

SPH を改良した落石防護柵の衝撃解析手法の検討

九州大学大学院

学生会員 ○末崎 将司

九州大学大学院

正会員 園田 佳巨

日本ゼネスパイプ株式会社

正会員 福永 一基

諸言

我が国では、国土の大部分を山地や丘陵地が占めることから、毎年のように落石等の斜面災害による被害が生じている。落石事故から道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ネット防護柵がある。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る。また、ワイヤロープや支柱などの軽量の鋼材要素により構成される構造物であるため、堅固な基礎を必要としないという利点もある。したがって、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。そこで、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ための基礎的段階として、SPH 法を用いたワイヤリングネット防護柵の衝撃応答解析を試みた。



図-1 ワイヤリングネット防護柵

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。具体的には、式(1)で表わされるように、ある点 x の物理量 $f(x)$ を Kernel 関数 W （重み関数）によって、周囲の粒子の値を用いた重み付き平均により求めている。

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

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。

また、物理量 $f(x)$ の 1 階の空間微分 $\nabla \cdot f(x)$ は部分積分を適用することで、式(2)のような Kernel 関数の空間微分に置き換えた計算を行う点に特徴がある。

$$\nabla \cdot f(x) \approx - \int_{\Omega} f(x') \cdot \nabla W(x-x', h) dx' \quad (2)$$

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。解析モデルでは、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特性を表現するため、式(3)に示すように、粒子間距離が大きいくほど重みが大きくなる Kernel 関数を考案した（図-2）。

$$\begin{aligned} W(R, h) &= \alpha_d \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(R-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \\ W'(R, h) &= \alpha_d \frac{-(R-\mu)}{\sigma^2} \times \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(R-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \\ R &= \frac{r}{h}, (0 \leq R < 2) \end{aligned} \quad (3)$$

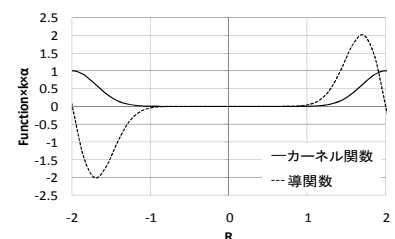


図-2 カーネル関数とその導関数

ここで、 $\sigma = 0.3$ は標準偏差、 $\mu = 2$ は平均（基準点）、 r は粒子間距離、 α_d は標準化するための係数である。

本 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。

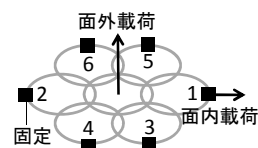


図-3 静的試験状況

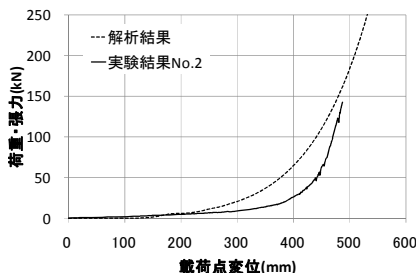


図-6 面内載荷結果

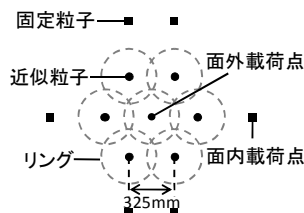


図-4 解析モデル

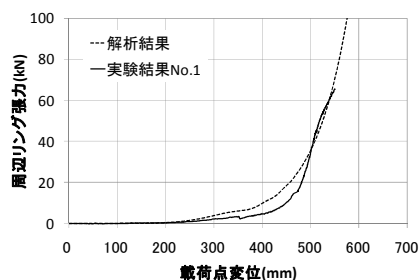


図-5 面外載荷結果

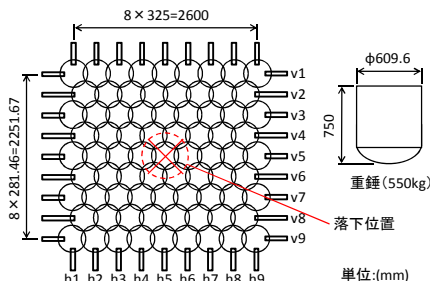


図-7 重錘落下実験

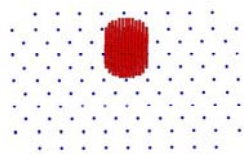


図-8 解析モデル

表-1 材料定数

	質量 (g)	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (N/mm ²)	粒子直径 (mm)
ワイヤリング	450.0	4.65	2.1×10^9	350.0
重錘(コンクリート)	281.25	2.25	2.1×10^4	50.0

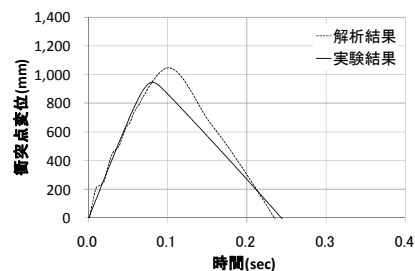


図-9 衝突点変位応答

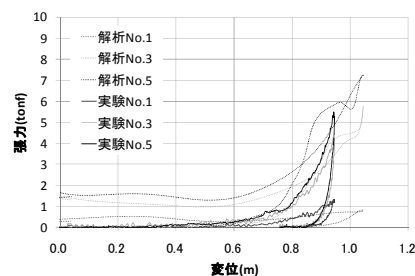


図-10 周辺張力と衝突点変位

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¹⁾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外方向載荷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載荷試験の2種類が行われ、荷重点変位、各リングの張力、反力等が計測されている。実際に用いられるネットは、直径350mmのワイヤリングが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には面外載荷試験、面内載荷試験の静的載荷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、荷重点変位とリング張力は、初期状態でリング間に遊間が存在しているため荷重点変位が200mm付近まではリングに張力が生じないが、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 $\sigma=0.23$ 、 $\mu=1.95$ 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。

重錘落下シミュレーション

重錘落下実験¹⁾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質量550kgの重錘を10mの高さから自由落下させたときの落下点変位、固定点でのリング張力を測定されている。

解析モデル、材料定数は図-8、表-1に示している。また、図-9、図-10に $\sigma=0.23$ 、 $\mu=1.85$ とした解析結果を示している。図-9より、衝突点変位応答は概ね再現できていることがわかる。また、図-10より、各リングに作用する最大張力や荷重点から遠い位置のリング張力(荷重分担)が小さくなる傾向などを概ね再現可能であることが認められる。今回の解析では、同じパラメータ値を用いた解析の精度は、静的試験と衝撃実験で異なる結果であったが、現実のリングには摩擦等に載荷速度の影響が存在するためであると考えられる。

結言

本研究で提案したカーネル関数を用いたSPH法により、落石防護ネット構造の衝撃応答を概ね再現可能であることが確認できた。今後、ワイヤリングネットの終局限界の評価を解析的に行うことを試みる予定である。

参考文献

- 1) 大森清武, 塩見昌紀, 吉田博: 落石防護柵用ネットの衝撃実験とその解析, 土木学会, 2002.7.