

# 碎石を敷設した実規模 RC 製ロックシェットの重錘落下衝撃荷重載荷時における弾性衝撃挙動

Elastic impact behavior of a full-scale RC rock-shed with gravel cushion under falling-weight impact loading

岸 徳光\*, 今野 久志\*\*, 山口 悟\*\*\*, 栗橋 祐介\*\*\*\*

Norimitsu Kishi, Hisashi Kon-No, Satoru Yamaguchi, and Yusuke Kurihashi

\*工博, (独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校, 校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛西 2-32-1)

\*\*博(工), 寒地土木研究所 寒地構造チーム, 統括研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

\*\*\* 寒地土木研究所 寒地構造チーム, 研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

\*\*\*\* 博(工), 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット, 講師 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**Key Words :** RC rock-shed, gravel cushion, falling-weight impact test, elastic impact behavior

キーワード : RC 製ロックシェット, 碎石緩衝材, 重錘落下衝撃実験, 弾性衝撃挙動

## 1. はじめに

落石防護構造物の一つである落石覆道(以後、ロックシェット)は、現在のところ落石対策便覧<sup>1)</sup>等の要領に基づき許容応力度法によって断面設計が行われている。しかしながら、許容応力度法に基づいた設計は、一般的には耐力的に余裕がありコスト高となる傾向にある。また、近年さまざまな構造物の設計法が許容応力度法から性能照査型設計法に移行している。ロックシェットに関しては、過去の被災事例<sup>2)</sup>やこれまでの研究成果<sup>3)</sup>から、終局限界耐力に対して大きな安全率を有していることが明らかとなっている。このことから、衝撃作用を受ける同種構造物に関する性能照査型設計法への移行は急務であるものと判断される。

筆者らは、RC 製ロックシェット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 版さらには 2/5 および 1/2 縮尺 RC 製ロックシェット模型を製作して重錘落下衝撃実験<sup>例えば 4)</sup>を実施し、その耐衝撃挙動を把握すると共に、実験結果を基に終局限界状態までの三次元弾塑性衝撃応答解析法の妥当性検討<sup>5)</sup>も実施している。

しかしながら、ロックシェットに対する性能照査型耐衝撃設計法を確立するためには、これまでに実施してきた各種実験における試験体の実構造物に対する寸法効果や衝撃荷重載荷時間と試験体の最低次固有振動数との関係等が弾性および弾塑性挙動に及ぼす影響を考慮しなければならず、それらの影響を排除するためにも実現象を再現した実規模実験を実施することが必要不可欠であるものと判断される。また、今後数値解析的検討において RC 製ロックシェットの弾塑性衝撃挙動を詳細に検討するためには、弾性領域における耐衝撃挙動データを詳細に整理することも重要である。

このような観点から、本論文では、実規模 RC 製ロック

シェット頂版に緩衝材として碎石を設置した場合における弾性衝撃挙動を明らかにすることを目的に、質量 2 ton の重錘を 2 m の高さから落下させる弾性に近い状態での重錘落下衝撃実験を実施したので報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

図-1 には、実験に使用した RC 製ロックシェットの形状寸法を示している。試験体は、道路軸方向長さが 12 m、外幅 9.4 m、壁高さ 6.4 m の箱型構造である。内空断面は幅 8 m、高さ 5 m であり、内空の四隅にはハンチを設けている。柱の道路軸方向幅は 1.5 m、部材厚さは、頂版、底盤、柱および側壁共に 0.7 m である。

図-2 には試験体の配筋状況を、表-1 には本実験で使用

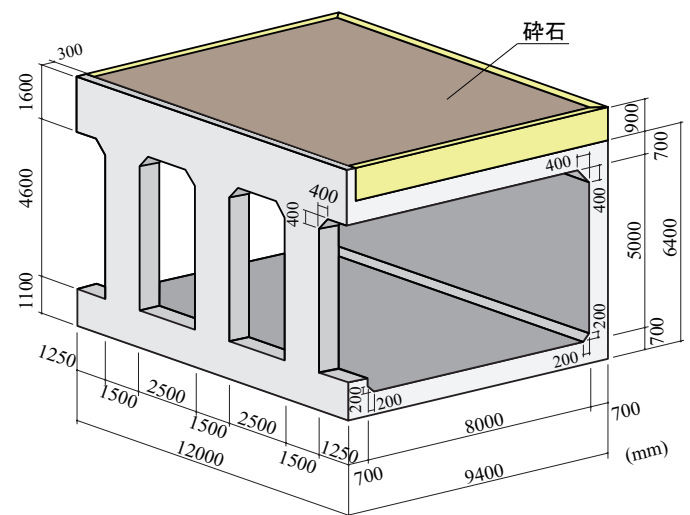


図-1 試験体の形状寸法

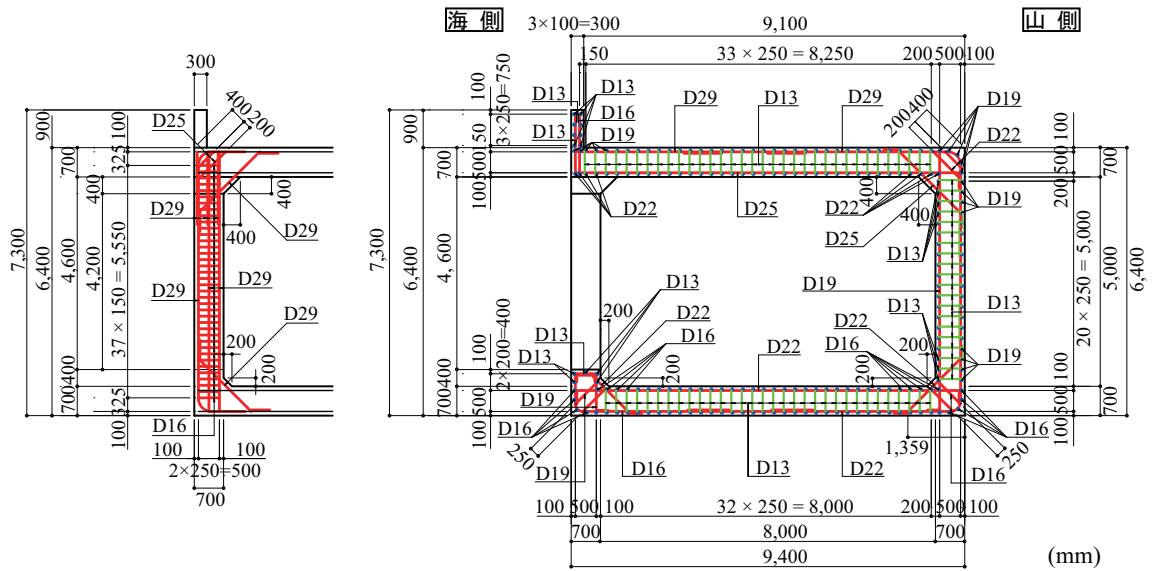


図-2 配筋状況

表-1 鉄筋の力学的特性値一覧

材質	呼び径	降伏強度 $f_y$ (MPa)	引張強度 $f_u$ (MPa)
SD 345	D29	391	555
	D22	390	543
	D19	397	598
	D16	396	587
	D13	396	556

## 2.2 衝撃実験概要

図-3には、重錘落下位置を示している。また、表-2には実験ケースの一覧を示している。実験は、緩衝材の厚さを900 mmとし、各載荷位置に対して質量2 tonの鋼製重錘をトラッククレーンにより高さ2 mまで吊り上げ、所定の位置に自由落下させることによって行っている。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の球形状となっている。

実験に使用した砕石は、小樽市美晴産の路盤用切込砕石(0~30 mm)である。粒度試験結果は、13.2 mm、2.36 mm、600  $\mu\text{m}$ のふるい通過率がそれぞれ60.8%、26.7%、14.3%であり、表乾密度は2.678  $\text{g}/\text{cm}^3$ であった。砕石は最大の締固め度が得られるように、所定の厚さ(300 mm)に敷き均し、タンピングランマーを用いて、ランマーのプレートマークが残らない状態になるまで(縦横それぞれ約1往復)転圧を行っている。

## 2.3 計測方法

本実験における計測項目は、1) 重錘の頂部表面に設置したひずみゲージ式加速度計(容量100 G、応答周波数がDC~2.0 kHz)による重錘衝撃力、2) 非接触型レーザ式変位計(最大ストローク200 mm、応答周波数約1 kHz) 31台による試験体各部の変位、3) 鉄筋に貼付したひずみゲージ240 chによる鉄筋ひずみ、および4) 高速度カメラ2台による重錘貫入量である。衝撃荷重載荷時における各種応答波形は、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、各応答波形の高周波成分はウィンドウ幅1 msの矩形移動平均法により平滑化処理を行っている。なお、変位波形は、S/N比が小さく正確な値を把握することが困難であったことから、本論文の考察からは除外している。

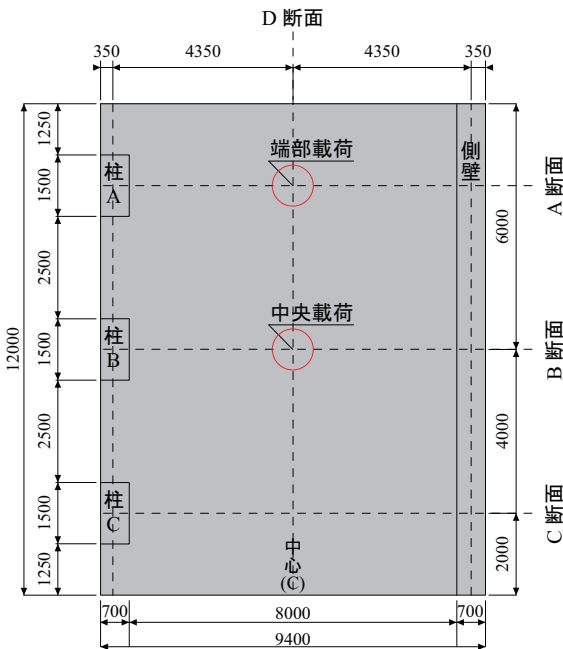
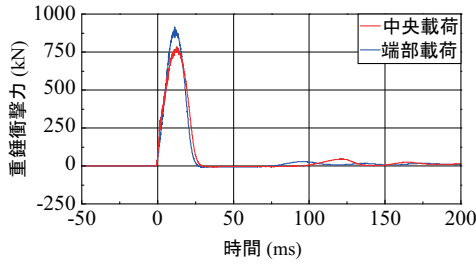


図-3 重錘落下位置

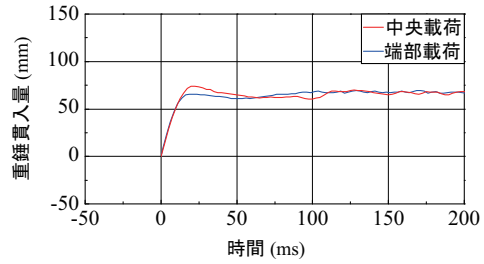
した各鉄筋の力学的特性値の一覧を示している。鉄筋比は一般的なロックシェッドと同程度としている。また、コンクリートの設計基準強度は24 MPaであり、実験時の底盤、柱/壁、および頂版コンクリートの圧縮強度は、それぞれ30.7 MPa、30.2 MPa、および37.9 MPaであった。

表-2 実験ケース一覧

载荷位置	緩衝材厚さ (mm)	重錘質量 (ton)	落下高さ (m)	入力エネルギー $E_k$ (kJ)
中央	900	2	2	40
端部				



(a) 重錘衝撃力波形



(b) 重錘貫入量波形

図-4 重錘衝撃力波形および重錘貫入量波形

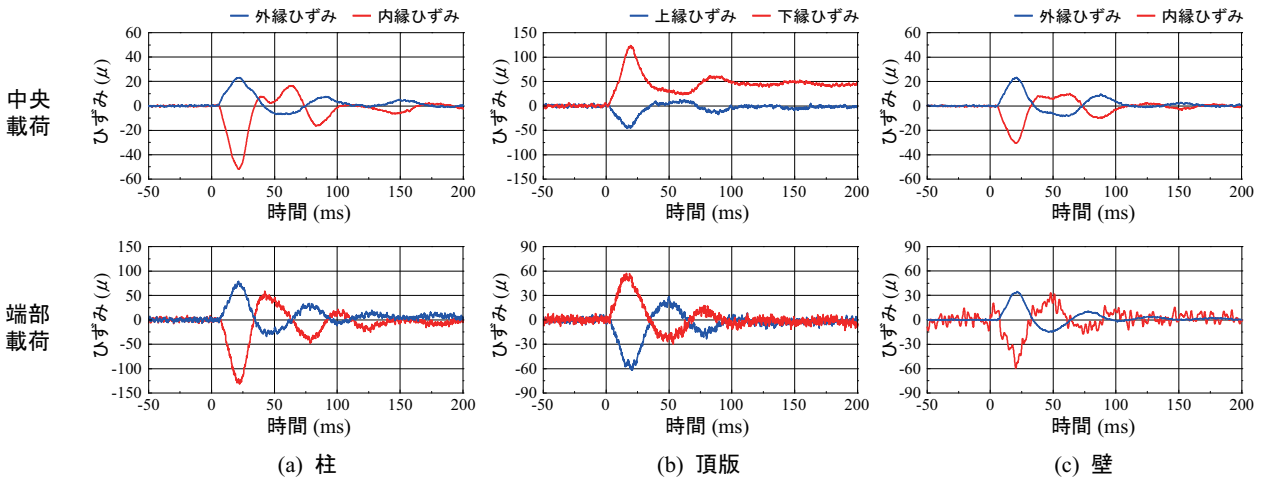


図-5 载荷断面における道路横断方向鉄筋（主鉄筋）のひずみ波形

### 3. 実験結果

#### 3.1 各種応答波形

##### (1) 重錘衝撃力波形と重錘貫入量波形

図-4には、重錘衝撃力波形および重錘貫入量波形を示している。また、表-3には、後述する鉄筋ひずみ値を含めた実験結果の最大値の一覧を整理して示している。

図-4(a)より、重錘衝撃力波形はいずれも重錘衝突直後に最大振幅を示し、継続時間が25ms程度の正弦半波状の波形が励起していることが分かる。最大重錘衝撃力は、中央载荷時よりも端部载荷時の方が大きく、入力エネルギーが大きい場合にはたわみ剛性の小さい端部载荷時に小さくなると云う傾向と異なる。これは、入力エネルギーが39.2kJと小さいことにより、対応して頂版の応答変位も小さいことから、頂版のたわみ剛性よりも端部载荷点近傍における緩衝材(碎石)の締め固め度が中央部よりも大きくなったことによるものと推察される。

また、図-4(b)に示す重錘貫入量に関する時刻歴波形を見ると、いずれも最大重錘衝撃力が発生する経過時間25ms

程度において最大重錘貫入量に到達し、その後若干リバウンドした後、一定値に漸近している。なお、端部载荷の場合には中央点载荷の場合よりも最大重錘貫入量が小さいことが分かる。これは、上述の端部载荷点近傍部の緩衝材の締め固め度が中央点部よりも大きいと推察したことと対応している。

なお、表-3に示している最大重錘衝撃力値から、落石対策便覧の評価式を用いてラーメの定数を算出すると、中央および端部载荷の場合でそれぞれ6,600および9,700 kN/m<sup>2</sup>程度となる。しかしながら、これらの評価値は入力エネルギーが小さく締め固め度が大きく影響する場合のものであるため、設計レベルの入力エネルギーに対しては未だ信頼性に乏しいと云わざるをえない。

##### (2) 鉄筋ひずみ波形

図-5には、载荷点断面の柱上部、頂版载荷部および側壁上部における断面方向鉄筋のひずみ波形を示している。図より、柱および壁部の場合には内外縁ひずみ、頂版の場合には上下縁のひずみの正負が交番していることが分かる。また、端部载荷の場合には、ひずみが零レベルに戻っていることから、ひび割れ等は発生していないものと判断される。

表-3 各種応答値の最大値一覧

荷重位置	最大重錘 衝撃力 (kN)	荷重部断面の最大鉄筋ひずみ ( $\mu$ )						最大貫入量 (mm)
		柱部		頂版		側壁部		
		外縁	内縁	上縁	下縁	外縁	内縁	
中央	787	23	-52	-46	124	23	-31	74
端部	917	79	-131	-62	57	36	-59	70

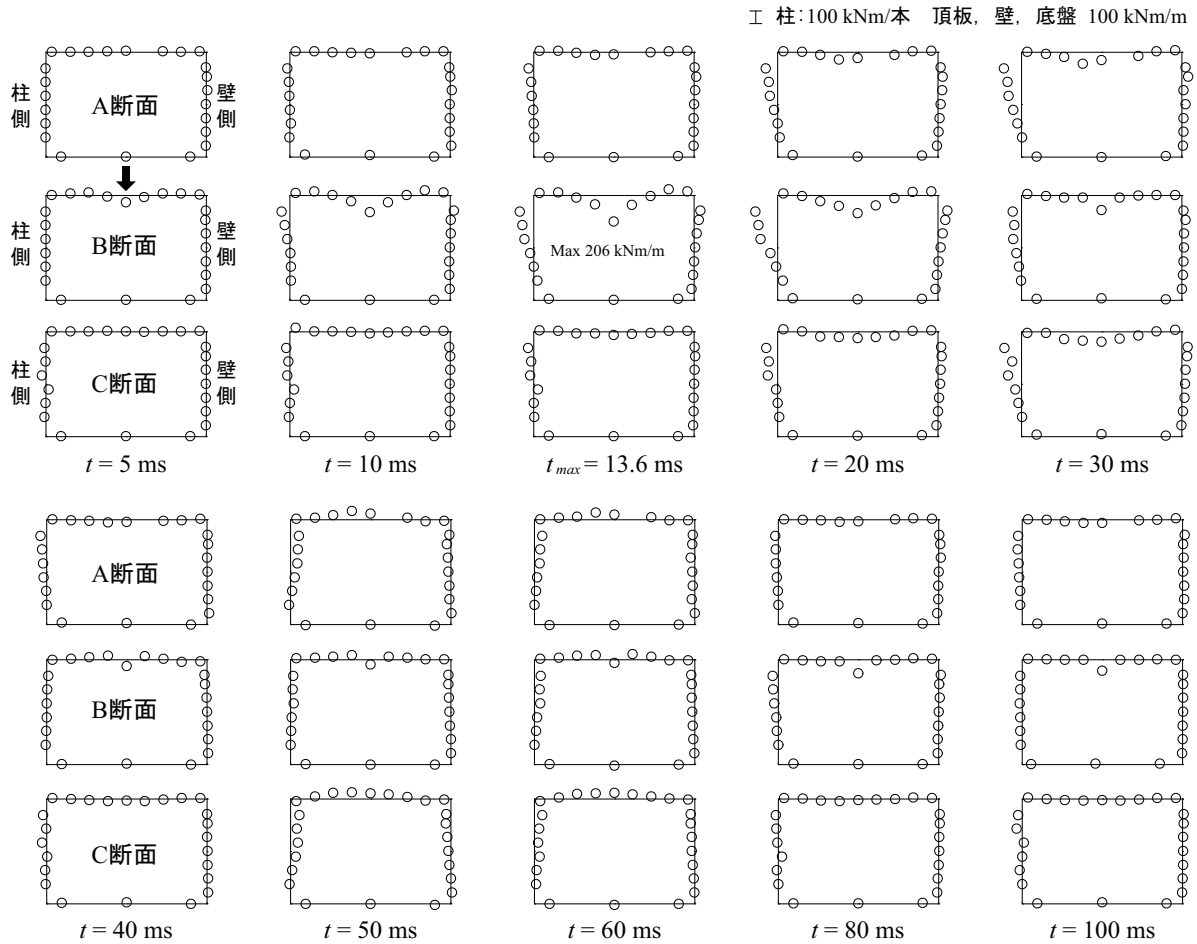


図-6 中央荷重の場合における道路横断方向曲げモーメント分布の経時変化

一方、中央荷重の場合には、頂版の下縁鉄筋に  $50 \mu$  程度の残留ひずみが発生している。これは、最大応答ひずみが  $120 \mu$  程度に達していることより、頂版下縁にはひび割れが発生していることを暗示している。

### 3.2 曲げモーメントの時刻歴分布図

#### (1) 道路横断方向の曲げモーメント分布

図-6には、中央荷重時における曲げモーメントの断面方向分布の経時変化を示している。図中、頂版および壁部の曲げモーメントは、単位幅 (1 m) 当たりの値とし、柱部に関しては断面当たりで評価している。ここでは、前述の鉄筋ひずみの応答波形が卓越する経過時間 100 ms までを、骨組の内側を正、外側を負の曲げモーメントとして示している。図には、最大曲げモーメント発生時刻 (以後、 $t_{max}$ ) の結果を示すとともに、最大曲げモーメント値を付記している。

なお、曲げモーメントは、以下のようにして評価した。す

なわち、

- i) 断面内のひずみ分布は、断面内上下縁あるいは内外の鉄筋ひずみ値を用い、かつ平面保持を仮定して決定する；
- ii) 断面内の応力分布は、求められたひずみに対して土木学会コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に準拠した各材料の応力-ひずみ関係から評価する；
- iii) 断面内に発生している軸力は、断面内応力分布を総和して評価する；
- iv) 曲げモーメントは、軸力によって発生した軸応力成分が断面内に均等に分布しているものと仮定して曲げ応力成分のみを抽出し算定する、である。

図より、いずれのケースにおいても、最大曲げモーメントは荷重点位置で発生していることが分かる。また、B断面に関する断面内の曲げモーメント分布を見ると、重錘衝突直後から荷重点直下に曲げモーメントが徐々に励起し、 $t_{max} =$

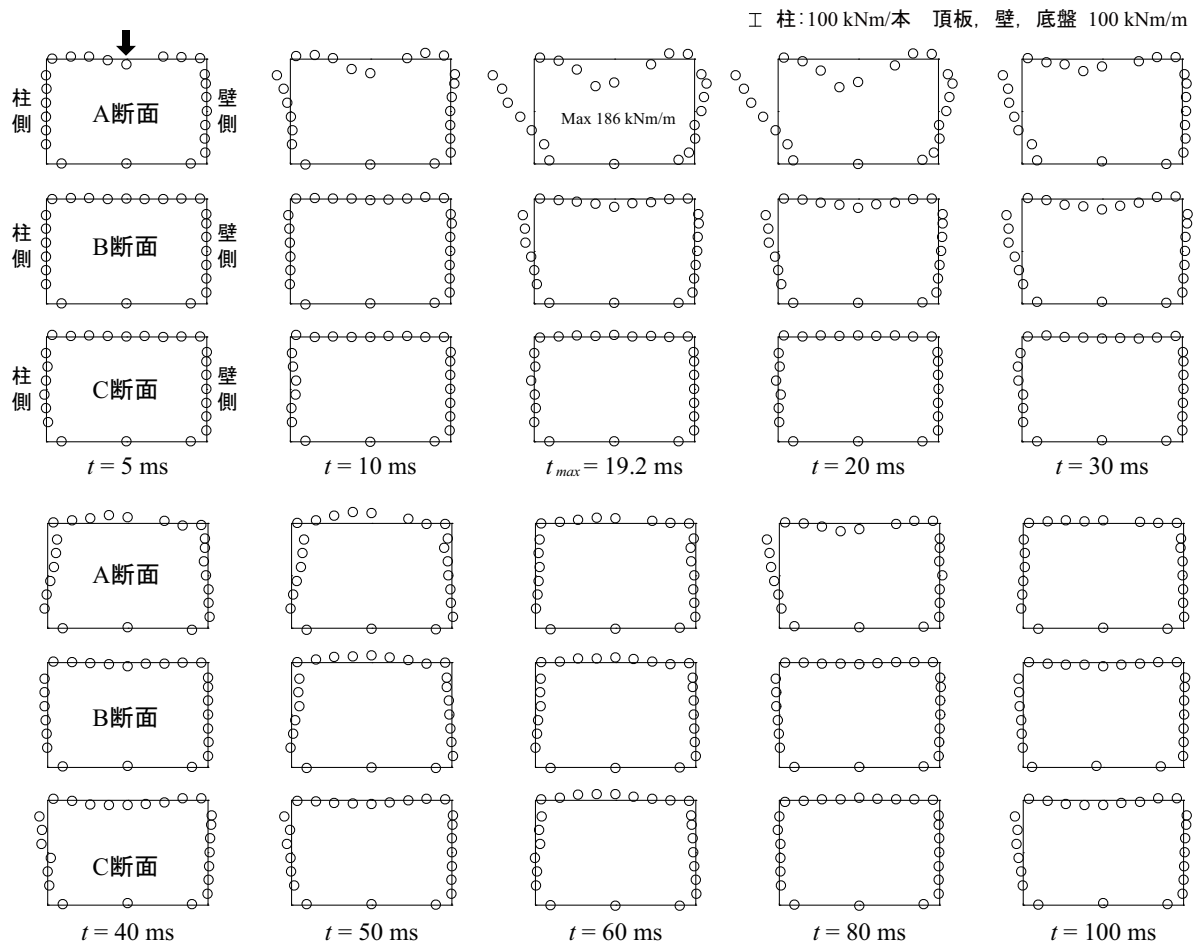


図-7 端部荷荷の場合における道路横断方向曲げモーメント分布の経時変化

13.6 ms で正の最大曲げモーメント 206 kNm/m が発生している。その際、頂版の柱および壁側では負曲げが生じており、静荷荷時における典型的な門型骨組と類似のモーメント分布を示していることが分かる。最大曲げモーメント発生以降の頂版部曲げモーメントは徐々に減少し、その後負曲げに移行している。これに対して、壁および柱部では、 $t = 20$  ms において最大曲げモーメントに達した後、単調に減少している。これは、いずれも基部の拘束が大きいことにより、対応して減衰も大きいことを暗示している。

一方、A および C 断面の分布を見ると、 $t = 20, 30$  ms において徐々に頂版、壁および柱部の曲げモーメントが増加し、B 断面の場合と同様の固定支持門型骨組状の分布を示している。A および C 断面においては、荷荷断面である B 断面と同様に曲げモーメントが発生するものの、B 断面よりも遅れて発生していることが確認できる。曲げモーメントの大きさは、A および C 断面共に B 断面の場合の 1/2 程度であることが分かる。 $t = 40$  ms 以降では、いずれの断面も頂版部で負曲げの状態となり、その後正曲げに移行している。

図-7 には端部荷荷時における曲げモーメントの断面方向分布の経時変化を示している。図より、最大曲げモーメントが発生する時刻は、 $t_{max} = 19.2$  ms と中央荷荷の場合と比較して若干遅いことが分かる。また、頂版や柱および壁部に

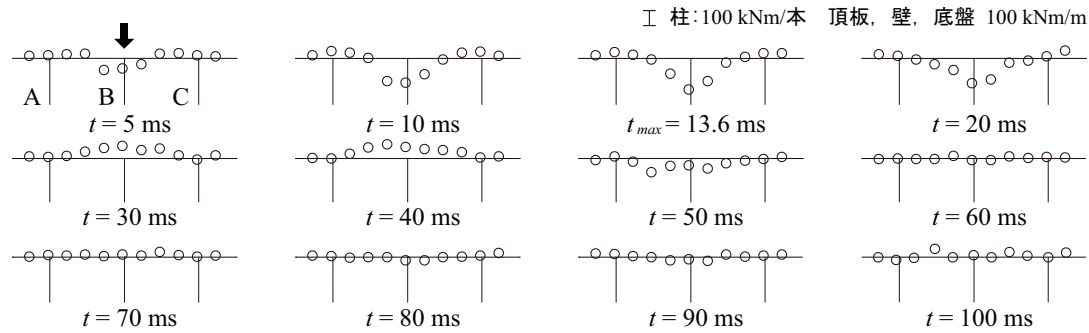
表-4 最大曲げモーメント一覧

荷荷位置	柱上部 (kNm/本)	頂版 (荷荷位置) (kNm/m)	壁上部 (kNm/m)
中央	-107	206	-53
端部	-316	186	-57

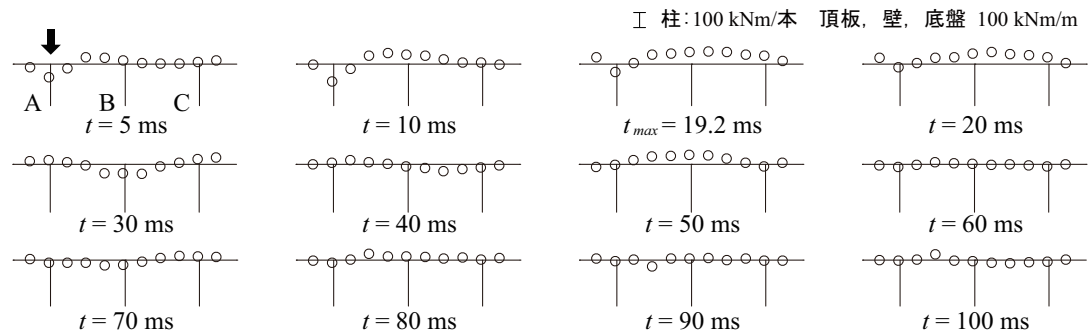
における最大応答値は、中央荷荷時よりも 2 倍程度大きい。これは、衝撃荷重荷荷位置がロックシェットの自由端近傍であることから、道路軸方向の拘束力が小さいことにより応答変位が大きくなったことによるものと推察される。 $t_{max}$  時以降では各点の曲げモーメントが減少し、 $t = 40$  ms において負曲げに転じている。

一方、B および C 断面では、それぞれ  $t = 30, 40$  ms 時点で最大曲げモーメントに達しており、応力波が荷荷点から反対側の自由端である C 断面側に伝播していることが分かる。また、発生した曲げモーメントの大きさは、荷荷点からの距離に対応して小さくなる傾向にある。 $t = 40$  ms 以降では、曲げモーメント分布が交番する形で変動しており、B および C 断面の挙動は A 断面の挙動を追従する形で推移している。

表-4 には、最大曲げモーメントの一覧を示している。表より、頂版部では中央荷荷の場合が端部荷荷の場合よりも大きい。柱及び側壁上部では頂版部と逆の傾向を示すことが



(a) 中央載荷の場合



(b) 端部載荷の場合

図-8 道路軸方向曲げモーメント分布の経時変化

分かる。

## (2) 道路軸方向の曲げモーメント分布

図-8には、各ケースにおける道路軸方向の曲げモーメント分布を示している。図より、両ケースともに  $t = 5 \text{ ms}$  から  $t_{\max}$  にかけて載荷点近傍では正の曲げモーメント、その両端では負の曲げモーメントが湧起しており、両端固定支持梁に類似した分布性状を示していることが分かる。その後、中央点載荷の場合には、 $t = 20 \text{ ms}$  において折れ線状の分布を呈した後、全体的に負曲げに移行しており、リバウンド状態に至っていることが分かる。一方、端部載荷の場合には、 $t_{\max}$  時以降、正のモーメントの発生位置が載荷位置である A 断面から C 断面に向かって推移していることが分かる。

以上のことから、道路軸方向鉄筋(配力鉄筋)にも比較的大きな曲げが作用することや、その応力は載荷位置から自由端に向かって伝播するように挙動することが明らかになった。

## 4. まとめ

本研究では、実規模 RC 製ロックシェッド頂版に緩衝材として碎石を設置した場合の弾性衝撃挙動を明らかにすることを目的に、弾性に近い状態での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) 碎石のラーメの定数は、中央載荷および端部載荷の場合でそれぞれ 6,600 および 9,700  $\text{kN/m}^2$  程度であった。但し、本実験における入力エネルギーは 39.2 kJ と小さいことより、この程度の入力エネルギーでは締め固め度

が大きく影響しているものと推察される；

- (2) 中央点載荷時において、端部(柱位置)断面における頂版の最大曲げモーメントは、中央断面の 1/2 程度となる；
- (3) 端部載荷の場合における柱及び側壁上部の曲げモーメントは、中央点載荷の場合よりも大きくなる傾向にある；
- (4) 道路軸方向の曲げモーメントも比較的大きな値を示し、応力波が載荷点から伝播するように挙動すること、等が明らかになった。

## 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：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.
- 3) Kishi, N., Okada, S., and Konno, H.: Numerical Impact Response Analysis of Rockfall Protection Galleries, Structural Engineering International, Vol.37, No.1 pp.103-113, 2009.
- 4) 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.
- 5) 岸 徳光, 牛渡裕二, 今野久志, 山口 悟, 川瀬良司：重錘落下衝撃荷重を受ける 1/2 スケール RC 製ロックシェッド模型に関する数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.58A, pp.1029-1040, 2012.3.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2007.