

(39) 小型土槽を用いたサンドクッションへの重錘衝突室内実験について

Impact experiment on sand cushion by the collision of a weight using small sized sand tank

榎谷 浩*, 風當祥一**, 小澤嘉敬***, 佐藤 彰****, 中村佐智夫****
 Hiroshi Masuya, Shouichi Futoh, Yoshiori, Akira Satoh, Sachio Nakamura

*金沢大学, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

**金沢大学大学院, 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

***長野県, 諏訪建設事務所整備課 (〒392-8601 長野県諏訪市上川1丁目1644-10)

****日本サミコン株式会社 技術部設計開発課 (〒950-0925 新潟県新潟市中央区弁天橋通1-8-23)

Key Words: Rock fall, Sand cushion, Impact experiment, Impact action

キーワード: 落石, サンドクッション, 衝撃実験, 衝撃作用

1. はじめに

落石対策工は落石予防工と落石防護工に大別され, 落石防護工は落石防護網, 落石防護柵, 落石防護壁, 落石覆工に分類される¹⁾. 落石対策は各国において独自になされてきた. 落石覆工は対象とする落石のエネルギーが大きな場合や, 落石の跳躍量が大きい場合, あるいは落石以外に崩土が予想される場合に使用されている. 落石覆工はPCコンクリートか鉄筋コンクリート製が採用されているが, いずれも落石による衝撃力を緩和させるために屋根部にはクッション材が設置される. クッション材は通常, 川砂や山砂が使用され, 敷砂緩衝材と呼ばれている. なお, 防護柵や防護壁にも, 衝撃作用を受ける箇所には同様なクッション材が使用される.

海外においても, 独自に防護対策が進められてきた. 橋梁などの一般的な土木構造物とは異なり, 情報交換の機会はありません. 経済水準と技術水準が直接反映した防護対策が取られているのが現状である²⁾. 日本は, この分野でもっとも技術水準が高い国の一つである. 最近では, 技術の発達と設計法に関する検討も行われるようになってきた³⁾.

山間部における自然災害に対する落石覆工等の防護構造物は, 落石等による衝撃荷重を受けることが前提となることから敷砂等による緩衝材を用いて合理的に設計する必要がある. しかし, 研究は長年行われているものの, このような緩衝材を通して構造物に伝達される衝撃力の評価や緩衝効果は, 十分には明らかにされていない. また, クッション材の複雑な衝撃挙動は理論的な説明が難しく, 性能照査型設計を行うためにも実験・

解析的研究の進展が望まれている. そこで本研究では構造物を安全かつ合理的に設計するため, 緩衝材の1つであるサンドクッション上への重錘衝突による室内実験を行い発生衝撃力, 緩衝効果について検討した.

2. 実験概要

2.1 実験方法

衝突実験では, 写真-1に示す重錘と土槽を使用した. 実験では, 重錘をロープにより所定の高さまで持ち上げ, 自由落下させた. なお使用した重錘は, 鋼製で, 先端が球状で直径100mmの円柱形状である. 質量は7.233kgである.

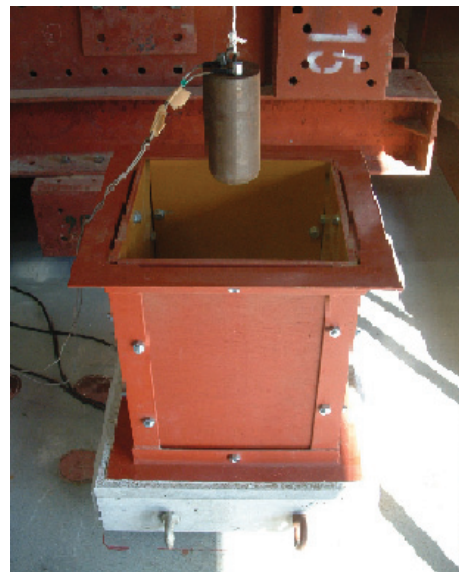
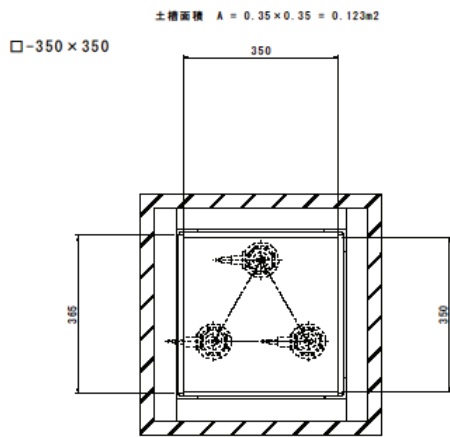
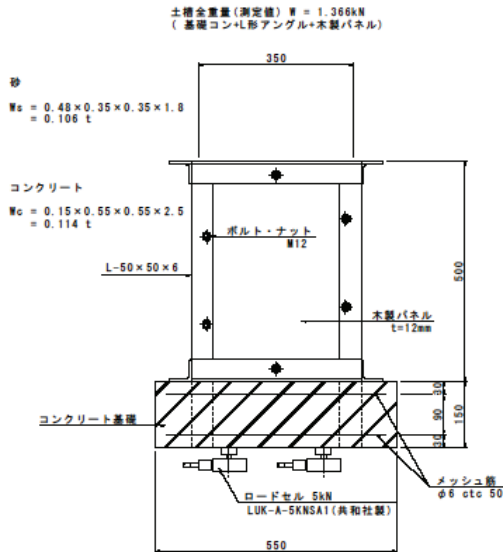


写真-1 衝突実験に使用した重錘と土槽



(a) 平面図



(b) 側面図

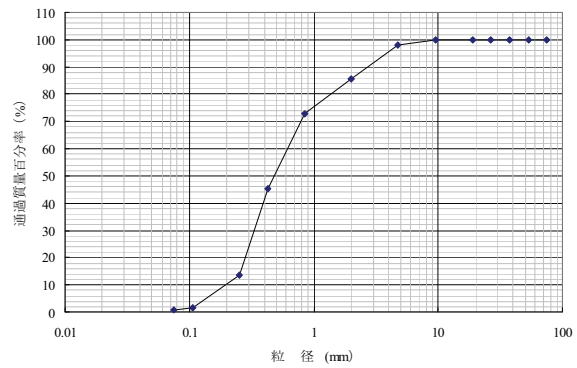
図-1 土槽構造(小型S)

図-1に示すように土槽として底面寸法が0.35m×0.35m(小型S)のもの他に、0.50m×0.50m(中型M)のものとして0.70m×0.70m(大型L)のもの計3種類を使用した。なおすべての実験では図-1(a)に示すように、土槽底部のコンクリート板の下にロードセルを3個配置し3点支持とした。

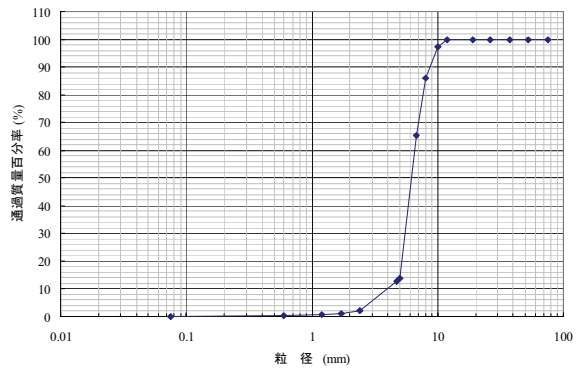
重錘落下高さは、0.25m、から2.00mまで0.25m間隔で8種類とした。サンドクッションは2.3で示す2種(材料)を用い、層厚25cm、と50cmに対して実験を行った。

2.2 測定項目

計測項目は重錘の加速度、土槽底部のコンクリート下部の3つの反力である。重錘に生じる加速度に重錘の質量を乗じたものは重錘からサンドクッションへの作用力であり、以後本論文では重錘衝撃力と呼ぶ。重錘加速度は加速度計(共和電業 AS-100HA)で、反力はロードセル(共和電業 LUK-10TBS)で測定した。計測はウェブロガー(KEYENCENR500)を用いて、100 μs 間隔で測定した。



(a) 川砂



(b) 砂利

図-2 サンドクッションの粒径加積曲線

表-1 サンドクッション材の特性値

砂種	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	有効粒径 (mm)	均等係数	曲率係数
川砂	0.2	0.34	0.61	0.49	3.1	0.95
砂利	4.0	5.5	6.5	6.1	1.63	1.16

2.3 サンドクッション

サンドクッション材には川砂と砂利を使用した。何れも新潟市胎内市黒川地内の胎内川水系胎内川筋産のものであり、それらの粒度分布を図-2に、特性値を表-1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 衝撃力

図-3は、衝撃力波形の一例を示したものであり、大型Lに川砂を砂厚25cmで敷き詰めた土槽に重錘を落下高さ2.00mから落下させた場合についての結果である。重錘質量に重錘の加速度を乗じたものを重錘衝撃力、各

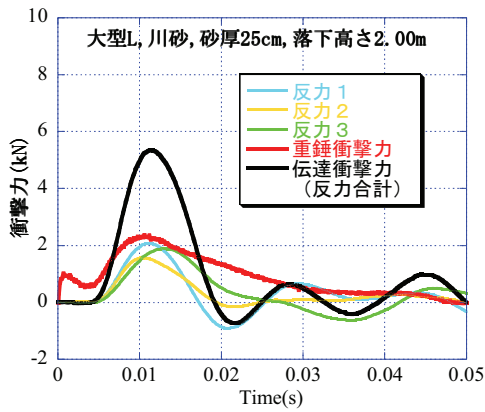
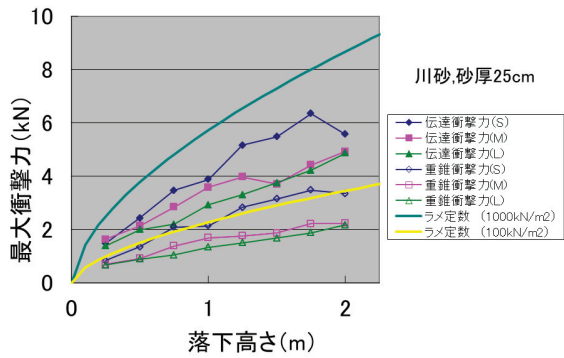


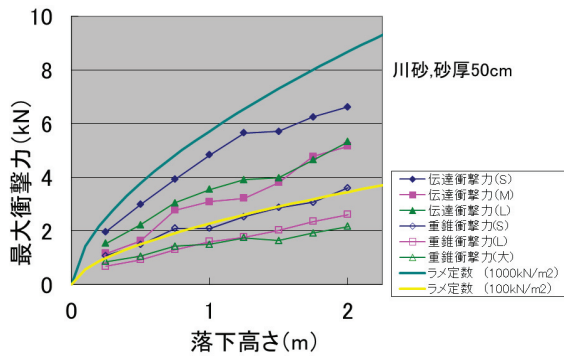
図-3 衝撃力波形の例
(大型L,川砂,砂厚25cm,落下高さ2.00m)

反力と反力の合計を伝達衝撃力と本論文では表現する。重錘衝撃力が立ち上がったあと、一度少し減少しそのあと増加し 0.01s で最大値に達した後緩やかに減少し、0.045s 程度で零になっている。一方、伝達衝撃力は、衝突後 0.005s 程度で急激に立ち上がり 0.012s 程度で最大値になった後、急激に減少している。

図-4 と図-5 は、各々川砂と砂利に対して落下高さ



(a) 川砂, 砂厚 25cm



(b) 川砂, 砂厚 50cm

図-4 落下高さと最大衝撃力 (川砂)

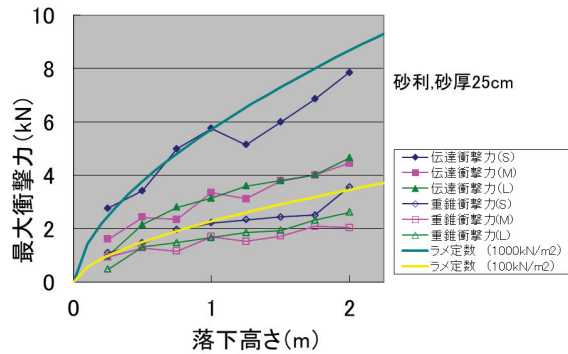
と最大衝撃力の関係を示したものである。最大衝撃力は、重錘衝撃力と伝達衝撃力について、小型 (S)、中型 (M) そして大型 (L) と分けて示した。なお、図中には次式で表される落石対策便覧式も示した。

$$P = 2.108\lambda^{\frac{2}{3}}(mg)^{\frac{2}{3}}H^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

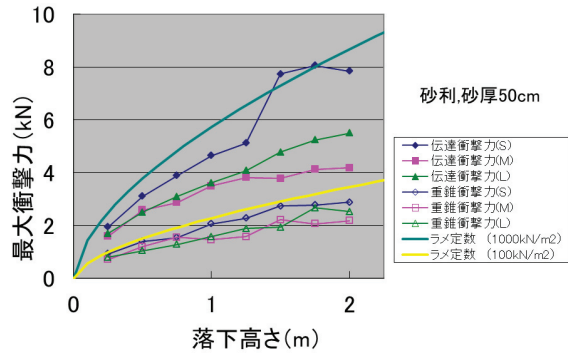
ここに、 m は落石質量(ton)、 H は落下高さ(m)、 λ は砂のラメ定数 (kN/m^2)、 g は重力加速度 (m/s^2) である。ラメ定数は非常に軟らかい土で $1 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ 、軟らかい土で $3 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ 、固い土で $10 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ とされており、ここでは、 1×10^3 と $1 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$ を示した。

川砂、砂利どちらの場合においても、伝達衝撃力が重錘衝撃力に比べ大きい値であることがわかる。また伝達衝撃力は、川砂、砂利どちらの場合においても、砂層の厚さによる有意な違いはあまり認められなかった。

小型(S)、中型(M)、大型(L)で比べると川砂も砂利も中型(M)と大型(L)はほぼ同じ値を示しているが、小型(S)は他の2つに比べてやや大きな値となっている。川砂と砂利で比べると、小型(S)の伝達衝撃力は砂利の方が少し大きい値となっているが、その他は落下高さが同じ場合は同程度の衝撃力である。これは、砂厚 d が 0.50m に対し土槽の内面の底面寸法 w が 0.35m と小さく、 $w/d=0.7$ と小さく土圧分布範囲に影響を与えたと推測される。な



(a) 砂利, 砂厚 25cm



(b) 砂利, 砂厚 50cm

図-5 落下高さと最大衝撃力 (砂利)

お、砂厚 $d=0.5\text{m}$ に対し中型(M)では $w/d=1.0$ 、大型(L)では $w/d=1.4$ であり、 $w/d=1.0$ 程度以上は必要と考えられる

落石対策便覧式と比較してみると、小型(S)の砂利の伝達衝撃力はラーメの定数 $\lambda=1 \times 10^3$ を超えることもあるが、その他の場合の伝達衝撃力と重錘衝撃力はラーメの定数 $\lambda=1 \times 10^3$ よりも小さな値である。

3.2 運動量と衝撃による力積

図-6 に示すように、質量 m の重錘が衝突速度 v_0 で衝突する場合、初期運動量 M_i は $M_i=mv_0$ で表わされる。図-7 は、川砂で砂厚 25cm の場合について、初期運動量と衝撃力による力積の関係を示したものである。重錘衝撃力では初期運動量と力積がほぼ等しくなっており、伝達衝撃力では、初期運動量よりわずかであるが大きくなっている。表-2 は伝達衝撃力による力積 I_t と初期運動量 M_i の比を示したものである。規模と砂種と砂厚により多少ばらつきが認められるが、全体として 1.13 程度であることがわかる。伝達衝撃力の最大値が重錘衝撃力より大きくなるのに対して、伝達衝撃力による力積は初期運動量と同程度であることが明らかとなった。

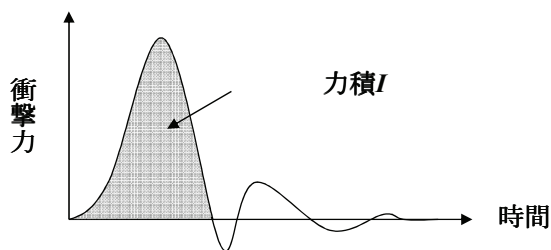


図-6 衝撃力波形と力積

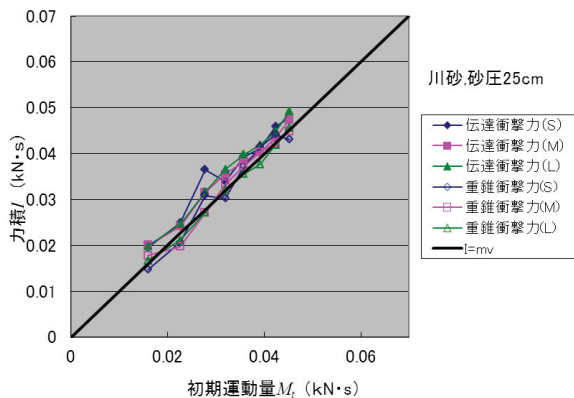


図-7 初期運動量と力積

4. まとめ

本研究では衝撃荷重を受けたときのサンドクッションに関する基本的な衝撃特性を調べることを目的として

表-2 伝達衝撃力による力積 I_t と初期運動量 M_i

規模	砂種	厚さ(cm)	の平均値
小型 ()	川砂	25	1.124
		50	1.10
	砂利	25	1.196
		50	1.19
中型 ()	川砂	25	1.093
		50	1.02
	砂利	25	1.09
		50	1.04
大型 (L)	川砂	25	1.11
		50	1.13
	砂利	25	1.126
		50	1.15
平均			1.125

一連の実験・解析を行った。実験から得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 伝達衝撃力の最大値は、重錘衝撃力のそれより大きな値となる。
- (2) 伝達衝撃力の最大値は、砂利において川砂より大きい。
- (3) 本実験結果においては砂層厚の有意な差異は、川砂および砂利双方において認められなかった。
- (4) 重錘衝撃力は、伝達衝撃力に比べ、作用時間が長い。
- (5) 小型 (S) 土槽では、中型 (M) や大型 (L) に比べて最大衝撃力が大きいことが明らかとなった。これは底面幅は層厚に比べ小さいためと考えられる。
- (6) 伝達衝撃力による力積の値は高々初期運動量の 1.13 倍程度であり、砂層厚さの影響は認められなかった。
- (7) 伝達衝撃力の最大値は、砂利で落下高さが大きい場合に落石対策便覧式においてラーメ定数 1000kN/m^2 に対応した値を超える場合があったが、それ以外の衝撃力についてはその範囲内であった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 2) T. Vogel, V. Labiouse, H. Masuya: Rockfall Protection as an Integral Task, IABSE, Structural Engineering International Vol. 19, Number 3, pp.304-312, 2009.
- 3) H. Masuya: History and highlights of rock fall research in Japan, Proceedings of interdisciplinary workshop on rockfall protection, pp.67-74, 2008.
- 4) 構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会 (編集 榎谷浩)：性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法 構造工学技術シリーズ No.52, 土木学会, 2007。