

FEM による実規模落石防護土堤の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討
(シンポジウム講演概要)

Numerical study on impact resistance behavior of full-scale rockfall-protection soil embankment
using the Finite Element method (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

瓦井 智貴 (室工大・理工) 小室 雅人 (室工大・理工) 岸 徳光 (室工大・理工) 前田 健一 (名工大・工)
内藤 直人 (豊橋技術科大・工) 中村 拓郎 (寒地土研) 牛渡 裕二 (構研エンジ) 柴田 蓮 (室工大)

Tomoki KAWARAI, Muroran Institute of Technology
Masato KOMURO, Muroran Institute of Technology
Norimitsu KISHI, Muroran Institute of Technology
Kenichi MAEDA, Nagoya Institute of Technology
Naoto NAITO, Toyohashi University of Technology
Takuro Nakamura, Civil Engineering Research Institute for Cold Region
Kentaro Suzuki, Koken Engineering
Ren SHIBATA, Muroran Institute of Technology
E-mail: kawarai@muroran-it.ac.jp

In this study, in order to investigate impact resistance behavior on a full-scale rockfall protection embankment, a three-dimensional elasto-plastic impact response analyses were carried out varying the energy, impact angle, and rotational component of the weight. From this study, the performance of a full-scale rockfall protection embankment in capturing falling rocks was confirmed.

1. はじめに

落石災害から道路交通網を守る落石防護工の 1 つである落石防護土堤は、現地発生土も利用可能である最も低コストな対策施設である。しかしながら、その耐衝撃挙動については十分に明らかにされておらず、耐衝撃設計法も確立されていないのが現状である。以上より、落石防護土堤の性能設計法の確立を最終目的として、本研究では落石防護土堤の耐衝撃挙動を把握するために、実規模落石防護土堤を対象に、有限要素法を用いた三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、実規模衝突実験結果¹⁾を基に、その耐衝撃挙動を適切に再現可能な数値解析モデルの構築を試みた。その後、重錘のかけ上がり挙動への影響要因の確認を目的に、法勾配や入力エネルギー、回転エネルギー比などを変化させてパラメトリック解析を実施した。

2. 実験概要

Table 1 には本研究で対象とした実験¹⁾のケース一覧を

Table 1 Test cases.

No.	Cases	Impact position	Mass of the weight M (t)	Drop height the weight H (m)	Drop-weight capture	
					Exp.	Ana.
1	A-M2.5-1	A	2.5	30	Passed through	
2	A-M2.5-2	A	2.5	30		
3	B-M1.9-1	B	1.9	25		
4	B-M1.9-2	B	1.9	22		
5	C-M1.9-1	C	1.9	22		



Fig. 2 Test situation.

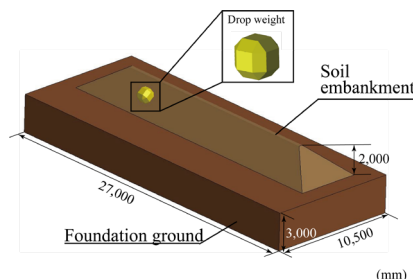


Fig. 3 FE model.

示している。実験ケース名に関して、第一項目は重錘の衝突位置 (A, B, C) を、第二項目の M に付随する数値は重錘質量 (t) を、第三項目は同ケースを実施した回数を表している。実験では、いずれのケースにおいても重錘が土堤の非衝突面側の法肩を越え、重錘が土堤を通過した。

Fig.1 には試験体図を、Fig.2 には実験状況を示している。本実験で対象とした土堤は一般的に製作されている形状を参考に、法勾配は 1:1.2、高さは 2 m、土堤延長方向を 18 m とした。正面図には全 5 ケースの重錘の衝突箇所を示している。なお、土堤材料には実験場周辺で採取可能な現地発生土である細粒分まじり砂質礫を使用した。また、実験は EOTA 型重錘を斜面勾配 50°, 最大高さ 30 m から自由回転落下させ土堤に衝突させている。

3. 再現解析概要と結果

Fig.3 には本数値解析で用いた解析モデルを示している。

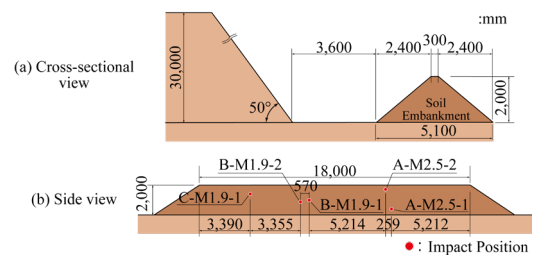


Fig. 1 Configuration of specimen.

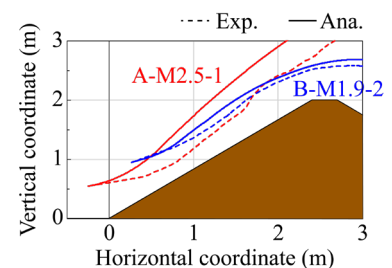


Fig. 4 Comparison of drop-weight path.

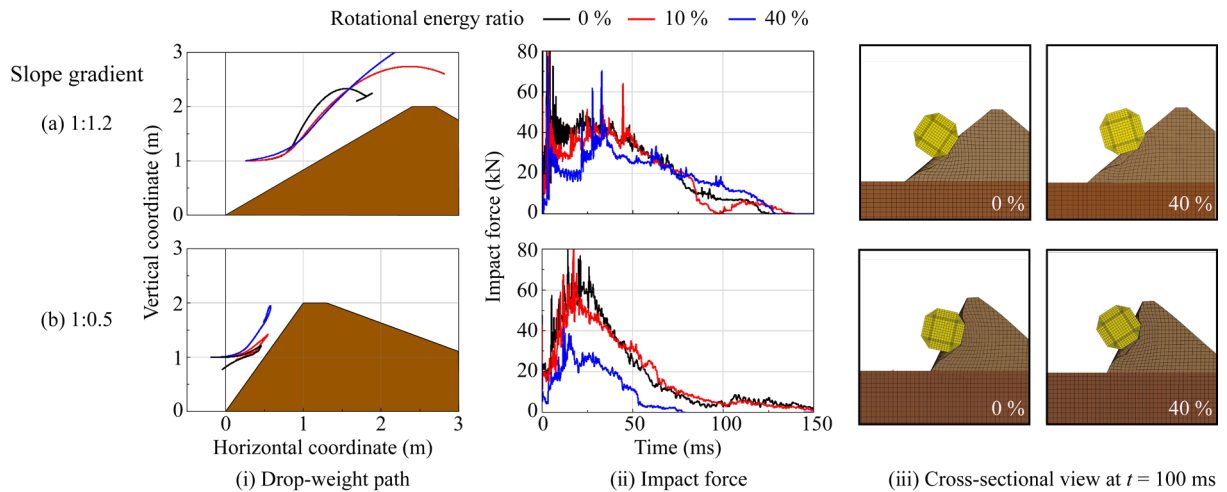


Fig. 6 Effects of rotational energy ratio and slope gradient.

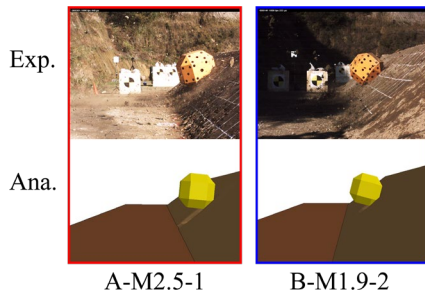


Fig. 5 Comparison of drop-weight impact behavior.

Table 2 Numerical analysis parameters.

Parameter	Values
Slope gradient	1:1.2, 1:0.5
Input energy (kJ)	100, 200, 300
Rotational energy ratio (%)	0, 10, 40
Impact angle (°)	0, 10, 20
Total number of cases	81

ここでは、土堤および基礎地盤までをモデル化することとし斜面は省略している。基礎地盤のモデル化の範囲に関しては、既往の研究結果¹⁾等を参考に土堤の耐衝撃挙動への影響が小さいと判断される程度のサイズを設定し、深さは3 mとした。また、重錘を含む全ての材料に8 節点固体要素を適用している。境界条件は、基礎地盤底面を完全固定とし、全側面の法線方向変位成分を拘束した。

重錘－土堤間には滑り・剥離を考慮した接触を定義し、予備解析より摩擦係数は0.3とした。衝撃荷重は、重錘を土堤に接する形で配置し、実験時における回転成分を含む実測衝突速度を重錘全要素に付加することで作用させた。なお、自重による影響を考慮し、スプリングバック解析を行った後に、衝撃応答解析を実施している。

Fig.4, Fig.5 には、本数値解析結果より得られた重錘軌跡図および重錘衝突後 100 ms 時点の土堤や重錘の状況を、実験結果と比較して示している。なお、一例として、ケース A-M2.5-1 および B-M1.9-2 の 2 ケースについて示した。Fig.4 より、ケース A-M2.5-1 に着目すると、破線で示す実験結果においては土堤にわずかに貫入した後、重錘はかけ上がっている様子が分かる。一方で、数値解析結果を見ると、貫入量に差はあるものの、実験結果と同様に土堤とほぼ平行に移動している様子が分かる。次に、B-M1.9-2 に着

目すると、実験結果と数値解析結果は非常によく対応しており、いずれも土堤を乗り越えていることが確認できる。Fig.5 より、100 ms 時点の状況を確認すると、いずれのケースにおいても重錘の位置や土堤の変状が両方で概ね対応していることが分かる。なお、Table 1 に示す 5 ケースの再現解析を実施した結果、実験結果と同様にいずれも重錘の捕捉には至らなかった。

4. パラメトリック解析概要と結果

本節では、前節の数値解析手法を踏襲し、種々のパラメータを変化させたパラメトリック解析を実施した。Table 2 には、検討に用いたパラメータである法勾配や入力エネルギー、回転エネルギー比および衝突角度について、それぞれの値を一覧にして整理している。ここでは、これらを変化させた全 81 ケースの衝撃応答解析を実施した。なお、2.5 t の重錘を使用し、土堤の中央、高さ 1 m の位置に載荷した。また、本稿では一部の結果のみを示す。

Fig.6 には、法勾配を 2 種類に、かつ重錘の回転エネルギー比を 3 種類に変化させた計 6 ケースのパラメトリック解析より得られた重錘軌跡図、重錘衝撃力および、100 ms 時点の変形状況を示している。なお、入力エネルギーは 200 kJ、衝突角度は 0° の結果である。(a) 図より、一般的な 1:1.2 勾配の場合を見ると、回転エネルギー比が 10 % 以上になると重錘が通過することが分かる。また、衝撃力を見ると、回転エネルギー比の増大に対応して 25 ～ 50 ms 間で示される平均衝撃力は小さくなる傾向が確認できる。(b) 図より、1:0.5 勾配の場合を見ると、いずれのケースにおいても勾配を急にしたことで重錘のかけ上がり挙動は抑制され、重錘を捕捉していることが分かる。

5. まとめ

- 1) 本数値解析モデルを用いることによって、実規模落石防護土堤の耐衝撃挙動をほぼ適切に再現可能である。
- 2) パラメトリック解析より、回転エネルギー比が 40% 程度の場合においても 1:0.5 勾配とすることによって重錘を捕捉できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 杉山ら：落石捕捉性能把握に向けた実規模落石防護土堤の落体衝突実験，構造工学論文集，Vol. 67A，pp. 864-877，2021。