

外力を変化させた落石防護土堤の重錘衝突実験

Weight collision experiment of rockfall protective soil embankment which changed external force

名古屋工業大学
名古屋工業大学
名古屋工業大学
(株)構研エンジニアリング
名古屋工業大学
寒地土木研究所

○学正員
学生員
学生員
正員
正員
正員

堀 耕輔 (Kosuke Hori)
松尾和茂 (Kazushige Matsuo)
峯 祐貴(Masaki Mine)
牛渡裕二 (Yuji Ushiwatari)
前田健一(Kenichi Maeda)
今野久志 (Hisashi Konno)

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、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(落石防護土堤・溝)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。そこで、本研究では落石防護土堤及びポケット部の落石防護性能の把握のための基礎資料収集を目的として、高さ 0.5 m の土堤模型を対象とした挙動確認実験を実施した。本論文では、外力を変化させた重錘衝突実験の結果について報告する。

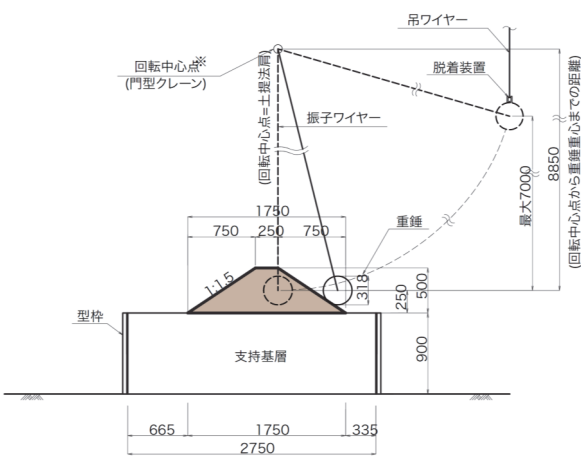


図 1 実験概要図

2.実験概要

2.1 試験体概要

図1および図2には、実験概要図および実験状況写真を示している。土堤模型の断面形状は高さ 0.5m、天端幅 0.25m、底面幅 1.75m の左右対称の台形状となっている。土堤模型延長は全 12m であり、1つの実験に対して影響範囲が延長 3m 程度と仮定し、3m 毎に荷重を作用させている。土堤下面には厚さ 0.9m の支持基層を設けている。重錘は直径 318mm、質量 54 kg の球体で、表層に板厚 9mm の鋼板を使用し、内部にコンクリートを充填して製作した。

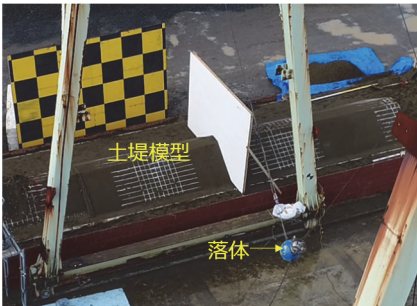


図 2 実験状況写真

実験は、重錘を振り子運動により土堤に衝突させて実施した。振り子運動の回転中心点は土堤模型法肩部衝突面側と一致させており、重錘吊り下げ時には重錘重心が土堤底面から 0.25 m の高さとなるよう回転中心から重錘重心までの半径を 8.85 m とした。衝突時の重錘と回転中心点との角度は 4 度程度となる。表 1 には実験ケース一覧を示している。

表 1 実験ケース一覧

落下高さ(m)	載荷方法	土堤勾配
1	衝撃載荷	1.5割
2		
3		
6		

2.2 施工方法及び計測方法

土堤構築にあたり、土堤模型は厚さ 0.25m 毎に、支持基層は 0.3m 毎に敷均して振動締固め機を使用して締固めて成形している。成形後に直径 75 mm の鋼製円筒を貫入させてサンプリングを行い、湿潤密度、含水比を計測した結果、実験時の平均湿潤密度および平均含水比はそれぞれ 1.5g/cm³、9%程度であった。表 2 には、実験に使用した石狩市生振（おやふる）産の砂の物性値一覧を示している。衝撃実験における計測項目は、高速度カメ

表 2 物性値一覧

項目	単位	試験結果
粗粒率		1.48
表乾密度	(g/m ³)	2.58
吸水率	(%)	3.24
微粒分量	(%)	2.2
内部摩擦角(φ)	(°)	36.5
粘着力(C)	(KN/m ²)	0.75

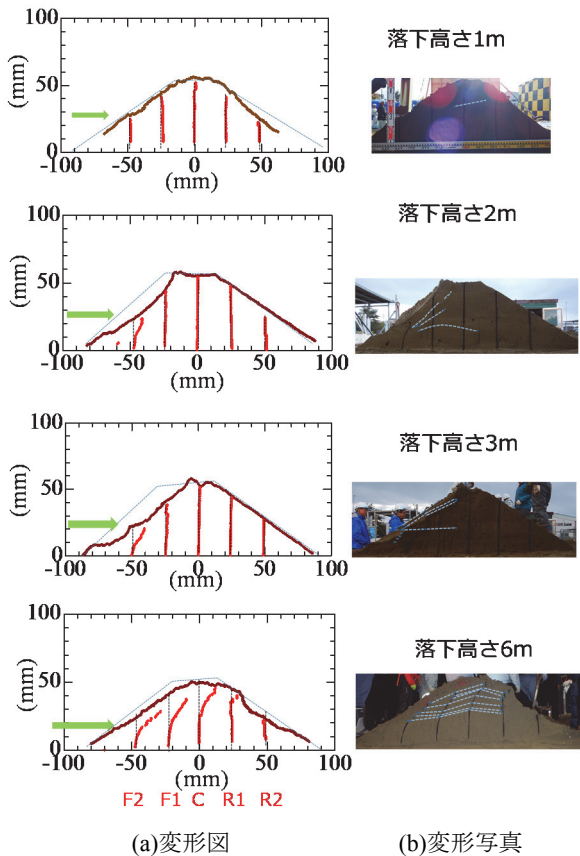


図3 衝突断面に関する変形図及び中央断面写真

ラによる重錘移動量および土堤構築時に予め配置した着色砂による実験後の土堤内部の砂移動量である。高速カメラのフレームレートは1000fpsであり、重錘移動量は重錘に貼り付けたターゲットの3次元方向それぞれの座標値を画像解析により求め、移動距離を微分することで速度を算出している。しかしながら、実験時に飛散した土粒子によりノイズが含まれてしまうことから、速度データは3word(3ms)の中央値処理および5word(5ms)の矩形移動平均処理を施している。

3.実験結果

3.1 破壊性状

図3(a)(b)には衝突断面に関する変形図および変形写真を示している。(a)の変形図、(b)の変形写真共に、左側が衝突断面、右側が被衝突断面である。(b)の変形写真には着色砂のせん断箇所を連結させた想定すべり線も併せて示している。図3(a)の内部の砂移動量に着目すると、落下高さ1mのケースは着色砂が大きく移動している場所はないが、落下高さ2m、3mのケースは着色砂F2が大きく動いていることが分かる。また、落下高さ6mのケースは着色砂F2、F1、Cに大きな動きが見られた。なお、着色砂R1、R2が実験前の着色砂設置位置よりも衝突面側に移動しているのは落体が土堤を通過後、被衝突面側の法面に衝突したためと考えられる。

図3(b)の写真の想定すべり線に着目すると、落下高さ

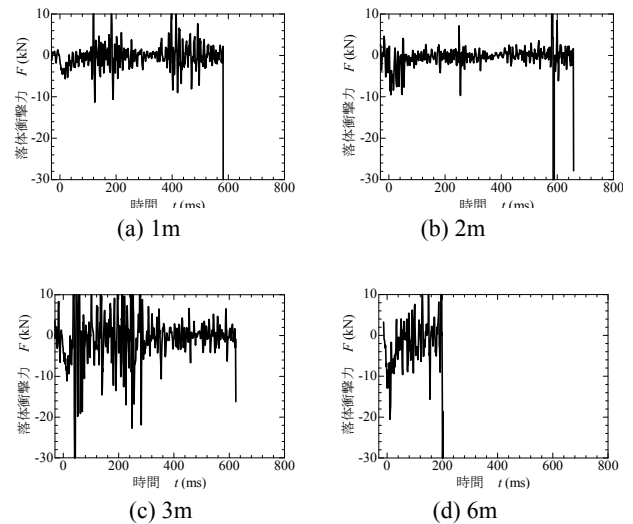


図4 重錘衝撃力

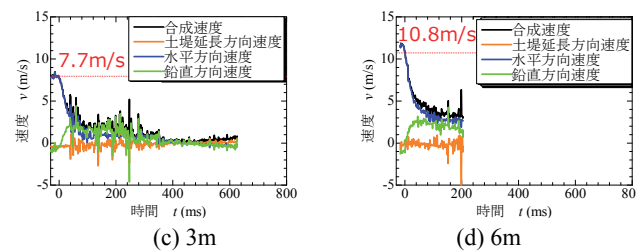
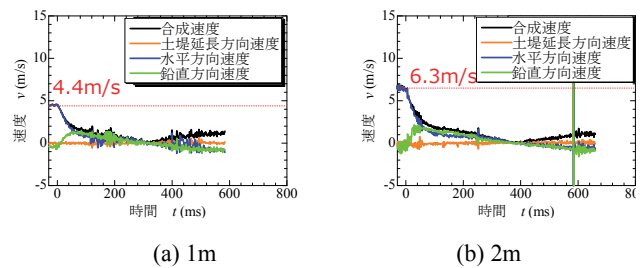


図5 重錘並進速度

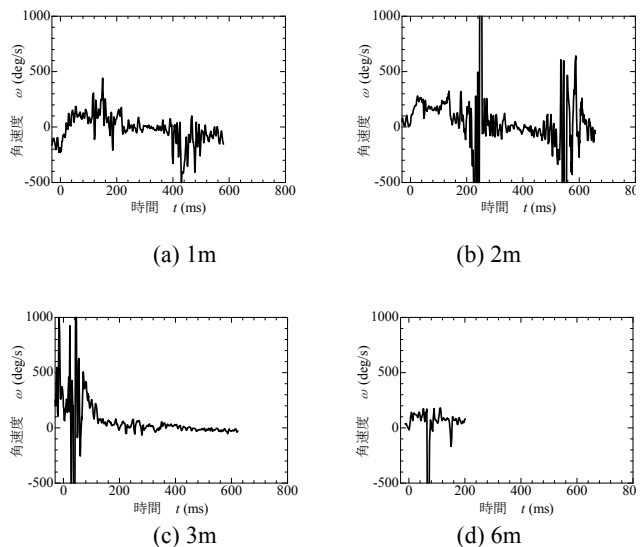


図6 重錘角速度

1m のケースは天端付近にすべり線が 1 本発生している。落下高さ 2m、3m のケースは重錘から天端に抜けようとするすべり線が 2~3 本程度、高さ中央付近に 1 本のすべり線が発生している。落下高さ 6m は重錘から被衝突側の法面に抜けようとするすべり線が 7 本程度見られた。

3.2 時刻歴応答波形

図 4、図 5、図 6、図 7 にそれぞれ、高速度カメラにて計測した重錘衝撃力、重錘並進速度、重錘角速度および重錘移動量に関する時刻歴応答波形を示す。なお、重錘並進速度は単位時間における重錘移動量から、重錘衝撃力は単位時間における重錘並進速度変化量に重錘質量を乗じて、重錘角速度は重錘の重心と重錘に貼り付けたターゲットの 2 点の移動量よりそれぞれ算出した。また、図 5、図 7 の赤線はそれぞれ、Y 軸方向速度の理論値、理論衝突高さを示している。

図 4 より、重錘衝撃力の最大値は落下高さ 1m のケースが 3~6kN、落下高さ 2m のケースが 6~10kN、落下高さ 3m のケースが 6~12kN、落下高さ 6m のケースが 10~20kN となった。

図 5 より、重錘並進速度は落下高さ 1m~3m のケースは計算値と同程度の速度だが、落下高さ 6m のケースは計算衝突速度以上の速度が生じていることが分かる。全ケースとも衝突直後から 20ms 程度までに水平方向速度が急激に減少し、代わりに鉛直方向上向き速度が急激に増加していることが分かる。その後、60ms 程度で水平方向および鉛直方向の速度はほぼ同程度となり、その後はいずれも緩やかに減少する傾向を示す。

図 6 より、重錘角速度についてもノイズが大きいため波形性状の考察が困難であるが、平均角速度は 200deg/sec 程度と推察される。

図 7 より、全ケースにおいて衝突後 20ms 程度までは水平移動量の減少量は小さいことが分かる。

図 8 は、重錘並進速度、重錘角速度および高さ方向の重錘移動量からそれぞれ算出した運動エネルギー、回転エネルギーおよび位置エネルギーに関する時刻歴応答波形についてそれぞれ示している。図より、いずれのケースも衝突直後に全エネルギーが急速に減少し、その後はほぼ一定になっていることが分かる。また、全ケースとも、全エネルギーが急速に減少する時間帯が、重錘衝撃力の波形立ち上がり時刻と一致している。(いずれのケースも衝突直後から 4~5ms まで)

3.3 重錘軌跡図

図 9 には高速度カメラから算出した重錘の軌跡図を示している。なお、落下高さ 1m~3m のケースでは計算時間短縮のため、最大駆け上がり位置(図 4(e)の Z 軸方向座標のピーク値)を確認し次第、計算を中止した。落下高さ 6m のケースは重錘が天端付近に到達する時刻付近にて計測範囲外となってしまったため、途中で計測を中止している。また、図中の青い直線は理論衝突高さを示している。赤の破線は、土堤から重錘半径分のオフセットラインである。図より、落下高さ 1m~3m のケースでは、土堤が落体を捕捉したのに対し、落下高さ 6m のケースでは落体が土堤を乗り越える結果となった。

また、図 10 に落下高さと最大貫入量の関係を示す。

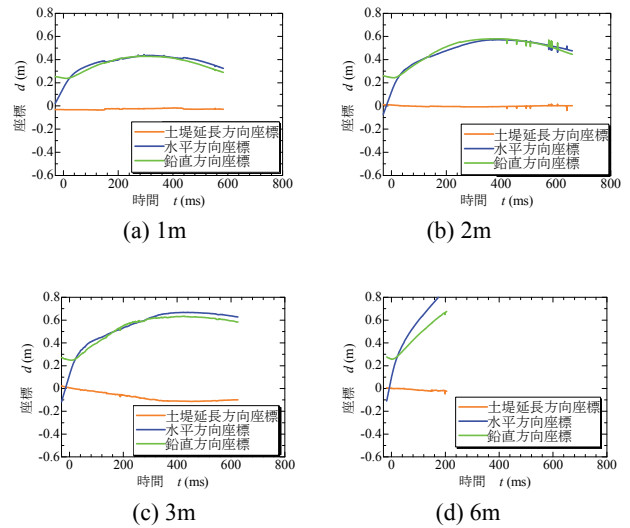


図 7 重錘移動量

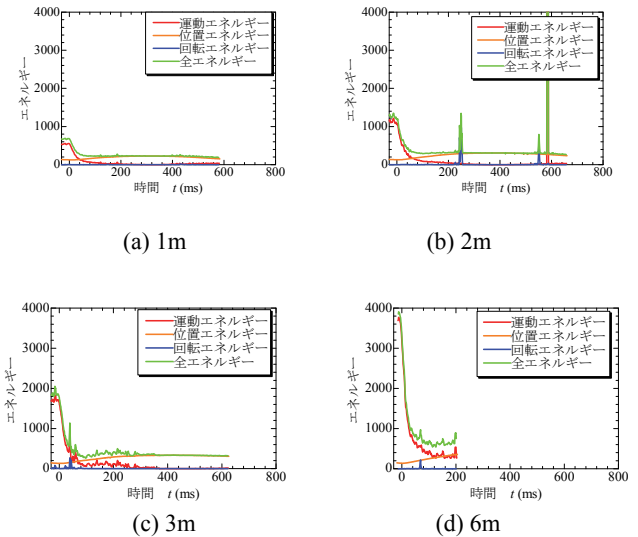


図 8 各種エネルギー

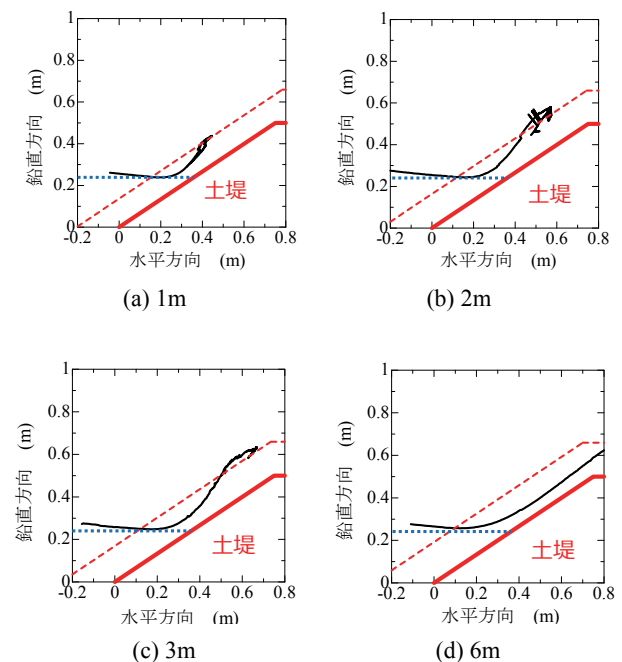


図 9 軌跡図

なお、図 10 に示す貫入量は、衝突側法面に対して垂直な方向への貫入量を示している。図より、落下高さが大きくなるほど、貫入量も線形的に増加していることが分かる。

図 11 には、落下高さと軌跡図から求めた最大駆け上がり高さ（高さ方向の最大値から最小値を差し引いた値）の関係を示す。なお、落下高さ 6m のケースは最大駆け上がり位置を確認できなかったため、最大駆け上がり高さは求めている。図より、落下高さが大きくなると、最大駆け上がり高さも大きくなるが、落体貫入量のように線形的に増加するのではなく、非線形的に増加している。これは、落下高さが大きいほど、初期全エネルギーに占める、初回衝突で失うエネルギーの割合が大きいためと考えられる。

初回衝突で失うエネルギーの割合を定量化するため、落下高さ 1m～3m のケースに関して、初回衝突以降の残存エネルギーを初期エネルギーで除した値を算出し傾向を調べる（以後全エネルギー減衰率と呼ぶ）。なお、簡単のため、初回衝突以降は全エネルギーは一定と見なし、計算終了時刻における全エネルギーを初回衝突以降の残存エネルギーとした。図 12 に、落下高さと全エネルギー減衰率の関係を示す。図より、落下高さを大きくすると全エネルギー減衰率も大きくなり、その傾向が落下高さと最大駆け上がり高さの関係とおおむね一致していることが分かる。

4.まとめ

本研究では落石防護土堤およびポケットの落石防護性能の把握のための基礎資料収集を目的として、高さ 0.5 m の土堤模型を対象として外力を変化させた重錘衝突実験を実施した。本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 落下高さが大きくなるほど土堤の落体衝突によるダメージは大きくなる傾向にある。
- 2) 全エネルギーは、重錘の土堤衝突直後に急速に減衰し、その後は一定になる。また、全エネルギーが急速に減少する時間帯が、重錘衝撃力の波形立ち上がり時刻と一致する。
- 3) 落下高さ 1m～3m のケースでは、土堤が重錘を捕捉したのに対し、落下高さ 6m のケースでは重錘が土堤を乗り越える。
- 4) 落下高さを増加させると重錘貫入量は線形的に増加する傾向にある。しかし、最大駆け上がり高さの場合は非線形的に増加する。

今後は、材料等を変化させて実験を実施すると共に、数値解析を実施し、落石防護土堤およびポケットの落石防護性能を詳細に把握することを試みる。

参考文献

- 1) 日本道路学会：落石対策便覧、2017.12

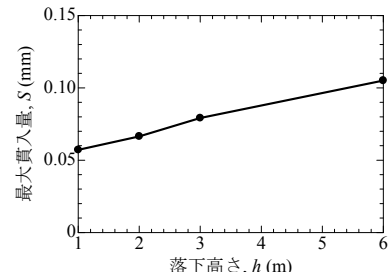


図 10 落下高さ－最大貫入量関係

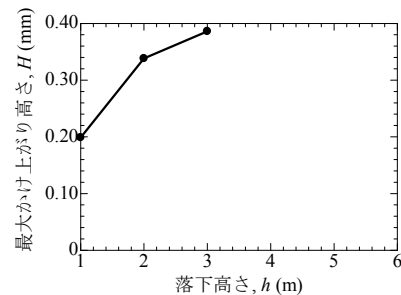


図 11 落下高さ－最大駆け上がり高さ関係

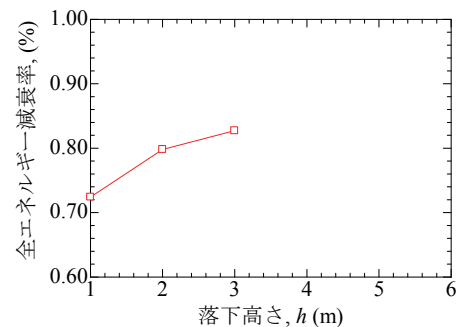


図 12 落下高さ－全エネルギー減衰率関係