

(50) ワイヤリング防護柵の衝撃応答解析への SPH 法の適用に関する基礎的検討

Basic study on the adaptability of SPH method to impact response analysis of wire ring net system

畑芳宏\*, 園田佳巨\*\*, 福永一基\*\*\*  
Yoshihiro Hata, Yoshimi Sonoda, Kazuki Fukunaga

\*九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

\*\*工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

\*\*\*九州大学大学院博士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

Key Words: Wire ring net system, SPH method, impact analysis  
キーワード: ワイヤリング防護柵, SPH 法, 衝撃応答解析

1. 緒言

我が国では、国土の大半を山地や丘陵地が占めるとともに梅雨や台風時期に集中豪雨が多いことから、毎年のように落石等の斜面災害が各地で生じている。このような災害から人命や都市、流通経路の安全を確保するために様々な構造物が設置されている。しかし、従来の落石防護構造物は、ロックシェッドのような鉄筋コンクリート製の構造物が主体<sup>1)</sup>であり、多額の建設費を必要とするとともに、構造規模が大きく地形的制約を受けることなどが指摘されている。このような背景から、経済性に優れた落石防護構造物が求められており、最近では従来から用いられてきた簡易な落石防護柵をはるかに凌駕する吸収エネルギー有した高エネルギー吸収型落石防護柵が開発されてきた。高エネルギー吸収型落石防護柵には、特殊な緩衝装置を用いたものや支柱の塑性回転によるエネルギー吸収を見込んだ構造形式などがあるが、欧米では直径 30cm 程度のワイヤリングによって構成されたネットを用い、その大きな変形能により落石エネルギーを吸収する形式の防護柵が主流である。我が国においても数種類の防護柵が欧米より技術導入されるようになってきている。図-1 はその一例であるが、この防護柵はワイヤリング、ワイヤロープ、支柱などの鋼材要素により構成される軽微な構造物であるため建設に広い空間を必要としないという利点もある<sup>2)</sup>。本稿ではこの形式の落石防護柵を総称してワイヤリング防護柵と呼ぶことにする。

一方、その性能を解析的に評価できる手法は確立されておらず、実物大の衝撃実験で照査しているのが現状である。そこで、本研究では、代表的な粒子法である SPH 法をベースにワイヤリング防護柵の衝撃応答解析プログラムを開発し、その適用性について検討した。

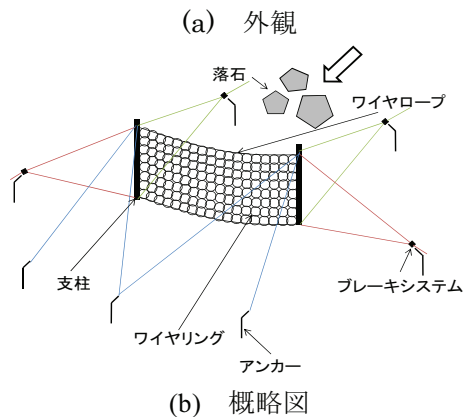


図-1 ワイヤリング防護柵

2. 解析手法

2.1 SPH 法の適用

一般的にワイヤリング防護柵のように要素間に遊間が存在し、両者に一定の相対張力変位が生じない限りは張力が働かないような大変位を伴う構造物に対して有限要素解析を適用することは難しい。そこで本解析では、解析モデルのデータ作成が容易であり、大変形問題に対しても適合性の高いメッシュレス法(SPH 法)を用いた衝

撃解析を行った。

SPH法は、図-2に示すように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。

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

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

本研究では、図-3に示すように個々のリングを1粒子で離散化し、ワイヤリング間距離が大きくなるほどお互いが引き合う力も大きくなる力学特性表現するために、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関数を採用している。

$$W(R,h) = k \times \alpha_d \times \exp\left(-\frac{(R-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$W'(R,h) = k \times \alpha_d \times \frac{-(R-\mu)}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(R-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

$$\alpha_d = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma^3 h^3} \text{(3次元)}$$

$$R = \frac{r}{h} \text{ (}|R| \leq \mu)$$

ここで、 $W$ はkernel関数、 $r$ は2粒子間の距離、 $\sigma=0.20$ は標準偏差、 $\mu=1.83$ 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-4に関数の形状を示している。このkernel関数は、パラメータ $\sigma$ 、 $\mu$ の値を変えることで関数形状を簡易に修正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。

## 2.2 構成則

ひずみ速度テンソルは、式(3)に示すように速度勾配により表現することができる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}_{ij}$ はひずみ速度テンソルである。

SPH法においては、粒子 $I$ および粒子 $J$ の速度を用いて、式(4)に示すように離散化が行われる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{J=1}^N \left( \frac{m^J}{\rho^J} v_i^{JII} \frac{\partial W}{\partial x_j^I} + \frac{m^J}{\rho^J} v_j^{JII} \frac{\partial W}{\partial x_i^I} \right) \quad (4)$$

ここで、 $v_i^{JII} = (v_i^J - v_i^I)$ である。

式(4)により求めたひずみ速度に時間刻み $\Delta t$ を乗じて各粒子のひずみテンソルを算出している。

本研究では、式(5)に示すVon Misesの降伏条件に基づく弾塑性構成式を用いた。

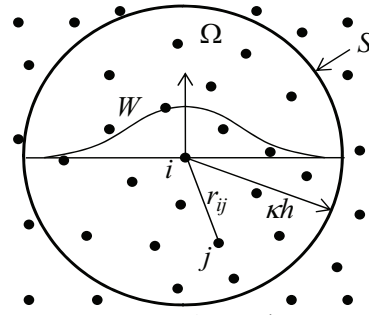


図-2 粒子近似

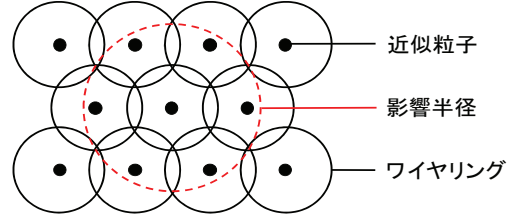


図-3 ワイヤリングの粒子近似

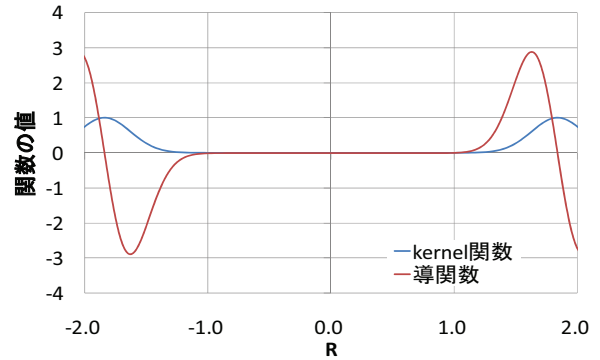


図-4 提案するkernel関数

$$d\sigma_{ij} = \left( D_{ijkl} - \gamma \frac{9G^2 \sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{\sigma_{eq}^2 (H' + 3G)} \right) d\varepsilon_{kl} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{ij}$ は応力テンソル、 $D_{ijkl}$ は弾性係数、 $G = E/2(1+\nu)$ はラーメ定数、 $E$ はヤング率、 $\nu$ はポアソン比、 $H'$ は硬化係数を示しており、ワイヤリングは鋼材であることから $H' = E/100$ としている。 $\sigma_{eq}$ はMisesの相当応力を示している。<sup>3)</sup>

ただし、現実のワイヤリング間の力のやりとりにおいては、せん断方向に力は伝達しないものと考えられるため、せん断力をゼロとして計算する。また、材料の塑性および破断に関してはMises相当応力 $\sigma_{eq}$ を用いて式(6)より判定している。なお、ワイヤリングの破断に関しては、粒子の重みをゼロにすることで表現している。

$$\begin{cases} f = \sigma_{eq} - \sigma_y < 0 \text{ (弾性)} \\ f = \sigma_{eq} - \sigma_y = 0 \text{ (塑性)} \\ f = \sigma_{eq} - \sigma_{cr} = 0 \text{ (破断)} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_y = 235(\text{N/mm}^2)$ は材料の降伏点、 $\sigma_{cr} = 380(\text{N/mm}^2)$ は引張強度を示す。(値はJIS規格の丸鋼SR235を参照)

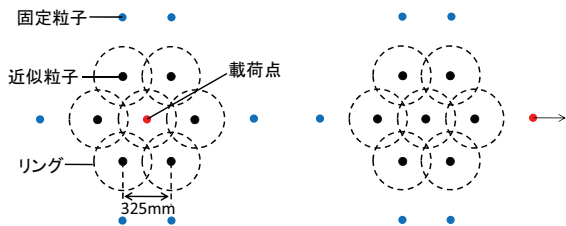


図-5 解析モデル

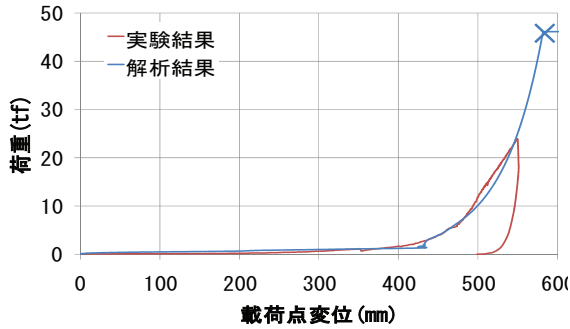


図-6 面外方向载荷試験結果

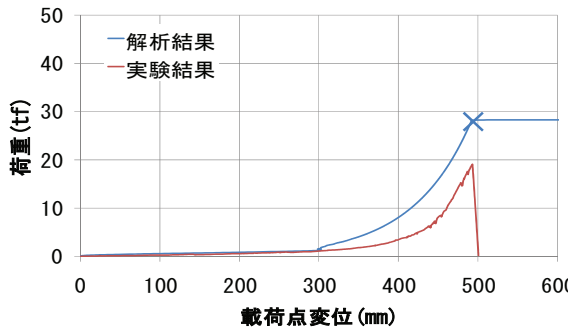


図-7 面内方向载荷試験結果

### 3. 静的引張試験シミュレーション

静的引張試験は日本ゼニスパイプ株式会社で行われたものを参考としている。ワイヤリングの静的引張試験では、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载荷試験と、衝突箇所からの荷重伝達の把握を目的とした面内方向载荷試験が行われた。そこで、ワイヤリングネットにおける kernel 関数のパラメータ  $\sigma$ 、 $\mu$  を決定するためにシミュレーションを試みた。解析では、直径 350mm のワイヤリングが 25mm の遊間を保持して連結されていることを考慮し、図-5 のように 1 リングを 1 粒子でモデル化した。図-6 と図-7 には面外方向载荷試験と面内方向载荷試験の実験結果および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、载荷した荷重と载荷点変位の関係は、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 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。解析結果においても、式(3)に示したように 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、Kernel 関数の 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荷重と載

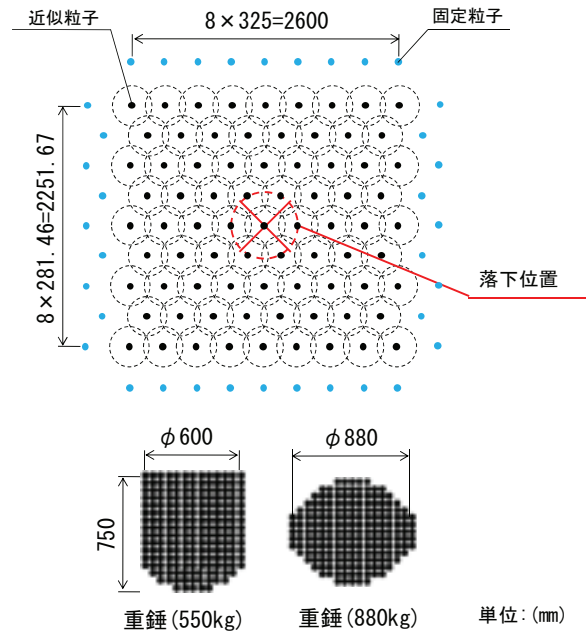


図-8 解析モデル

表-2 実験および解析ケース

	重錘質量 (kg)	落下高さ (m)	衝突速度 (m/s)	衝突エネルギー (kJ)
CASE1	550	1	4.43	5.39
CASE2		10	14.00	53.90
CASE3	880	5	9.90	43.12
CASE4		7	11.71	60.37
CASE5		10	14.00	86.24

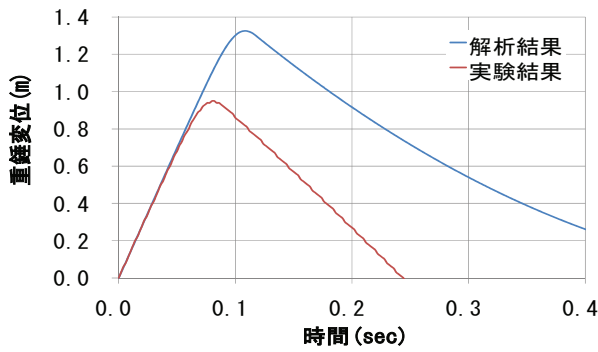
表-3 材料定数

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	粒子直径 (mm)
ワイヤリング	4.65	$2.1 \times 10^5$	350.0
重錘(550kg)	2.25	$2.1 \times 10^4$	50.0
重錘(880kg)	2.28	$2.1 \times 10^4$	40.0

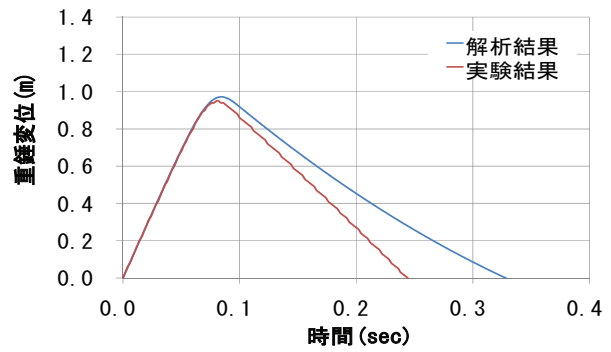
荷点変位の関係を概ね再現できることが確認できる。また、本実験では実験機具の都合により载荷荷重 20tf 付近で除荷している。一方、解析では载荷荷重を増し続けたため面外方向载荷試験では約 40tf、面内方向载荷試験では約 30tf でワイヤリングの破断が生じると予測される。

### 4. 重錘落下実験シミュレーション

重錘落下実験は日本ゼニスパイプ株式会社で行われたものを参考としている。<sup>4)</sup>重錘落下実験では、H 型钢で組んだ鋼製フレームに図-8 に示すように 2.5m×2.5m 程度のワイヤリングネットを、張力測定治具を介して取り付け 4 辺支持したものに重錘(質量 550kg, 880kg)を自由落下させる実験を行った。また、ワイヤリング粒子は遊間を考慮し 325mm 間隔に配置している。なお、実験及び解析ケースは表-2、材料定数は表-3 に示している。



(a)  $\sigma=0.2, \mu=1.95$



(b)  $\sigma=0.2, \mu=1.83$

図-9 重錘変位応答(CASE2)

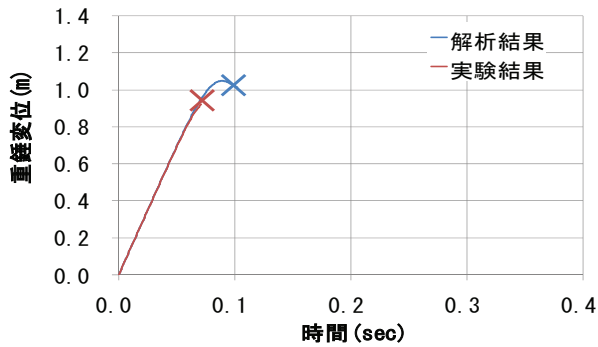


図-10 重錘変位応答(CASE5)

図-9(a)に kernel 関数のパラメータ  $\sigma=0.2, \mu=1.95$  としたときの CASE2 における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  $\sigma=0.2, \mu=1.83$  とした場合の重錘変位応答を図-9(b)に示すが、実験値を概ね再現できることが分かる。パラメータが静的試験の場合と異なる原因には、衝撃载荷時には各リングの遊間調整による荷重再配分を行う時間的余裕が無いことなどが影響していると考えられる。

また、図-10 に CASE5 における破断までの重錘変位応答を示している。この図より、解析結果は実験結果と同程度の変形量でワイヤリングネット中央に破断が生じていることから、数値計算によってワイヤリングの破断を予測することが可能であると考えられる。また、表-4 に重錘の補足の成否について示しているが、実験結果をすべて再現できていることが認められ、本解析手法によりワイヤリングネットの耐衝撃性能評価が可能であることが確認された。

## 5. 結論

本研究では、SPH 法を改良した衝撃応答解析手法を提案し、ワイヤリング防護柵の重錘落下試験をシミュレートすることで適用性について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

表-4 捕捉成否の比較

CASE		1	2	3	4	5
捕捉成否	実験	○	○	○	×	×
	解析	○	○	○	×	×

- 1) SPH 法を改良した手法の適用でワイヤリングネットの衝撃応答解析が可能であることが認められた。
- 2) 提案した kernel 関数のパラメータを調節することで、ネット構造物における任意の非線形な荷重-変位関係、リング間の遊間も表現することができることが分かった。
- 3) 材料特性として終局限界ひずみを設けることでワイヤリングネットの破断予測が可能であると考えられる。

今回は、ワイヤリングネットに着目して衝撃挙動の検討を行っているが、今後、ワイヤリング防護柵全体の衝撃挙動を検討するためには、支柱、ワイヤロープやブレーキシステムなどについて詳細なモデル化を行う必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，1983.7
- 2) MJ ネット研究会：超高エネルギー吸収型落石防護柵 MJ ネット 設計・施工・積算要領，2008
- 3) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，構造工学シリーズ 15，丸善，2004.
- 4) 大森清武，塩見昌紀，吉田博：落石防護用ネットの衝撃実験とその解析，第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，2002.7