

落石防護土堤の破壊メカニズム解明に向けた小型・中型静的実験と二次元 DEM 解析

Small and middle-scale static model test and 2D-DEM of rockfall protective soil embankment for destruction mechanism clarification

近藤慶亮¹, 前田健一², 木村絢³, 小栗快之⁴, 中村拓郎⁵, 海部友和⁶, 内藤直人⁷

1 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム・k.kondo.690@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学大学院教授・高度防災工学センター

3 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム

4 名古屋工業大学大学・社会工学科環境都市分野

5 土木研究所寒地土木研究所

6 構研エンジニアリング

7 豊橋技術科学大学

概 要

近年我が国では自然災害の激甚化により落石災害の発生リスクが高まっており、落石対策の合理化が求められている。落石対策工のひとつである落石防護土堤は、土を台形上に盛土した構造物である。土のみで施工されるため、施工性、経済性、維持管理性に優れる。しかし、現在の設計法では土堤の性能評価が明確にされていない。本稿では、設計法確立に向け、土堤の基本的な破壊メカニズムとスケール効果を把握するために、小型（実規模の 1/4 スケール）・中型土堤（実規模の 1/2 スケール）への静的載荷実験を行った。載荷終了後の土堤断面から、土堤内部では受働崩壊が発生していることが示唆された。また、本稿では最大荷重についても比較した。さらに、二次元個別要素法において、実験と同様に小型・中型土堤への静的載荷実験を行うと、本稿に用いた解析モデルは実験の最大荷重と終局荷重を概ね再現した。

キーワード：落石，落石防護土堤，二次元 DEM，静的載荷実験，スケール効果

1. はじめに

我が国は、国土の約 7 割が山岳地帯である。そのため、山岳地帯にも道路や鉄道などの交通インフラが整備されており、これらは人々の生活にはなくてはならない存在である。しかし、近年の気候変動に伴う集中豪雨等の災害の激甚化・頻発化により落石災害が多発している上に、落石発生箇所・落石外力が増加し落石災害に対するリスクが高まっている。以上のことから、落石対策工の対応可能エネルギーの拡大や施工性・維持管理性に優れた合理的な落石対策工の実施が求められている。

ここで、落石対策工の一つとして落石防護土堤（以下、単に土堤と示す）が挙げられる。土堤は土のみで構成され、設定スペースさえあれば現地発生土の流用も可能であり、経済性、施工性、維持管理性に優れた落石対策工とされている。しかし、落石対策便覧¹⁾には土堤のエネルギー吸収のメカニズムやその効果については示されているが、その定量的な評価はなされていない。また、土堤の形状寸法についても 1 つの研究例が示されているのみであり、落石外力や土堤材料の影響が考慮されたものにはなっていない

のが現状である。

そこで、本稿では落石防護土堤の性能設計法確立に向け、土堤の基本的な破壊メカニズムとスケール効果を把握するために、実規模の 1/4 スケールの土堤（以下、小型土堤）・実規模の 1/2 スケールの土堤（以下、中型土堤）への静的載荷実験を行った。さらに 2 次元個別要素法（Discrete Element Method, 以下 2D-DEM と略す）を用いて再現解析を行い、解析モデルの妥当性を検討した。

2. 実験概要

本研究では高さ 0.5m の土堤を対象とした小型土堤実験²⁾及び高さ 1.0m の土堤を対象とした中型土堤実験を実施した。小型土堤実験では重錘形状を変化させ、重錘形状及び土堤形状の違いによる破壊形態及び荷重挙動への影響についての検討を行った。さらに、中型土堤実験と既往研究における小型土堤実験²⁾の一部と比較検討した。

2.1 小型土堤実験

図 1 に実験概要図を示す。土堤部及び基礎部は、表 1 に

示す物性値の砂を用いて基礎部と実規模の1/4スケールを想定した土堤部で構成される縮尺模型とした。表2に実験ケースの一覧を示す。表中のケース名については記号が重錘形状、数字が土堤法面勾配を示している。土堤勾配は落石対策便覧に記載される一般値1:1.0~1:1.5を目安に、1:1.0を1ケース、1:1.5を2ケースとした。土堤部は、高さ0.50m、天端幅0.25m、底面幅1.75mもしくは1.25mの左右対称の台形状とした。土堤模型延長は全9.00mであり、一つの実験に対して影響範囲が延長3.00m程度と仮定し、3.00m毎に荷重を作用させている。基礎部は、高さ0.90m、幅2.75mの断面とした。試験体の構築に際して、基層部は厚さ0.30m毎に、土堤部は0.25m毎に砂を敷き均し、振動締め機を使用して成形した。重錘は球体とEOTA型³⁾の2種類を使用した。質量はどちらも54kgである。直径は球体が0.318m、多面体が0.285mである。本実験は、重錘に接続した油圧ジャッキにより、土堤に載荷速度0.5mm/sで水平荷重を作用させた。荷重作用高さは重錘重心を土堤底面から0.25mの高さに設定した。

2.2 中型土堤実験

図2に実験概要図を示す。土堤部及び基礎部は、表1に示す物性値の砂を用いて基礎部と実規模の1/2スケールを想定した土堤部で構成される縮尺模型とした。土堤勾配は、2019年度実規模実験⁴⁾と同様に1:1.2になるように構築した。この法勾配は以下を基に設定した。1)落石対策便覧に記載される一般値1:1.0~1:1.5を目安とすること、2)今回の土堤実験にて得られた材料試験結果を用いた盛土安定計算においてすべり安全率1.2を確保可能な勾配とすること、である。土堤部は、高さ1.00m、天端幅0.20m、底面幅2.60mの台形状とし、延長は4.60mとした。基礎部は、高さ0.60m、幅4.10mの断面で、延長6.60mとした。基礎部はコンクリート基礎の上に山留材を配置して砂を充填し、土堤部はその上に構築した。試験体の構築に際して、基層部は厚さ0.30m毎に、土堤部は0.25m毎に砂を敷き均し、振動締め機を使用して成形した。実験では一辺の長さ0.50m、質量234.5kgのEOTA型重錘を使用した。本実験は、重錘に接続した油圧ジャッキにより、土堤に載荷速度0.5mm/sで水平荷重を作用させた。荷重作用高さは重錘重心を土堤底面から0.50mの高さに設定した。ここで、小型・中型土堤実験では類似した砂を用いている。

2.3 計測項目

小型土堤実験、中型土堤実験共に測定項目はロードセルによる載荷荷重、ワイヤ式変位変換器による水平方向の重錘貫入量、ビデオカメラによる土堤変状計測及び土堤載荷点内部に埋設した着色砂による土堤断面変状である。ただし、小型土堤実験における着色砂は近い箇所での変形を判別しやすくする目的で、砂と同じ素材で黒色と白色の2色を使用し、中型土堤実験では土堤に用いた砂とは別素材の白砂を使用した。

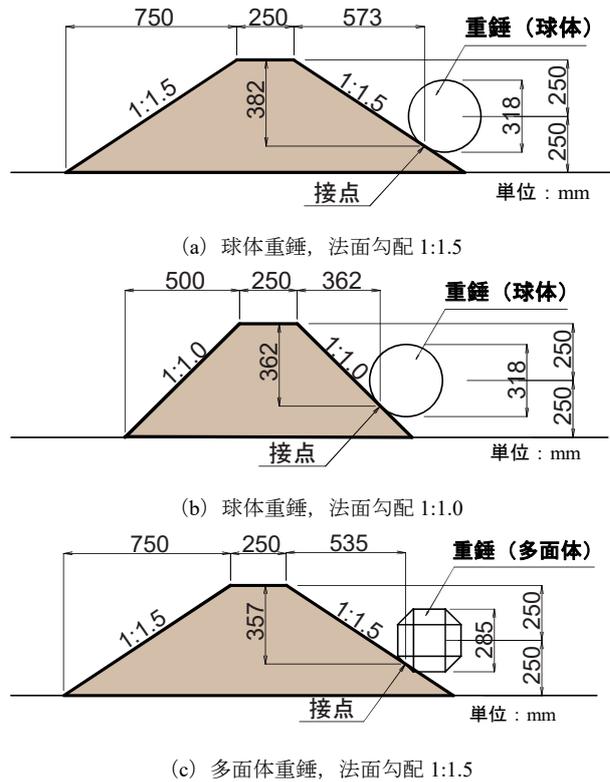


図1 小型土堤実験概要図

表1 材料試験結果一覧

地盤材料：砂		小型土堤	中型土堤
項目	単位		
土粒子の密度	(g/cm ³)	2.58	2.69
60%粒径 D_{60}	(mm)	0.37	0.28
均等係数 U_c	-	2.15	1.83
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	(g/cm ³)	1.59	1.41
最適含水比 w_{opt}	(%)	20.80	25.4
内部摩擦角 ϕ	(°)	36.50	34.70
粘着力 C	(kN/m ²)	0.75	6.60
平均含水比	(%)	10.01	9.5

表2 小型土堤実験ケース一覧

ケース名	載荷方法	地盤材料	土堤勾配	重錘形状
S-1.5	静的載荷	砂	1:1.5	球体
S-1.0			1:1.0	球体
P-1.5			1:1.5	多面体

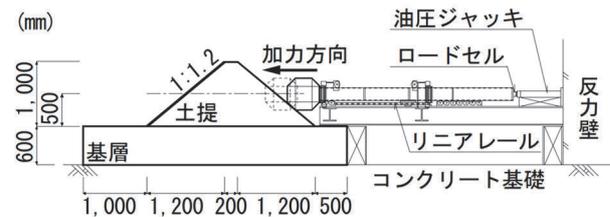


図2 中型土堤実験概要図

3. 実験結果及び考察

3.1 土堤断面変状

(1) 小型土堤実験

図 3 に荷重終了時の荷重面及び非荷重面の様子を、図 4 に荷重終了時の土堤断面変状を、図 5 に各ケースにおける貫入量の時刻歴分布を示す。なお、図 3 内の実線はひび割れを、破線は非荷重面から見た押抜き土塊を示している。図 4 について、土堤内部に埋設した着色砂は土堤中央部を C とし、それぞれ左右に F, R とした。また、アルファベットに隣接する数字は中央に近い着色砂から順に 1~4 とした。せん断していた着色砂の箇所を実線で示し、せん断から予想したすべり線を破線で示す。また、S-1.0 では、一部の領域は土堤の開削時に崩れてしまい計測を行うことができなかった。いずれのケースでも重錘が土堤に貫入し、荷重面及び土堤天端にひび割れが発生していた。また、全ケースでその後非荷重面に押抜き破壊が発生していた。押抜き破壊の範囲を比較すると、S-1.0 は他の 2 ケースよりも押抜き破壊の範囲が大きくなっている。この結果は既往の研究⁹⁾で得られている結果にも一致しており試験体による誤差ではないと考えられる。この原因として、S-1.0 では荷重を受ける法面が急勾配であるため、緩勾配となっている他の 2 ケースよりも荷重時の法面の法線成分荷重が大きくなるのが原因だと考える。

図 4 に示した着色砂の変形に着目すると、S-1.5 では着色砂 F4 の重錘接触箇所付近がお椀型に変形しており、また、着色砂のせん断を結んだ想定滑り線は重錘から非荷重面の中腹へ抜ける位置に発生しているものと考えられる。

S-1.0 では、着色砂 F2 において、土堤内の着色砂の位置が支持基層内の着色砂よりも非荷重面側にずれていた。このことから、着色砂による計測箇所以外でせん断もしくは曲げが発生していたと考えられる。また、着色砂のせん断を結んだ想定滑り線は重錘から非荷重面の法尻に抜けるように発生していると考えられる。

P-1.5 では上の 2 ケースで見られたお椀型の変形が見られなかった。着色砂のせん断を結んだ想定すべり線は重錘から非荷重面の上部に向かって抜けていると考えられる。

また、S-1.0 のみ想定すべり線が法尻に抜けたことに関しては前述の通り、他の 2 ケースに比べて法面の法線成分荷重が大きいため、すべり線の方向が下向きになり、加えて底面幅が小さいことに起因したと考えられる。

(2) 中型土堤実験

図 5 に荷重終了時の荷重面及び非荷重面の様子を、図 6 に荷重終了時の土堤断面変状を示す。なお、断面の崩壊を防ぐために、掘削は天端より徐々に行っており、図 6 は、掘削中に定点カメラで撮影した画像を重ね合わせたものである。また、図 5 内の破線は非荷重面から見た押抜き土塊を示している。図 6 はせん断していた着色砂の箇所と荷重方向を正とし黄色矢印で示し、せん断から予想したすべり線を白色破線で示す。さらに、荷重前と荷重終了後の

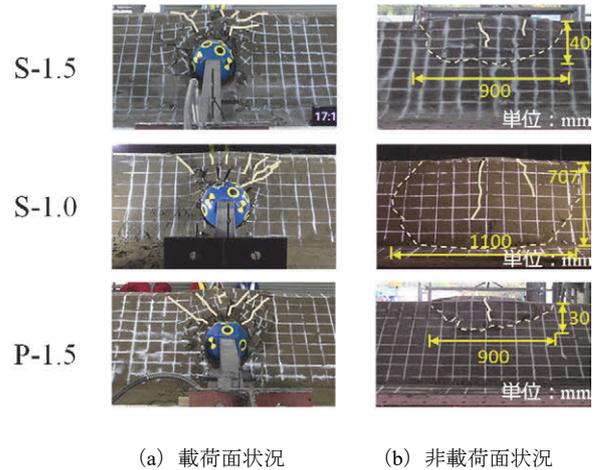
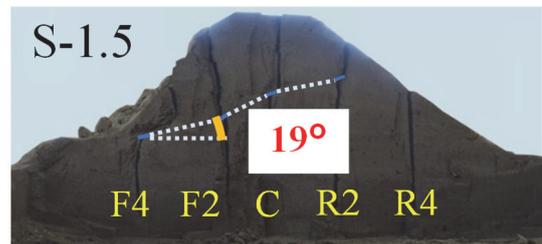
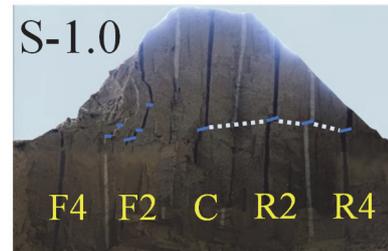


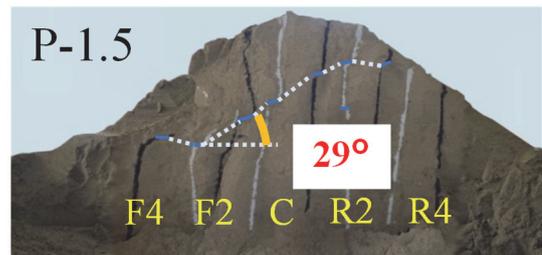
図 3 荷重終了時の土堤法面の様子 (小型土堤実験)



(a) S-1.5

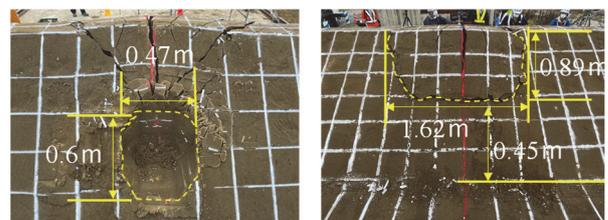


(b) S-1.0



(c) P-1.5

図 4 荷重終了時の土堤断面変状 (小型土堤実験)



(a) 荷重面状況 (b) 非荷重面状況

図 5 荷重終了時の土堤法面の様子 (中型土堤実験)

重錘位置を赤線で構築した図で示す。

図 5 について、載荷面では重錘上部から斜め 45° 上方にひび割れが進展しており、土塊の中央部には縦方向のひび割れも観察された。非載荷面では、載荷点である土堤高さ 1/2 の位置付近より上方で土塊の形成が認められ、土塊の幅は土堤部の延長方向に 1.62m 程度であった。

図 6 について、非載荷面のひび割れにつながる想定すべり線は、載荷面から土堤中央部まで概ね水平方向に進展し、その後天端方向に進展して非載荷面でひび割れが発生したと考えられる。まず青枠部では、着色砂の間隔が狭くなっていることから、重錘の貫入に抵抗しきれず土堤が真横にずれたと考える。また赤枠部では、想定すべり線と水平方向とのなす角が約 23° であった。これは、今回用いた砂材料の内部摩擦角 $\phi=35^\circ$ より求めた受働崩壊角 ($45^\circ - \phi/2$) が約 28° と近い値を取ったことから受働崩壊によって想定すべり線が斜めに進展したと考える。ここで、小型土堤について確認すると、押し抜きせん断が土堤下部に抜けた S-1.0 を除いて他 2 ケースは右斜め上方にすべり線が進展している。各すべり線の水平方向とのなす角は S-1.5 は約 19°、P-1.5 は約 29° であった。当実験で用いた砂材料の内部摩擦角は 37° であり、受働崩壊角は 27° となり、P-1.5 については受働崩壊角と実験結果のすべり線と水平方向とのなす角に近い値となった。

以上より、多面体重錘で載荷した時は受働崩壊が生じたことが示唆されたが、球体重錘では受働崩壊角よりも若干小さい値を取った。これは、多面体重錘は主載荷面が鉛直のため水平に砂を押しことから、受働崩壊角に近い値を取ったのに対し、球体重錘だと主載荷面は無く球状であることから中心より下方は斜め下方向に砂を押しするため、受働崩壊角よりも小さい値を取ったと考える。

3.2 荷重貫入量曲線の比較

図 7 に小型土堤実験及び中型土堤実験における荷重貫入量曲線を示す。横軸に貫入量 (m)、縦軸に載荷荷重 (kN) をとり、プロットにてそれぞれの最大荷重点を示す。また、表 3 に図 7 でプロットした点の貫入量と荷重を示す。

まず、小型土堤実験での法勾配と重錘形状による影響を考える。法勾配について S-1.0 の最大荷重は 5.99kN、S-1.5 は 8.53kN で緩勾配の方が 2.54kN 大きい値を取ることが分かった。これは、土堤の法面が急勾配になると法面の接線方向への荷重が小さくなり、法線成分への荷重が大きくなるため緩勾配の場合よりも荷重が効率よく作用するためだと考える。このことから、法勾配が急になると最大荷重が大きくなることが分かった。

次に、重錘形状について P-1.5 の最大荷重は 5.71kN で S-1.5 に比べて 2.82kN 小さい値を取った。図 7 から多面体重錘では球体重錘よりも荷重の立ち上がりが緩やかになっている。このことから多面体重錘は球体重錘よりも貫入する際に抵抗を受けづらいと考える。また、図 7 の S-1.0 と S-1.5 を比較すると、荷重の立ち上がりは同程度になっていることから、荷重の立ち上がりには重錘形状が影響す

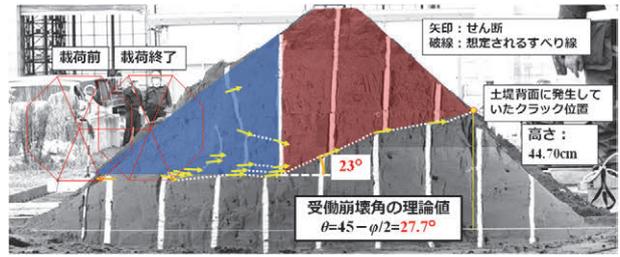


図 6 載荷終了時の土堤断面変状 (中型土堤実験)

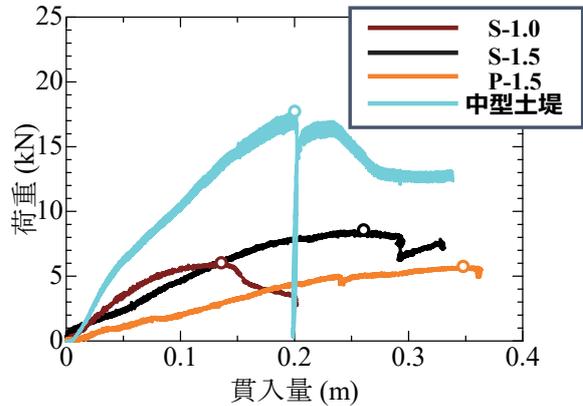
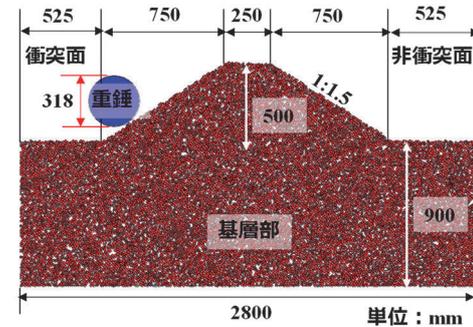


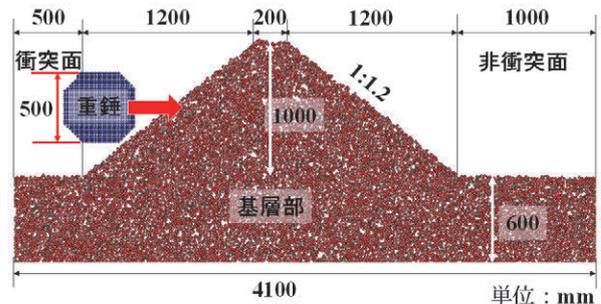
図 7 荷重貫入量曲線 (小型・中型実験での比較)

表 3 図 7 における荷重及び貫入量の比較

		小型土堤			中型土堤
		S-1.0	S-1.5	P-1.5	
最大荷重時	荷重 (kN)	5.99	8.53	5.71	17.69
	貫入量 (m)	0.14	0.26	0.35	0.20



(a) 小型土堤



(b) 中型土堤

図 8 解析モデル

ることが示唆された。このことから、重錘形状は多面体に比べて球体の方が最大荷重が大きくなるのが分かった。

さらに、中型土堤実験と P-1.5 の最大荷重を比較する。中型土堤実験での最大荷重は 17.69kN で P-1.5 の最大荷重の約 3.1 倍の値を取った。上記より、勾配が 1:1.0~1.5 の間では土堤の法面が急勾配であるほど最大荷重は大きい値を取るから、中型土堤が 1.5 割勾配だった場合には、1.2 割勾配の土堤を用いた実験結果の最大荷重 17.69kN よりも大きな値を取ることが予想される。したがって、1.5 割勾配の中型土堤の最大荷重は P-1.5 の小型土堤の最大荷重の 3.1 倍以上になると考える。仮に最大荷重がすべり面の面積に比例するとすれば、中型土堤の法面を緩くしたときに小型土堤の最大荷重の 4 倍未満となれば、小型土堤と中型土堤にはスケール効果があると言えるため、今後スケール効果についてさらなる検討を行いたい。

4. 数値解析及び考察

図 8 に 2D-DEM による小型土堤実験 (S-1.5) 及び中型土堤実験の再現解析の解析モデルを示す。解析モデルは共に実験時の寸法から設定した。また、表 4 の解析パラメータは既往研究⁹⁾を参考に設定し、粒子直径は最大粒径が重錘直径の 1/10 以下が望ましいとした既往研究⁹⁾を参考に、計算コストを考慮し、最大粒径は中型土堤実験結果の静的荷重を表現可能な重錘直径の $1/(20\sqrt{2})$ 、最小粒径は最大粒径の半分とした。なお、粒径を小さくすると同一体積中の粒子数が増加し、土堤全体として剛性が低下するために土堤内の局所的な変形・破壊モードの再現性が向上することがわかっている。また、解析上で粘着力を表すボンド強度を設定するため、表-1 に示す解析パラメータで掘削解析⁶⁾を実施し、自立高さとの関係を算出した。これに加え、図 9 に示すように、中型土堤実験での土堤の限界自立高さが 1.0m であったことを踏まえ、ボンド強度を設定した。小型土堤実験についても類似した砂材料を用いていることから、同一のボンド強度に設定した。

4.1 荷重貫入量曲線の比較

図 10 に小型土堤実験とその解析及び中型土堤実験とその解析の計 4 種類における荷重貫入量曲線を示す。小型・中型ともに白抜きプロットで示す最大荷重の大きさは概ね一致し、中型土堤に関しては最大荷重発生以後に荷重が下がり、一定値で推移する際の荷重である終局荷重についても概ね再現していることが確認された。荷重での再現性が確認できた中型の同モデルを用いて、以下中型土堤の変形破壊挙動について考察する。

4.2 中型土堤における土堤の変形破壊挙動の把握

図 11 に中型土堤の解析結果における荷重の時刻歴分布図を示し、図 12 は図 11 中に赤プロットで示した時刻における土堤断面図を示す。図 12 に示す土堤断面図は実験時に埋設した着色砂の配置を参考に格子状に粒子を着色

表 4 解析パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	設定値
最大粒径 D_{max}	D (m)	0.01768
最小粒径 D_{min}		0.00884
平均粒径 D_{50}		0.01326
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_u (deg.)	25
減衰定数	h	1.0
ボンド直径	D_b (m)	0.00884
ボンド強度	s_b (Pa)	2.11×10^7

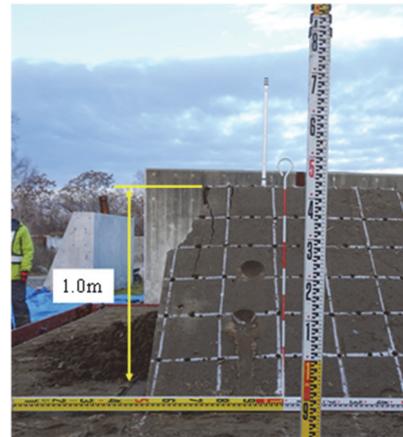


図 9 中型土堤の限界自立高さ

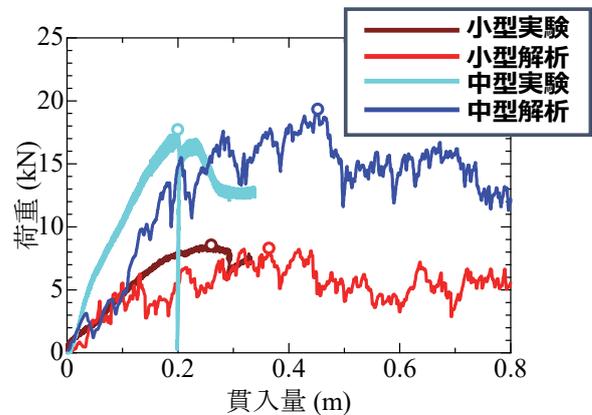


図 10 荷重貫入量曲線 (実験と解析での比較)

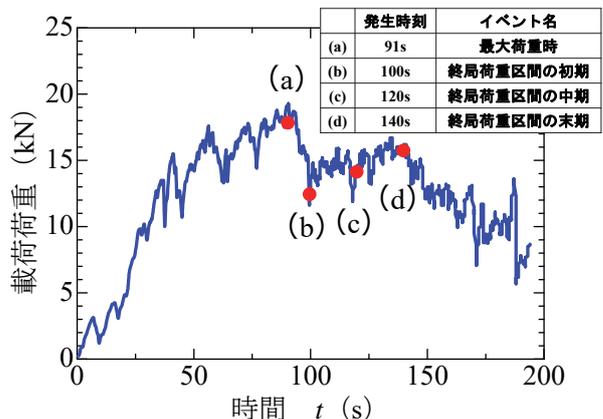


図 11 荷重の時刻歴分布図 (中型土堤: 解析)

し、せん断を視認できた範囲を黄枠で、(d) は視認できた想定すべり線を黄破線で示した。

図 12 (a) より最大荷重発生時には重錘下部周辺ではせん断の発生が視認できたが、土堤の非載荷面では明確なせん断は見られなかった。このことから、図 6 で示した想定すべり線は、最大荷重発生時には重錘下部周辺で真横に少し進展している段階であると推察される。そして荷重が下がり、一定値で推移する際の荷重である終局荷重となった図 12 (b), (c) では、時刻経過に関わらず明確な想定すべり線の進展があまり見られず、天端方向へのすべり線は視認できない。これは粒子寸法が大きくせん断が見えていないためか、あるいは終局荷重区間の初期から中期では想定すべり線があまり進展しないことが考えられる。終局荷重区間の末期にあたる図 12 (d) では、土堤の非載荷面にひび割れが視認され、この段階で天端方向に進展する想定すべり線が発生し、非載荷面のひび割れで抜けていると考えられる。このように、解析においても実験と同様の想定すべり線が見られた。

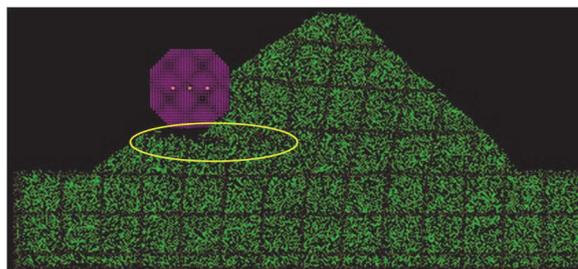
5. まとめ

本研究では落石防護土堤の性能設計法確立に向け、小型土堤と中型土堤へ静的荷重実験及びその再現解析を 2D-DEM を用いて実施し、土堤の基本的な破壊メカニズムとスケール効果について検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

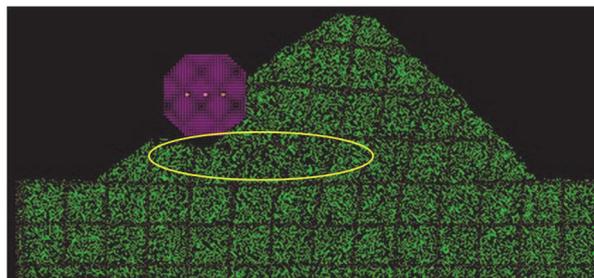
- 1) 静的荷重が作用した場合、中型土堤と P-1.5 で用いた多面体重錘では主載荷面が鉛直のため水平に砂を押し出すことから、想定すべり線と水平方向とのなす角が受働崩壊角に近い値を取った。しかし、S-1.5 で用いた球体重錘では主載荷面は無く球状であることから中心より下方は斜め下方向に砂を押し出すため、受働崩壊角よりも若干小さい値を取った。
- 2) 小型土堤実験における荷重貫入量曲線より、法勾配が急になると最大荷重は大きくなることが分かった。
- 3) 小型土堤実験における荷重貫入量曲線より、重錘形状が多面体に比べて球体の方が最大荷重が大きくなることが分かった。
- 4) 土堤の変形破壊挙動は、最大荷重発生時には水平方向への進展に留まっており、その後の終局荷重発生区間でも初期から中間ではあまり進展は見られず、末期において天端方向へすべり線が進展し、非載荷面のひび割れで抜けたと推察される。

参考文献

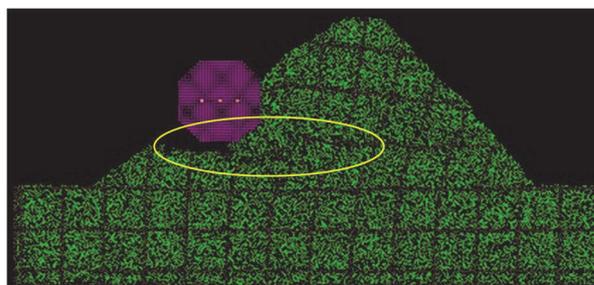
- 1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，pp.243-246, 2017
- 2) 峯祐貴，松尾和茂，前田健一，高橋浩司，山内翼，今野久志：異なる地盤材料を用いた落石防護土堤の静的荷重水平載荷実験，土木学会北海道支部論文報告集第 76 号
- 3) European Organization for Technical Approvals (EOTA)：



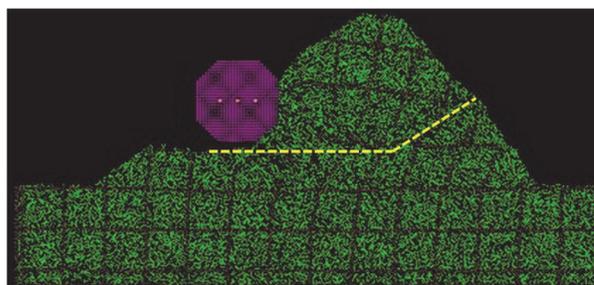
(a) 最大荷重発生時 (91s)



(b) 終局荷重発生区間 (初期：100s)



(c) 終局荷重発生区間 (中期：120s)



(d) 終局荷重発生区間 (末期：140s)

図 12 時間経過に伴う断面変化図

ETAG27, Guideline for european technical approval of falling rock protection kits, p.38, 2013

- 4) 杉山直優，前田健一，鈴木健太郎，今野久志，峯祐貴，磯合凌弥：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.67,2021
- 5) 前田健一，羽柴寛文，刈田圭一，牛渡裕二，川瀬良司：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
- 6) 内藤直人，前田健一，田中敬大，堀耕輔，牛渡裕二，鈴木健太郎，川瀬良司：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