

法面を急勾配化した落石防護土堤に対する 重錘衝突実験及び個別要素法を用いた内部挙動の把握

Weight impact tests and DEM to understand
the internal behavior of a steep-sided rockfall protection soil embankment

小栗快之¹⁾, 前田健一²⁾, 近藤慶亮³⁾, 吉廣悠太⁴⁾,
中村拓郎⁵⁾, 鈴木健太郎⁶⁾, 内藤直人⁷⁾, 瓦井智貴⁸⁾

Yoshiyuki Oguri, Kenichi Maeda, Keisuke Kondo, Yuta Yoshihiro,
Takuro Nakamura, Kentaro Suzuki, Naoto Naito, Tomoki Kawai

- 1) 名古屋工業大学 大学院博士前期課程 工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町,
E-mail: y.oguri.893@stn.nitech.ac.jp)
- 2) 博(工)名古屋工業大学 社会工学科 教授 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町,
E-mail: maeda.kenichi@nitech.ac.jp)
- 3) 名古屋工業大学 大学院博士前期課程 工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町,
E-mail: k.kondo.690@stn.nitech.ac.jp)
- 4) 名古屋工業大学 工学部 社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町,
E-mail: y.yoshihiro.523@stn.nitech.ac.jp)
- 5) 博(工)土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム主任研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号,
E-mail: nakamura-t@ceri.go.jp)
- 6) 博(工)構研エンジニアリング (〒060-0034 札幌市中央区北4条東4丁目1番地1号,
E-mail: suzu@koken-e.co.jp)
- 7) 博(工)豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 助教 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1,
E-mail: naito.naoto.xz@tut.jp)
- 8) 博(工)室蘭工業大学 大学院工学研究科 助教 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1
E-mail: kawai@muroran-it.ac.jp)

Although the rockfall protection soil embankments are economical, easy to construct, and easy to maintain, their performance design method has not yet been established. In this study, a 1/4-scale model of a full-scale soil embankment with a steep slope was subjected to a rotating weight impact test and reproducible analysis using the discrete element method to evaluate the performance of the soil embankment in catching falling rocks. The deformation and failure behavior of the soil embankment and the internal stress propagation behavior were investigated by comparing the experimental results with the replicated analysis.

Key Words : Rockfall protection soil embankment, Discrete element method, Internal behavior

1. はじめに

近年、我が国では集中豪雨や大地震など自然災害の激甚化に伴い大規模な落石災害の発生リスクが高まっている。落石災害は人命に直接関わるとともに、交通網の寸断等により地域経済に大きな影響を及ぼす。これらの被害を最小限に抑えるため、合理的な落石対策工の実施が求められている。そこで地形・地質等の現場条件を利用して落石エネルギーの吸収・消散を図る落石防護土堤(図-1)

(以下、土堤と示す)に着目する。土堤は土のみで構成され、経済性や施工性、維持管理性に非常に優れた落石対策工である。しかし、落石対策便覧などの現行の参考図書に

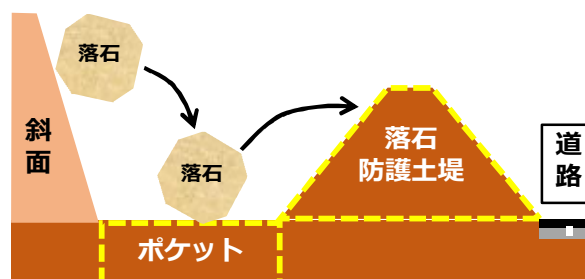


図-1 落石防護土堤のイメージ図

において土堤の落石エネルギーの吸収・消散メカニズム、すなわち落石の捕捉性能については定量的な評価方法が示されておらず、性能設計法は未だ確立されていない。

以上の背景より、本研究では土堤の落石捕捉性能の把握を目的とした実験的検証として、載荷面側の法面を急勾配化し、斜面上から重錘を落下させ回転した状態で衝突させる衝撃载荷実験を実施した。これより、土堤法面の勾配が落石捕捉性能に及ぼす影響を検討した。また、法面の急勾配化に伴う土堤内部挙動への影響を把握することを目的に、二次元個別要素法（以下、2D-DEMと示す）^[1,2]による解析的検討を併せて実施した。

2. 実験および数値解析概要

(1) 実験概要および計測項目

図-2に実験概要図を示す。本実験は実規模の1/4スケールを想定した高さ0.50mの縮小模型を対象とした。図-3および表-1に示すEOTA型重錘を使用し、重錘の跳躍を抑えるため曲率を有する斜路上に重錘を設置し、着脱装置を用いて重錘の衝突位置が土堤高さの中央となることを目標に衝突させた。土堤寸法について、非載荷面側の法勾配は1:1.2、載荷面側の法勾配は1:1.2と1:0.5の2種類とし、表-2に示す土砂（細粒分質砂質礫）を使用し構築した。試験体の構築について、基層部は高さ0.30m毎、土堤部は0.25m毎に敷均し、締固め度90%以上を目標に振動締固め機を使用して構築した。また、表-3に実験ケース一覧を示す。ケース名は各ケースの載荷面側の法勾配（G：Gradient）が1:1.2、1:0.5であることを示す。衝突速度（水平右、鉛直上向きを正）、衝突角速度（進行方向に対して順回転を正）、衝突時の水平面との重錘角度は表-3に示す通りであり、両ケースは同程度の衝突速度で実施された。また、実験結果としてG1:1.2は重錘が土堤をかけ上がり通過、G1:0.5は土堤が重錘を捕捉したことを示す。

計測項目として、本実験は高速度カメラ画像（500fps）によるPTV（Particle Tracking Velocimetry）解析を行い、重錘表面に貼り付けた複数個のターゲットから重錘重心の3次元座標を求めた。この重心座標から重錘重心の軌跡、並進速度、角速度、衝撃力、運動エネルギーを算出した。なお、軌跡以外のデータは、生データに両側微分処理を施した後、7point（14ms）の移動平均処理を行い、データをスムージングした。

(2) 数値解析概要

図-4、表-4に解析概要および解析パラメータ一覧を示す。2D-DEMによる数値解析は既往の研究で用いられたモデル^[1]を参考に、土堤断面形状および基層部の寸法を実験時と同一にして実施した。解析パラメータの一つであるボンド強度は、既往実験より本実験で使用した土堤材料の限界自立高さ1.82m（図-5）を踏まえ、掘削解析^[3]により10.87MPaと設定した。重錘質量は実験と同等の貫入挙動を再現するため、密度が実験時と同一になるよう設定した。そして、本解析では同一の衝突条件における土堤内

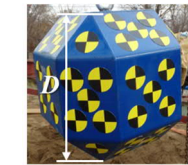
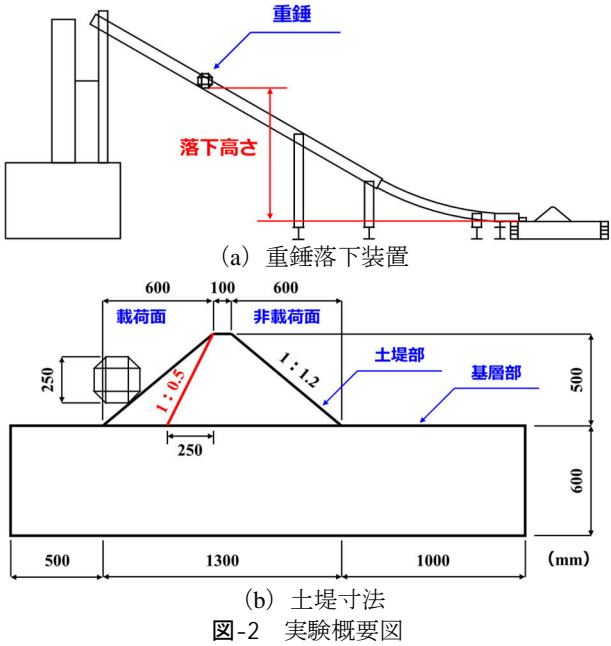


図-3 EOTA 型重錘

表-1 重錘諸元一覧

重錘径 (m)	重錘質量 (kg)	慣性モーメント (kg・m ²)
0.25	29.0	0.22

表-2 土質試験結果一覧

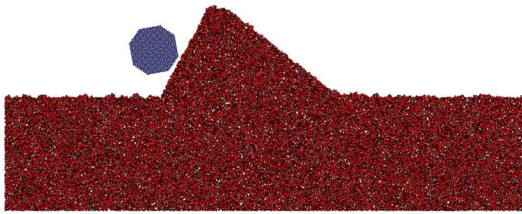
項目	単位	試験結果
地盤材料の分類名	-	細粒分質砂質礫
土粒子の密度	g/cm ³	2.639
50%粒径D ₅₀	mm	0.27
粒度	石分（75mm以上）	% 1.5
	礫分（2~75mm）	% 37
	砂分（0.075~2mm）	% 35.9
	シルト分（0.005~0.075mm）	% 22.1
	粘土分（0.005mm未満）	% 5
均等係数U _c	-	49.3

表-3 実験ケース一覧

実験ケース名	法面勾配	衝突速度(m/s)		衝突角速度 (rad/s)	重錘角度 (°)	実験結果
		水平方向	鉛直方向			
G1:1.2	1:1.2	6.01	-0.68	44.53	13	通過
G1:0.5	1:0.5	6.44	-0.77	17.53	18	捕捉



(a) N-G1:1.2



(b) N-G1:0.5

図-4 解析概要図

部の変形・破壊挙動を観察するため、いずれの法勾配についても表-5に示すG1:1.2の衝突時パラメータを用いた。表-5について、実験結果のスムージング処理による影響を考慮し、後述の実験結果における0ms時ではなく、重錘衝撃力が立ち上がる直前の時刻を衝突時パラメータとして設定した。また、ケース名は実験時のケース名の冒頭にN (Numerical Analysis) を加え、N-G1:1.2、N-G1:0.5とした。

3. 実験および数値解析結果

(1) 実験結果

図-6に土堤の載荷面側の法尻を原点とした重錘重心の軌跡図を示す。軌跡について、最大衝撃力時、最大貫入時、貫入終了時、最大到達高さ時、最大水平到達時を白抜き丸、塗りつぶし丸、塗りつぶし四角、白抜き三角、塗りつぶし三角のプロットでそれぞれ示す。また、土堤部について実線と破線で土堤の概形線と重錘の最大・最小半径分のオフセットラインを示す。図-6より、G1:1.2は重錘の土堤衝突後、法面の法線方向における貫入量14.5mmで最大貫入を迎えた。その後、法面から離れる方向に跳躍し、水平方向座標0.48mで最高到達高さ0.82mとなり土堤を通過した。G1:0.5は重錘の土堤衝突後、貫入量64.7mmで最大貫入を迎えた。その後、法面から反発する挙動を示し、水平方向座標0.05mで最高到達高さ0.66mとなり重錘は捕捉された。

図-7~9に重錘速度、重錘運動エネルギー、重錘衝撃力の時刻歴波形をそれぞれ示す。図-7について、水平速度、鉛直速度、合成速度を青線、緑線、黒線でそれぞれ示し、水平方向について土堤衝突時の重錘進行方向を正、鉛直方向について上向きを正とした。図-8について、線速度エネルギー、回転エネルギー、全運動エネルギーを赤線、青線、黒線でそれぞれ示す。図-9について、G1:1.2、G1:0.5をそれぞれ赤線、青線で示す。なお、各時刻歴波形は高速度カメラ画像から重錘が土堤に衝突した時刻を0msとし、重錘の貫入終了時 (G1:1.2、G1:0.5それぞれ36ms、92ms) までを示しているほか、貫入終了時までを図-6と同様にそれぞれプロットした。図-7より、両ケースともに重錘の土堤衝突直後、鉛直速度が増加、水平速度が減少した。一方、貫入終了時の水平速度に着目すると、G1:1.2は1.99m/s、G1:0.5は-0.22m/sであった。これは衝突時の水平速度に対してG1:1.2は66.9%、G1:0.5は103.4%の水平速度減少率であり、G1:0.5の方が36.5%大きかった。次に図-8より、G1:1.2は重錘の土堤衝突直後、線速度エネルギーと回転エネルギーともに減少傾向にあるが、G1:0.5は線速度エネルギーが大幅に減少した一方で、回転エネルギーは最大貫入時程度まで増加していることが分かる。また、最大貫入時および貫入終了時の全運動エネルギーを比較する。G1:1.2について、最大貫入時および貫入終了時の全運動エネルギーはそれぞれ0.41kJ、0.34kJであり、土堤衝突時の全運動エネルギー0.75kJに対しそれぞれ45.3%、54.7%減少した。一方、G1:0.5について、最大貫入時および貫入終了時の全運動エネルギー0.30kJ、0.08kJは土堤衝突時の全運

表-4 数値解析パラメーター一覧

パラメータ	記号 (単位)	設定値	備考
最大粒径 D_{max}	D (m)	0.00839	重錘径(0.5m)の $1/(20\sqrt{2})$
最小粒径 D_{min}		0.00442	最大粒径の1/2
平均粒径 D_{50}		0.006295	-
粒子形状	非円形 (三角形配置)	-	-
オーバーラップ率	%	50.0	-
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2650	-
法線方向ばね定数	k_n (N/m)	1.0×10^7	-
接線方向ばね定数	k_t (N/m)	2.5×10^6	法線方向の1/4
粒子間摩擦角	ϕ_s (deg.)	25	粒子間摩擦係数0.466
減衰定数	h	1.0	-
初期粒子発生密度	-	0.15	porosity
堆積時粒子間摩擦係数	(deg.)	54.5	粒子間摩擦係数1.4
ボンド法線方向ばね定数	k_n (N/m ²)	2.3×10^9	法線方向ばね定数/ボンド直径
ボンド接線方向ばね定数	k_t (N/m ²)	5.7×10^8	接線方向ばね定数/ボンド直径
ボンド直径	D_b (m)	0.00442	最小粒径と同じ
ボンド強度	s_b (Pa)	10.87×10^6	限界自立高さ1.82m

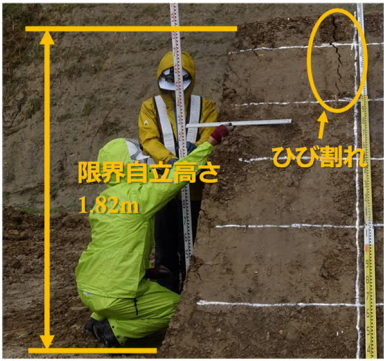


図-5 限界自立高さ計測時の様子

表-5 数値解析ケース一覧

解析ケース名	水平速度 (m/s)	鉛直速度 (m/s)	角速度 (rad/s)	重錘角度 (°)
N-G1:1.2	6.10	-0.75	45.57	13
N-G1:0.5				

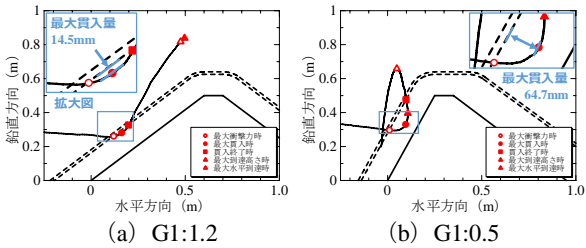


図-6 重錘重心の軌跡図

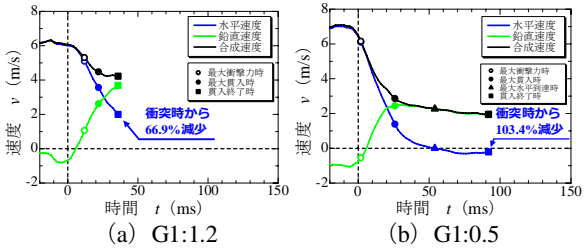


図-7 重錘速度の時刻歴波形

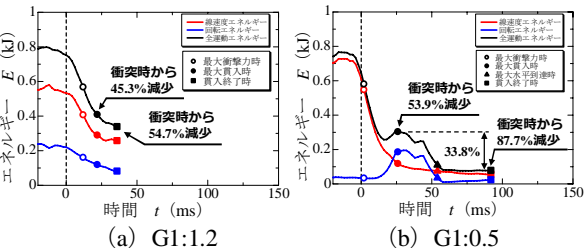


図-8 重錘運動エネルギーの時刻歴波形

動エネルギー0.65kJに対し、それぞれ53.9%, 87.7%減少した。これより、G1:0.5はG1:1.2と比較して、最大貫入時において8.6%, 貫入終了時において33.0%エネルギー減少率が大きいことが分かる。さらに、最大貫入時における線速度エネルギーはG1:1.2で0.29kJ, G1:0.5で0.12kJであった。これは衝突時の線速度エネルギー (G1:1.2で0.53kJ, G1:0.5で0.61kJ) に対しそれぞれ45.3%, 80.3%の減少率であり、35.0%の差が見られた。これより、最大貫入時については線速度エネルギーに着目することで、エネルギー減少率の差が確認された。次に図-9より、G1:1.2は重錘の土堤衝突から12ms後に3.25kN, G1:0.5は2ms後に5.93kNの最大衝撃力が計測され、G1:0.5の方が約1.8倍大きかった。

(2) 数値解析結果

図-10に重錘重心の最大到達高さ時までの軌跡図を示す。図-10より、N-G1:1.2は重錘の土堤衝突後、貫入量21.2mmで最大貫入を迎えた。その後、法面を駆け上がる挙動を示し土堤を通過した後、水平方向座標1.28mで最大到達高さ0.88mとなった。N-G1:0.5は重錘の土堤衝突後、貫入量77.9mmで最大貫入を迎えた。その後、法面に貫入したまま駆け上がる挙動を示し土堤を通過した後、水平方向座標0.53mで最高到達高さ0.85mとなった。

図-11~13に重錘並進速度、重錘運動エネルギー、重錘衝撃力の時刻歴波形をそれぞれ示す。なお、各図の凡例は図-7~9と同様である。図-11より、実験結果と同様に重錘の土堤衝突直後における鉛直速度の増加、水平速度の減少が見られた。貫入終了時の水平速度について、N-G1:1.2は3.10m/s, N-G1:0.5は1.37m/sであり、これは重錘の土堤衝突時における水平速度6.10m/sに対してN-G1:1.2は49.2%, N-G1:0.5は77.5%の水平速度減少率となった。次に図-12より、いずれの法勾配についても重錘の土堤衝突直後、線速度エネルギーと回転エネルギーが減少した。重錘の土堤衝突時に対する最大貫入時の全運動エネルギー減少率はN-G1:1.2で43.1%, N-G1:0.5で56.3%であった。また、貫入終了時についてはN-G1:1.2で57.2%, N-G1:0.5で82.9%であり、全運動エネルギー減少率は実験結果と同様、N-G1:0.5の方が大きい結果となった。次に図-13より、N-G1:1.2は重錘の土堤衝突から5ms後に5.42kN, N-G1:0.5は9ms後に8.39kNの最大衝撃力が計測され、実験結果と同様、N-G1:0.5の方が最大衝撃力は約1.5倍大きい結果となった。

図-14~16に各法勾配における最大貫入時と貫入終了時の土堤断面図、応力分布図、粒子速度図をそれぞれ示す。図-14について、载荷中の土堤内部の変状を観察しやすくするため、格子状に粒子を着色した。図-15について、応力分布図における応力は平均主応力を表している。また、N-G1:1.2について、最大貫入時には既に土堤部および基層部に応力が伝播していたため、貫入初期の応力伝播挙動を観察する目的で、貫入初期における応力分布図も併せて示す。これより、重錘の土堤衝突後、N-G1:1.2では重錘接触部から法面の法線方向を主とする放射状の応力伝播が見られた。N-G1:0.5では、重錘接触部を中心に天端から基

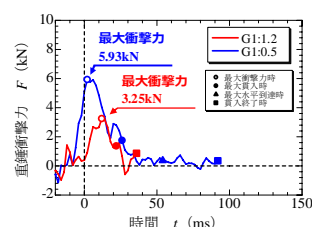
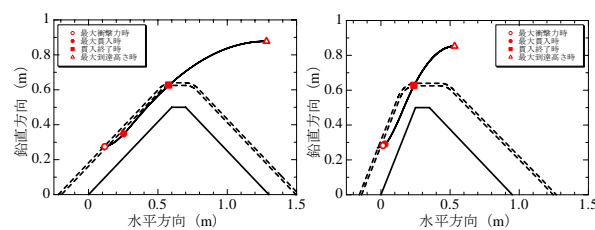
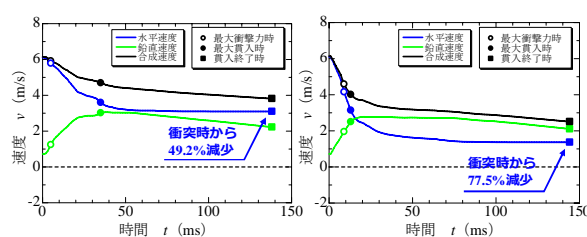


図-9 重錘衝撃力の時刻歴波形



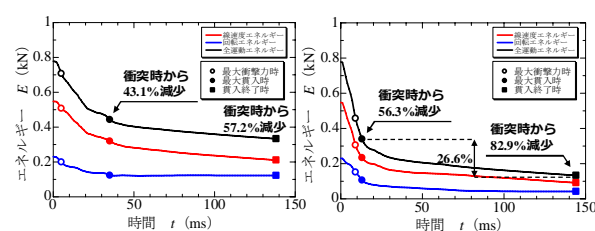
(a) N-G1:1.2 (b) N-G1:0.5

図-10 重錘重心の軌跡図



(a) N-G1:1.2 (b) N-G1:0.5

図-11 重錘速度の時刻歴波形



(a) N-G1:1.2 (b) N-G1:0.5

図-12 重錘運動エネルギーの時刻歴波形

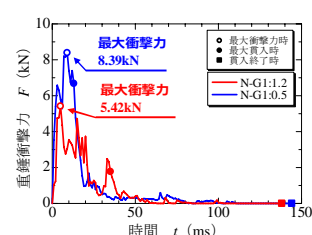


図-13 重錘衝撃力の時刻歴波形

層付近にまで及ぶ広域な放射状の応力伝播が確認され、さらにコンター図よりN-G1:0.5の方が赤系のコンターが見られ、土堤内部に大きな応力が発生していることが分かる。次に両ケースの最大貫入時に着目する。図-14(a)よりN-G1:1.2では重錘接触部近傍の着色粒子が僅かに細くなっている。この変形について、図-16(a)の速度分布図を見ると、この付近の粒子のみが赤いコンターを示し、水平右方向のベクトルを示したことから、载荷点近傍において圧縮変形が発生したことが読み取れる。一方、N-G1:0.5では図-14(b)より载荷点近傍の着色粒子が弓なりに

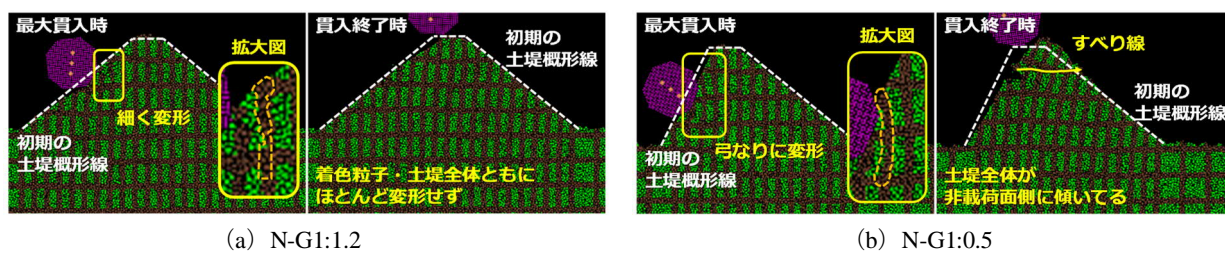


図-14 土堤断面図

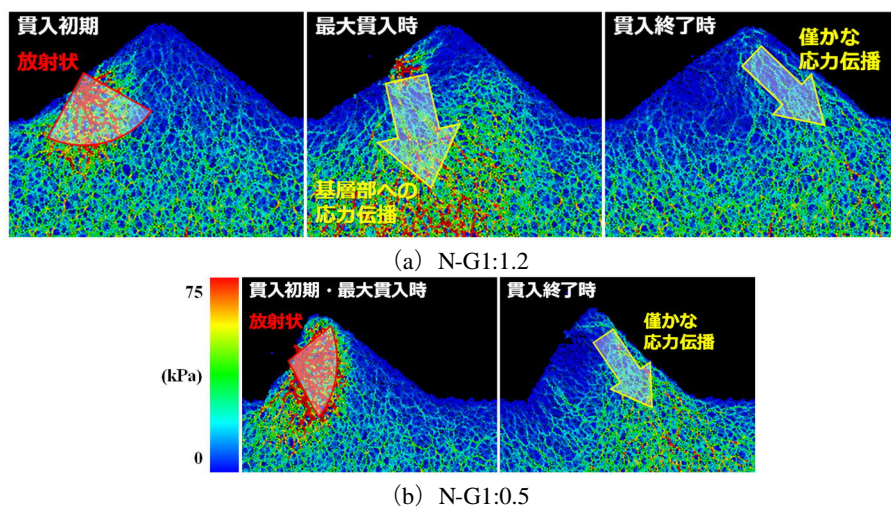


図-15 応力分布図

変形していることが分かる。そこで図-16(b)を見ると、重錘接触部近傍は赤色、その周辺部は黄色や緑色のコンターを示しており、変位に速度差が見られることから、せん断変形の発生が読み取れる。次に、貫入終了時に着目する。図-14(a)よりN-G1:1.2では着色粒子の変形および土堤全体の変形はほとんど見られず、図-15(a)より重錘が土堤から離れた箇所から僅かに応力が土堤内部に伝播する程度であった。一方、N-G1:0.5では図-14(b)より土堤全体が非載荷面側に傾くような変形が見られたほか、天端付近における横方向の着色粒子近傍から非載荷面に繋がるすべり線の形成が確認され、天端付近が土塊として押抜かれた。したがって、貫入終了時までの土堤内部の損傷は、N-G1:1.2と比較してN-G1:0.5の方が大きかったと言える。

なお、N-G1:1.2における重錘通過後の水平変位が実験結果よりも大きいことや、N-G1:0.5における重錘が捕捉されなかったことについて、2D-DEMでは土堤延長方向への応力分散や粒子の移動・変形が考慮されないため、実験時よりも衝撃力が大きくなり、エネルギー吸収効果が十分に発揮されなかったためと考える。したがって、2D-DEMにおける実験時の最大貫入量以降の重錘挙動の再現精度については別途検討を実施する。

4. 考察

(1) 土堤の法勾配が落石捕捉性能に及ぼす影響

実験結果より、同程度の衝突条件下においてG1:1.2は重錘が通過、G1:0.5は重錘を捕捉した結果が得られた。また、解析結果ではいずれの法勾配においても重錘は通過した

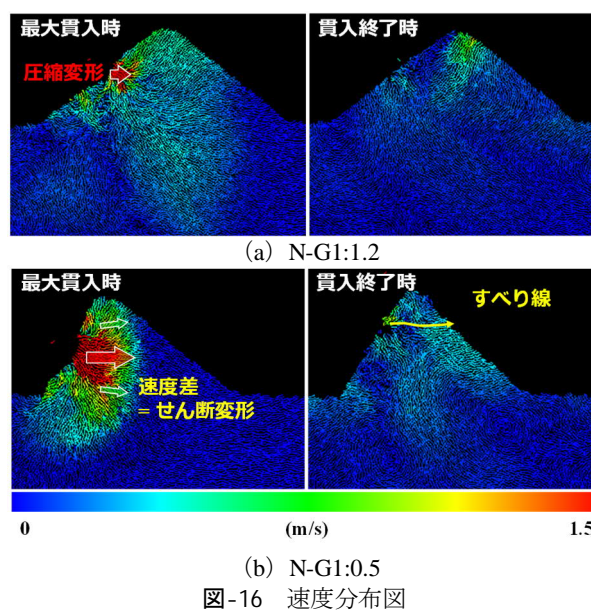


図-16 速度分布図

が、N-G1:0.5において重錘の水平方向の運動が抑制されていることが確認された。これより、土堤法面の急勾配化は土堤の落石捕捉性能の向上に寄与すると考え、その要因を考察する。実験および解析結果より、土堤法面の急勾配化により、重錘運動エネルギーの減少率が増大し、また土堤内部のせん断変形および土堤全体での変形が促進されることが明らかとなった。ここで、図-14(b)より最大貫入時までは土堤全体での変形はほとんど見られず、衝突部周辺のせん断変形が主な変形挙動として観察されたことから、土堤のエネルギー吸収の観点において、最大貫入時

までは衝突部周辺のせん断変形が要因の一つであることが推測される。また、図-8(b)と図-12(b)より最大貫入時から貫入終了時までには、実験結果では33.8%、解析結果では26.6%の重錘運動エネルギーが減少し、この間に土堤全体の変形が観察された。したがって、最大貫入以降は土堤全体の変形が重錘運動エネルギーを吸収する要因の一つであることが推測される。N-G1:1.2ではこのような衝突部周辺のせん断変形および土堤全体の変形がほとんど観察されなかったことから、G1:1.2では最大荷重時までに45.33%、貫入終了までに54.67%のエネルギー吸収に留まり、残存エネルギーによって重錘が土堤を通過したと解釈できる。

次に、このような衝突部周辺のせん断および土堤全体の変形に伴う土堤のエネルギー吸収性能に寄与する要素として重錘貫入量を挙げる。本実験および解析の結果、法勾配1:0.5の方が土堤への重錘貫入量が大きいことが分かった。貫入量が大きくなることで、衝突部周辺のせん断変形および土堤全体の変形を促進させ、土堤のエネルギー吸収性能が向上すると考えられる。また、重錘貫入量は土堤法面に対する重錘の衝突角度が影響すると考える。これは、土堤法面に対する重錘の衝突角度が大きくなるほど、土堤法面の法線方向における衝撃力の分力が大きくなり、土堤内部に重錘の衝突エネルギーが伝播しやすくなる。すると、土堤内部にせん断変形を発生させやすくなり、土堤内部への重錘の貫入が促進されたと考えられるためである。実際に、土堤衝突時における重錘の合成速度と土堤法面とのなす角を計測すると、G1:1.2は46度、G1:0.5は70度であった。以上より、土堤法面を急勾配化させることで、衝突角度の増加に伴い土堤への重錘貫入量が大きくなるため、土堤内部のせん断および土堤全体の変形が促進される。その結果、土堤のエネルギー吸収性能および落石捕捉性能が向上したと考えられる。

(2) 土堤の法勾配が耐荷性能に及ぼす影響

前節より、土堤が重錘運動エネルギー吸収し、重錘を捕捉するためには、土堤内部のせん断変形および土堤全体の変形が重要であることが明らかとなった。一方で、土堤法面の急勾配化により、土堤に作用する衝撃力は実験結果では約1.8倍、解析結果では約1.5倍に増大し、図-15(b)から土堤全体への大きな応力伝播、図-14(b)から土堤全体の変形・土堤内部のすべり線の形成が確認された。ここで、既往研究^[4]より、土堤内部におけるすべり線を伴う押抜きせん断破壊は、土堤が大きく損傷し、耐荷性能が減少していることを示す一つの指標であると言える。つまり、同一の落石外力に対し、法勾配1:1.2では損傷が小さく特段の補修を必要としないものの、法勾配1:0.5では土堤が大きく損傷し、土堤の再構築などが必要となる可能性が示唆された。以上より、土堤法面の急勾配化は土堤の落石捕捉性能を向上させる一方で、想定外の落石外力や繰返し落石作用に対する脆弱性が懸念されるため、法面を急勾配化した土堤の耐荷性能については別途検討を実施する。

さらに、急勾配化した土堤については、その長期耐久性

を考慮し、土堤法面へのソイルセメントなどを用いた補強が必要である。このとき、落石外力に対するソイルセメントの損傷によるエネルギー吸収効果の発現が期待される。そのため、今後は載荷面側にソイルセメント補強を施した実規模土堤に対する回転式重錘衝突実験を実施し、ソイルセメントが土堤の重錘捕捉性能および土堤耐力に及ぼす影響についても検討する。

5. まとめ

本研究は落石防護土堤の載荷面側における法勾配が落石捕捉性能に及ぼす影響の把握を目的に、実規模の1/4スケールを想定した縮小模型に対する回転式重錘衝突実験を実施した。また、法面の急勾配化が土堤内部の変形破壊挙動に及ぼす影響の把握を目的に2D-DEMによる解析的検討を実施した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 土堤法面の急勾配化により、重錘の落石捕捉性能が向上した。これは土堤法面への重錘の衝突角度が大きくなることで、重錘の土堤への貫入および土堤の変形を促進させ、土堤のエネルギー吸収性能が向上するためであると考えられる。
- 2) 実験および数値解析の結果、土堤のエネルギー吸収性能には衝突部周辺のせん断変形および土堤全体の変形が寄与することが明らかとなった。
- 3) 実験および数値解析の結果、土堤法面の急勾配化は重錘衝撃力を増大させ、土堤内部の広範囲に大きな応力を発生させることが分かった。また、解析結果よりN-G1:0.5のみ、すべり線の形成が確認された。以上より、土堤法面の急勾配化は土堤の落石捕捉性能を向上させる一方、土堤の耐荷性能を低減させる可能性が示唆された。

謝辞

本研究の成果の一部は、国土交通省・令和6年度「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の委託研究、科学研究費(研究課題23H01501)の援助を受けたものである。末筆ながら深謝の意を示します。

参考文献

- [1] 前田ら：二次元個別要素法を用いた落石による水平堆積層の衝撃力伝達挙動，土木学会論文集A2（応用力学），Vol.67, No.2, pp.355-364, 2011.
- [2] 松尾ら：落石防護土堤の落石捕捉性能把握を目的とした模型実験及び数値解析，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.75, No.2, pp.389-400, 2019.
- [3] 内藤ら：落石防護土堤の耐衝撃性能に及ぼす粘着力の影響に関する個別要素法解析，計算工学講演会論文集，Vol.22, 2017.
- [4] 近藤ら：載荷履歴を有する落石防護土堤の重錘衝突による破壊挙動と損傷度評価，構造工学論文集，Vol.71A, 2025.