斜面模型の振動台実験を対象とした SPH 法による再現解析

	鳥取大学大学院	正会員	○小野	祐輔
(独)	原子力安全基盤機構	正会員	中村	英孝
(独)	原子力安全基盤機構	正会員	森	和成

(独)原子力安全基盤機構 正会員 村田 雅明

日本大学 正会員 中村 晋

1. 目的

斜面の耐震性能は他の構造物への影響を含めて議論されなければならない. そのため, 地震によって斜面に 生じる変形を崩壊も含めて予測する手法が望まれる.現状, 地震時の斜面の変形量の予測は, 有限要素法によ る動的解析結果を利用した Newmark 法が用いられることが多いが, 崩壊に至るような大変形や崩壊後の予測 への適用性には疑問が残る.本研究では, 地震による斜面崩壊が生じた場合において, その変形量の定量的評 価を目的として, Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法の適用を試みた.

2. SPH 法の概要

SPH 法では,解析対象の連続体を粒子と呼ばれる単位に分割する.応力,ひずみ,速度等の物理量は各粒毎 に計算する.本研究では,一般的な有限要素法の解析と同様に斜面を構成する地盤材料を弾塑性体として取り 扱う.弾塑性体の運動方程式は,SPH 法による離散化によって,粒子に対して次のように与えられる.

$$a_{\alpha}^{i} = -\sum_{j=1}^{N} m^{j} \left(\frac{\sigma_{\alpha\beta}^{i}}{\left(\rho^{i}\right)^{2}} + \frac{\sigma_{\alpha\beta}^{j}}{\left(\rho^{j}\right)^{2}} + \Pi^{ij} \delta_{\alpha\beta} \right) \frac{\partial W^{ij}}{\partial x_{\beta}} + b_{\alpha}$$
(1)

ここで上付きの添字は粒子を表すインデックス、 $\delta_{\alpha\beta}$ はクロネッカーのデルタである.また、 W^{ij} は平滑化カーネル関数であり、本研究では三次元スプライン関数に基づくものを用いる¹⁾. Π^{ij} は Monaghan が提案した人工粘性項であり、SPH 法特有の解の振動と引張状態での不安定性を抑制するものである. b_{α} は物体力であり、本研究では重力加速度と入力地震動に対応する.時間ステップ毎の各粒子の応力速度を次式により求める.

$$\dot{\sigma}_{\alpha\beta} = D^{ep}_{\alpha\beta\gamma\eta} \dot{\varepsilon}_{\gamma\eta} \tag{2}$$

ここで、 $D^{ep}_{\alpha\beta\gamma\sigma}$ は弾塑性マトリクスであり、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$ は SPH 法により、次式によって求める.

$$\dot{\varepsilon}^{i}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{j=1}^{N} \frac{m^{j}}{\rho^{j}} \left(v^{i}_{\alpha} - v^{j}_{\alpha} \right) \frac{\partial W^{ij}}{\partial x_{\beta}} + \sum_{j=1}^{N} \frac{m^{j}}{\rho^{j}} \left(v^{i}_{\beta} - v^{j}_{\beta} \right) \frac{\partial W^{ij}}{\partial x_{\alpha}} \right\}$$
(3)

3. 実験の再現解析

本研究では、振動台実験²⁾の再現解析を行った.本稿では、表1に示す二つのケースについて解析結果を示 す.いずれのケースも、図1に示すように斜面中に弱層を設けることで滑り線が現れる位置を制御している. 実験では、Case 5 は表層が一気に滑り落ちる滑落型崩壊、Case 8 は加振中に徐々に表層が滑ってい行く進行的 変形が生じた.また、Case 8 では加振終了時には表層は崩落していなかった.

これらの実験ケースを対象として, SPH 法による数値解析を実施した結果を図1および図2に示す. 解析モ デルは、図1,2それぞれの左側に示すように、実験供試体と同様に三種類の材料から構成されている. 図の 中央は、加振前の重力の作用による初期応力状態を求めた結果である. Case 5 では、弱層の上部に引張破壊、 中央部にせん断破壊領域が見られる. Case 8 では弱層全体がせん断破壊状態になっている.

キーワード:斜面, 耐震, Smoothed Particle Hydrodynamics, 粒子法, 数値解析

連絡先: 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101 鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 0857-31-5286

-633-

	表1	解析ケ	ースの-	-覧
--	----	-----	------	----

ケース	入力加速度	解析条件	
Case 5	水平 : 正弦波 400 gal	粒子間隔:0.025 m,粒子個数:1575 個	
	鉛直:なし	積分時間間隔:1.0×10 ⁻⁵ s,引張破壞応力:στ=-0.1 N/m ²	
Case 8	水平:正弦波 600 gal	粒子間隔: 0.025 m, 粒子個数: 1428 個	
	鉛直:なし	積分時間間隔:1.0×10 ⁻⁵ s,引張破壞応力:στ=-0.1 N/m ²	



図1 Case 5 (左:斜面の材料モデル,中:初期状態,,右:加振終了後の状態)



図3 滑り土塊の滑り量の実験結果との比較(左: Case 5,右: Case 8)

図 1, 2の右側に間振終了後の状態を示す. これらに見られるように, SPH 法による解析は実験の崩壊状態 を再現している. また図 3 には滑り土塊の滑り量の時刻歴を実験結果と比較して示す. Case 5, Case 8 のいず れも表層の滑り量は再現できているが, 滑りの始まる時期は異なっている. さらに Case 5 では滑り速度が再 現されてるのに対し, Case 8 では異なっている.

参考文献

Liu, G.R. and Liu, M.B.: Smoothed Particle Hydrodynamics, *World Scientific Publishing*, ISBN981-238-456-1, 2003.
村田雅明他: 岩盤斜面模型の地震時ひずみの発達過程に関する検討, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.