

二次元 DEM 解析を用いた落石防護土堤の衝撃緩衝性能に関する検討

Consideration for impact absorption performance of rockfall protective soil embankment using 2D-DEM simulation

名古屋工業大学 ○学生員 田中 敬大 (Takahiro Tanaka)
名古屋工業大学 学正員 堀 耕輔 (Kosuke Hori)
名古屋工業大学 正 員 前田 健一 (Kenichi Maeda)
構研エンジニアリング フェロー 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)

1. はじめに

我が国で多発する落石から道路等の構造物を防護するための方法として、落石防護土堤やポケット部（斜面と対策工との空き空間）等の土を用いた対策工のより積極的な利用が考えられる。落石防護土堤は、設置スペースさえあれば現地発生土の流用も可能で経済性、施工性、維持管理性能に優れた落石対策工法である。また補足可能落石エネルギーも、およそ200~3000kJと比較的大きなもので対応可能とされている¹⁾。しかし、現行ではコンクリートや鋼などの人工材料を用いた対策工のように変形・破壊モードを考慮した性能評価がなされていないのが現状である。

そこで、本研究では、土のみで構成される対策工である落石防護土堤の性能評価・設計に向けて個別要素法（Discrete Element Method、以下DEMと略す）解析を実施し、種々の落体の運動条件が落石防護土堤の耐衝撃性能に及ぼす影響について検討した。本数値解析を実施するにあたり、使用した落石防護土堤の形状や材料定数は既往の研究²⁾を参考としており、既往の研究は実際の落石防護土堤への落体衝突現象を再現可能なモデルであり、解析精度は確認されている。

2. 異なる運動量の落石に対する落石防護土堤の耐衝撃性能

2.1 解析概要

図-1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。表-2に示すように落体質量 M^f と落体の入射水平速度 V^f を定めた。落体質量 M^f は落体構成粒子密度により設定している。なお、既往の研究²⁾を参考に落石防護土堤の粘着力は $c=9\text{kPa}$ とし、落体構成粒子の密度以外の解析パラメータは表-1に示したものと同様である。

2.2 異なる運動条件の落石に対する落石防護土堤の最終形状

図-2、3には落石防護土堤の最終形状を示している。図ではボンド強度の破断状況も観察するためにボンド結合でつながっているクラスター毎に色付けして示している。ここで表-2に示すように、落石防護土堤の最終形状を「土堤を壊さず捕捉する」、「土堤を壊さず通過する」、「土堤を壊して捕捉する」、「土堤を壊して通過する」

表-1 解析パラメータ

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)	$0.1\text{--}2.2 \times 10^6$

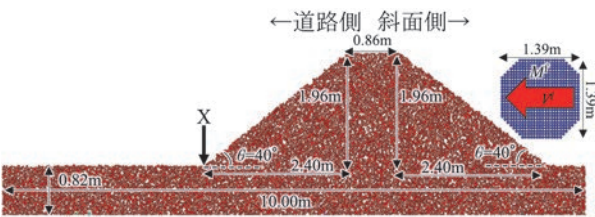


図-1 落石防護土堤及び落体の解析モデル

表-2 検討ケース

		落体の入射水平速度, V^f (m/s)							
		6	8	10	12	14	16	18	20
落体質量, M^f (t)	2.5	○	○	○	×	×	×	×	×
	3.3	○	○	○	×	×	×	×	×
	4.1	○	○	○	×	×	×	×	×
	4.9	○	○	○	×	×	×	×	×

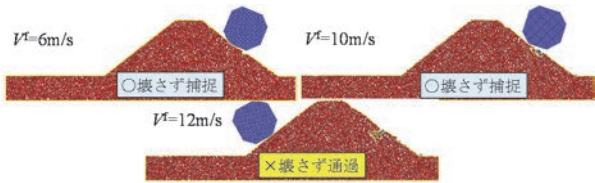


図-2 落石防護土堤の最終形状 ($M^f=2.5\text{t}$)

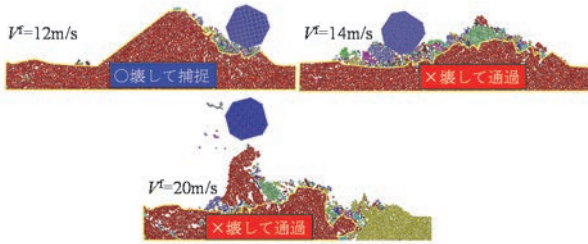


図-3 落石防護土堤の最終形状

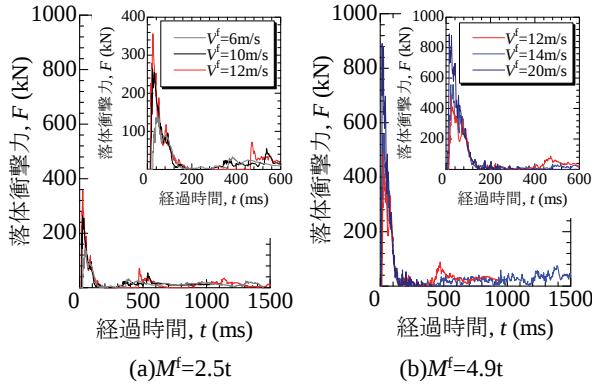


図-4 落体衝撃力の時刻歴波形

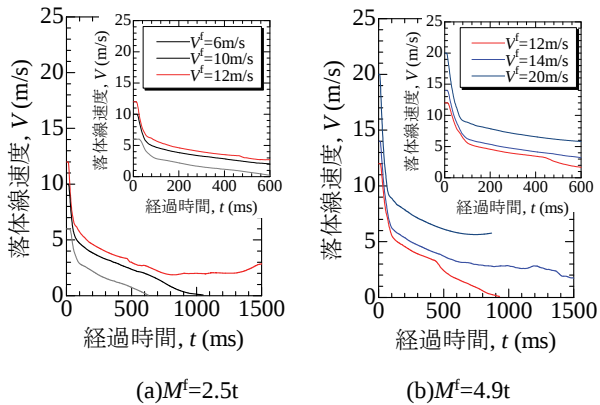


図-5 落体線速度の時刻歴波形

する」の4通りに分類した。落体が図-1中のX位置を越えたときを「通過する」とみなした。また図-2、3中の黄色で囲った最大クラスターから離散した粒子の合計体積が、落体体積の3割以上となった場合を「壊した」とみなした。落体が落石防護土堤を「通過する」場合は図-1中のX位置に落体が到達した瞬間を最終形状とし、「捕捉する」場合は解析終了時での形状を示している。

図-2より、落体の質量 M^f が小さい $M^f=2.5t$ の場合は、落石防護土堤を壊さず捕捉、もしくは通過していることが分かる。これに対して、図-3より落体の質量 M^f が大きい $M^f=4.9t$ の場合は、落石防護土堤を壊して捕捉、もしくは通過していることが分かる。特に、落体の質量 $M^f=2.5t$ の $V^f=12m/s$ では落体が落石防護土堤を壊さず通過したのに対して、落体の質量 $M^f=4.9t$ の $V^f=12m/s$ では落石防護土堤が壊れて落体を捕捉していることが分かる。

落体の質量が小さい場合など土堤の変状が少ない時は、落体が土堤衝突時に鉛直上向きの分力を受けやす

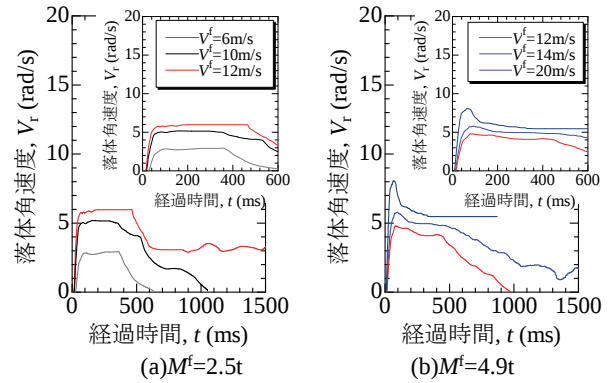


図-6 落体角速度の時刻歴波形

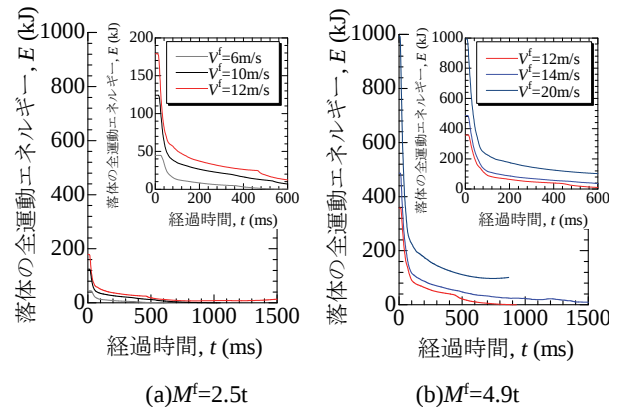


図-7 落体の全運動エネルギーの時刻歴波形

く、落体が運動を続けることで、土堤を通過するものと考えられる。よって対策工検討の際には、落体を停止させるための土堤の高さ（深さ）や法勾配、ポケット幅を確保する必要があるものと考えられる。

2.3 落体の各種時刻歴波形

図-4(a)(b)、図-5(a)(b)、図-6(a)(b)、図-7(a)(b)、図-8(a)(b)には図-2、3に土堤の最終形状を示した6ケースの落体衝撃力、落体線速度、落体角速度、落体の全運動エネルギー、エネルギー減少率の時刻歴波形を示している。 $M^f=4.9t$ の $V^f=20m/s$ の各時刻歴は落体が図-1中X位置を越える $t=860ms$ まで表示している。プロットされている落体衝撃力は、落体がポケット部または土堤に衝突する際に落体に生じる水平方向と鉛直方向の加速度から算出した各方向の衝撃力を合成したものである。なお、時刻歴の $t=0ms$ が解析開始時刻であり落体が土堤に衝突した瞬間に衝撃力が立ち上がる。

落体衝撃力について、入射水平速度 V^f が大きいほど、さらに落体質量 M^f が大きいほど最大落体衝撃力が大きくなっていることが分かる。最大衝撃力（1波目のピーク）は $t=15\sim40ms$ 間に生じており、これは落体の土堤への初期衝突時におけるものである。

落体線速度に関しては、 $t=8\sim100ms$ における減少勾配が最も大きくなっており、落体衝撃力の1波目の継続時間と概ね一致することが分かる。角速度に関しては、 $t=8\sim100ms$ において土堤への衝突により増加しており、

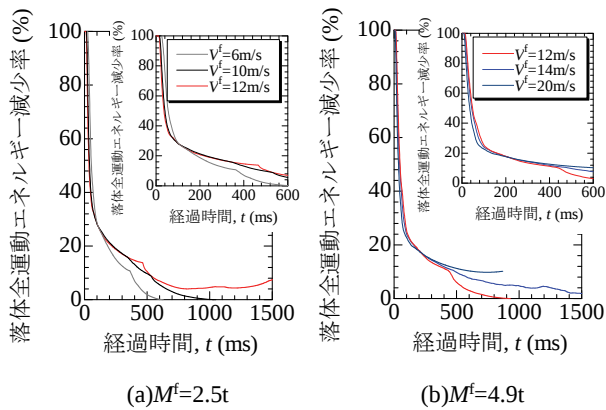


図-8 落体全運動エネルギー減少率の時刻歴波形

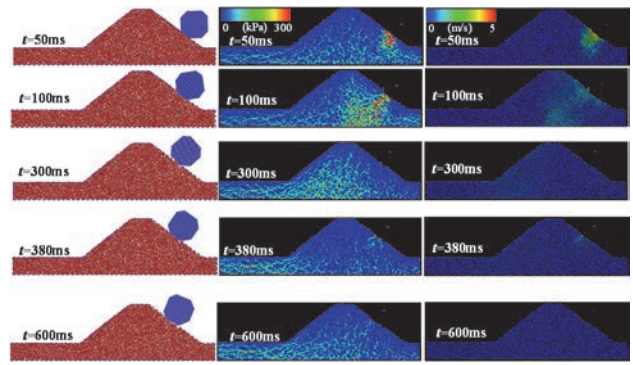
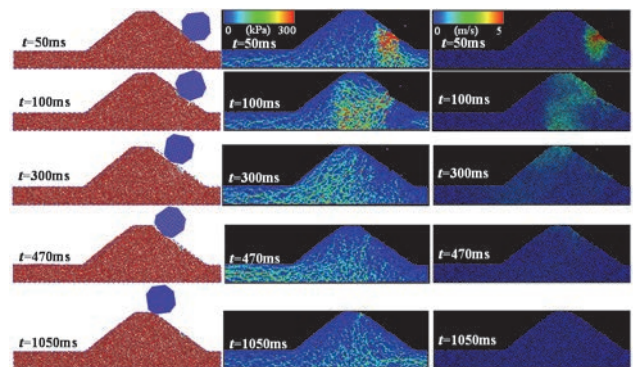
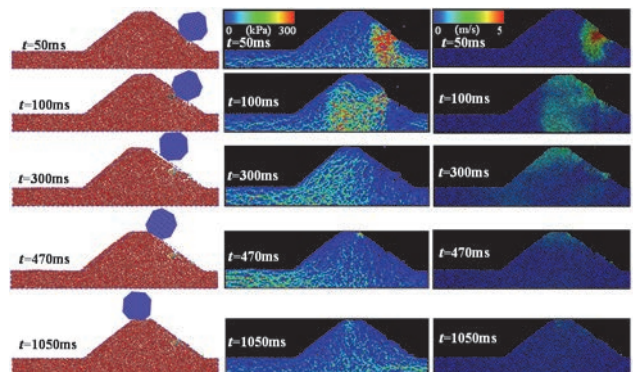
衝突後の最大回転エネルギーは衝突前の全運動エネルギーのおよそ3~7%となっている。落石対策便覧¹⁾では、落石のエネルギーを算出する際、回転エネルギー分として線速度より算出したエネルギーの10%を加算することとなっており、解析結果は概ね同程度の値となっている。 $M^f=2.5t$ で比較すると、 $V^f=6m/s$ のケースは $t=600ms$ 付近で、 $V^f=10m/s$ のケースは $t=1050ms$ 付近で落体線速度と落体角速度が0になるのに対して、 $V^f=12m/s$ のケースは速度が0にならず道路側の法面を転動し加速していることが分かる。 $M^f=4.9t$ で比較すると、 $V^f=12m/s$ のケースは $t=930ms$ 付近で落体線速度と落体角速度が0になっているのに対して、 $V^f=14m/s$ と $V^f=20m/s$ のケースは速度が維持されていることが分かる。同じ速度($V^f=12m/s$)でも落石防護土堤を壊さない $M^f=2.5t$ の場合は速度が残る結果となった。さらに土堤を通過するケースに関して、 $M^f=4.9t$ の $V^f=14m/s$ の場合は徐々に速度が減少しているのに対して、 $M^f=2.5t$ の $V^f=12m/s$ の場合は速度が道路側法面で増加している。これは土堤を乗り越えた落体が再度、土堤の上から落下したためである。

落体の全運動エネルギーに関しても、落体が土堤に衝突し貫入あるいは破壊している間、すなわち衝撃力の第1波継続時間である $t=8\sim100ms$ で急激にエネルギーが減少していることが分かる。この衝突に全エネルギーのおよそ80%が減少している。 $M^f=2.5t$ の $V^f=12m/s$ と $M^f=4.9t$ の $V^f=12m/s$ の場合は、 $t=400\sim500ms$ にエネルギーの減少勾配が大きくなっていることが分かる。また、土堤を通過するケース($M^f=2.5t$ の $V^f=12m/s$ と、 $M^f=4.9t$ の $V^f=14.0m/s$ と $V^f=20.0m/s$)は落体全エネルギーが0にならず、さらに土堤を壊さない $M^f=2.5t$ の $V^f=12m/s$ はエネルギーが増加していることが分かる。本検討はあくまでも落体が水平に土堤に入射する場合であり、およそ360kJまでは捕捉でき、990kJは捕捉できない結果となった。

2.4 落石防護土堤の変形挙動

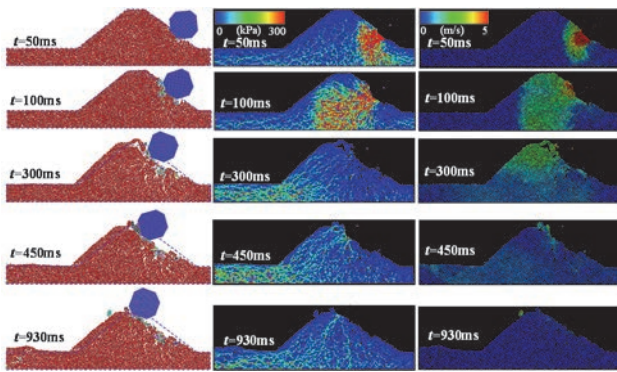
本節では土堤の変形挙動を図-8のエネルギー減少率の時系列と併せて詳細に考察する。図-9(a)(b)(c)~14(a)(b)(c)には、図-2、3の最終形状を示した6ケースの土堤の離散化の進展図、内部応力分布、粒子速度分布を示している。

100msの落体初回衝突時の土堤の離散化の進展は少な

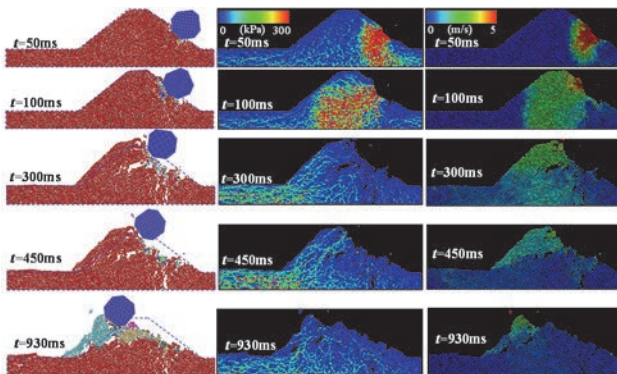
図-9 落石防護土堤の変形挙動 ($M^f=2.5t$, $V^f=6m/s$)図-10 落石防護土堤の変形挙動 ($M^f=2.5t$, $V^f=10m/s$)図-11 落石防護土堤の変形挙動 ($M^f=2.5t$, $V^f=12m/s$)

く、内部応力、速度共に大きな値を持つことが分かる。よって、図-8(a)のように $t=8\sim100ms$ において落体のエネルギーが土堤に吸収され、急激に減少したものと考えられる。

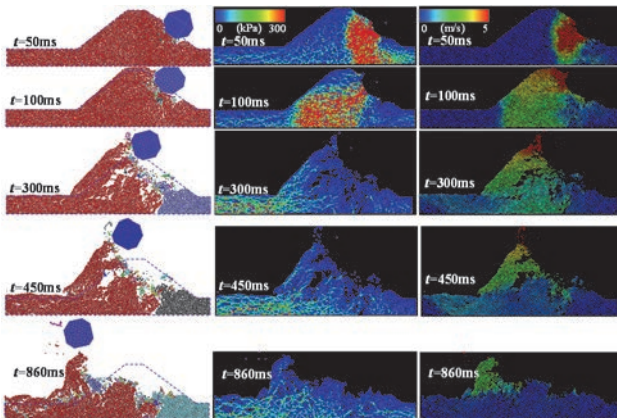
$t=300ms$ 以降では、図-8(a) $M^f=2.5t$ の $V^f=6m/s$ のエネルギー勾配が $t=380ms$ において変化している。これは土堤が弾性的に変形し、落体の運動に抵抗するためであり、この時刻では落体接触部に僅かながら応力が発生している。また、図-8(a) $M^f=2.5t$ の $V^f=12m/s$ のエネルギー勾配が $t=470ms$ で変化していることが分かるが、これは落体が天端右端に乗り上げるためであり、この瞬間落体衝撃力が立ち上がると共に、落体接触部に強い応力が生じて



(a)離散化の進展図 (b)内部応力分布 (c)粒子速度分布
図-12 落石防護土堤の変形挙動 ($M^f=4.9t$, $V^f=12m/s$)



(a)離散化の進展図 (b)内部応力分布 (c)粒子速度分布
図-13 落石防護土堤の変形挙動 ($M^f=4.9t$, $V^f=14m/s$)



(a)離散化の進展図 (b)内部応力分布 (c)粒子速度分布
図-14 落石防護土堤の変形挙動 ($M^f=4.9t$, $V^f=20m/s$)

いることが分かる。

図-12、13、14の $M^f=4.9t$ に関して $t=50ms\sim100ms$ は土堤の離散化の進展が少なく、内部応力、速度共に大きな値を持つことが分かる。よって、この時刻において落体の全運動エネルギーが土堤に吸収され、そのエネルギーが粒子速度に変わること、落体の全運動エネルギーが急激に減少したものと考えられる。

$t=300ms$ では、土堤の離散化が進み、粒子速度が増加するため、落体の運動に対して粒子が抵抗できない。よって、同時刻での落体接触部付近での応力は比較的小さく、エネルギー勾配に大きな変化は生じないものと考えられる。

$t=450ms$ において、 $M^f=4.9t$ の $V^f=12m/s$ は粒子速度が減少することで土堤が落体に抵抗し、落体接触部から強い応力が発生していることが分かる。この時刻では、落体のエネルギーを土堤が吸収したものと考えられる。

$M^f=4.9t$ の $V^f=14m/s$ と $20m/s$ の場合は、 $M^f=4.9t$ の $V^f=12m/s$ の場合に比べて離散化の進展と粒子速度が速く落体に抵抗できないため、内部応力が小さいものと考えられる。

以降、落体が停止する $M^f=4.9t$ の $V^f=12m/s$ の場合は離散化の進展が止まり、内部応力も粒子速度も小さくなっている。落体が通過する $M^f=4.9t$ の $V^f=14m/s$ と $V^f=20m/s$ の場合は、土堤粒子が大きく離散化し落体接触部付近の粒子速度が大きく増加している。そのため内部応力は小さくなりエネルギーの減少勾配は比較的平坦となっている。

以上より、土堤の落体エネルギー吸収は、落体の土堤への初回衝突時と、土堤が離散化する場合において土堤の粒子速度が減少し、落体の運動に抵抗する瞬間に発揮されるものと考えられる。

3.結論

落石防護土堤の性能評価・設計に向けて二次元DEM解析を用いて、運動量を変化させた落体の土堤への衝突解析を実施した。土堤に衝突する落体の速度、エネルギー、土堤の変状、土堤内部の応力、粒子速度に着目し、土堤のエネルギー吸収性能に関する考察を行った。得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 落石防護土堤による落体エネルギーの吸収は、土堤の初回衝突時と、土堤が変状し落体の運動に抵抗する瞬間に主に発揮される。
- 2) 落体の質量が小さい場合など、土堤の変状が小さい時には、落体が土堤に衝突した際に鉛直上向きの分力を受けやすく、落体は運動を継続する。よって対策工検討に際しては落体を停止させるための土堤の高さ(深さ)や勾配、ポケット幅を確保する必要がある。

今後は、ボンド破断後にボンド結合が復活する条件での解析や、落体衝突後の土堤に再度落体を衝突させることで、落石防護土堤の損傷度評価に関する検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧、2000。
- 2) 内藤直人、前田健一、田中敬大、西弘明、牛渡裕二: 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、平成28年度土木学会北海道支部論文報告集、Vol.73、A-30、2017。