

3次元個別要素法を用いた落石防護ネット構造の衝撃応答解析

九州大学 学生会員 石井慎二 九州大学 正会員 園田佳巨 九州大学 正会員 彦坂熙

1. 緒言

急峻な地形が多い日本では、豪雨や地震発生等により斜面の崩壊や落石災害が起こり易い環境下にあり、道路防災において落石対策は重要な課題の一つである。従来は、ロックシェッドや落石防護擁壁等の落石対策工法が施工されてきたが、コンクリート製の防護構造物は重量が大きく、建設コストも高価になるため、交通量が少ない地方路線等では採用されづらいなどの難点がある。そのため、巨大な落石を確実に受け止める事が可能でかつ経済性に優れる鋼製ネット構造(写真-1参照)が施



写真-1 落石防護ネット構造の野外実験状況

工される機会が増えつつあるが、落石の衝突を受けた際のネット全体系の挙動を予測する解析手法は未整備であり、その性能評価方法についても明確な規定はない。そこで、本研究では落石防護ネット構造の性能評価方法を確立するために、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作成し、ネット構造の衝撃挙動のシミュレーションを試みた。

2. 解析手法

2.1 リングネット落石防護構造

解析の対象としたネット構造は、リングネット落石防護柵と呼ばれるもので、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支柱と鋼製ロープで支えた形式である。現実のリングネット防護柵は、ネットの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も有しているが、ここではネット、支柱、ロープの3主要部材のみをモデル化して解析を試みた。

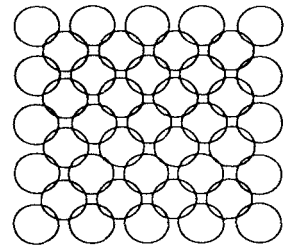


図-1 鋼製リングネット

2.2 個別要素法による衝撃応答解析

リングネット落石防護柵を構成する主要部材(ネット、支柱、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、各部材毎に異なるバネ要素でモデル化した個別要素法を用いて衝撃応答解析を試みた。

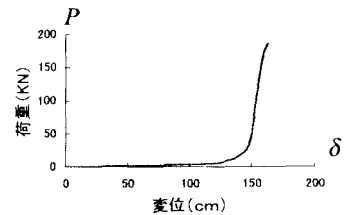


図-2 リングネット二方向引張試験

①リングネット：鋼製リングを組み合わせたネットの変形に対する抵抗特性を理論的に求めることは困難である。そこで、図-2に示すような鋼製リングの二方向引張試験結果¹⁾を元に、変位の非線形関数として引張抵抗荷重を与える簡易な方法を試みた。すなわち、リング要素間に引張荷重にのみ抵抗する法線方向バネ k_n として、図-2の接線勾配を求め、以下に示す減衰項 C_n とともに与えた。

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

ここに、 P ：引張荷重、 δ ：要素間変位、 h ：減衰定数、 m ：要素質量

②支柱：支柱には鋼管が用いられているため、図-3に示すような曲げバ

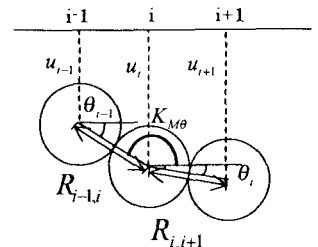


図-3 支柱の曲げバネのモデル化

ネ K_M を導入し、要素間に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、 $K_M = \frac{EI}{R}$ 、 I ：支柱（鋼管）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

③ワイヤーロープ：ワイヤーロープにもリングネット同様に引張荷重のみを伝達する要素を用いた。したがって、要素間には法線方向バネ k_n 、減衰項 C_n を以下の式で与えた。

$$k_n = \frac{EA}{R_y}, \quad C_n = 2h\sqrt{mk_n} \quad (3)$$

ここに、 EA ：ロープの軸剛性、 R_y ：ロープ要素間距離

なお、落石との接触判定を容易にするために、全部材を球状要素でモデル化している。

3. 数値計算例および考察

図 - 4 に示すリングネット構造（1 パネル）を解析対象とした衝撃応答解析を行った。衝突物の条件として、ネット中央に重量 2 t f、衝突速度 20 m/s の落石が衝突するものとした。なお、リングネット構造系の解析を行う前に、四辺を拘束した状態のネット単体の解析も実施し、ネットの動的変形挙動に境界条件が与える影響について考察した。図・5 および図・6 は、落石衝突後 70ms 経過時の変形状況を示したものである。この図より、四辺を拘束されたネットは全体的に一樣な撓みにより落石を受け止め、衝突部の変形量は 117 cm の値が生じている。一方、リングネット構造（1 パネル）の場合には、ネットの上・下辺に変形が認められ、ネット中央の応答変位は 122 cm と、ネット単体の場合に比べてわずかに 5 % 程度の増加が認められた。これは、今回のモデルの場合、ネットの剛性が支柱やロープと比べて相対的に非常に小さく、2 t f 程度の小規模な落石であれば、殆どネットの変形のみで受け止めることが可能なため、両者の相違が小さくなったものと思われる。

以上の解析により、本研究で用いた簡易な個別要素法を用いて落石防護ネットの衝撃応答挙が再現可能であることが確認された。今後、リング要素のバネ特性等については、理論的な検討を行い、実際の衝撃実験結果との定量的な比較・検証を行うことで、落石の持つエネルギーを効率良く吸収できる構造部材の組み合わせについて考察していく予定である。

最後に、本研究を行うにあたり、リングネット落石吸収柵工法研究会の佐野榮氏に資料等の提供をいただいたことをここに記し、感謝の意を表します。

参考文献 1) 鉄道総合技術研究所・東亜グラウト工業株式会社 共同研究報告書：高エネルギー吸収柵の鉄道への適用に関する研究、平成 10 年 7 月

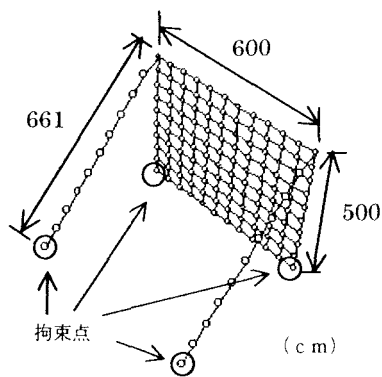


図 - 4 リングネット落石防護柵

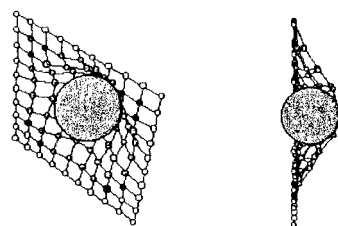


図 - 5 リングネット単体の変形状況 (70ms)

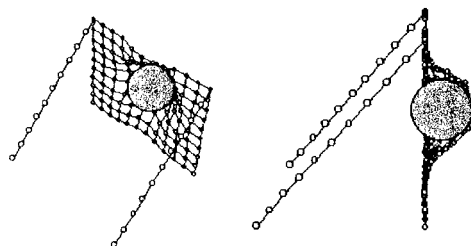


図 - 6 リングネット構造系（1 パネル）の変形状況 (70ms)