粒子法(SPH法)による土塊衝突荷重評価に関する研究

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

1. はじめに

粒子法の一種である 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.

SPH法はこれまで有限要素法では難しいとされてきた 大変形を伴う現象を数値解析的に追跡できる可能性を有 しているが,適用事例が少ないことが課題のひとつであ る.本稿では,さらなる SPH 法の適用範囲拡大を目指し, 崩壊した斜面の衝突実験の再現解析を試み,その適用性 を示した.

2. 解析モデル

解析対象は、中島ら^{3),4}の実施した斜面模型の加振実 験とした.図-1に実験供試体の形状を示す.実験は遠心 実験装置内で行われており、供試体の寸法は実寸大スケ ールに換算した値である.

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-2 に SPH 粒 子モデルを示す.表層および弱層は Drucker-Prager 弾塑 性体とし,表-1の材料定数を適用した.弱層の残留強度 は,文献 5)に記載の特性値を参考として粘着力がピーク 強度の半分となるよう仮定した.基盤層は剛体とし,必 要な範囲のみモデル化した.粒子間隔は事前に行った衝 撃力の解析精度と粒子間隔の関係^のを考慮し,0.5m とし た.影響半径は粒子間隔の 2.0 倍とし,平滑化関数には 三次スプライン関数を採用した.

載荷の方法は、モデル全体に自重を作用させつつ、基 盤層に対し、図-3 に示す加振波形を強制変位により 10 秒間入力した.その後加振をやめて、さらに 10 秒間解析 した.本解析は動的解析であり、時間積分は陽解法の一 種 verlet 法を使用している.時間刻みは 1.0×10⁵sec とし た.



図-1 実験供試体形状

残留 内部摩擦角(deg) 0.0 36.9 400 ク強度降伏曲面 表層 300 200 菮(gal) 100 引き戻し先 0 加速度 弱層 -100 $\geq I_1$ -200 残留強度降伏曲面 -300 -400 基盤層 (剛体) 0 2 4 6 8 10 時刻(sec) 図-2 解析モデル 図-3 加振波形 図-4 弱層降伏時の取り扱い

表-1 解析に用いた材料定数

粘着力(kPa)

粘着力(kPa)

内部摩擦角(deg)

ピーク

弱層

71.8

36.9

35.9

表層

914.5

0.0

914.5

キーワード	SPH 法,オ	ープンソースソフトウェ	ア, Drucker-P	rager, 斜由	『崩壊,衝突	
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	TEL03-5769-2736



3. 構成則

弱層および表層に適用した Drucker-Prager 弾塑性構成 則は, 野々山⁷⁾, 小野⁸⁾を参考とした. 降伏条件式は次 式で表される.

$$f = \sqrt{J_2 + \alpha I_1 - Y} = 0 \tag{1}$$

ここに、 J_2 は偏差応力テンソルの第二不変量、 I_1 は 応力テンソルの第一不変量、 α およびYは材料定数であ る.また構成則に用いる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.

弱層は、最初の降伏まではピーク強度を用い、その後 は残留強度を用いている.最初の降伏が生じた際は、図 -4に示すように、ピーク強度降伏曲面上の点から静水圧 軸に向かって垂直な直線を引き、その直線と残留強度降 伏曲面との交点へ応力を引き戻している.

4. 解析結果

図-5 に各時刻の変形図を示す. 粒子の色は, 各粒子の せん断ひずみの大きさを表している. 弱層の位置にひず みの大きな赤い線が現れており,実験のすべり線の発生 位置と一致する.表層と弱層が一体となって壁に衝突し, 解析は終了した. 解析結果の最終ステップにおける変形 状態は, 図-6 に示す実験写真⁴とほぼ一致した.

図-7 に着目点の移動量,水平方向土圧,鉛直方向土圧 を示す.実験結果の線は文献3)および文献4)のグラフを 紙面上から読み取ったものである.また,すべり線の崩 壊が開始した時点(土塊移動量の増分が明らかに増えた 時点とした)を0秒として作図した.移動量,土圧,共 に解析結果は実験結果の傾向を捉えることができた.

5. まとめ

本研究では,SPH 法による土塊衝突実験の再現解析を 試みた.著者らの構築した解析モデルは実験結果の傾向 を再現することができており、構造物への衝撃荷重評価 手法として,SPH 法が有力な選択肢であることを確認で きた.

参考文献

 1)秋元ら: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)
中島ら:動的遠心模型実験による斜面のすべり土塊衝突荷重評価, 土木学会第71回年次学術講演会,VII-066,2016. 4)中島ら:土
塊の衝突荷重評価を目的とした斜面の動的遠心模型実験,第51回
地盤工学研究発表会,2016. 5)原子力安全基盤機構:基礎地盤及び斜面の安定性に係る設計・リスク評価手引き,2014. 6)佐藤ら
: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, 土木学会第72回年次学術講演会(投稿中),2017. 7)野々山ら:
SPH 法による実大規模斜面掘削実験の二次元再現解析,地盤工学 ジャーナル,Vol. 7, No. 4, pp. 543-555,2012. 8)小野: SPH 法 による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析,土木学会第32回地震工 学研究発表会講演論文集,2012.