

落石防護柵の衝撃挙動解析への SPH 法の適用性に関する基礎的検討

九州大学大学院

正会員 ○福永 一基

九州大学大学院

正会員 園田 佳巨

九州大学大学院

学生会員 畑 芳宏

1. 緒言

我が国では、国土の大半を山地や丘陵地が占めることから、落石等の斜面災害による被害が多発している。落石事故から都市や流通経路の安全を確保するため様々な防護構造物が設置されているが、その一つとして図-1 に示すワイヤリング防護柵がある。一般に、落石防護柵は柵自体の大きな変形能により落石エネルギーを柔らかく受け止めることが可能であり落石防護柵の施工実績は増加しつつあるが、柵形式の構造物の動的挙動を解析する手法は確立されておらず、その耐衝撃性能は衝撃試験によってのみ照査されているのが現状である。本研究では柵形式の防護構造物の耐衝撃性能を、数値解析によって照査する基礎的段階として、SPH 法を用いたワイヤリング防護柵の衝撃応答解析を試みた。



図-1 ワイヤリング防護柵

2. SPH 法の適用

ワイヤリングネット構造のように、部材間に様々な遊間があり、大変形が可能な構造物の応答解析に対して有限要素法を適用することは難しい。そこで、大変形問題に対しても適合性が高い SPH 法（メッシュレス法）を用いた衝撃解析を行った。SPH 法は、連続体を任意に離散化した点（粒子）の集合体で表現した上で、偏微分方程式を Kernel 積分によって近似的に解く手法である。ある点 x の物理量 $f(x)$ は式(1)で表わされる。

$$f(x) \approx \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

ここで、 x' は積分領域 Ω 内の任意評価点、 h は重み関数 W の影響領域長さである。

本研究では、解析対象であるワイヤリングネット構造の 1 リングを 1 粒子で離散化することで簡易なモデル化を行った。解析では、ワイヤリング間距離が大きくなるほど互いが引き合う力も大きくなる力学特性を表現するため、式(2)に示すように、粒子間距離が大きいくほど重みが増大する Kernel 関数を考案した。

$$\begin{aligned} W(R, h) &= k \times \alpha_d \times \exp\left(-\frac{(R-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \\ W'(R, h) &= k \times \alpha_d \times \frac{-(R-\mu)}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(R-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \\ \alpha_d &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma^3 h^3} \quad (3次元) \\ R &= \frac{r}{h} \quad (|R| \leq \mu) \end{aligned} \quad (2)$$

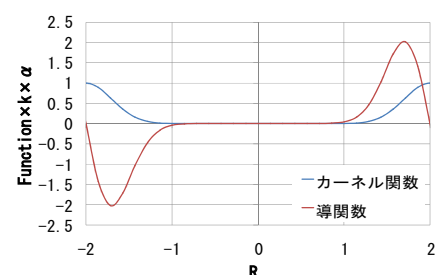


図-2 提案した kernel 関数

ここで、 W は kernel 関数、 r は 2 粒子間の距離、 h は影響長さ、 $\sigma = 0.3$ は標準偏差、 $\mu = 2.0$ は平均(基準点)、 $k = \sqrt{2\pi\sigma^2}$ は次元補正係数を示しており、図-2 に関数の形状を示している。

この Kernel 関数は、パラメータ σ 、 μ の値を変えることで関数形状を簡易に修正することができる利点を有していることから、異なる種類のネット構造物に対しても応用可能であると考えられる。

3. 静的載荷試験シミュレーション

ワイヤリングの引張試験では、図-3 に示すように、衝突箇所におけるネットの変形挙動の把握を目的とした面

キーワード 落石防護柵, SPH 粒子法, 衝撃挙動解析

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 九州大学 TEL 092-802-3370

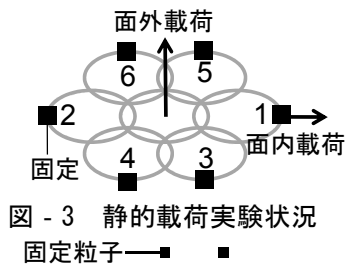


図-3 静的荷重実験状況
固定粒子—■—

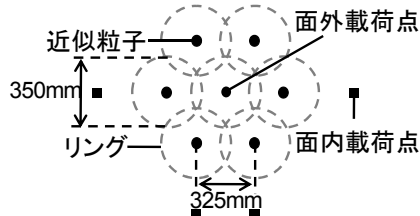


図-4 静的荷重実験モデル

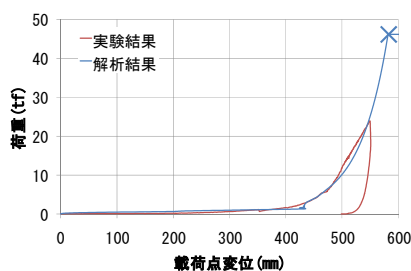


図-5 面外方向荷重

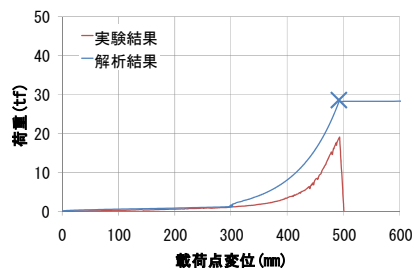


図-6 面内方向荷重試験

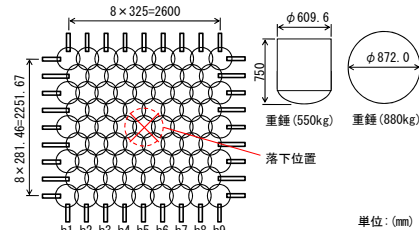


図-7 重錘落下実験

表-1 材料定数

	質量 (g)	密度 (g/cm³)	ヤング率 (N/mm²)	粒子直径 (mm)
ワイヤリング	450.0	4.65	2.1×10^5	350.0
重錘(550kg)	281.25	2.25	2.1×10^4	50.0
重錘(880kg)	145.92	2.28	2.1×10^4	40.0

表-2 実験および解析ケース

実験 ケース	重錘質量 (kg)	落下高さ (m)	衝突速度 (m/s)	捕捉成否	
				実験	解析
CASE1	550	10	14.00	○	○
CASE2	880	10	14.00	×	×

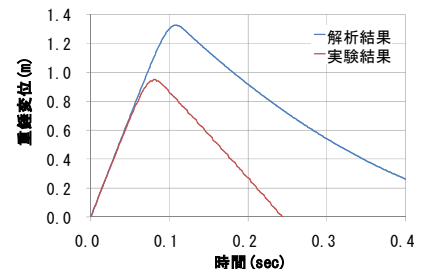


図-8 重錘応答変位(CASE1)

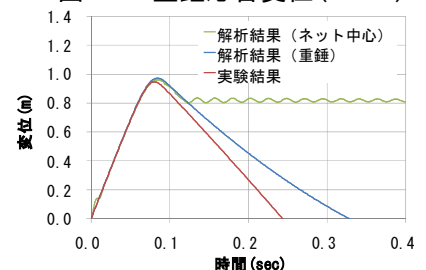


図-9 衝突点変位応答(CASE1)

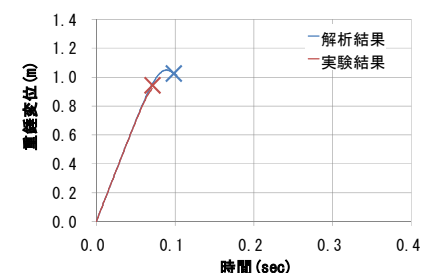


図-10 ネット中央の破断(CASE2)

外方向荷重試験と衝突箇所からの荷重伝達の把握を目的とした面内方向荷重試験の2種類を行い、荷重点変位、各リングの張力、反力等の計測を行った。解析では、直径350mmのワイヤリングを25mmの遊間で連結されていることを考慮し、図-4のように1リングを1粒子でモデル化した。図-5、図-6には面外荷重試験、面内荷重試験の静的荷重試験結果とそれに対応するシミュレーション結果をそれぞれ示している。実験結果より、荷重点変位と載荷荷重の関係は、初期状態でリング間に遊間が存在しているため僅かな荷重で荷重点変位300mm程度まで変位を生じ、それ以降は勾配が増加していく非線形な関係を示すことが分かる。解析においては、Kernel関数値を粒子間距離が小さい範囲でゼロに設定することで遊間の効果を表現可能であること、2つのパラメータを $\sigma=0.2$ 、 $\mu=1.95$ と設定することで非線形な変位-張力関係を概ね再現できることが確認できる。

4. 重錘落下シミュレーション

重錘落下実験では、図-7に示すように4辺支持した約3m×3mのワイヤリングネットに重錘を自由落下させたときの重錘変位、ネット中心変位、固定点でのリング反力の測定を行った。なお、材料定数、実験および解析ケースは表-1、表-2に示している。また、図-8に $\sigma=0.2$ 、 $\mu=1.95$ としたときの重錘変位応答を示すが、解析値が実験値に比べて最大変位がかなり大きいことが認められる。そこで、パラメータを調整し $\sigma=0.2$ 、 $\mu=1.85$ としたときの変位応答を図-9に示すが、衝突点変位応答は概ね再現できていることが分かる。再現可能なパラメータが静的試験と衝撃実験で異なる原因として、現実のリングには摩擦等の載荷速度の影響が存在するためであると考えられる。図-10には、破断までのネットの衝突点の変位応答を示している。この図より、同程度の変形量でネットの破断が生じているため、ネットの破断を予測することが可能であると考えられる。

5. 結言

本研究で提案したkernel関数を用いたSPH法により、落石防護ネット構造の衝撃応答を概ね再現することができた。また、材料の限界を設けることでワイヤリングネットの終局限界も概ね再現できた。今後は、リング間のエネルギー損失を考慮し、ワイヤリング防護柵全体系による耐衝撃性能評価を試みる必要がある。