落石防護工用緩衝砂の緩衝特性に関する実験的検討

Experimental study of shock absorbing performance of sand cushion

	\sim $-$	-	1	
(独)土木研究所寒地土木研究所	OIF.	貝	山口 悟	(Satoru Yamaguchi)
室蘭工業大学大学院社会基盤ユニッ	ト正	員	木幡行宏	(Yukihiro Kohata)
室蘭工業大学大学院社会基盤ユニッ	ト正	員	小室雅人	(Masato Komuro)
(独)土木研究所寒地土木研究所	正	員	今野久志	(Hisashi Konno)
釧路工業高等専門学校	フュ		岸 徳光	(Norimitsu Kishi)

1. はじめに

北海道の道路は急峻な地形や海岸線等に築造されてい る場合も少なくなく、大規模な岩盤崩壊や落石を始めと する道路災害(写真-1)が発生している。このため、 落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設 されている。その落石防護構造物の一つに、RC 製ロッ クシェッド(以後、ロックシェッド)が挙げられる。

これらのロックシェッドは、主に「落石対策便覧」¹⁾ に基づき、許容応力度法に基づいて設計が行われている。 しかしながら、近年、様々な土木構造物の設計法が許容 応力度設計法から性能照査型設計法に移行してきており、 ロックシェッドにおいても、より合理的な設計を可能と する性能照査型設計法の確立が望まれている。

この様な状況下において、筆者らは、ロックシェッド に対する性能照査型設計法確立のための基礎的な取り組 みとして、RC 梁や RC 版等の部材、さらにはロックシ ェッドの縮尺模型に対する重錘落下衝撃実験を実施し、 終局に至るまでの耐衝撃挙動の把握を行ってきた。その 結果、許容応力度法により設計された構造物は終局と定 義される入力エネルギーでは 30~40 倍程度の安全余裕 度を有していることを確認している²⁾。また、これら実 験結果を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、 終局に至るまでの耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解 析手法の開発に関する検討を行っている。

現在、ロックシェッド上には、標準的に 90 cm 厚の 敷砂緩衝材が設置されているが、性能照査型設計法の確 立に向けて終局時近傍までの耐衝撃挙動を数値解析的に 検討するためには、より厳しい落石条件下に対しても精 度の高い解析結果を与える敷砂の材料構成則モデルの構 築が必要である。

このような観点から、本研究では、各種条件下におけ る敷砂緩衝材の数値解析用材料構成則モデルの設定手法 を構築するための基礎的研究として、室内実験に続いて、 大型緩衝材衝撃実験装置を製作し、重錘落下衝撃実験を 実施した。本論文では、敷砂緩衝材の敷砂厚をパラメー タとし、重錘衝撃力および伝達衝撃力、重錘貫入量の耐 衝撃挙動データを精度よく計測するために、ハイスピー ドカメラを用いて緩衝特性の把握を行ったので報告する。

2. 実験概要

2.1 実験装置の概要

本研究では、緩衝材を介して RC 部材や構造物に入力





される衝撃力(伝達衝撃力)を精度よく計測するために、 図-1に示すような鋼・コンクリートから成る RC 版 を製作し、かつその下方に図-2に示す衝撃用ロード セルを設置している。

敷砂緩衝材の緩衝特性に関する研究において、伝達衝 撃力は一般的に緩衝材下面で計測された伝達衝撃応力が 重錘衝突位置に対して軸対称に分布するものと仮定し、 台形則を用いて集積することにより評価している。しか しながら、伝達衝撃応力の分布性状によっては計測誤差 等も集積されることにより精度の高い伝達衝撃力が得ら れない可能性もある。このことから、本研究では緩衝材 を設置した RC 版全体をロードセルで支持し、緩衝材を 介して基礎部に伝達される反力を計測することとした。

RC版は各辺 5 mの正方形で、版厚 0.5 m である。 底版は t = 22 mm 鋼板を使用し、H 形鋼や溝形鋼により 井桁状に主構造を組み、溶接によるひずみが入らないよ うに計測を行いながら製作を行った。重錘による RC版 の破損を防ぐため、RC版の中央には1 m 四方の t = 22 mm 鋼板を設置している。また、各ロードセルは貫通 ボルトを通じて剛基礎と固定し、実験時の RC版の浮き 上がり防止を行っている。敷砂緩衝材の砂枠は、4.9 m ×4.9 m の平面形状となっている。

衝撃実験の前には静載荷により各ロードセルの荷重分 担の確認をおこなっている。

2.2 衝撃実験概要

写真-2には、衝撃載荷実験状況を示している。実 験は、敷砂緩衝材を 70 cm ~ 30 cm の厚さで設置し、 質量 5,000 kg の鋼製重錘をトラッククレーンにより1.0 m ~ 15.0 m の高さまで吊り上げ、脱着装置により敷 砂緩衝材の設置されているRC 版中央部に自由落下させ ることにより行っている。

使用した鋼製重錘は、直径が 1.0 m、高さが 97 cm で底部より高さ 17.5 cm の範囲が半径 80 cm の球状と なっている。また、重錘は鋼製円筒の内部に鋼塊とコン クリートを充填して所定の質量に調整している。

実験に使用した砂はこれまでの敷砂緩衝材実験と同一 とし、石狩市厚田の知津狩産の細砂を使用した。本実験 に用いた砂の物性値を表-1 に示す。

表-2には、実験ケースの一覧を示している。実験ケース名は敷砂緩衝材(S)の厚さ(cm)と落下高さ(m)を示す H とその高さを付し、ハイフンで結び示している。

敷砂の締固めはこれまでの敷砂緩衝材実験と同様に、 敷砂厚 70 cm の場合には、下から 20 cm、25 cm、25 cm の 3層として、敷砂厚 50 cm の場合には、25 cm を 2層、敷砂厚 30 cm の場合には、30 cm 1層にてそれ ぞれ足踏み式により行った。なお、各実験の終了後には 重錘落下中心部の 3 m × 3 m 以上の範囲の砂をバック ホウにより取り除き、RC 版の損傷が無いことを確認し、 敷砂緩衝材の再設置を行った。

2.3 デジタルハイスピードカメラによる計測方法

敷砂緩衝材の緩衝特性に関する大型重錘落下衝撃実験 では、重錘に設置している加速度計と敷砂緩衝材への重 錘貫入量の計測データを同期させ、詳細な現象の解明と 今後の数値解析に用いる敷砂緩衝材の材料構成則モデル の構築のため、デジタルハイスピードカメラを使用した。 使用したデジタルハイスピードカメラは、航空宇宙産 業や自動車衝突実験などで使用されているハイスペック な機種で、冬期の屋外で使用できること、重錘質量 5,000 kg 落下時の安全対策と大型重機による敷砂緩衝材 の設置撤去場の確保が可能であることとして、撮影距離 20 m 以上で、ms の分解能を有し、微小な変位を計測 できる機種(IDT 社製)を選定した。

撮影は 1/1,000 sec (1,000 コマ/秒) で、有効画素 数:カラー 1,120 × 1,120 (白黒 752 × 1024)にて 収録を行った。また、図-3 に示す運動解析ソフト

(View Point: Glenallan Technology 社製)を使用し、 不動点と重錘に設置したターゲットマーカーから動画像 ターゲットマーク自動読み取りを行い、計測を行った。 有効画素数から計測した敷砂緩衝材への重錘貫入量は $0.6 \sim 1.7 \text{ mm} / \text{ ms}$ の精度であった。デジタルハイス



写真-2 実験装置と重錘(実験状況)

表-1 敷砂緩衝材の物性値

			最大乾燥	最適含
産地	分類	粗粒率	密度	水比
			(g/cm^3)	(%)
知津狩	細砂	1.39	1.52	22.1

表-2 実験ケース一覧

実験ケース	敷砂厚	落下高さ	入力エネルギー
	(cm)	(m)	(KJ)
S70-Н 2.5		2.5	122.6
S70-Н 5.0		5.0	245.2
S70-Н 7.5	70	7.5	367.7
S70-H 10.0		10.0	490.3
S70-Н 12.5		12.5	612.9
S70-H 15.0		15.0	735.5
S50-H 2.5		2.5	122.6
S50-Н 5.0		5.0	245.2
S50-Н 7.5	50	7.5	367.7
S50-H 10.0		10.0	490.3
S50-H 12.5		12.5	612.9
S30-Н 1.0		1.0	49.0
S30-Н 2.0		2.0	98.1
S30-Н 3.0	30	3.0	147.1
S30-H 4.0		4.0	196.1
S30-Н 5.0		5.0	245.2





ピードカメラによる計測データは、メモリレコーダ/アナライ ザ(EDX:共和電業社製)のデータ収録中にハイスピード カメラから 5 Vの出力を行い、図-3 中央の黄緑色のマーカ ーにて加速度計など収録データとの同期を行っている。

2.4 計測機器による計測方法

本実験における計測機器による計測項目は、1) 重錘の頂部 表面に設置したひずみゲージ式高応答小型加速度計(容量 100、 200、500 G、応答周波数 DC ~ 5 kHz: 共和電業社製)によ る重錘衝撃力、2) RC 版下面に設置した図-2 に示す 29 個 の衝撃用ロードセル(定格容量: 750 KN 5 個、500 KN 8 個、 300 KN 16 個)の合計値である伝達衝撃力、3)レーザ式変位 計(LB: KEYENCS社製、応答周波数約 1 kHz)によるRC 版の変位である。

衝撃実験時の各種応答波形は、いずれもサンプリングタイム 0.1 ms でデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。 また、各実験に際して敷砂緩衝材の締固め密度の確認として、 シンウォールサンプリングチューブを用いて、実験前には 3 箇所で試料の採取(ϕ 7.5 cm、H = 15 cm)を実施し、実験後 には重錘直下の中心の 1 箇所で試料の採取(ϕ 7.5 cm、H = 5 cm)を行っている。

3. 実験結果

3.1 各時刻歷応答波形

図-4 (a) ~ (c) には、入力エネルギー E = 245.2 KJ (落 下高さ h = 5.0 m)が同一で、敷砂厚を変化させた場合の重錘 衝撃力、伝達衝撃力および重錘貫入量に関する時刻歴応答波形 を重錘衝突時刻を 0 として示している。なお、伝達衝撃力は 前述したとおり図-2 に示した 29 個の衝撃用ロードセルからの応答波形を単純に足し合わせたものである。

図より、敷砂厚毎の比較を行うと、(a) 重錘衝撃力、(b) 伝 達衝撃力とも、ほぼ類似の応答波形性状を示し、敷砂厚が薄く なるのに従って重錘衝撃力、伝達衝撃力とも大きい値を示して いる。(c) 重錘貫入量による比較では、敷砂厚の増加に伴い貫 入量は増大することがわかる。特に今回は重錘貫入量の時刻歴 変位を重錘衝撃力波形と同期させて計測したことにより、貫入 中の変曲点と重錘衝撃力の関係を特定することができた。この 変曲点の第1変曲点は重錘衝撃力の最大値発生時刻とほぼ類似 しており、第2 変曲点の発生時刻も重錘衝撃力波形の第2 波 目の最大値発生時刻とほぼ一致している。

3.2 各種最大衝撃力と入力エネルギーの関係

図-5 には、各種最大衝撃力と入力エネルギーの関係を示 している。図中の曲線は敷砂緩衝材を用いた場合における Hertz の接触理論に基づく振動便覧式³⁾に基づき、敷砂厚と 落石直径の比から決定される割り増し係数を考慮して算出した 衝撃力(ラーメ定数: $\lambda = 1,000 \sim 4,000 \text{ kN/m}^2$ 、割り増し 係数: $\alpha = (D/T)^{1/2} = 1.20 \sim 1.83$ 、D:重錘径 1.0 m、 T:敷砂厚 70 ~ 30 cm)を示している。

図より、敷砂厚の増加に対応してラーメ定数が小さく示され、 敷砂厚 70 cm の場合には、1,000~2,000 kN/m² 程度となって いる。また、敷砂厚が厚くなるに従い最大重錘衝撃力よりも構 造物に入力される最大伝達衝撃力の方が大きな値が計測されて いる。これはこれまでの 90 cm の厚さによる実験結果と同様 の傾向を示している。これに対して敷砂厚が薄くなるに従い、 入力エネルギーの増加によりラーメ定数が変化していることが



わかる。

以上より、より厳しい落石条件下に対しても精度の高い最大 衝撃力の計算結果を得るためには、ラーメ定数の割り増し係数 の新たな算出方法を構築する必要があることがわかった。

3.3 各重錘貫入量と入力エネルギーの関係

図-6 (a), (b)には、最大重錘貫入量と入力エネルギーの関係を示している。(a) 図より、最大重錘貫入量は、入力エネルギーの増加に対応して増加しているが、その勾配は敷砂厚が薄くなるにしたがって大きくなる傾向が示されている。

(b) 図には、重錘の貫入ひずみ(敷砂厚に対する重錘貫入量の割合)と入力エネルギーの関係を示している。(b) 図より、 貫入ひずみは、入力エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加しており、その勾配は敷砂厚の薄い場合ほど大きくなっている。また、貫入ひずみは各敷砂厚の最終実験ケース時において 80%以上の値を示している。

3.4 実験前後の敷砂緩衝材の乾燥密度の関係

図-7 には、敷砂緩衝材の実験前(3箇所の平均値)と実 験後(重錘直下の中心)に計測した乾燥密度の結果を敷砂の最 大乾燥密度:ρdmax = 1.52 g/cm³に対する比と入力エネルギー の関係で示している。

図より、実験前の足踏みによる乾燥密度では 敷砂厚 30 cm の場合には低いものの、概ね 80 ~ 90 % となっており、実 験後の結果では、敷砂厚 50 cm 場合には、入力エネルギーの 増加と共に乾燥密度も増加し、最大乾燥密度を超えた値も計測 されている。敷砂厚 30 cm の場合には、最大乾燥密度に近い 値の後は、試料採取がうまくできなかったことにより、低い値 となっている。

4. まとめ

本研究では、敷砂緩衝材の数値解析に用いる材料構成構則モ デルの設定手法を構築するための基礎的研究として、敷砂緩衝 材の敷砂厚をパラメータとした大型実験を実施し、緩衝特性の 把握を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 重錘貫入量の時刻歴変位を重錘衝撃力波形と同期させて
 計測したことにより、貫入中の変曲点と重錘衝撃力の関
 係を特定することができた。
- 2) より厳しい落石条件下に対しても精度の高い最大衝撃力



の計算結果を得るためには、ラーメ定数の割り増し係数 の新たな算出方法を構築する必要があることがわかった。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会: 落石対策便覧、2000.6.
- 2) 牛渡裕二、川瀬良司、今野久志、岸 徳光: RC 製ロック シェッド模型の重錘落下挙動に関する二次元骨組解析法の 妥当性検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.61-66, 2011.7
- 3) 土木学会:土木技術者のための振動便覧、1985.