

粒子法 (SPH 法) による衝突荷重評価のための粒子間隔の検討

(株)大林組

正会員

○遠藤 学 秋元 理仁

JIP テクノサイエンス(株)

正会員

佐藤 一樹 戸田 圭彦

日本原子力発電(株)

井垣 亮 奥谷 哲也 小川 勤

1. はじめに

粒子法の一つである SPH 法は, 大変形を伴う地盤工学の諸問題において有力な解析手法になりつつある. 著者ら¹⁾は, 固体 SPH 法へと改良したオープンソースソフトウェア LIGGGHTS²⁾を用いて, SPH 法による断層変位問題への適用性について検討してきた.

さらに, 著者らは SPH 法の適用範囲拡大を目指し, 土塊衝突問題への適用性を検討している³⁾. 衝突問題を取り扱うにあたっては, 衝撃力を精度よく評価できるモデル化が求められる. しかし, 衝突など物体同士の接触を扱う場合における SPH 法のモデル化には不明な点も多い. そこで, 本稿では粒子間隔(解析スタート時の粒子配置間隔)に着目し, 弾性棒の剛体壁への衝突問題を対象に, 粒子間隔が衝撃力の精度に及ぼす影響を検討した.

2. 解析モデル

解析対象は, 高さ 0.05m, 長さ 0.5m の平面応力弾性体が初速 10m/sec で剛体壁に衝突する問題である. 棒の厚みは単位厚である.

解析に用いたプログラムは, 著者らが開発¹⁾した LIGGGHTS の固体 SPH 法改良版である. 図-1 に解析モデルを示す. 剛体壁は移動自由度を持たない SPH 粒子(剛体粒子)によって表現した. 表-1 に解析ケースを示す. 粒子間隔および弾性係数をパラメータとしたパラメトリックスタディを実施した. 粒子間隔ごとのモデル先端拡大図を図-2 に示す.

本解析は動的解析であり, 時間積分は陽解法の一つ verlet 法を使用している. 影響半径は粒子置間隔の 2.0 倍とした. 材料減衰は考慮していない. また応力ひずみ関係では, 客観性のある応力速度としてコーシー応力の Jaumann 速度を用いた.

SPH 法で接触を取り扱うためには, ペナルティ法のような接触アルゴリズムを導入する方法もあるが, 本研究で用いた LIGGGHTS は SPH 法の平滑化関数によって接触を取り扱っている.

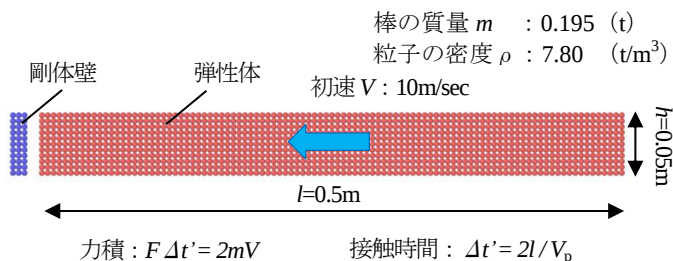


図-1 解析モデル

表-1 解析ケース

	弾性係数 $E(\times 10^3 \text{ kN/m}^2)$	弾性波速度 $V_p(\text{m/sec})$	ポアソン比 $\nu (-)$	粒子間隔 $l_0(\times 10^{-3} \text{ m})$
case1	200000	5340	0.2	5.0
case2	200000	5340	0.2	2.5
case3	200000	5340	0.2	1.0
case4	200000	5340	0.2	0.5
case5	2000	534	0.2	5.0
case6	2000	534	0.2	2.5
case7	2000	534	0.2	1.0
case8	2000	534	0.2	0.5

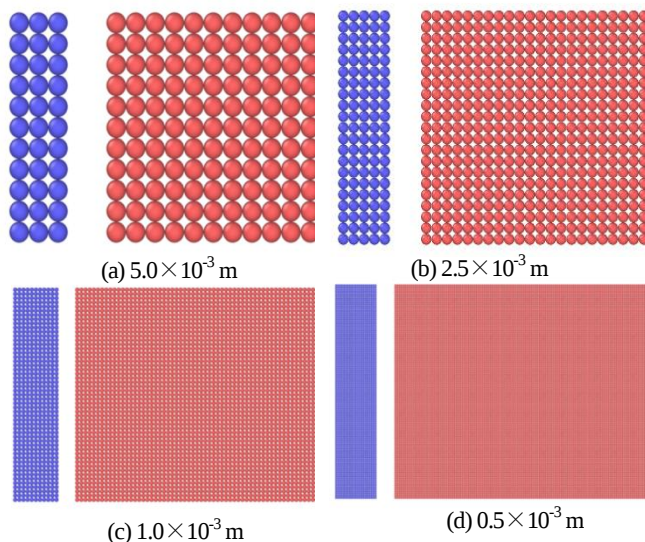


図-2 モデル先端の拡大図

3. 解析結果

図-3, 図-4 に全ケースの衝撃力の応答および接触面の速度を示す. 解析精度の検証のために, 本解析モデルを一次元衝突問題と見なして誘導した理論解を併記した.

衝撃力波形は粒子間隔が小さくなるほど理論解に近づく傾向にあることが分かる. case1 および case5 による,

キーワード SPH 法, オープンソースソフトウェア, 衝撃力

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

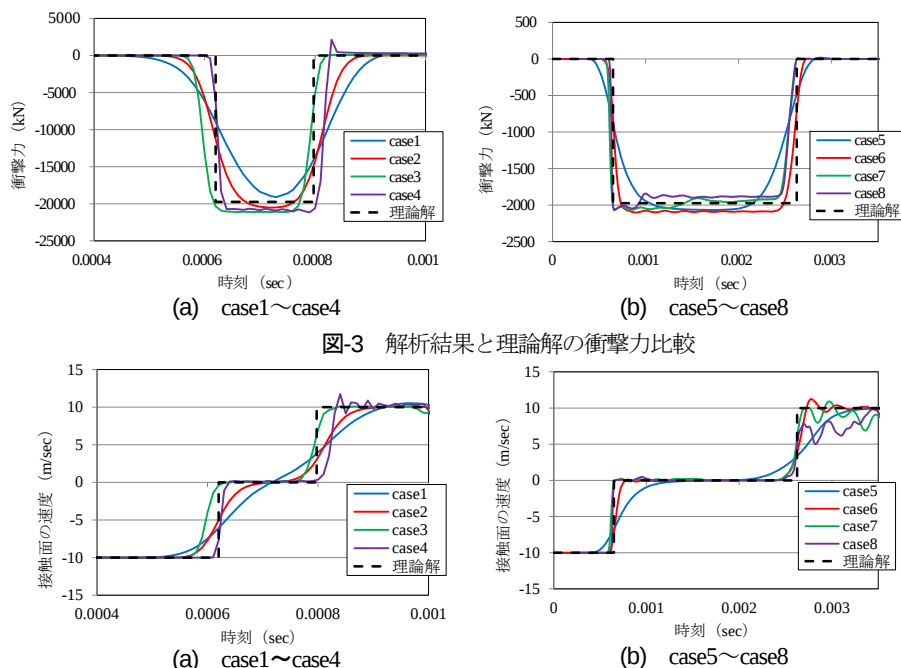


図-3 解析結果と理論解の衝撃力比較

図-4 解析結果と理論解の速度比較

粒子間隔の粗いモデルでは、衝撃力波形を十分に表現できていない。一方、速度に着目すると、粒子間隔の粗いモデルでは速度が滑らかに変化しており接触時間（接触の開始から終了まで）を表現できていない。ただし、接触が終了して完全に離れたあとは 10m/sec の速度で移動しており、粒子間隔が粗くても力積は保たれている。

4. 粒子間隔に関する考察

SPH 法は明確な物体表面を持たず、各粒子の平滑化関数の影響半径内に侵入した粒子同士が影響を及ぼしあうことによって接触を表現している（図-4）。この影響半径の外縁が、見かけの表面と考えることもできる。しかし、SPH 法の平滑化関数の重みは外へ行くほど小さくなるため、物体同士の跳ね返りが発生するためには、ある程度重みが大きくなるまで粒子同士の距離が近づかなければならない。この重みが大きくなるまで近づく間も粒子同士の力の交換は行われているため、衝撃波形が滑らかになってしまう。また、影響半径の大きさは粒子間隔に比例して決定しており、粒子間隔の粗いモデルではこの影響が顕著に表れる。

そこで、理論解に対する接触時間の相対誤差を次式で仮定することを試みた。

$$error = \frac{\Delta t' - \Delta t}{\Delta t} = \frac{l_0}{V \Delta t} \quad (1)$$

ここに、 $error$ ：相対誤差、 l_0 ：(初期) 粒子間隔、 V ：衝突速度、 Δt ：理論上の接触時間、 $\Delta t'$ ：SPH 法の接触

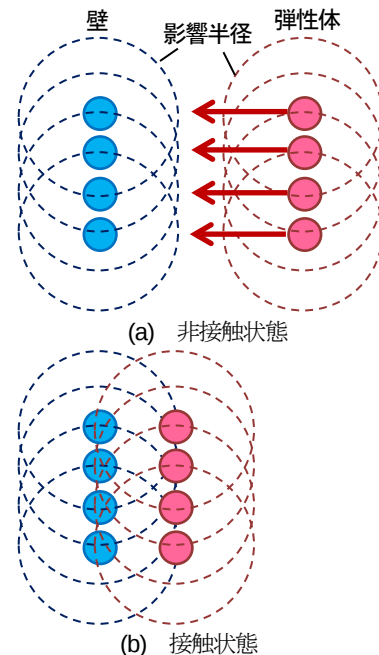


図-5 本研究での接触の取り扱い

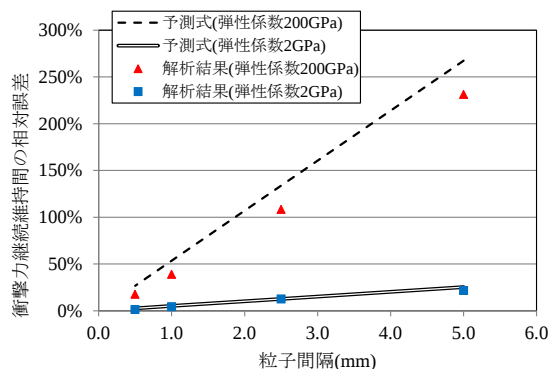


図-6 粒子間隔と相対誤差の関係

時間である。式(1)は影響半径の中を跳ね返りが生じるまで速度 V で進行すると仮定して求めたものである。

図-5 に、式(1)と解析結果の比較を示す。本予測式によって示される粒子間隔と相対誤差の関係は、解析結果を精度よく表現できている。

5. まとめ

本検討により、粒子間隔と衝撃力の精度の関係を明らかにすることができた。ただし、本成果は、限られた条件のもとで求められたものであり、より一般的な現象に適用するためには、十分な検討が必要である。

参考文献

- 1) 秋元理仁他：オープンソース粒子法コードの改良およびSPH法による断層変位解析に関する検討，土木学会第71回年次学術講演会 VII-060, 2016.
- 2) CFDEM@project：http://www.cfDEM.com/
- 3) 秋元理仁他：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（投稿中），2017.