

緩衝材として碎石を設置した実RC製ロックシェッドの重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact loading tests of a full-scale RC rock-shed with gravel cushion

室蘭工業大学大学院
(独) 寒地土木研究所
室蘭工業大学大学院
釧路工業高等専門学校

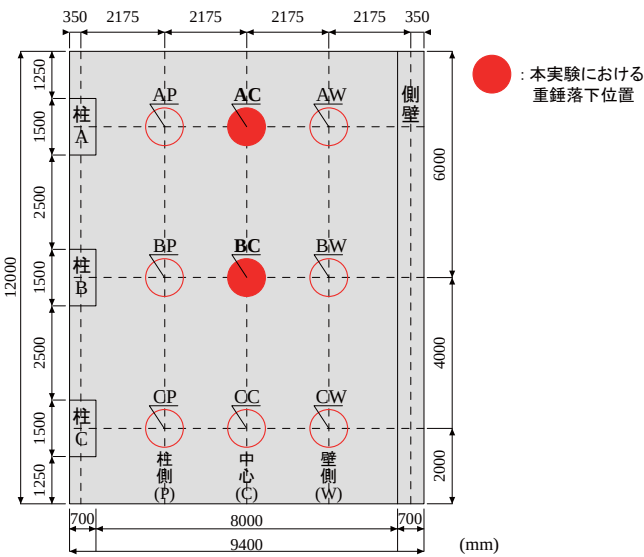
○ 学生会員 佐伯 侑亮 (Yusuke Saeki)
正会員 今野 久志 (Hisashi Konno)
正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

日本海沿岸や山間部には落石から通行車両や人命を保護する落石防護覆工が建設されている。現在この種の構造物の設計は落石対策便覧¹⁾などの要領に基づく許容応力度法で行われているが、近年の実証実験や数値解析の研究により過大な安全余裕度を有していることが指摘されている。そのため、現行設計法はより合理的な性能規定に基づく性能照査型設計法に移行することが望ましい。

著者らはこれまでRC製ロックシェッドに関する性能照査型耐衝撃設計法の確立を目的に、RC梁やRCスラブなどの部材単位での実験²⁾や数値解析³⁾から研究を開始し、さらには2/5および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^{4)~7)}や数値解析を実施している。しかしながら、これらの検討はすべて縮小模型によるものであることから、合理的設計法確立のためには実大規模の実証実験等により寸法効果等の影響を明確にすることが極めて重要である。

このような背景より、著者らはRC製ロックシェッドに関する性能照査型設計法の確立を目的として、実構造物の各種耐衝撃挙動のデータ取得のために、実規模RC製ロックシェッドを製作し、緩衝材種類、重錘質量、落下高さ、落下位置を変化させた重錘落下衝撃実験を行った(表－1参照)。本論文では、緩衝材として碎石を用い、使用限界を超過する入力エネルギーを作用させた場合の実験ケースを対象に、ロックシェッドの耐衝撃挙動や破壊性状について検討する。



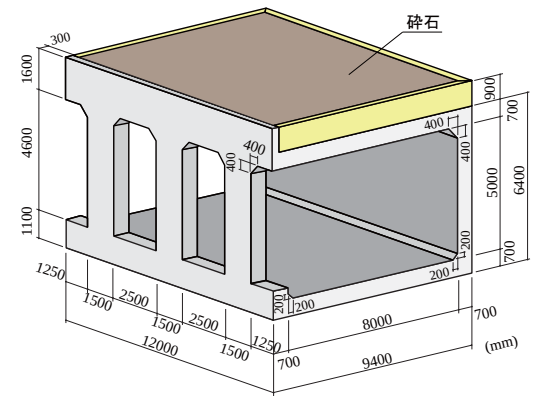
図－1 重錘落下位置

2. 実験概要

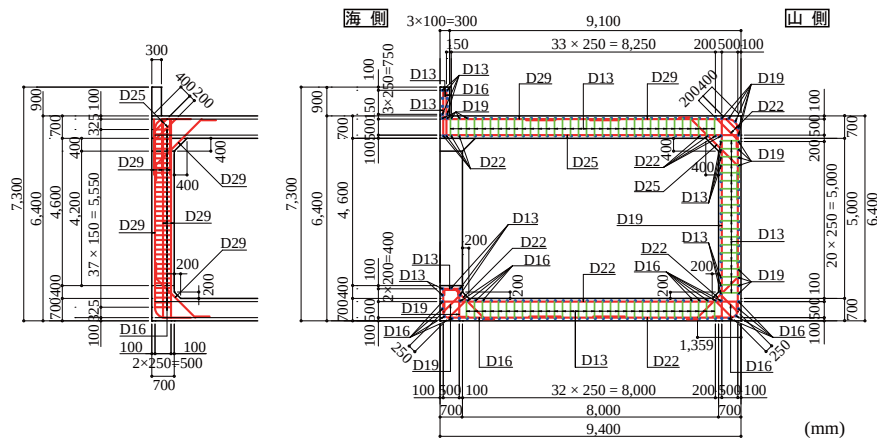
表－1には一連の実験ケースを整理して示している。また、図－1には重錘落下位置を示している。本論文では、緩衝材に碎石を用い入力エネルギーを1,500 kJとして、重錘落下位置をロックシェッドの頂版中央部および端部としたケース(No.21, 22)を対象に検討を行う。また、本論文ではこれらのケースをそれぞれ中央載荷および端部載荷と呼ぶこととする。実験は後述するロックシェッド模型に碎石を90 cm敷き、所定の位置に質量10 tの鋼製重錘

表－1 実験ケース一覧

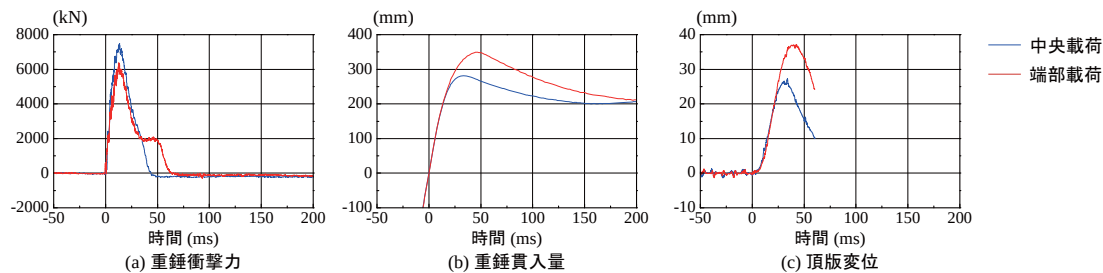
No.	ケース名	緩衝材	載荷位置	重錘質量 (t)	落下高さ (m)
1	S-BC-E20	砂	BC	2	1
2	S-BW-E40		BW		2
3	S-BP-E40		BP		
4	S-BC-E40		BC		
5	S-AC-E40		AC		
6	S-AW-E40		AW		
7	S-AP-E40		AP		
8	G-AW-E20	碎石	AW	2	1
9	G-AC-E20		AC		2
10	G-AP-E40		AP		
11	G-AC-E40		AC		
12	G-BC-E40		BC		
13	G-BW-E40		BW		
14	G-BP-E40		BP		
15	G-CW-E40		CW		
16	G-CC-E250		CC	5	5
17	T-BC-E3000	TLAS	BC	10	30
18	T-CC-E3000		CC		30
19	S-AC-E250	砂	AC	5	5
20	S-BC-E1500		BC	10	15
21	G-BC-E1500	碎石	BC	10	15
22	G-AC-E1500		AC		15
23	G-CC-E3000		CC		30



図－2 ロックシェッド形状寸法



図－３ ロックシェッド配筋図



図－４ 重錘衝撃力、重錘貫入量および载荷点頂版変位に関する応答波形

表－２ 鉄筋の力学的特性値一覧

材質	呼び径	降伏応力 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)
SD 345	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

を高さ 15 m から自由落下させることにより行っている。砕石は最大の締め固め度となるように 30 cm 厚ごとにタンピングランマーを用いて十分に転圧して設置した。

図－２には、実規模ロックシェッド模型の形状寸法を示している。本ロックシェッドの設計では緩衝材として 90 cm 厚の敷砂を用いることを前提に設計落石エネルギーを 100 kJ としている。従って、本実験では設計の 15 倍の落石エネルギーを作用させることとなる。

図－３には、試験体の配筋状況を表－２には本実験で利用した各鉄筋の力学的特性値の一覧を示している。なお、鉄筋の材質はすべて SD 345 である。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としてはそれぞれ D 25 を 125 mm 間隔および D 29 を 250 mm 間隔(鉄筋比 0.68 %)で配置している。コンクリートのかぶり、いずれの部材も鉄筋からの芯かぶりとして 100 mm としている。またコンクリートの設計基準強度は 24 MPa であり、実験時の底盤、柱/壁、頂版の圧縮強度はそれぞれ、30.7 MPa、30.2 MPa および 37.9 MPa であった。測定項目は加速度 α 、鉄筋ひずみ ε 、頂版、柱、壁の内空変位 δ 、重錘貫入量 Δ である。また実

験終了後には頂版裏面のひび割れを撮影し、ひび割れ性状を観察している。

3. 実験結果および考察

3.1 時刻歴応答波形

図－４には、重錘衝撃力、重錘貫入量、および载荷点直下における頂版内空変位(以後、頂版変位)の応答波形を示している。図－４(a)の重錘衝撃力波形より、両ケースともに継続時間が 50 ms 程度の正弦半波状の波形性状を示していることがわかる。また、最大値は中央および端部载荷の場合でそれぞれ 7,500 および 6,400 kN 程度であることから、衝撃力算定のための振動便覧式からラメ定数を求めるとそれぞれ 6,000 および 4,000 kN/m² 程度である。また、端部载荷の場合には経過時間 $t = 40 \sim 50$ ms において、重錘衝撃力が 2,000 kN 程度を示している。これは、頂版部のリバウンドにより重錘が再衝突したことによるものと考えられる。

図－４(b)の重錘貫入量波形は、経過時間 20 ms 程度では、落下位置によらずほぼ同様の性状を示しており、一気に 250 mm 程度まで貫入していることがわかる。また、その後の挙動を比較すると中央载荷の方が端部载荷の場合よりも最大貫入量およびリバウンド量小さいことがわかる。

図－４(c)の頂版変位波形より、最大変位は端部载荷の場合の方が大きいことがわかる。これは端部载荷の場合には頂版の変形に対する拘束度が低いと考えられる。

3.2 鉄筋ひずみ最大値一覧

表－３には、実験結果の一覧を示している。表より、柱および壁部の外縁および頂版の下縁鉄筋において 0.2 % 程度の引張ひずみが発生していることがわかる。このこと

表-3 最大値一覧

実験ケース	最大重錘 衝撃力 (kN)	最大貫入量 (mm)	最大変位 (mm)	載荷部断面の最大鉄筋ひずみ(%)					
				柱部		頂版		壁部	
				外縁	内縁	上縁	下縁	外縁	内縁
G-BC	7,491	281	27.4	0.183	-0.059	-0.041	0.194	0.159	-0.026
G-AC	6,365	349	37.1	0.186	-0.077	-0.035	0.204	-	-0.019

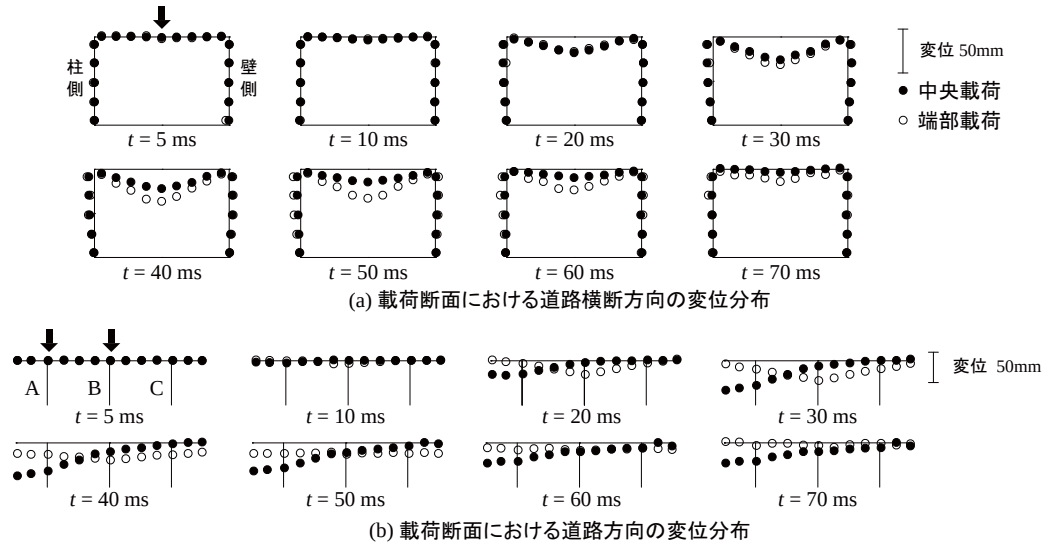


図-5 載荷断面における変位分布の経時変化

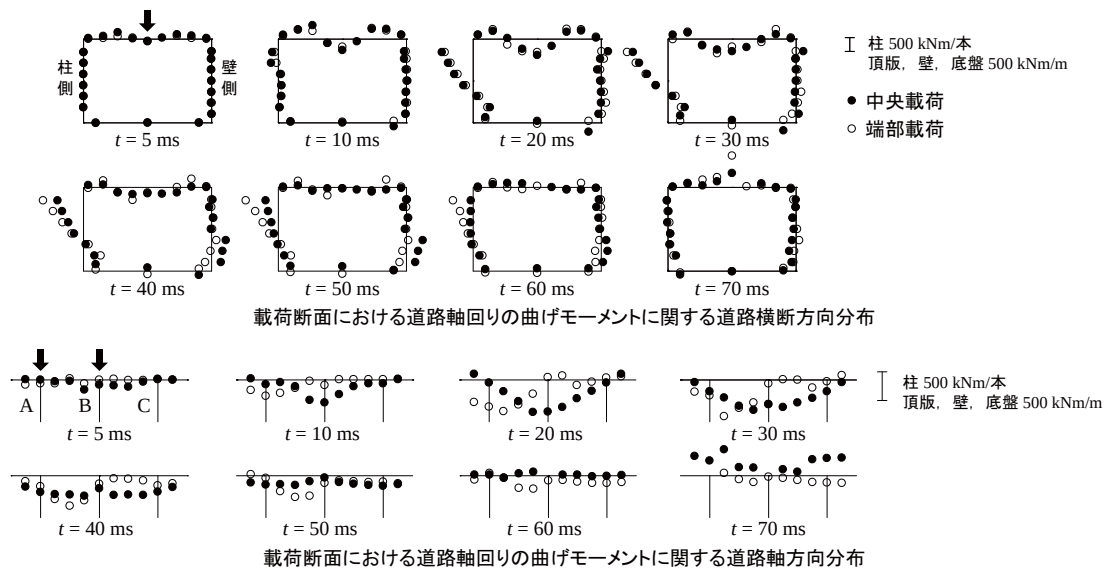


図-6 載荷断面における曲げモーメント分布の経時変化

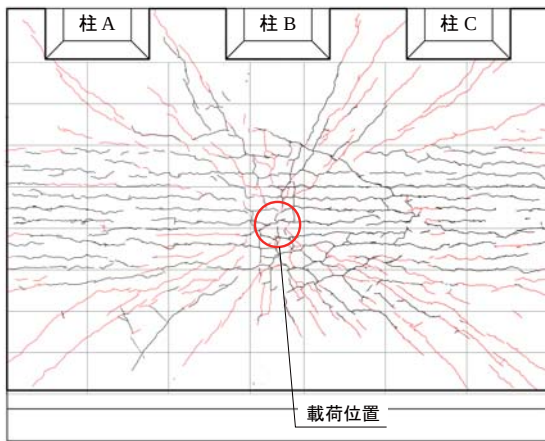
より、ロックシェッドは使用限界状態を大きく上回る損傷を受けているものと考えられる。

3.3 変位分布性状

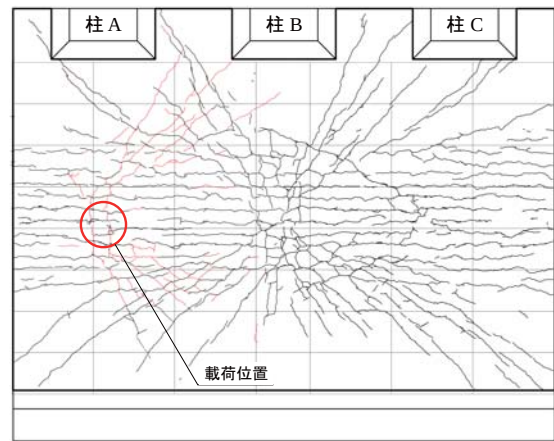
図-5には、載荷断面における変位分布の経時変化を示している。図-5(a)の道路横断方向の変位分布より、中央および端部載荷の場合の変位は、 $t = 10 \sim 30$ msにかけて急激に増大し、その後復元する性状を示していることがわかる。また、経過時間 $t = 20$ ms までは、両者ほぼ同様の分布性状を示しているものの、 $t = 30$ ms 以降において、端部載荷の場合の変位が大きくなる傾向にある。こ

れは端部載荷の場合には、衝撃荷重を分担する断面が中央載荷の場合よりも少なく変形に対する拘束度が低いためと考えられる。

図-5(b)の道路軸方向の変位分布より、中央載荷の場合には、 $t = 30$ ms において中央部の変形量が最も大きく、三角形の分布を示した後、全体変形に推移することがわかる。これに対し、端部載荷の場合には、 $t = 40$ ms においてロックシェッド端部が最大変位を示し、その後復元する性状を示す。ここで、中央部であるB断面、および載荷部の反対側端部のC断面の変形量は極めて小さい。



(a) 中央載荷の場合



(b) 端部載荷の場合

図-7 実験終了後裏面ひび割れ性状

このことより、载荷部である A 断面近傍は相対的な変形量が大きいため著しく損傷しているものと推察される。

3.4 曲げモーメント経時変化

図-6には载荷断面における曲げモーメント分布の経時変化を示している。図-6(a)の道路軸回りの曲げモーメントの道路横断方向の分布より $t = 30 \text{ ms}$ までは両ケースともにほぼ同様の経時変化を示しており、典型的な門方骨組と類似の曲げモーメント分布を示していることがわかる。ただし、壁部の曲げモーメントは頂版の場合に比較して小さい。また、 $t = 40 \text{ ms}$ 以降では、中央载荷の場合における柱部の曲げモーメントが端部载荷の場合よりも早期に復元する傾向を示している。

図-6(b)の道路軸回りの曲げモーメントに関する道路軸方向分布を見ると、中央载荷の場合には $t = 20 \text{ ms}$ において、载荷点部 (B 断面) の曲げモーメントが最大となりその後、 $t = 40 \text{ ms}$ において A、C 断面に曲げモーメントが作用し、 $t = 70 \text{ ms}$ では負の曲げモーメントに転じている。これに対し、端部载荷の場合には $t = 30 \text{ ms}$ において载荷部よりも中央側の断面の曲げモーメントが最大となり、その後復元するものの負の曲げモーメントは発生していない。

3.5 頂版裏面ひび割れ性状

図-7(a), (b)にはそれぞれ中央および端部载荷実験終了後における、頂版裏面ひび割れ性状を示している。図には既存のひび割れを黒線で、実験終了後におけるひび割れを赤線で示している。

(a) 図より、中央载荷の場合には、载荷点から放射状にひび割れが進展していることがわかる。また、道路軸方向に発生している既存のひび割れ幅が拡大していることも確認している。従って、ロックシェッド頂版部には、道路軸回りの曲げモーメントが卓越するのは勿論のこと、変形量の増大に伴って壁および柱側にはねじりモーメントも発生していることがわかる。

(b) 図より、端部载荷の場合には、载荷点から中央部側に向かって放射状のひび割れが発生していることがわかる。なお、ひび割れの分散範囲が中央载荷の場合よりも小さいことから载荷点近傍のひび割れ幅は中央载荷の場合よりも大きいものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、RC 製ロックシェッドに関する性能照査型設計法の確立を目的として、実構造物の各種耐衝撃挙動データの取得のため、実規模 RC 製ロックシェッドを製作し重錘落下衝撃実験を実施した。本実験により得られた知見を整理すると以下の通りである。

- 1) 緩衝材として碎石を用いる場合のラーメ定数は $4,000 \sim 6,000 \text{ kN/m}^2$
- 2) 端部载荷の場合には、中央载荷の場合と比較して、頂版部の変形量が大きく、かつ局所化する傾向にある。
- 3) 使用限界を超過する落石エネルギーが作用する場合には頂版の裏面に放射状のひび割れが発生する。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) Schellenberg, K. : On the design of rockfall protection galleries, vdf Hochschulverlag an der ETH Zurich, 2009, ETH e-collection
- 3) Schellenberg, K., Kishi, N., and Konno, H.: Analytical model for rockfall protection galleries - a blind prediction of test and conclusion, Applied mechanics and materials, Vol.82, pp.722-727, 2011. 9
- 4) 今野久志，岸 徳光，石川博之，三上 浩：敷砂を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.2, 2006.7
- 5) 岸 徳光，西 弘明，今野久志，牛渡裕二，保木和弘：2 辺支持大型 RC スラブに関する重錘落下衝撃実験：構造工学論文集，Vol.57A, pp.1181-1193, 2011.3
- 6) 山口 悟，岸 徳光，今野久志，西 弘明：敷砂緩衝材を有する RC 製ロックシェッド模型に関する衝撃载荷実験，構造工学論文集，Vol.56A, pp.1149-1159, 2010.3
- 7) 西 弘明，岸 徳光，牛渡裕二，今野久志，川瀬良司：敷砂緩衝材を設置した 1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol.57A, pp.1173-1180, 2011.3