

個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析に関する基礎的検討

防衛大学校 学生会員 ○高橋 和慎 学生会員 原木 大輔 正会員 香月 智
東京製鋼株式会社 田代 元司

1. 緒言

落石を防止するとともに、万一落石が発生した場合に落石を飛跳させずに斜面に沿って落すことを目的とした待ち受け型の落石防護網は、写真-1に示すように、ワイヤロープや金網で構成されたネット構造物である¹⁾。現行設計法においては、落石の運動エネルギーとネットの可能吸収エネルギーによる設計が行われているが、落石衝突時のネット全体の変形やエネルギー吸収過程については未だ明らかにされていない。そこで、落石エネルギーが落石防護網に吸収される過程を検討するために、大変形問題への適用が可能と考えられる個別要素法を用いた解析法を開発し、その第一段階として重錘衝突実験の結果と挙動を比較検討するものである。



写真-1 落石防護網

2. 重錘衝突実験

重錘衝突実験は図-1に示すような実構造物の1/4モデルである3×3mのネットを使用し、100kgの重錘をネット中心部より0.75m上方に衝突させた。表-1に実験で使用したワイヤの諸元を示す。

3. 解析手法

個別要素法は構造物を剛体の小要素とそれを接続するばねの集合体としてモデル化し、その要素ごとに運動方程式をたて、数値積分により各要素の変位、回転を求めるものである²⁾。本解析では球形要素に加えてワイヤをモデル化するため、円柱形要素を導入した。

本解析で用いた個別要素法におけるばねモデルを図-2に示す。要素間には6自由度に応じた6つのばねを導入し、力の伝達はこのばねを媒体として行なわれるものとする。

三次元における運動方程式を中心差分法を用いて解く。ただし、速度項は後進差分とした。すなわち、

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t + \Delta t) - 2\mathbf{u}(t) + \mathbf{u}(t - \Delta t))}{\Delta t^2} \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \frac{\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - \Delta t))}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{u}$: 変位ベクトル、 $(\cdot)$: 時間に関する1次微分。これを、運動方程式と連立して解き、次時点 $(t + \Delta t)$ における変位を次式によって求める。

$$\mathbf{u}(t + \Delta t) = \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \right)^{-1} \left\{ \mathbf{F}(t) - \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{D} \frac{\Delta \mathbf{u}}{\Delta t} \right\} + \{ 2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - \Delta t) \} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{M}$: 質量マトリクス、 $\mathbf{D}$: 減衰マトリクス、 $\mathbf{K}$: 剛性マトリクス、 $\mathbf{F}$: 外力マトリクス、 $\Delta \mathbf{u}$: Δt 秒間の $\mathbf{u}$ の増分。

本解析の要素間ばねに導入する構成則は図-3に示すように、全て弾性ばねとした。また、要素間ばねの荷重と変形の関係は図-4に示す幾何学的関係より次式のように

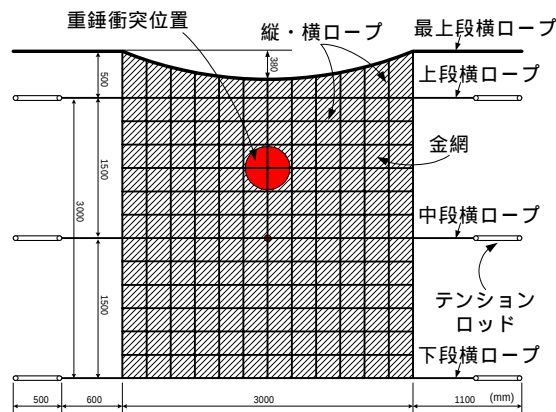


図-1 実験装置の概要図

表-1 ワイヤの諸元

	3×7 φ8 ワイヤ (縦・横ロープ、上・中・下段横ロープ)	7×7 φ12 ワイヤ (最上段横ロープ)
ヤング率 $E(\text{N/m}^2)$	1.32×10^{11}	1.55×10^{11}
公称断面積 $A(\text{m}^2)$	1.10×10^{-4}	1.87×10^{-4}

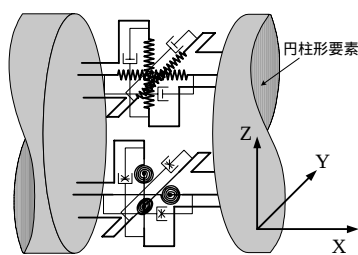


図-2 ばねモデル

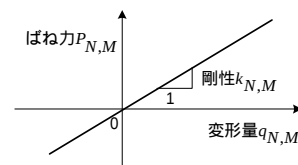
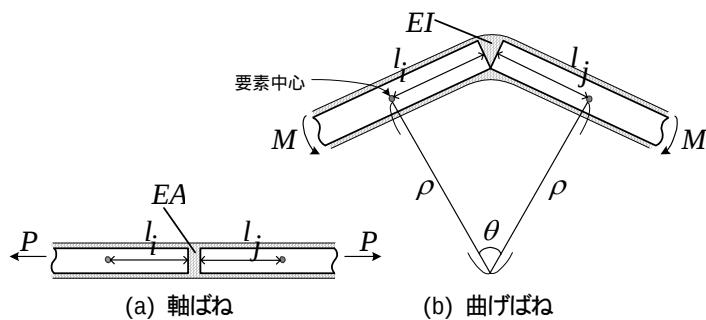


図-3 構成則



(a) 軸ばね (b) 曲げばね
図-4 要素間ばねの荷重と変形の関係

キーワード 落石防護網、ネット構造、個別要素法

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL046-841-3810 E-mail: s52307@ed.nda.ac.jp

に表せる．すなわち，

$$P_N = \frac{EA}{l_i + l_j} q_N \quad (4-a)$$

$$P_M = \frac{EI}{\rho} = \frac{EI}{l_i + l_j} q_M \quad (4-b)$$

ここで， $l_{i,j}$ ：それぞれの要素中心からばねまでの距離， P_N ：軸ばねのばね力， P_M ：曲げばねのばね力， A ：モデル化する部材の断面積， I ：モデル化する部材の断面二次モーメント， E ：モデル化する部材のヤング率， ρ ：モデル化する部材の曲率半径．

解析モデルは，図 - 5 に示すように，球形要素 182 個，円柱形要素 417 個を用いてモデル化した．なお，縦ローブと横ローブの交点は球要素とし，交点間の円柱形要素数は，図 - 5 の点線で示す重錘衝突部領域では 2 個要素，それ以外では 1 個要素とした．

解析パラメータを表 - 2 に示す．断面積はワイヤの公称断面積とする．ワイヤの軸方向の剛性は使用したワイヤの引張試験により決定した．また，曲げ剛性はワイヤ独自の特性を考慮して，ヤング率は鋼材の値とし，断面二次モーメントは可とう度を考慮した値とすることにより決定した．要素の密度は解析モデルのネット部の全重量が，実験で使用したネット部の全重量と同等になるように決定した．

4. 解析結果

実験においてネットをビデオ撮影したものと，解析により得られたネットの挙動を比較して図 - 6 に示す．図 - 6(a)は，ネットと重錘が接触する直前の状態($t = 0$ msec)を示している．図 - 6(b)はビデオ判定により重錘の最大変位に達した時刻のものである．実験においては衝突部のネットが飛び出すように大きく変位していることがわかる．同時刻の解析結果においても，重錘および衝突部のネットが飛び出すように大きく変位している．また，衝突部だけではなく，点線で囲んだ上段横ローブと中段横ローブの間（以降ネット上部）の右側端部のたわみや中段横ローブと下段横ローブの間（以降ネット下部）のたわみについても，実験結果を概ね表現できている．図 - 6(c)はビデオから判定した重錘とネットが離れる時刻である．この時，ネット上部は後方へたわんでおり，ネット下部は前方へたわんでいることがわかる．同時刻の解析結果においても，点線で囲んだネット上下部のそれぞれのたわみは実験結果を概ね表現できている．図 - 6(d)はビデオ撮影開始から 400msec 後の状態である．この時，ネット上部は後方へたわんでおり，ネット下部は前方へたわんでいることがわかる．同時刻の解析結果においても，点線で囲んだネット下部のたわみは実験結果を概ね表現できている．

5. 結言

円柱形要素を導入した個別要素法により，少ない要素でネットと重錘の定性的衝突挙動について，良くシミュレーションできていることがわかった．

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) Cundall, P. and Strack, O.: A Discrete Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, pp.47-56. 1979.

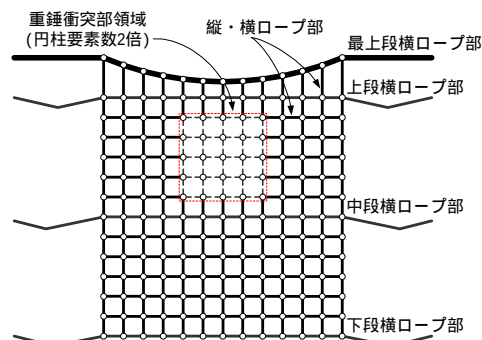


図 - 5 解析モデル

表 - 2 解析モデルの諸元

		最上段横ローブ部 (7×7 φ12)	それ以外のローブ部 (3×7 φ8)
軸ばね	剛性 EA(N)	1.32×10^7	2.89×10^7
	減衰定数	1.19×10^3	5.10×10^2
曲げばね	剛性 EI(Nm ²)	1.92	4.15
	減衰定数	1.27	6.79×10^{-2}
密度 (kg/cm ³)		1.96×10	1.96×10
可とう度		83.1	133.9

実験ビデオ

解析

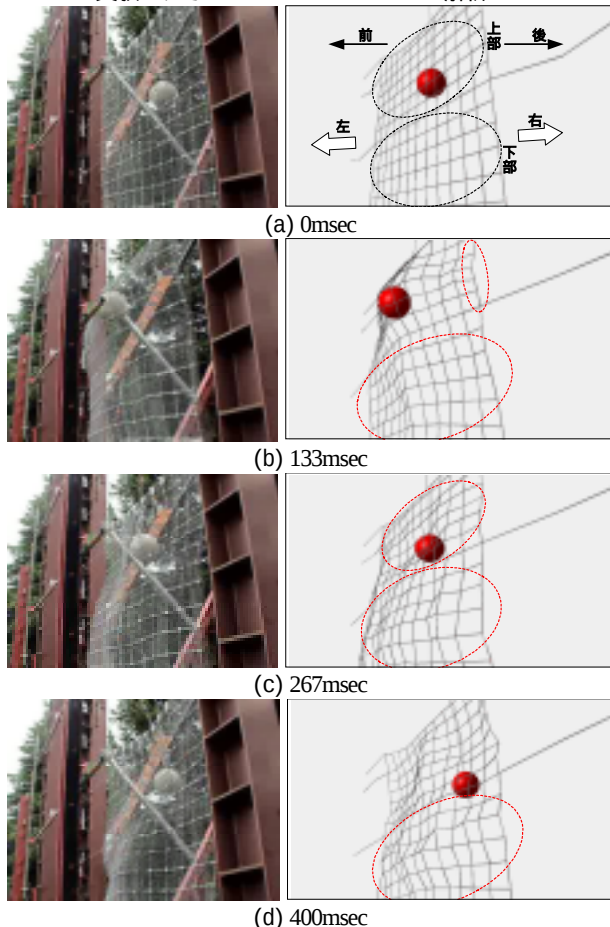


図 - 6 実験と解析の比較