、4段階に分けて基本構造から複雑なモデル化を行いながら、応答特性の検討を行った。なお、落石の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。また、解析に用いた諸元を表-1に示す。今回はリングネット落石防護柵の変形特性を再現する基礎的な解析であるため、各要素の減衰定数は同じ値を与えているが、現実には異なると考えられ、検討する必要がある。

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部単体のみをモデル化したものである。この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図-8に示す。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パネ係数を設定できれば、個別要素法により鋼製ネット構造の衝撃応答解析が可能であるものと考えられる。

3.2 リングネット1パネル（スライド無し）の解析

図-9は、リングネット構造の主要な3部材（支柱、ロープ、リングネット）で構成される1パネルモデルを示している。実際の構造は、リングネットと支柱は結合されていないが、ここではネットの水平方向へのスライドによる緩衝効果を把握する比較対象として、支柱に結合したモデルで解析を行った。図-10は、落石がネットに衝突して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。この図より、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。

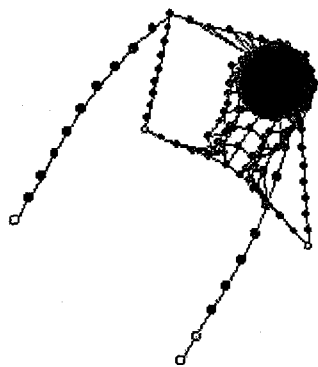


図-13 側方拘束時の剛性を用いたときの応答状況

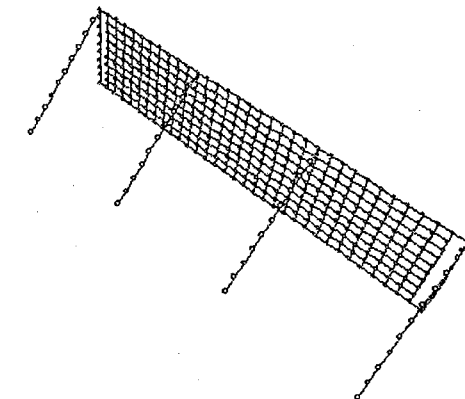
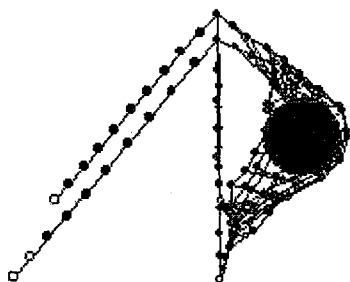


図-14 リングネット1ユニットモデル

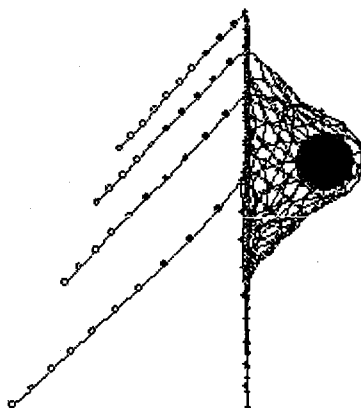
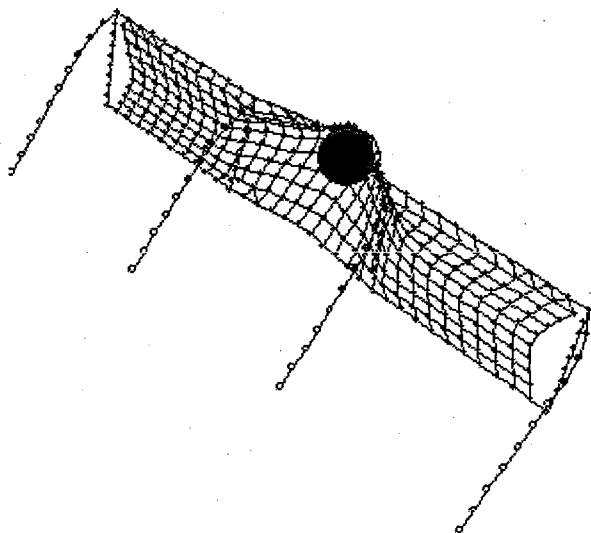


図-15 リングネット1ユニットの衝撃応答状況 (150msec 経過後)

表-2 リングネットの剛性が構造系全体の応答に与える影響 (150msec 経過時)

バネ係数の種類	側方無拘束時の剛性	側方拘束時の剛性
最大応答変位量(cm)	283.0	281.0

3.3 リングネット1パネル (スライド考慮) の解析

図-11 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-12 は、図-10 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り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防護柵は3パネルで1ユニットを形成し、相互のネットが結合されているので、図-12 ほどの過度なスライドは発生しないと思われるが、リングネットの応答変位を正確に求めるためには、スライドの影響を考慮する必要があることが推察された。

3.4 鋼製リング間の引張抵抗の影響

図-4 に示したように、リングネットの引張抵抗は隣接リングの拘束条件により大きく異なる。そこで、図-11 のモデルにおいて、リングネットの法線方向バネとして、

図-4 の2種類の試験結果の接線勾配を与えた時の衝撃挙動を比較した。図-12 および図-13 は、それぞれ側方自由時の剛性と側方拘束時の剛性を与えたときの応答状況を示している。これらの図より、ネット構造全体系の衝撃応答に殆ど相違が見られないことがわかる。表-2 は、両ケースにおける落石衝突後 150msec の最大変位 (ネット中央部) を比較したものである。この表より、最大変位の差はわずか 2cm 程度であり、鋼製リング間の引張抵抗の影響は予想以上に小さいことが認められた。これは、ネット全体系としての挙動には、他の要因 (支柱やロープの変形および水平スライド等) が大きく作用するためであると考えられる。そこで、本研究ではこの結果を踏まえ、より簡易な側方自由な状態における引張試験結果を採用することとした。

3.5 リングネット落石防護柵1ユニットの解析

図-14 は実際のリングネット落石防護柵1ユニットを模した解析モデルを示している。図-15 は落石防護柵全

表-3 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	ネット単体モデル	1 パネルモデル		1 ユニットモデル
		スライド無	スライド有	
最大応答変位量(cm)	140.0 (100msec 時)	269.0	283.0	276.0

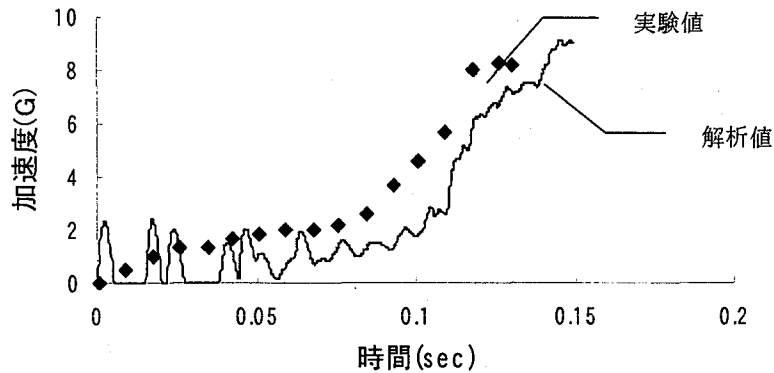


図-16 落石の応答加速度の比較

体系の応答状況を示したものである。この図より、1ユニットの場合、落石の衝撃を受ける中間パネルの変形により左右の隣接パネルが引き寄せられることで、落石の衝撃力を構造全体で受け止めていることが認められる。表-3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特性が応答変位に有意な影響を与え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ブレーキリング等の装置が配置されており、落石に対する抵抗力を高めるにはスライド量を小さくする必要があることから、落石のエネルギーを効率良く吸収する最適なスライド特性については、今後、解析的な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、コンクリート製の重錘重心位置に加速度計を内蔵させ、重錘自体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おり、その他に本解析法の妥当性を検証する有効な実験データが存在しないため、実験で計測された重錘加速度と解析結果を比較した。図-16より、両者は良好に一致しており、本解析が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。以上の考察より、現実のリングネット防護柵は、本解析で考慮していない各種の細部構造(ブレーキリング等)を有しているが、本研究で行った基本的なモデル化で構造全体系の衝撃応答特性を大まかに把握できることが認められた。

結 論

本研究で得られた成果を要約すると以下のようになる。

- 1) 3次元個別要素法を用いた解析により、鋼製落石防護柵の衝撃挙動を良好に表現できることが確認された。
- 2) 鋼製リング間の拘束状況によりネット単体の剛性は大きく異なるが、リングネット全体系の衝撃応答への影響は

小さいことがわかった。

3) リングネットの水平方向へのスライドが、ネット全体系の変形状況に大きく影響していることが認められた。

4) 野外実験による落石の加速度応答を、本解析で良好に再現可能であることから、本手法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) 洲上正浩，小畑康隆：ジオセンチックスを用いた落石防護擁壁の実験的研究，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.233-238，2000年6月
- 3) 松尾修，佐々木哲也他：発泡スチロールを設置した落石防護柵の重錘落下実験，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.159-164，2000年6月
- 4) 小畑康隆，藤井智弘他：緩衝装置を配置したエネルギー吸収型落石防止柵に関する実験的研究，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.147-152，2000年6月
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 古賀泰之：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，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.165-170，2000年6月

(2001年9月14日受付)