

SPH-FEM ハイブリッドモデルによる重錘衝突実験の再現解析

(株)大林組 正会員 ○松本 優資 秋元 理仁 遠藤 学
 JIP テクノサイエンス(株) 正会員 佐藤 一樹 戸田 圭彦 田中 克弘
 日本原子力発電(株) 奥谷 哲也 小川 勤

1. はじめに

近年、地盤構造物の衝突・貫入・削剥などを表現可能な数値解析技術の重要性が日に日に高まってきている。そのような背景を受けて、著者らは Mohr-Coulomb 降伏条件を使用した衝突解析の方法について検討し、有限要素法による砂質土および砕石への衝突解析を実施した¹⁾。

著者らの実施した有限要素法解析の結果は衝撃力および貫入量に関しては実験結果の傾向を再現し得る妥当なものであったが、重錘先端の要素が潰れてしまうことやクレーター状の変形モードになるなど、変形が実現象に比べて不自然であることは否めない。通常の有限要素法では衝突現象の大変形にまでは要素の変形が追従できないものと考えられる。

そこで本稿ではこれらの問題点の解消を図り、著者らが既往の研究²⁾で検討を進めてきた粒子法 (SPH 法) を重錘衝突実験に適用し、その効果について検討した。

2. 解析モデル

有限要素法解析¹⁾と同じく山口ら³⁾の重錘衝突試験を対象とする。本実験は、5m 四方の厚さ 500mm の RC 版の上に、厚さ 500mm の緩衝材 (砂あるいは砕石) を敷き詰めた上に、金属製の重錘を高さ 5m から落下させ、その衝撃力および重錘の貫入量を計測している。解析モデル (1/4 対称モデル) を図-1 に示す。大変形が予想される緩衝材領域を SPH 粒子によってモデル化し、RC 版は FEM によってモデル化した。緩衝材には Mohr-Coulomb 弾塑性を適用しその他は弾性体とする。解析条件は事前に検討を行った有限要素解析モデルと同じである。解析条件を表-1 に示す。解析に使用したプログラムは LS-DYNA9.0 である。

3. SPH モデルの解析結果

解析は重錘の衝突直前から 100msec 実施した。図-2 に衝撃力および重錘貫入量の時刻歴応答を示す。衝撃力および重錘貫入量ともに実験の傾向を良好に捉えることができている。図-3 に 100msec 時点における砂質土モデルの変形図を示す。FEM モデルは重錘先端の要素が潰れてしまい不

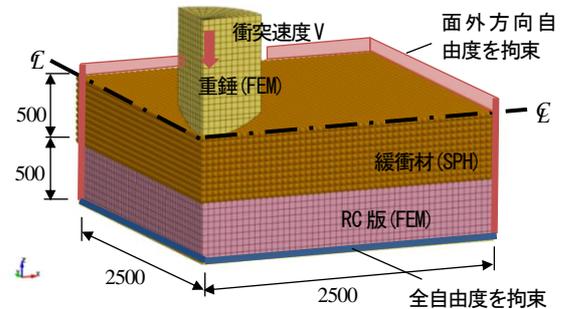


図-1 SPH 解析モデル (単位 mm)

表-1 解析条件の一覧

		砂質土SPHモデル	砕石SPHモデル
緩衝材	緩衝材	砂質土	砕石
	ϕ (degree)	35.0	45.0
	弾性係数 (MN/m ²)	31.5	87.5
	ポアソン比	0.3	0.3
	ψ (degree)	10	10
	c (kN/m ²)	0.0	0.0
密度 (t/m ³)	1.6	2.2	
RC版	弾性係数 (MN/m ²)	20000	
	ポアソン比	0.167	
	密度 (t/m ³)	1.96	
鋼材	弾性係数 (MN/m ²)	206000	
	ポアソン比	0.3	
	密度 (t/m ³)	7.85	
重錘-緩衝材間		ペナルティ法による接触定義, 摩擦係数0	
緩衝材-RC版間		SPH粒子とFEM節点を剛結	
重錘の初速度 (m/sec)		鉛直下方に9.90285 (5mの高さから落下相当)	
重錘の質量 (t)		5.0 (ただし1/4モデルのため1.25t)	

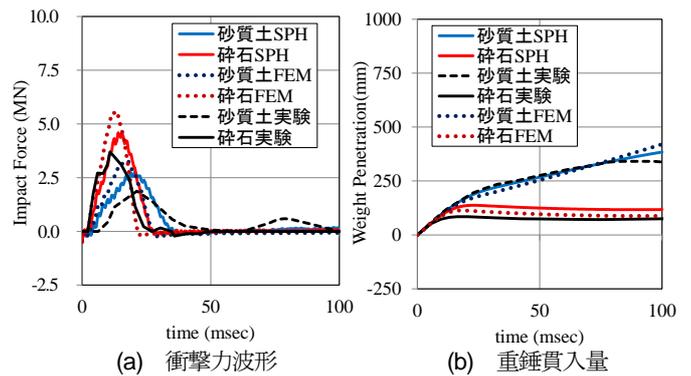


図-2 SPH モデルの結果と実験結果との比較

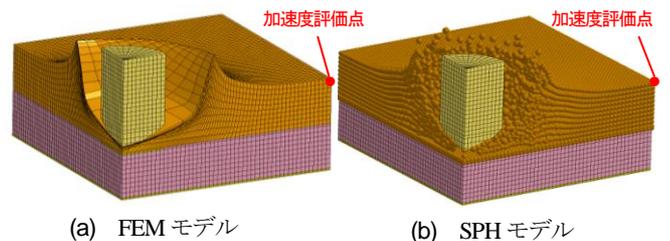


図-3 100msec 時点における砂質土モデルの変形図 (倍率 1.0)

キーワード SPH 法, 衝突解析, 弾塑性, Mohr-Coulomb

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 インターシティ B 棟 (株)大林組 原子力本部 TEL 03-5769-2736

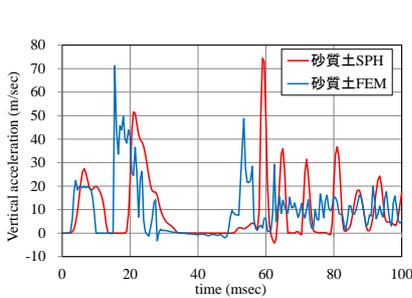


図-4 SPHモデルとSPHモデルの加速度波形

然な変形が生じているのに対して、SPHモデルは重錘の貫入を表現できており、砂質土部分が鉛直上方向に飛散している。以上より、SPHモデルはFEMモデルと同様に衝撃力および重錘貫入量を評価可能であり、かつ変形モードも表現できることが示された。

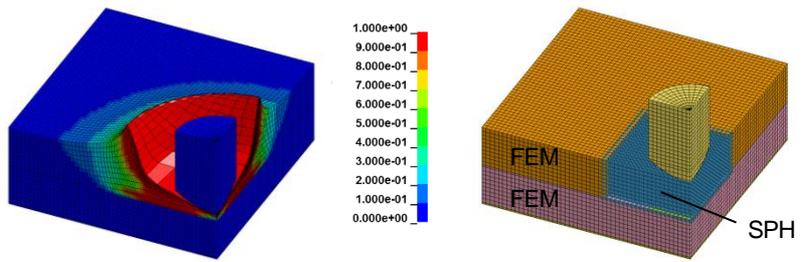
しかし、SPHモデルには次のような欠点が見られた。図-3中の加速度評価点における鉛直方向加速度波形を図-4に示す。SPHモデルの加速度応答は高次領域を含んでおらず、ピーク位置の位相も遅れている。これは、SPH法では運動方程式を解く際に周辺粒子の重み付き平均をとっているために、FEMに比べて変位の解像度が低下することが原因と考えられる。

4. 部分的にSPHを適用したFEMモデル

地中を伝播する振動を適切に評価するためには、振動に関しても高い解像度を担保できる解析手法が望ましい。そこで大変形領域にはSPH法を適用し、その周辺はFEMを適用した混合モデルによる解析を試みた(以後SPH+FEMモデルと称する)。本研究における大変形領域は、最大せん断ひずみが1.0を超過する領域と定義し、図-5のように領域を設定した。

図-6にSPH+FEMモデルの衝撃力波形および重錘貫入量を示す。衝撃力はSPHモデルと同等の結果が得られている。一方、重錘貫入量については実験の傾向を概ね再現できたものの、やや最終変位がSPHモデルに比べて大きく得られた。ただし貫入量が大きく得られることについては、本手法は安全側の結果が得られると言える。また、図-7に100msec時点における変形図を示す。SPHモデル同様に、重錘の貫入を表現することができている。SPH+FEMモデルの加速度波形を図-8に示す。FEMモデルの結果とほぼ同様の傾向を示しており、高周波成分を含む波形が得られた。

以上の検討より、SPH法とFEMの両方を使い分けることで、両者の得失を考慮した合理的な解析が可能であると考えられる。



(a) 最大せん断ひずみコンター (倍率 1.0, 100msec 時点) (b) ひずみの大きい領域にSPHを適用

図-5 ひずみの過大となる領域にSPHを適用したモデル

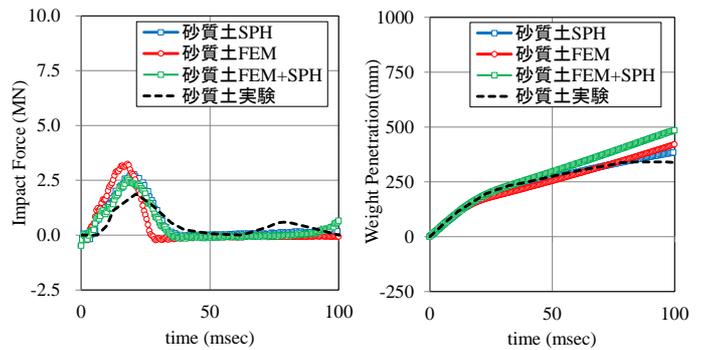


図-6 SPH+FEMモデルの結果およびFEMモデルとSPHモデルとの比較

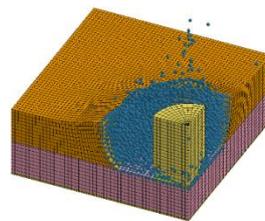
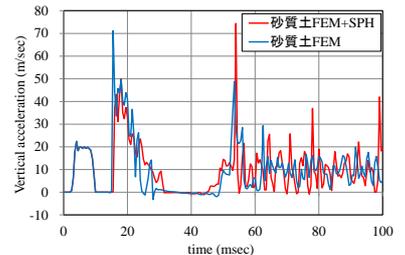


図-7 SPH+FEMモデルの変形図 図-8 FEM+SPHモデルの加速度波形 (倍率 1.0, 100msec 時点)



5. まとめ

本研究では重錘衝突実験を対象に、SPH法による衝突解析を実施した。またSPH法とFEMの混合モデルの適用性について検討し、SPHモデルの欠点を改善することができた。ただし、現時点ではSPH法を適用する領域の大きさを決定するためにFEM解析を行う必要があり、モデル作成には少々手間を必要とする。また、垂直以外の貫入方向やさらに高速域の衝突に対する適用性は未検討である。したがって今後はこれらの課題について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 秋元ら：Mohr-Coulomb弾塑性構成則を用いた重錘衝突実験の有限要素解析，土木学会第71回年次学術講演会(投稿中)，2018。
- 2) 秋元ら：粒子法(SPH法)による土塊衝突荷重評価に関する研究，土木学会第72回年次学術講演会，III-282，2017。
- 3) 山口ら：敷砂あるいは砕石緩衝材の緩衝特性に関する大型重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol. 60A，pp. 983-995，2014。