落石防護土堤の耐衝撃挙動に及ぼす粘着力の影響に関する DEM 解析

Impact resistance behavior of rockfall protective soil embankment with different adhesive force by using DEM simulation

名古屋工業大学	○学生	Ė員	内藤	直人(Naoto Naito)
名古屋工業大学	ΤĒ	員	前田	健一(Kenichi Maeda)
名古屋工業大学	学正	E員	田中	敬大(Takahiro Tanaka)
土木研究所寒地土木研究所	正	員	西	弘明(Hiroaki Nishi)
構研エンジニアリング	正	員	牛渡	裕二(Yuji Ushiwatari)

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)幅等、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ことで、対 策規模の縮小や対応可能エネルギーの拡大が可能となることから、 土の緩衝工の緩衝効果を適切に評価することが求められている.

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)を用いた数値解析を実施してきた. 本研究では、対応エネルギーが比較的大きいとされる落石防護土堤 ¹⁾の適切な性能評価に向けて、掘削解析により土の粘着力を設 定した上で、落石防護土堤の耐衝撃挙動に及ぼす粘着力の影響 について検討するために二次元 DEM 解析を実施した.

2. DEM 掘削解析による土の粘着力の設定 2.1 掘削解析概要と粘着力の確認方法



図-1 掘削解析の概要

表-1 解析パラメータ				
パラメータ	記号(単位)	基本設定値		
	<i>D</i> (m)			
粒子直径	最大粒径 Dmax	0.100		
	最小粒径 Dmin	0.050		
	平均粒径 D50	0.075		
粒子の密度	$ ho_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	$\phi_{\mu}(\text{deg.})$	25		
減衰定数	h	1.0		
ボンド直径	<i>D</i> _b (m)	0.05		
ボンドばね定数	<i>k</i> _b (N/m)	ばね定数×10		
ボンド強度	s _b (Pa)	$0.1-2.2 \times 10^{6}$		

本解析では、二次元 DEM で曲げ剛性を有するボンド要素 ³を 用いて土の粘着力を表現することを試みた. 図-1 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 Sbにおける限界自立高さH。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-2(a)(b)には、ボン ド強度 Sb=2.2MPaの掘削解析の様子と掘削深さ 4.25mの崩壊の様 子を示している.



excavation failure behavior in the case of bond strength s_b=2.2MPa

(b)崩壊の様子:ボンド強度 Sb=2.2MPa, 掘削深さ 4.25m 図-2 掘削解析の様子

図-2(b)より, 崩壊時には, ほぼ直線のすべり面が形成されるこ とが分かる.また, 曲げ剛性を有するボンド要素を用いて粘着力を モデルすることで, 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ていることが分かる. 土の粘着力は、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することとした。 図-3 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 φ 2+45°とし、内部摩擦角は二軸圧縮試験²から求めた φ =37.5°としている.



2.2 土の粘着力と DEM 解析におけるボンド強度の関係

図-4には、DEM 解析におけるボンド強度と掘削解析で得た限 界自立高さ., そこから算出した粘着力の関係を示している. その 結果、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. これにより、地盤調査などから得られた粘着力を DEM 解 析パラメータのボンド強度を用いて設定できる.



3. 異なる粘着力の落石防護土堤の耐衝撃性能 3.1 解析概要

図-5には、本検討で用いた落石防護土堤及び落体の解 析モデルを示している. 落体モデルは 1.2×1.6m の長方形と し、水平方向の入射速度 12.0m/s で落石防護土堤に衝突さ せる解析を実施した. 落体を構成する土粒子密度は 2700kg/m³であり、奥行きを落体長辺と同じ 1.6m と仮定する と落体の入力エネルギーは 531.2kJ となる. なお、土堤に用 いた解析パラメータは表-1と同様である.



図-5 落石防護土堤及び落体の解析モデル

本検討では, 粘着力 *c*=1, 4, 6, 9kPa の 4 ケースについて 解析を行い, 特に粘着力が極端に異なる *c*=1, 9kPa のケー スについては, 落体の水平方向衝撃力, 水平方向速度, 角 速度, 土堤の変形・応力伝播挙動について時刻歴で詳細に 検討した.

3.2 異なる粘着力を有する落石防護土堤の最終形状

図-6には異なる粘着力を有する落石防護土堤の最終形 状を示している。図中ではボンド要素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、土堤の初 期位置を緑色実線で示している。



(a)粘着力 c=1kPa



(b)粘着力 c=4kPa



(c)粘着力 c=6kPa



(d)粘着力 c=9kPa図-6 落石防護土堤の最終形状

図-6より,粘着力が最も小さく乾燥状態に近い c=1kPaの 条件では,落体衝突後にほぼ全てのボンド要素が破断し, 土堤を構成する土粒子モデルがばらばらになって堆積して いる様子が分かる.そこから粘着力を大きくすると,徐々にブ ロック化した土塊が残るようになり,まとまった土の塊が次第 に大きくなっていくことが分かる.本解析では,粘着力が最も 大きい c=9kPa の場合に落体が土堤の初期位置で停止する 結果となっている.土の粘着力が大きいほど落体の停止位 置は斜面側になると言える.

3.3 異なる粘着力が落体挙動に及ぼす影響

図-7(a)(b)(c)には,粘着力 c=1,9kPa の場合の水平方向 の落体衝撃力,水平方向の落体速度と落体角速度の時刻 歴波形を示している. 図-7(a)の落体衝撃力については、粘着力が高い c=9kPaの方が粘着力が低く乾燥状態に近いc=1kPaに比べ てt=0~100,400~700msの落体衝撃力が大きいことが分かる。

図-7(b)(c)の水平方向の落体速度及び落体角速度については,粘着力が高い c=9kPa の方が粘着力が低く乾燥状態に近い c=1kPa に比べて, t=0~100,400~700ms における速度・角速度の減少勾配が大きくなっており,上述した落体衝撃力が大きくなる時刻と対応していることが分かる.

以上より,前節で示した土の粘着力を大きくするほど落体 の停止位置が斜面側になる理由として,土の粘着力が大き いほど土堤の押し抜きせん断抵抗力が大きくなることで,落 体が受ける衝撃力は大きくなり,その分,落体の速度が早く 失われることが考えられる.



3.4 異なる粘着力が土堤の耐衝撃挙動に及ぼす影響

図-8 には, 粘着力 c=1, 9kPa の場合の落石防護土堤の 変形挙動を示している. 図中ではボンド要素の破断状況も観察 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.



図-8 落石防護土堤の変形挙動;左側:粘着力 c=1kPa,右 側:粘着力 c=9kPa

図-8より,粘着力が低く乾燥状態に近い c=1kPa の場合 は,衝突直後から土堤が離散化していることが分かる.それ に対して,粘着力が高い c=9kPa の場合は,落体衝突後も土 の塊として落体を受け止め続けていることが分かる.また,最 終的にブロック化するものの,その塊は落体と同等の大きさ を保持していることが分かる.

土堤の粘着力が大きい場合は、小さい場合に比べて、土 の塊としての大きな質量で落体を受け止め続けることができ るものと考えられる.

図-9(a)(b)には, 粘着力 c=1, 9kPa の場合の落石防護土 堤の速度分布及び応力分布の経時変化を示している.

まず,速度分布に着目すると,粘着力が低く乾燥状態に 近い c=1kPa の場合は,粘着力が高い c=9kPa の場合に比 べて,衝突直後の落体周辺の土粒子速度が大きくなってい ることが分かる.また,t=400ms 以降においても,土堤全体及 びその足元の地盤まで速度を有し,変形し続けていることが 分かる.これは,上述のように衝突直後から,土堤が離散化 し,激しく飛散して変形が継続するためと考えられる.

それに対して, 粘着力が高い c=9kPa の場合は, t=600ms 以降に速度を有する領域は, 落体衝突位置から裏法尻にか けての狭い範囲に集中していることが分かる. ここで, 応力分 布を観察すると, t=400ms においては, 落体衝突位置から土 堤の足元の地盤にかけて斜めの応力鎖が伝達していること が分かる. 粘着力の効果により, 粘着力が小さい場合に比べ て土堤とその下の地盤が一体となって落体に抵抗していると 言える.





4. まとめ

落石防護土堤の耐衝撃挙動に及ぼす粘着力の影響について二 次元 DEM 解析を実施した結果,以下のことが分かった.

- DEM 掘削解析で得られた限界自立高さから極限つり合い法 を用いて粘着力を算出した結果、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. これにより、地盤 調査などから得られた粘着力を DEM 解析パラメータのボン ド強度を用いて設定できると考える.
- 2) 粘着力が小さく乾燥状態に近い条件では、土堤は落体 衝突後に激しく離散化し飛散するが、粘着力を大きくす ると、徐々にブロック化した土塊が残るようになり、落体 の停止位置は次第に斜面側になる.
- 3) 土の粘着力を大きくするほど落体の停止位置が斜面側になる理由として、土の粘着力が大きいほど、土堤の押し抜きせん断抵抗力が大きくなることで、落体が受ける 衝撃力は大きくなり、その分、落体の速度が早く失われることが考えられる.
- 4) 粘着力が大きい場合,粘着力が小さい場合に比べて土 堤とその下の地盤が一体となって落体に抵抗しているこ とが分かった.

5) 土堤が最終的には破壊されブロック化する条件においても、粘着力が大きい条件では、そのブロック化した塊は落体と同等の大きさを保持していることが分かり、大きな質量で落体を受け止め続けることができるものと考えられる。

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) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.
- 羽柴寛文,前田健一,内藤直人,山口 悟,牛渡裕二, 鈴木健太郎,川瀬良司:落石特性の異なる水平堆積 層内の衝撃力伝達挙動に関する二次元個別要素法解 析,土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2, pp.443-454, 2012.