

実規模斜入射実験による落体反発挙動及びエネルギー減衰に対する被衝突体の影響

名古屋工業大学 学生会員 ○磯合 凌弥 正 会 員 前田 健一

学生会員 峯 祐貴 学生会員 杉山 直優

(株) 構研エンジニアリング 正 会 員 牛渡 裕二 非 会 員 菅原 正則

土木研究所寒地土木研究所 正 会 員 今野 久志

1. はじめに

現状わが国では落石外力の増加や対策工の老朽化により落石災害が増加しており，人命やインフラ設備に関わる甚大な被害も発生している．これを受け落石対策の合理化が求められている．しかし，落石の反発挙動に関して未だ解明されていない点が多い¹⁾．そこで本稿では，落体反発挙動及びエネルギー減衰に対する被衝突体の影響の評価を目的に実規模斜入射実験を実施し，検討を行った．

2. 実験概要及び計測項目

図-1 に実験場風景，表-1 に実験ケース一覧を示す．実験では質量 1.6t，0.25t の EOTA 型重錘（図-2）を高さ約 30m，勾配約 50°の斜面上から層厚 $T=0.9\text{m}$ ，長さ $L=5.0\text{m}$ の砂による緩衝層（表-2 に材料試験結果を示す）及び，厚さ $T=1.0\text{m}$ 長さ $L=5.0\text{m}$ のコンクリート（図-3）へ斜入射させた．ケース名は頭文字が被衝突体を表し，S が砂による緩衝層，C がコンクリートであり，次に続く数字は落体質量 $M(\text{t})$ ，末尾の数字は同ケースの実験順である．計測項目は落体が落下する様子を 500fps の高速度カメラで撮影し，PTV 解析により落体の反発挙動を算出した．

3. 実験結果及び考察

3.1 落体重心の軌跡図

図-4 に落体重心の軌跡図を示す．落体の衝突点を原点とし，緩衝層衝突ケースを実線，コンクリート衝突ケースを点線で示し，最大跳躍点をプロットにて示している．S-0.25-1 は衝突後に落体が緩衝層に隠れ，その後に緩衝層上で落体が停止した．そのため，貫入中のデータが取れず再度落体が見え始めた段階での軌跡を示している．また，C-0.25-2 は図-5 に示すように衝突後に落体が破損したためグラフには示していない．図-4 より，緩衝層衝突ケースでは落体が緩衝層へ貫入したのち跳躍していることが分かる．コ



図-1 実験場風景



図-2 EOTA 型重錘(1.6t)

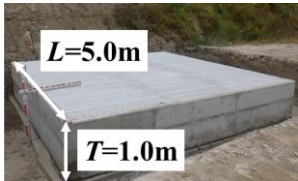


図-3 コンクリート

表-1 実験ケース一覧

ケース名	落体質量 M (t)	緩衝層厚 T (m)	被衝突体
S-0.25-1	0.25	0.9	緩衝層
S-1.6-1	1.6		
S-1.6-2			
C-0.25-1	0.25	0	コンクリート
C-0.25-2	0.25		
C-1.6-1			

表-2 材料試験結果

地盤材料の分類名：分級された礫まじり砂		
項目	単位	試験結果
土粒子の密度	g/cm^3	2.67
60%粒径 D_{60}	mm	0.60
均等係数 U_c	-	3.53
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/m^3	1.68
最適含水比 w_{opt}	%	16.5
平均湿潤密度	g/cm^3	1.54
平均含水比	%	6.30
コーン試験 N_d	回	0~6
衝撃加速度	G	14~21

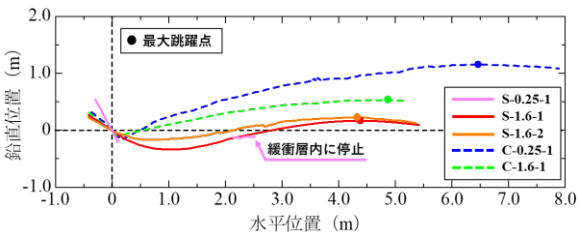


図-4 落体重心の軌跡図

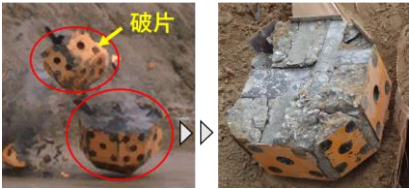


図-5 落体破損の様子 (C-0.25-2)

ンクリート衝突ケースではほぼ貫入することなく跳躍しており，最大跳躍点の鉛直位置はコンクリート

衝突ケースの方が緩衝層衝突ケースより大きいことが分かる。また、C-0.25-2は衝突後に落体が破損したため破片が広範囲に飛散した。このことから、緩衝層への衝突では落体の跳躍高を抑制し、場合によっては緩衝層上で落体を捕捉できる可能性が示唆された。コンクリートへの衝突では跳躍高が大きくなり、また落体が破損し破片が飛散する可能性があり、落石被害の影響範囲が大きくなることが示唆される。

3.2 エネルギーの時刻歴波形及びエネルギー減衰率

図-6に落体の運動エネルギーの時刻歴波形及びエネルギー減衰率を示す。落体が衝突した時刻を0msとし、緩衝層への衝突ケースは実線、コンクリートへの衝突ケースは点線で示している。S-0.25-1及びC-0.25-2はエネルギーの時刻歴波形の算出ができなかったため除外した。エネルギー減衰率は、衝突直前と鉛直速度が上向きに最大になった時刻での運動エネルギーの比より算出し、衝突によりどれだけエネルギーが減衰したかの割合を表す。S-0.25-1は緩衝層上で落体が停止したためエネルギー減衰率を100%とした。またC-0.25-2は落体の破損により、落体質量が衝突前後で変化したため衝突後の妥当なエネルギーの算出ができなかった。そのため、エネルギー減衰率の記録はなしとした。図-6より緩衝層への衝突ケースでは衝突後、ゆるやかにエネルギーが減衰している。コンクリートへの衝突ケースでは衝突後、急激にエネルギーが減衰し、その後はあまり減衰していないことが分かる。ここで落体衝突面の様子を図-7に示す。図-7(a)より緩衝層には長さ約3m、幅約1.5mほどの衝突痕が生じており、図-7(b)よりコンクリートには局所的な破壊が生じていることが分かる。このことから、緩衝層衝突ケースでは落体と緩衝層との接触面積が大きくなり、接触している間に摩擦及び貫入抵抗によってエネルギーが減衰し、コンクリート衝突ケースでは局所的な破壊によって短時間でエネルギーが減衰すると推察される。

ここで落石対策便覧¹⁾では、平坦部に落石が衝突した際、衝突前後でのエネルギーは0.45倍（エネルギー減衰率で55%）になるとしている。本実験におけるエネルギー減衰率は、緩衝層衝突ケースでは64.6%～100%であり、55%よりも大きくなった。一方、コンクリート衝突ケースでは37.5%～45.6%であり、55%よりも小さくなった。このことから、層厚0.9m

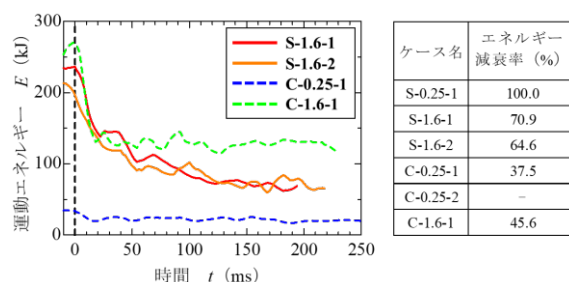


図-6 エネルギーの時刻歴波形及びエネルギー減衰率

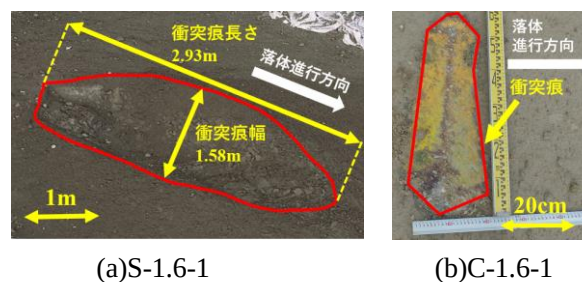


図-7 落体衝突面の様子

の緩衝層への衝突では落石対策便覧¹⁾に示されるエネルギー減衰性能を満たし、コンクリートへの衝突では満たさない結果となった。

4. まとめ

本稿では落体反発挙動及びエネルギー減衰に対する被衝突体の影響の評価を目的に実験を行い、検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 緩衝層への衝突では跳躍高を抑制し、場合によっては緩衝層上で落体を捕捉できる可能性がある。コンクリートへの衝突では跳躍高が大きくなり、また落体破損時の破片の飛散により影響範囲が大きくなる場合がある。
- 2) 緩衝層への衝突では貫入時の摩擦及び貫入抵抗によってゆるやかにエネルギー減衰が生じ、コンクリートへの衝突では衝突面の局所破壊によって急激にエネルギー減衰が生じる。
- 3) 落石対策便覧¹⁾に示されるエネルギー減衰率(55%)と比べ、緩衝層への衝突でのエネルギー減衰率は大きくなり、コンクリートへの衝突でのエネルギー減衰率は小さくなる。

謝辞：本研究に用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)20H02241の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2017。