論文 敷砂緩衝材を設置した RC 製実規模ロックシェッド模型の衝撃載荷実 験

山口 悟*1・木幡 行宏*2・小室 雅人*3・岸 徳光*4

要旨:現在,RC 製落石覆道の設計は許容応力度法により行われているが,過去の被災事例の検証などから同 覆道は耐力的に非常に大きな安全率を有しているものと考えられる。本論文では,より合理的な断面設計を 可能とする性能照査型耐衝撃設計法を確立するための基礎資料の収集を目的に,RC 製実規模落石覆道を製作 し,重錘を繰り返し落下させる衝撃載荷実験を実施した。その結果,敷砂緩衝材を有する試験体頂版部に着 目し,許容応力度法によって求められた設計落石エネルギーと実験結果との間には,15 倍以上の差が認めら れた。

キーワード:道路防災施設, RC 製ロックシェッド, 重錘衝撃載荷実験, 敷砂緩衝材, 性能照査型設計法

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路には落石災害を防止 するための道路防災施設として落石覆道(以後,ロック シェッド)が数多く建設されている。そして近年,斜面 の経年劣化等により落石による道路災害(**写真-1**)が 発生している。

ロックシェッドの設計は現在,新設時はもとより,防 災点検などによる新たな落石に対する補強時において も許容応力度法の下に行われている¹⁾。また,過去の被 災事例の検証や数値解析的検討から,許容応力度法によ り設計された同種の構造物では,耐力的に非常に大きな 安全率を有していることが明らかになっている²⁾。

近年,様々な構造物の設計法が許容応力度法から限界 状態設計法を経て,性能照査型設計法へ移行してきてい ることから,ロックシェッド等の設計においても各性能 に対する断面設計を可能とする性能照査型耐衝撃設計 法の確立が望まれている。

筆者らは合理的な耐衝撃設計法を確立するための基礎的な研究として、小型や大型のRC梁、RCスラブに関する衝撃実験や、実験結果を精度よく評価可能な弾塑性衝撃応答解析を実施してきた³⁾。さらに、実ロックシェッドの2/5や1/2スケールRC製ロックシェッド模型を製作して重錘落下衝撃実験や数値解析を実施している。その結果、RC梁に関しては、小型から大型に至る数多くの実験結果を基に、入力エネルギー、残留変位あるいは最大変位、静的耐力から構成される性能照査式に対応した設計式を提案している⁴⁾。また、ロックシェッド模型を対象とした研究では、三次元弾塑性有限要素法や三次元動的骨組解析法の適用も提案し⁵⁾、これらの手法が実験結果を大略適切に評価可能であることを明らかにし



写真-1 落石による道路災害例(2008)

ている。また,現在のロックシェッド頂版上には緩衝材 として基本的に敷砂を使用することが規定されている ものの,より大きな落石荷重が想定される場合には,三 層緩衝構造(敷砂, RC版, EPS による構造。以後,TLAS) の使用も認められている。一方,性能照査型設計は既設 ロックシェッドの耐荷力評価としても使用されること より,既設ロックシェッド頂版上の緩衝材に関する現地 調査を実施した。その結果,緩衝材の多くは現地発生土 の礫質土であり,非常に強固に締め固まっていることが 明らかになった^の。

以上のように、部材レベル、縮尺模型レベルでの衝撃 実験および数値解析的検討を実施してきたが、RC 製ロ ックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法を確立するた めには、載荷位置や緩衝材を変化させた場合の実規模ロ ックシェッドに対する終局までの耐衝撃挙動の把握な

*1 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域社会基盤ユニット 教授 工博 (非会員)

- *3 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域社会基盤ユニット 准教授 博(工) (正会員)
- *4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)



図-1 試験体の形状寸法



写真-2 試験体の外観





らびに実験結果を基にした数値解析手法の精度向上が 必要不可欠である。

このような背景より、本研究では実規模ロックシェッ ド模型試験体を製作し、緩衝材として敷砂、砕石および TLAS の3種類を用いた場合について重錘落下衝撃載荷 実験を実施し、終局に至るまでの耐衝撃挙動データを取 得した。本論文ではその中の一つとして我が国で最も多 く採用されている敷砂緩衝材を用いた場合の実験結果 について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) 形状寸法および使用材料

図-1 には、実験に使用した RC 製ロックシェッド模型の形状寸法を、写真-2 にはその外観を示している。 試験体は、道路軸方向の長さが12m、外幅9.4m、壁高さ 6.4mの箱型構造であり、内空断面は幅 8m、高さ5mで、 頂版,底版,側壁,柱の厚さはいずれも0.7 mである。柱 の道路軸方向の長さが1.5 m,内空の四隅にはハンチを設 けている。ロックシェッド頂版上には緩衝材として厚さ *t* = 90 cmの敷砂が設置されている。

図-2 には、試験体の配筋状況を示している。鉄筋比 については一般的なロックシェッドと同程度としてお り、頂版下面および上面の軸方向鉄筋比についてはそれ ぞれD25を125 mm間隔およびD29を250 mm間隔(鉄筋比 0.68%)で配置している。頂版の配力筋については、現 行設計と同様に鉄筋量が軸方向鉄筋の50%程度を目安 に、上面にD19、下面にD22をいずれも250 mm間隔で配 置している。壁の断面方向鉄筋は、外側がD29、内側が D19をいずれも250 mm間隔,また配力筋は外側がD19、 内側がD13をいずれも250 mm間隔で配置している。底盤 の断面方向鉄筋は、上面がD22、下面がD16をいずれも250 mm間隔で配置しており、配力筋は上面、下面共にD16 を250 mm間隔で配置している。柱の軸方向鉄筋は、外側、 内側共にD29を144 mm間隔で10本,道路軸方向の両面は D29を250 mm間隔で配置している。帯鉄筋は,D16を中 間拘束鉄筋を含め,高さ方向に150 mm間隔で配置してい る。コンクリートのかぶりは,いずれの部材も鉄筋から の芯かぶりで100 mmとしている。表-1に鉄筋の引張試 験による力学的特性値を示す。なお,鉄筋の材質は全て SD 345である。また,コンクリートの設計基準強度は24 N/mm²であり,実験時の圧縮強度は28.3 N/mm² であった。

(2) 試験体の設計条件

実験に使用した実規模ロックシェッドの設計は、落石 対策便覧 ¹⁾を基本として行っている。すなわち,二次元 骨組解析により作用断面力を算出し、許容応力度法にて 断面設計を行うものである。設計落石衝撃力については 以下のようにして決定した。①既往の研究等より許容応 力度法で求めた耐荷力は、実際の限界耐力に対して 20 ~30 倍の安全率を有していること、②実験の制約(トラ ッククレーンを使用するため最大重錘質量10 ton,最大 落下高さ30m)より,最大載荷可能エネルギーは3,000kJ であること、③実験において終局限界状態を確認したい ことより, 試験体の設計落石エネルギーは, 3,000 kJ/30 (安全率) = 100 kJ とした。実験では、質量 2 ton の重錘 を使用することから設計落石エネルギーに相当する落 下高さは5mとなる。設計落石条件(質量2ton,落下高 さ5m)を基に落石対策便覧に示されている衝撃力算定 式により設計落石衝撃力を算定した。

2.2 実験方法

表-2 には、弾性域実験の後、塑性域実験を実施して いる全実験ケースを一覧にして示している。各実験ケー スを分かりやすくするために、緩衝材の種類(S:敷砂, G:砕石、TLAS:三層緩衝構造)、図-3 に示す重錘落 下位置として、柱位置を示すA、B、Cと柱側、中央、壁 側を示す、P、C、Wに、重錘質量と重力加速度、落下高 さを乗じ求められる入力エネルギーE(kJ)をハイフンで 結び簡略化して示している。本論文では、着色箇所の敷 砂緩衝材実験について考察している。

写真-3 には、重錘落下衝撃載荷実験の状況を示して いる。実験は、トラッククレーンを用いて弾性域の場合 (実験No. 1~7) には質量2 tonの重錘を、塑性域の場合 (実験No. 19, 20) には質量5 tonおよび10 tonの重錘を所

定の高さまで吊り上げ,着脱装置を介して自由落下させることにより実施している。実験は表-2 に示す落下高さの低い方から順次載荷する,漸増繰返し載荷法により行った。

質量2 tonおよび5 tonの重錘は,直径1.00 m,高さ97 cm で,底部より高さ17.5 cmの範囲が半径 80 cmの球状であり,質量10 tonの重錘は,直径1.25 m,高さ95 cmで,底部より高さ30 cmの範囲が半径1 mの球状となっている。

表-1 鉄筋の力学的特性値一覧

	材質	呼び径	降伏強度 <i>fy</i> (MPa)	引張強度 <i>f</i> u (MPa)		
	SD345	D29	390.9	554.6		
		D22	389.6	543.0		
		D19	397.1	597.9		
		D16	395.9	586.8		
		D13	395.5	556.2		

表-2 実験ケース

No	実験ケース	緩衝材	載荷 位置	重錘 質量 (ton)	落下高 さ (m)	入力エネ ルギー (kJ)
1	S-BC-E20	砂	BC	2	1	20
2	S-BW-E40		BW		2	40
3	S-BP-E40		BP			
4	S-BC-E40		BC			
5	S-AC-E40		AC			
6	S-AW-E40		AW			
7	S-AP-E40		AP			
8	G-AW-E20	— — — — — — — — — — — — — — — — — — —	AW	2	1	20
9	G-AC-E20		AC			
10	G-AP-E40		AP		2	40
11	G-AC-E40		AC			
12	G-BC-E40		BC			
13	G-BW-E40		BW			
14	G-BP-E40		BP			
15	G-CW-E40		CW			
16	G-CC-E250		CC	5	5	250
17	T-BC-E3,000	TT 10	BC	10	30	3,000
18	T-CC-E3,000	ILAS	CC			
19	S-AC-E250	砂	AC	5	5	250
20	S-BC-E1,500		BC	10	15	1,500
21	G-CC-E1,500	砕石	CC	10	15	1,500
22	G-AC-E1,500		AC			
23	G-CC-E3,000		CC		30	3,000



写真-3 実験状況(S-BC-E40)

2.3 敷砂緩衝材

本実験で用いた敷砂緩衝材は,最大乾燥密度1.561 g/cm³,粗粒率1.37,最適含水比18.8%の石狩市厚田知津 狩産の細砂である。粒度試験結果は,0.6,0.3,0.15,0.075 mm のふるい通過率がそれぞれ98,60,5,1%となっている。

実験に際しては型枠をロックシェッド頂版上の外周 に設置し、厚さ30 cm 毎に敷砂を投入し足踏みおよびバ ケット容量0.2 m³のバックホウを1往復させることによ って各層ごとの締固めを行い、所定の厚さである90 cm に成形した。敷砂緩衝材の湿潤密度および含水比の計測 は、30 cm 毎の締固め終了後に重錘落下点近傍を除く任 意の3 地点からシンウォールサンプリングチューブによ り実施した。各層毎の湿潤密度および含水比のばらつき は小さく、実験時の敷砂の湿潤密度は平均で1.559 g/cm³、 含水比は平均8.14%であった。

2.4 計測方法

本実験における測定項目は、1) 重錘の頂部表面に設置 したひずみゲージ式加速度計(容量 100 G, 200 G, 500 G, 1000 G, 応答周波数はそれぞれ DC~2.0 kHz, 3.5 kHz, 5 kHz および 7 kHz) 4 個による重錘衝撃力, 2) 非接触式 レーザ式変位計(LVDT,測定範囲±100 mm,応答周波 数約 1 kHz) 31 台による内空変位,鉄筋に貼付したひず みゲージ 240 ch による鉄筋ひずみである。また,高速度 カメラ 2 台による重錘貫入量と頂版変位である。

高速度カメラは1msにて撮影し、デジタルデータレコ ーダと同期を行っている。衝撃実験時の各種応答波形に ついては、サンプリングタイム 0.1ms 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、各波形の高 周波成分については1msの矩形移動平均法により処理 を行っている。弾性域の変位波形については応答値が非 常に小さく、応答値に対するノイズレベルが大きいため 正確な値を把握することが困難なことから本論文の考 察からは除外している。また、塑性域の各実験ケースの 終了後には、試験体のひび割れ状況を撮影している。

3. 実験結果

3.1 重錘貫入量の時刻歴応答

図-4 には、重錘が緩衝材に衝突した時間を0 msとして、高速度カメラから求めた重錘貫入量の時刻歴応答波形を示している。なお、高速度カメラと重錘加速度計から判定される衝突時刻は、サンプリング間隔の違いから1 ms以内の差は生じているものの、ほぼ同時刻に励起していることを確認している。

図より,重錘質量が2 tonで弾性域内(*E* = 20~40 kJ)の重錘貫入量を比較すると,入力エネルギーが最も小さいE20の貫入量は100 mm以下となっていることが分かる。



同一入力エネルギー(E = 40 kJ)で載荷位置を変化させ た場合の波形を比較すると、いずれの場合もほぼ同様の 性状を示している。すなわち、重錘衝突後ほぼ線形的に 貫入量が増大し、その後勾配が徐々に緩やかになり最大 貫入量に達している。最大重錘貫入量は110~160 mm の 範囲内となっており、重錘貫入量が最も小さいケースは、 S-BW-E40 であり、次に小さいものは S-AW-E40 である。 これら 2 ケースの載荷位置は、図-3 に示すように壁部 側であることより、剛性の高い壁部によって頂版の変形 量が抑制されたものと考えられる。さらに、これらの載 荷位置における重錘衝撃力は、同一の道路軸直角方向断 面(道路横断面方向、柱 A および B 断面)において、最 も大きな値を示していることを確認している。

また,入力エネルギーの増加に伴い重錘貫入量も増大 する傾向を示し,最も入力エネルギーが大きい S-BW-



図-6 各種時刻歴応答波形(E=1,500kJ, S-BC-E1,500)

E1,500の場合では最大貫入量が約650mmとなっている。 3.2 各種時刻歴応答波形

図-5,6には、入力エネルギーが大きい塑性域の2ケ ース(*E* = 250,1,500 kJ)について、重錘が緩衝材に衝 突した時間を0msとして、重錘衝撃力、載荷点変位、重 錘貫入量および載荷点直下近傍の頂版部における鉄筋 ひずみに関する時刻歴応答波形を比較して示している。 なお、載荷点変位に関しては、頂版下面の鉛直変位をレ ーザ式変位計(LVDT)によって計測したものと頂版下 面に設置したターゲット(ϕ 80 mm)を約20 m離れた位 置から高速度カメラにて計測したものを示している。な お、図-6には高速度カメラの調整不良により、その載 荷点変位は示していない。

両図より,重錘衝突初期より重錘衝撃力が鋭く励起す ると同時に,重錘も敷砂内に貫入していることが分かる。 その後,5ms程度経過後に上下縁の鉄筋ひずみの励起が 見られる。また,いずれのケースにおいても重錘衝撃力, 変位量および鉄筋ひずみが最大値に達した後に,重錘貫 入量は最大値を示していることが分かる。

両図の各波形性状を比較すると, 重錘衝撃力波形によ

る比較では入力エネルギーの大きい E = 1,500 kJ の場 合には正弦半波状の最大重錘衝撃力の発生時刻が早く, その後約 $t = 50 \text{ ms} c 1,100 \text{ kN}程度の一定値が続いた後,}$ t = 130 ms程度で 2 波目が合成されたような波形性状を示している。一方, <math>E = 250 kJの場合には, 1 波目の最大 ピーク値に達するまでの時刻がE = 1,500 kJの場合と比 較して若干遅いものの, 重錘衝撃力の継続時間は 130 ms 程度と若干短いことが分かる。これは, 頂版の変位や鉄 筋ひずみの波形性状からも明らかなように入力エネル ギーが小さいことが要因であるものと推察される。

図-5より載荷点変位波形を比較すると、高速度カメ ラによる最大変位量は、レーザ式変位計によるそれより も1.5 mm程小さな値を示している。また、レーザ式変位 計では頂版が上側に変位する応答を示しているものの、 カメラによる計測ではそのような応答は示されていな い。一方で下端鉄筋ひずみに着目すると、ひずみが負の 値を示していないことから、頂版が上方に変位をしてい ないものと推察され、高速度カメラによる計測結果が実 際の変位量を反映しているものと判断される。なお、レ ーザ式変位計による変位波形に関しては、現在再精査中 である。

残留変位に関しては、図-5の端部載荷であるE = 250 kJの場合には、載荷点直下近傍の下縁鉄筋ひずみに残留 ひずみが若干発生しているものの、実験後の頂版には残 留変位が生じていない。これに対して、図-6に示すE = 1,500 kJの場合には、実験後の頂版には1.7 mmの残留変位 が発生していることを確認している。

3.3 最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係

図-7 には、各最大重錘衝撃力値と入力エネルギーの 関係を示している。図中には、落石対策便覧¹⁾ により算 出した衝撃力 ($P = 2.108 (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \cdot a$ より、 重錘質量:m = 2, 5, 10 ton,重力加速度: $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, ラーメの定数: $\lambda = 1,000, 1,500 \text{ kN/m}^2$,割増係数: $a = \sqrt{D/T} = 1.05, 1.18, D$:重錘径 100, 125 cm,T:敷砂 厚 90 cm)を曲線で示している。

図より,入力エネルギーの増加に伴い最大重錘衝撃力 も増大していることが分かる。また,図から実験結果の 最大重錘衝撃力は,λ=1,000~1,500 kN/m²程度の値を仮 定することにより,適切に評価可能であると考えられる。 3.4 **ひび割れ発生状況**

図-8 には、入力エネルギーE = 1,500 kJの頂版下面の ひび割れ発生状況(赤色)を各実験ケース順に重ね書き をして示している。

図より, 頂版下面の載荷点を中心にRC版特有の放射状 の曲げひび割れや道路軸方向の曲げひび割れが発生し, 頂版部に残留変位が若干確認されている。しかしながら, かぶりコンクリートの剥落も見られず, 十分供用可能で あることが分かる。

以上より,90 cm 厚の敷砂緩衝材の緩衝効果は,入力 エネルギーがE = 1,500 kJまでは使用限界を十分確保可 能であるものと判断される。また,試験体頂版部に着目 して考えると,許容応力度法によって求められた設計落 石エネルギー (E = 100 kJ)と実験結果のE = 1,500 kJから, 15 倍以上の差が認められた。

4. まとめ

本研究より得られた結果を整理すると,以下のように 示される。

- 敷砂緩衝材を設置したロックシェッドの載荷時の最 大重錘衝撃力は,落石径と敷砂厚を考慮(割増係数:
 α)し、かつラーメの定数をλ=1,000~1,500 kN/m²と した落石対策便覧により評価可能である。
- 90 cm厚の敷砂緩衝材の緩衝効果は、入力エネルギー がE = 1,500 kJまでは使用限界を十分確保可能である。
- 3) 試験体頂版部に着目し,許容応力度法によって求められた設計落石エネルギーと実験結果との間には,15倍以上の差が認められた。



図-7 最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係



参考文献

- 1) (社) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6
- 2) 熊谷守晃:ルランベツ覆道における落石災害に関する報告,第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集,pp.286-290,1993.6
- 岸 徳光,今野久志,三上 浩: RC 梁の繰り返し 重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.55A, pp. 1225-1237, 2009.3
- 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩, 岡田慎哉: 大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 構造 工学論文集, Vol. 54A, pp. 1077-1088, 2008.3
- 5) 牛渡裕二,今野久志,小室雅人,保木和弘,岸 徳光: RC 製ロックシェッドに関するファイバー要素を用いた三次元骨組動的応答解析法の適用性検討,構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 1008-1016, 2013.3
- 6) 山口 悟,木幡行宏,今野久志,西 弘明,小室雅 人,岸 徳光:既設落石防護覆道上の緩衝材の実態 調査について,第48回地盤工学研究発表会,pp. 2055-2056,2013.7