

ネット構造物衝撃応答解析への個別要素法の適用に関する基礎的検討

防衛大学校 ○原木 大輔, 香月 智 東京製綱株式会社 田代 元司

1. 緒言

近年、ワイヤロープの柔軟性を活用した砂防構造物が建設されている。ワイヤロープは、曲げ剛性が小さく、柔軟性に富む構造物であるので、石礫の衝突をしなやかに受け止める効果が期待できる。一方、構造解析上では、ネット構造物は自立形状を決定できない不安定構造物であり、その衝撃による応答形状は初期形状とは全く異なる大変形問題である。よって、ワイヤの各部分に伝わるエネルギー分担の詳細は算定が難しく、破壊限界の照査を構造解析に基づいて行うことが難しい。そこで、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ネット構造物の解析法を開発し、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し、将来的な変形応答解析に基づく安全照査法確立の基礎とする。

2. 重錘衝突実験

ネット構造の衝撃応答を検討する基礎的資料を得るために、ワイヤロープのネット構造物に対する重錘衝突実験を実施した。重錘衝突実験では、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、上方に吊り下げた100kgの重錘を振り子の要領で落下させた。衝突位置はネット中心部より0.75m上方で、落下高さを1, 2, 3, 3.3mと変化させて、ロープの張力、ネットの変位および挙動を計測した。実験に使用したワイヤおよび金網の諸元を表-1に示す。

図-2に、ワイヤごと、落下高さごとのワイヤに生ずる最大張力を示す。各ワイヤとも落下高さが大きくなると、最

大張力も大きくなるとともに、どの落下高さにおいても重錘の衝突位置から最も近い中段横ロープの張力が大きいことがわかる。また、図-3には、ワイヤごと、落下高さごとの最大変位を示しているが、最大変位は落石の落下高さを大きくしても、さほど大きくならないことがわかる。これは、変位が特定の大きになると、ワイヤの張力が発生し、変形を止めるためである。言い換えると、ワイヤの弾性ひずみエネルギーの消費を伴わない自由な運動状態の変位・変形の占める割合が大きいことがわかる。

3. 円柱形要素を導入した個別要素法

3.1 解析法

一般的な3次元個別要素法では、球形要素が用いられることが多いが、球形要素だけを用いてモデル化するためには多くの要素を必要とし、計算負担の観点では効率的とは言いがたい。そこで、本研究では剛体要素として円柱形要素を導入することにした。

すなわち、図-4に示すように、円柱形要素とそれを接続するばね要素によってワイヤを表現する。また2本のワイヤロープの交点では図-5のようにモデル化するものとする。この際、図-4における要素*i*と*j*の局所座標を設定する姿勢ベクトルをそれぞれ次式のように表す。

$$\mathbf{L}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_j = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\mathbf{x}_i^T = [x_{xi}, y_{xi}, z_{xi}] \tag{2-a}$$

$$\mathbf{y}_i^T = [x_{yi}, y_{yi}, z_{yi}] \tag{2-b}$$

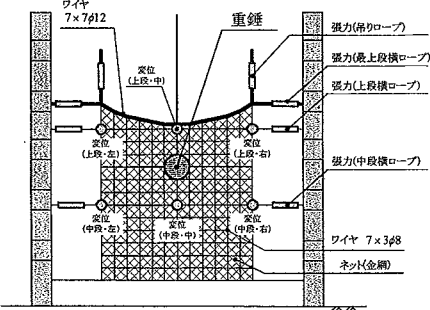


図-1 落石衝突実験装置概要

表-1 部材の諸元と解析パラメータ

部材名称	ワイヤ部			金網部
	規格	7×7 φ12	3×7 φ8	φ2.6×25×25
実験	密度	0.63kg/m	0.21kg/m	5.1kg/m ²
	剛性 EA(N)	1.747×10 ⁷	6.616×10 ⁶	1.654×10 ⁴
軸ばね	減衰係数	1.083×10 ⁴	1.148×10 ⁴	5.192×10 ²
	剛性 EI(Nm ²)	1.524	9.725×10 ⁻²	0.000
曲げばね	減衰係数	8.145×10 ⁻²	9.725×10 ⁻²	0.000
	密度 (kg/cm ³)	1.301×10 ⁻²	1.301×10 ⁻²	1.435×10 ⁻¹
可換度		83.1	133.9	—

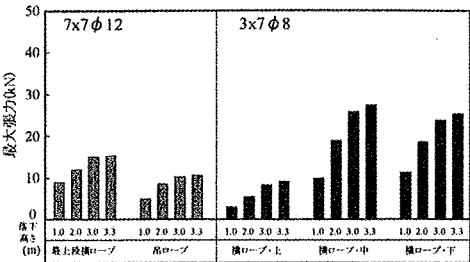


図-2 ロープ最大張力

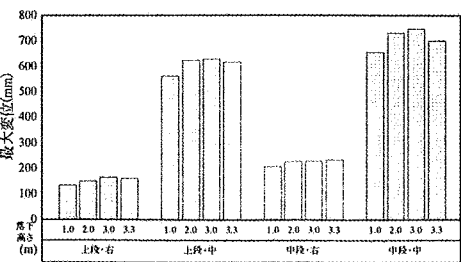


図-3 ロープ最大変位

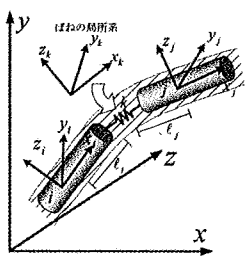


図-4 円柱形要素とワイヤばね

$$\mathbf{z}_i^T = [x_{zi}, y_{zi}, z_{zi}] \quad (2-c)$$

ここで、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{z}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j, \mathbf{z}_j$: それぞれ要素 i, j の局所座標の x, y, z 軸ベクトル, x_n, y_n, z_n : それぞれベクトル $\mathbf{x}_{ni}$ の一般座標系における x, y, z 成分。

また、連接ばねの姿勢ベクトル $\mathbf{L}_k$ は、次式により与えるものとした。

$$\mathbf{L}_k = \frac{\ell_j \mathbf{L}_i + \ell_i \mathbf{L}_j}{\ell_j + \ell_i} \quad (3)$$

ここで、 ℓ_j, ℓ_i : それぞれ要素の中心からばねまでの距離

解析モデルは、図-5 に示すように球形要素 196 個、円柱形要素 754 個を用いてモデル化した。縦ロープと横ロープの交点は球形要素とし、交点間は 1 つの円柱形要素とした。また、金網部はロープで囲まれた領域を代表するものとして、ロープの交点を斜め方向に結ぶように円柱形要素を配置した。なお、衝突部付近は大きく変形することが予想されるため、交点間を 2 要素で分割した。

要素間ばねは弾性として、荷重と変形の関係は幾何学的関係より次式のように表せる。ただし、ワイヤは断面保持の仮定が成立しないため、可撓度¹⁾ α により曲げ剛性を減ずる。すなわち、

$$k_n = \frac{EA}{\ell_i + \ell_j} \quad (4)$$

$$k_M = \frac{1}{\alpha} \frac{EI}{\ell_i + \ell_j} \quad (5)$$

ここで、 k_n, k_M : それぞれ軸ばね、曲げばねの剛性、 A : ワイヤの断面積、 I : ワイヤの断面 2 次モーメント、 E : ワイヤのヤング率。

解析パラメータを表-1 に示す。

3.2 解析結果

図-6 に実験ビデオ映像と、解析により得られたネットの挙動を比較して示す。図-6(a)は、ネットと重錘が接触する直前の状態($t=0\text{msec}$)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おり、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プと中段横ロープの間(以降ネット上部)の右側端部の撓みや中段横ロープと下段横ロープの間(以降ネット下部)の撓みについても、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、ネット上部は衝突部付近が撓み、ネット下部は前方へ大きく撓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撓みは実験結果を概ね表現できている。図-6(d)の 533msec 後の状態では、ネット上部は後方へ撓んでおり、ネット下部は前方へ撓んでおり、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撓みは実験結果を概ね表現できている。

図-7 には上・中・下段横ロープの張力～時間関係を実験結果と比較して示す。全体として実験結果より張力がやや大きい、波形と共に良くシミュレートできている。

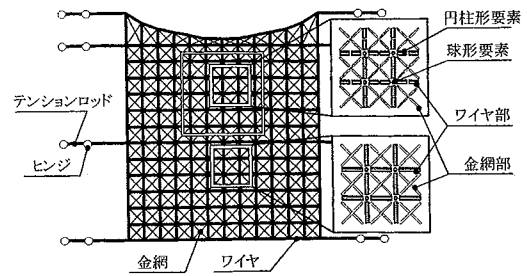
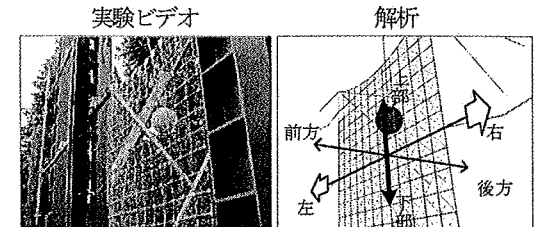
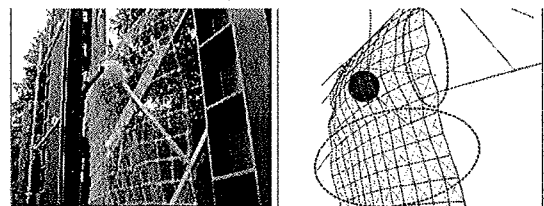


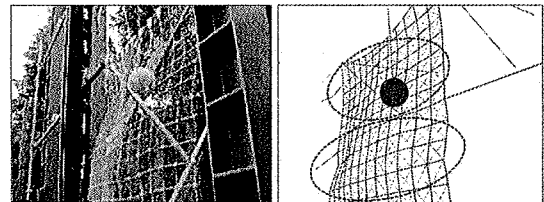
図-5 解析モデル



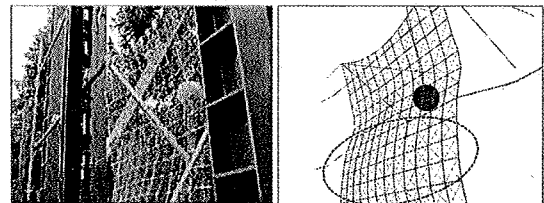
(a) $t=0\text{msec}$



(b) $t=133\text{msec}$



(c) $t=333\text{msec}$



(d) $t=533\text{msec}$

図-6 ネットの挙動

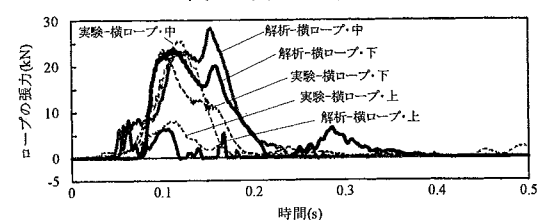


図-7 張力～時間関係(上・中・下段横ロープ)

4. 結 言

重錘衝突実験の結果と挙動を比較検討し、個別要素法によってネット構造物の衝撃応答をシミュレートできることを示した。

参考文献

- 1) ワイヤロープ便覧編集委員会: ワイヤロープ便覧, 1967.