

個別要素法を用いた掘削解析による粘着力の設定と落石防護土堤の衝撃解析

名古屋工業大学 学○内藤直人 正 前田健一 学 田中敬大
構研エンジニアリング 正 牛渡裕二 正 川瀬良司

1. はじめに

我が国で多発する落石の対策では、落石防護土堤や崖錘堆積物、ポケット（斜面と対策工の空き空間）幅、などで、今まで設計に考慮されることが少なかった土塊を防災施設の一部に見込むために、土を用いた緩衝工の緩衝効果を適切に評価すること求められている。

著者らは、土を用いた緩衝材に関する模型実験と二次元個別要素法（Discrete Element Method、以下 DEM と略す）を用いた数値解析¹⁾を実施してきた。本研究では、落石防護土堤の適切な性能評価に向けて、土の粘着力を掘削解析により設定した上で、落石防護土堤の二次元 DEM 解析を実施した。

2. 土の粘着力設定に向けた二次元 DEM 掘削解析

本解析では、二次元 DEM で曲げ剛性を有するボンド要素を用いて土の粘着力を表現することを試みた。粘着力は、掘削解析で求めた限界自立高さから Culmann の斜面安定解析を参考にした極限つり合い法によって算出している。

2.1 解析概要

図 1(a)に掘削解析の概要を示す。幅 8.00m、深さ 3.00m または 6.00m の水平地盤を作製し、地盤の片側を 0.25m ずつ掘削することで任意のボンド強度 S_b における限界自立高さ H_c を求めている。粒子は非円形粒子を用いており、表 1 にパラメータを示している。図 1(b)(c)には、ボンド強度 $S_b=0.4\text{MPa}$ 、 $S_b=2.2\text{MPa}$ の掘削解析例を示している。

図 2 に示すような法先を通る平面破壊を仮定した式を用いて、限界掘削高さから粘着力を算定している。なお、崩壊角 α は主働崩壊角 $\phi/2+45^\circ$ とし、内部摩擦角は二軸圧縮試験²⁾から求めた $\phi=37.5^\circ$ としている。

2.2 解析結果及び考察

図 3 には、DEM 解析におけるボンド強度と掘削解析で得た限界自立高、そこから算出した粘着力の関係を示している。ボンド強度と粘着力との間には線形関係が成り立つことが分かった。また、図 1(c)の斜面末崩壊部分には、トップリング崩壊直前のような亀裂も表現できていることが分かる。

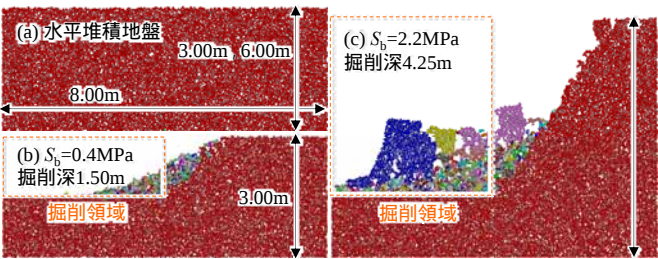


図 1 掘削解析の概要

表 1 解析パラメーター一覧

パラメータ	記号（単位）	基本設定値
粒子直径	D (m)	
	最大粒径 $D_{\max}$	0.100
	最小粒径 $D_{\min}$	0.050
	平均粒径 D_{50}	0.075
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2650
法線方向ばね定数	k_n (N/m)	2.0×10^7
接線方向ばね定数	k_s (N/m)	5.0×10^6
粒子間摩擦角	ϕ_μ (deg.)	25
減衰定数	h	1.0
ボンド直径	D_b (m)	0.05
ボンドばね定数	k_b (N/m)	ばね定数 $\times 10$
ボンド強度	s_b (Pa)	$0.1\text{--}2.2 \times 10^6$

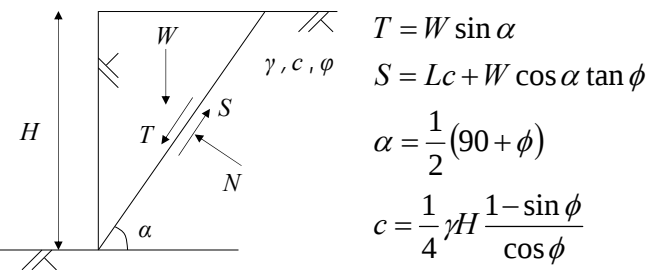


図 2 極限つり合い法の概要

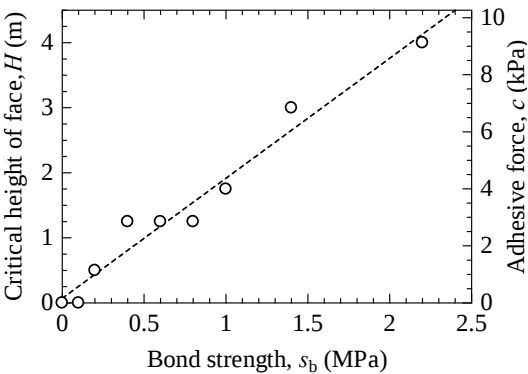


図 3 限界自立高さ及び粘着力とボンド強度の関係

キーワード 落石、落石防護土堤、個別要素法、粘着力

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 16 号館 227 号室 TEL052-735-5497

3. 落石防護土堤の二次元 DEM 衝撃解析

本解析では、前章で得られた粘着力 9.1kPa を想定したボンド強度 $S_b=2.2\text{MPa}$ を用いて落石防護土堤をモデル化し、土堤の衝撃変形挙動及び落石運動挙動を調べた。

3.1 解析概要

落石防護土堤は図 4 に示すようにポケットも併せてモデル化している。落体モデルは $1.2\times 1.6\text{m}$ の長方形とし、入射速度 19.6m/s 、入射角度 52° 、入射角速度 14.7rad/s でポケットに進入し落石防護土堤に衝突する解析を実施した。なお、土堤に用いた解析パラメータは表 1 と同様である。

3.2 解析結果及び考察

図 5 には、落体衝突時のポケット及び土堤の変形挙動を示している。図ではボンド強度の破断状況も観察するため、ボンド結合でつながっている破片毎に色付けして示している。落体はポケット及び土堤にそれぞれ 1 回ずつ衝突して、落体を補足する結果となった。

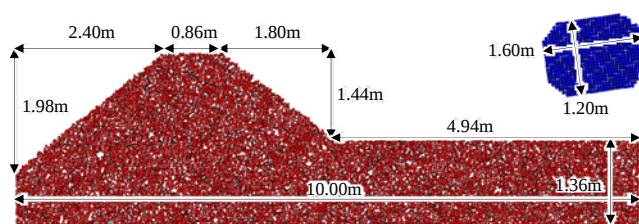


図 4 落石防護土堤モデル

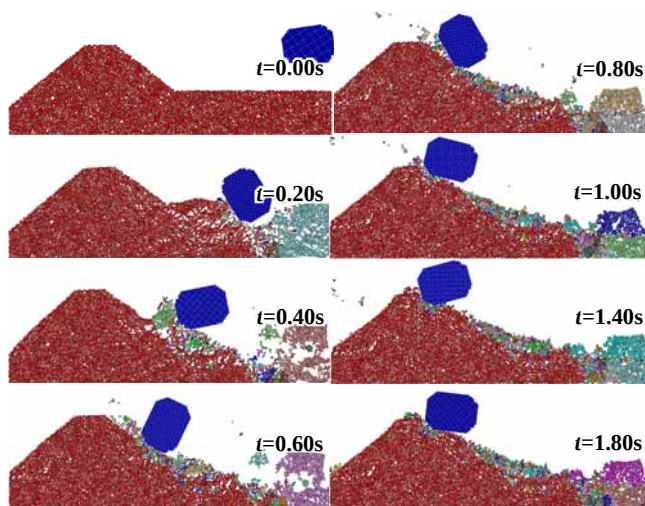


図 5 ポケット及び落石防護土堤の衝撃変形挙動

図 6 にそのときの落体速度の経時変化を示す。まず、 $t=0.04\text{--}0.13\text{s}$ のポケットへの衝突で速度の 6 割程度を吸収し、その後、 $t=0.50\text{s}$ 以降の土堤への衝突で残りの速度を吸収していることが分かる。土堤の落石エネルギー吸収性能に加えて、その前面のポケットにおけるエネルギー吸収性能を評価する

ことも重要な検討課題であると言える。

図 7 に落石補足後の土堤の最終形状を示す。天板付近へ落体が衝突している影響で、天板と土堤背面上部に盛り上がり部分が生じていることが分かる。実際の土堤の被災事例においても天板付近への衝突で同様の変形挙動が確認されており、DEM 解析は落石防護土堤の性能評価への適用可能性があるものと考えられる。

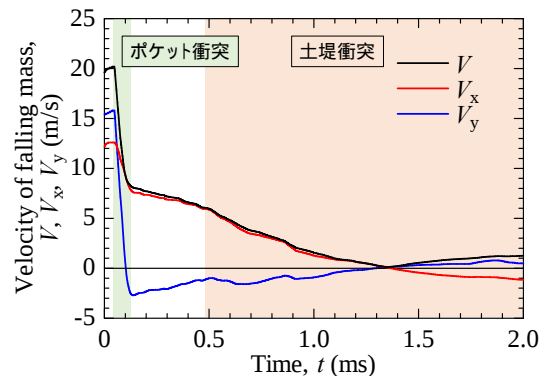


図 6 落体速度の経時変化

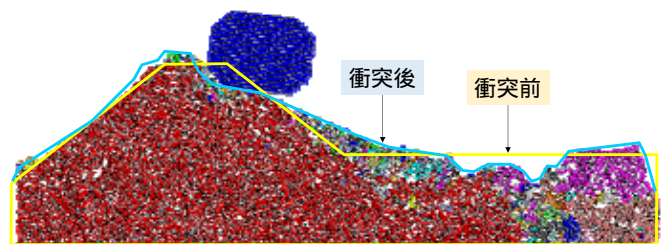


図 7 落石補足後の落石防護土堤の最終形状

4. まとめ

二次元 DEM を用いた掘削解析で得た限界自立高さから算出した粘着力とボンド強度との間には線形関係が成り立つことが分かった。また、斜面未崩壊部分には、トップリング崩壊直前のような亀裂も表現できることが分かった。さらに、ポケット及び落石防護土堤の衝撃解析を実施した結果、土堤の落石エネルギー吸収性能に加えて、その前面のポケットにおけるエネルギー吸収性能を評価することも重要な検討課題であることを示した。

謝辞：本研究に用いた装置の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)26289152 及び特別研究員奨励費(26・7908)の助成を受けたものである。末筆ながら、ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 前田健一 他(2011): 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No. 2, pp.355-364.
- 2) 羽柴寛文 他(2012): 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 68, No. 2, pp.443-454.