

# 論文 実規模RCロックシェットの耐衝撃挙動に及ぼす緩衝材の影響

佐伯 侑亮<sup>\*1</sup>・今野 久志<sup>\*2</sup>・栗橋 祐介<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本論文では、ロックシェットの合理的な耐衝撃設計手法の確立を目的に、実規模ロックシェットに設計条件の15倍の入力エネルギーが作用する場合を対象として、その耐衝撃挙動に及ぼす緩衝材種類の影響を重錘落下衝撃実験により検討した。その結果、1) 敷砂緩衝材の場合が碎石緩衝材よりも緩衝性能に優れている、2) 碎石緩衝材を用いる場合には、頂版部の鉄筋が降伏に至るものの、ひび割れ等の損傷は比較的軽微であり、ロックシェット内部の安全性は十分に確保されている、ことなどが明らかになった。

**キーワード:** 実規模ロックシェット, 重錘落下衝撃実験, 敷砂緩衝材, 碎石緩衝材, 耐衝撃挙動

## 1. はじめに

日本は国土の約7割が山岳や丘陵地で狭く細長い地形であることから、山岳部や海岸線の急崖斜面沿いには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であるロックシェットは、現在落石対策便覧<sup>1)</sup>等に即して許容応力度法に基づき断面設計が行われている。これに対して、近年構造物の設計手法は、許容応力度法からより合理的な性能規定を基本とする性能照査型設計法への移行が進められている。ロックシェットにおいても、過去の被災事例<sup>2)</sup>や既往の研究結果<sup>3)</sup>によって、許容応力度法に基づいて断面設計した場合には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おり、性能照査型設計法への移行の必要性が高まっている。

このことから、本研究グループでは、実規模RCロックシェットを製作し、緩衝材種類、重錘質量、落下高さ、载荷位置を変化させた全23ケースの重錘落下衝撃実験を実施した。これまでの研究では、緩衝材として碎石を用いる場合を対象に、ロックシェットの耐衝撃挙動に及ぼす重錘落下位置の影響<sup>4)</sup>や緩衝材として敷砂および碎石を用いる場合を対象に、弾性範囲内の耐衝撃挙動に及ぼす緩衝材種類の影響について検討している。しかしながら、塑性域におけるロックシェットの耐衝撃挙動に及ぼす緩衝材種類の影響については未だ検討していないのが現状である。

このような背景より、本論文ではロックシェットの許容応力を上回るレベルの各種入力エネルギーが作用する場合において、緩衝材の種類がロックシェットの耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討することを目的に、载荷位置を

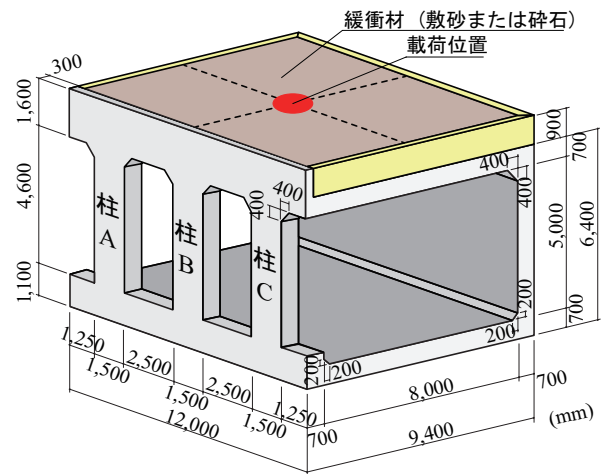


図-1 ロックシェット形状寸法

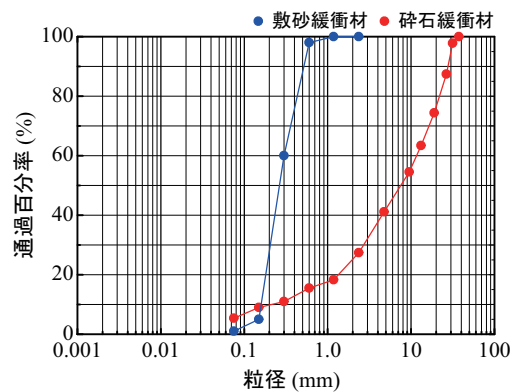


図-2 緩衝材の粒径加積曲線

ロックシェットの頂版中央部に限定して、緩衝材を敷砂あるいは碎石とした場合の実験結果を比較検討した。なお、一連の実験では1体の実規模RCロックシェットに対して各種パラメータを変化させて繰り返し重錘落下衝

\*1 西松建設(株) (正会員)

\*2 (独)寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工)(正会員)

\*3 室蘭工業大学 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工)(正会員)

\*4 (独)国立高専機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博(正会員)

表-1 実験ケース一覧

緩衝材の種類	重錘質量 (ton)	落下高さ (m)	入力エネルギー (kJ)	実験前の荷点直下における残留変位および残留ひずみ		
				残留変位 (mm)	残留上縁ひずみ ( $\mu$ )	残留下縁ひずみ ( $\mu$ )
敷砂	10	15	1,500	1.4	-18	275
碎石				3.3	-28	434

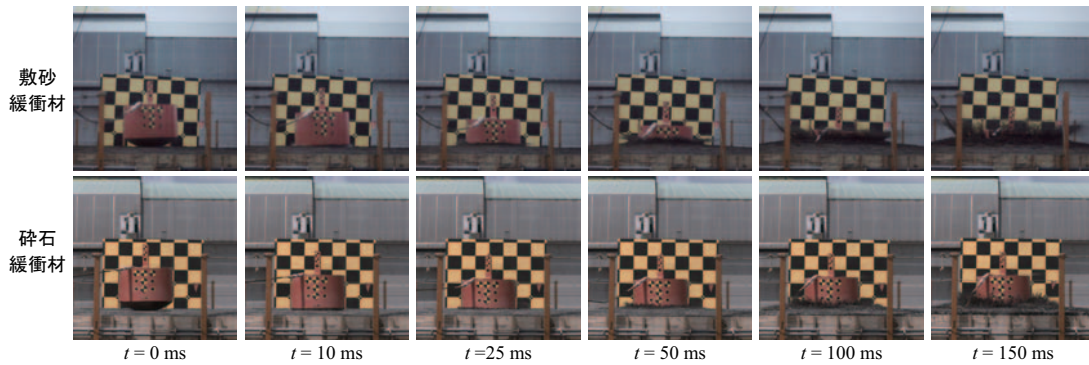


写真-1 重錘の貫入状況

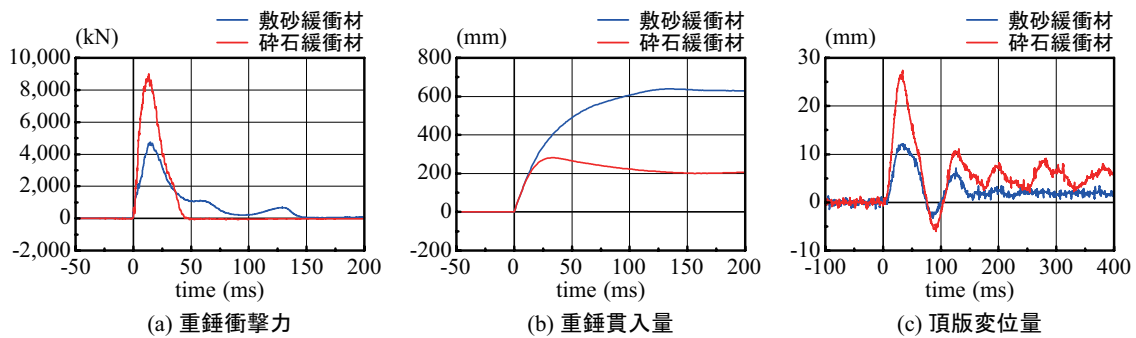


図-3 重錘衝撃力、重錘貫入量および荷点頂版変位に関する応答波形

撃実験を行っている。そのため、本論文においても荷履歴を有するロックシェッドを対象とした実験となっている。

2. 実験概要

図-1には本実験に使用した実規模ロックシェッド模型の形状寸法および荷位置を示している。本ロックシェッドは、緩衝材として90cm厚の敷砂を用いることを前提に、設計落石条件を質量2ton、落下高さ5mの入力エネルギー100kJとし、許容応力度法に基づいて設計されている。表-1には、実験ケースおよび各実験前における残留変位、残留ひずみを整理して示している。実験は、ロックシェッド模型頂版部に敷砂緩衝材あるいは碎石緩衝材を厚さ90cmまで敷設し、その中央部に質量10tonの鋼製重錘を高さ15mから自由落下させることにより行っている。なお、既往の研究より、ロックシェッドが終局状態に至る入力エネルギーは、設計値に対して30倍程度大きいことが明らかになっている<sup>3)</sup>。従って、入力エネルギーの設定は、重錘落下によるロックシェッドの

応答値が許容値を上回るものの、終局には至らない程度の入力エネルギーとして設計値の15倍(1,500kJ)とした。

図-2には、実験に使用した敷砂緩衝材および碎石緩衝材の粒径加積曲線を示している。図より、敷砂緩衝材に用いた砂は粒径が最大で1mm程度であるのに対し、碎石は最大で30mm程度であることが分かる。実験に用いた砂はアスファルト合材用の細目砂であり、その表乾密度は2.56g/cm<sup>3</sup>であった。また、碎石は小樽市美晴産の路盤用切込碎石であり、表乾密度は2.68g/cm<sup>3</sup>である。緩衝材はそれぞれ厚さ30cmごとに敷均し、その後バックホウおよびタンピングランマー等を使用して転圧を行うことで所定の厚さである90cmに成形した。

頂版部の鉄筋比は一般的なロックシェッドと同程度の0.68%としている。頂版下面および上面の軸方向鉄筋は、それぞれD25(SD345)を125mm間隔およびD29(SD345)を250mm間隔で配置している。コンクリートのかぶり厚は、いずれの部材も鉄筋からの芯かぶり厚で100mmである。また、コンクリートの設計基準強度は24N/mm<sup>2</sup>であり、実験時の底盤、柱/側壁および頂版の圧縮強度はそれぞれ、30.7、30.2および37.9N/mm<sup>2</sup>であった。

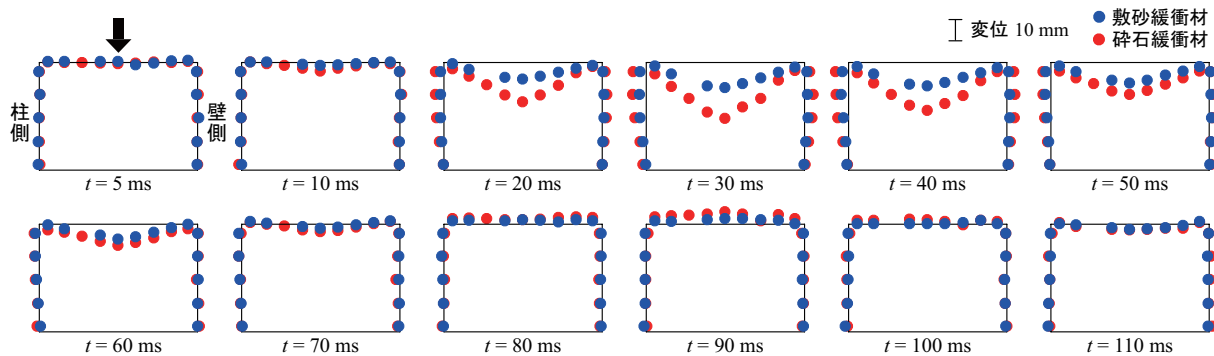


図-4 载荷位置を通る道路軸直角方向断面に関する法線方向変位分布の経時変化

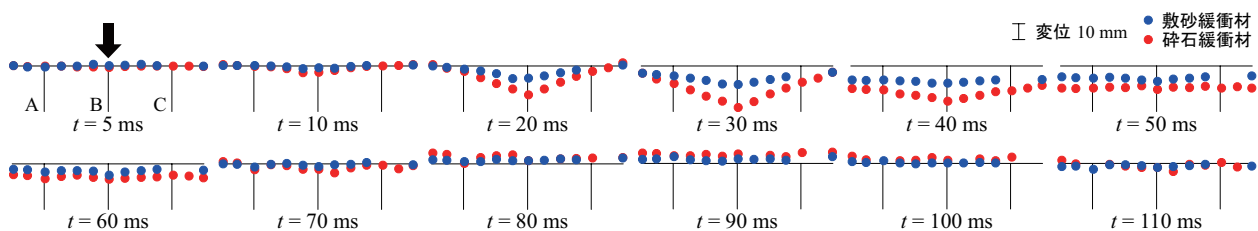


図-5 载荷位置を通る道路軸方向断面の頂版たわみ分布に関する経時変化

測定項目は重錘衝撃力評価のための重錘加速度、鉄筋ひずみ、頂版／柱面／側壁の内空法線方向変位、重錘貫入量である。また、実験終了後には頂版、柱および側壁のひび割れを撮影し、ひび割れ分布を記録している。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 重錘貫入状況

写真-1には、敷砂および碎石緩衝材の重錘貫入状況を時系列で示している。写真より、両ケース共に時間の経過に伴い重錘が貫入していく様子が見られる。また、敷砂緩衝材の場合には、経過時間  $t = 150$  ms において重錘全体が貫入し、砂が著しく飛散している。これに対し、碎石緩衝材の場合には、 $t = 25$  ms において重錘先端部が貫入する程度であり、それ以降貫入量の増加は見られず、また碎石の飛散量は砂の場合よりも少ない。

#### 3.2 時刻歴応答波形

図-3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変位に関する応答波形を示している。図-3 (a) の重錘衝撃力波形より、両ケース共に継続時間が 50 ms 程度の正弦半波状の波形性状を示していることが分かる。なお、敷砂緩衝材の場合には最大重錘衝撃力値が小さいものの、第1波後に振幅の小さく継続時間の長い第2波が続いて生じており、重錘衝撃力の継続時間は碎石緩衝材の場合より2倍以上長いことが見て取れる。また、最大重錘衝撃力値は敷砂および碎石緩衝材でそれぞれ 4,800 および 9,000 kN 程度であることから、振動便覧式に基づき衝撃力算定のためのラーメの定数を求めると、それぞれ 1,300 および 6,500 kN/m<sup>2</sup> 程度として評価される。

図-3 (b) の重錘貫入量波形において、経過時間  $t = 20$  ms 程度までは緩衝材の違いによらず同様の性状を示している。その後、敷砂緩衝材の場合には、重錘が貫入し続けているのに対し、碎石緩衝材の場合にはリバウンド状態に移行していることが分かる。なお、敷砂緩衝材の場合にはリバウンドはほとんど見られない。最大重錘貫入量は敷砂および碎石緩衝材の場合で各々 640 および 280 mm 程度であることから、緩衝材厚 (900 mm) に対する重錘貫入量の割合は各々 70 および 30% 程度となる。

図-3 (c) より、頂版変位波形は、両ケース共に重錘衝突後に継続時間 80 ms 程度の第1波が発生しその後減衰自由振動状態に移行している。また、敷砂緩衝材の場合には経過時間  $t = 200$  ms 程度でほぼ一定値に収束しているものの、碎石緩衝材の場合には未だ振動状態にあることが分かる。敷砂緩衝材の場合における最大変位は、碎石緩衝材の場合の 50% 以下の値となっている。両ケース共に残留変位が発生していることから、頂版部が塑性域に達していることが示唆される。

#### 3.3 変位分布の経時変化

図-4には、载荷位置を通る道路軸直角方向断面に関する変位分布の経時変化を両緩衝材の場合で比較して示している。図より、緩衝材の種類によらず、変位は経過時間  $t = 10 \sim 30$  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。また、頂版の変位分布に着目すると、碎石緩衝材の場合には敷砂緩衝材の場合よりも中央部の変形量が大きく、かつ角折れに類似した分布性状を示していることが分かる。このことから、碎石緩衝材の場合には頂版中央部に大きな曲げモーメントが作用していることが推察される。

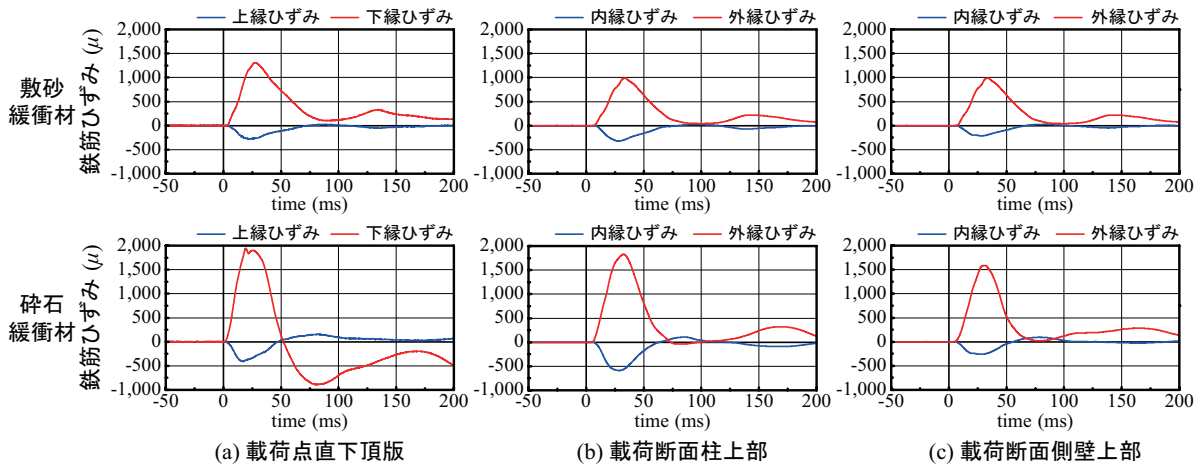


図-6 頂版中央部、柱/側壁上部断面の鉄筋ひずみ波形の一例

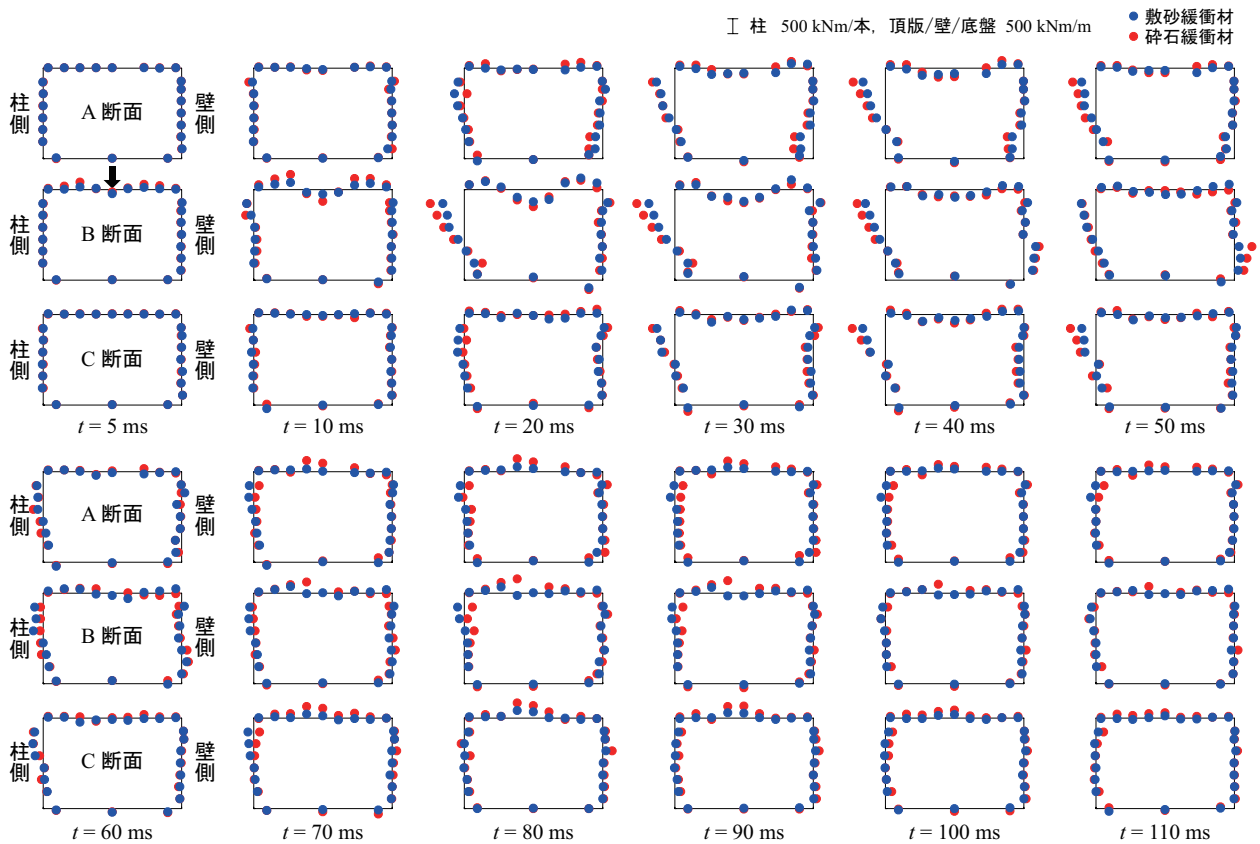


図-7 断面方向曲げモーメントの断面内分布に関する経時変化

図-5には、荷重位置を通る道路軸方向断面に関する変位分布の経時変化を示している。図より、道路軸直角方向断面における変位分布と同様に  $t = 10 \sim 30$  ms にかけて荷重点近傍の変位量が急激に増大し三角形分布を呈していることが分かる。

このような傾向は、碎石緩衝材の場合が敷砂緩衝材の場合よりも顕著である。また、 $t = 40, 50$  ms 以降においては、荷重点 (B 断面) 近傍の変位が復元するのに対し、A/C 断面の変位が増加するため、頂版全域においてほぼ一定の変位分布となっている。その後、これらの変位は時間経過に伴って復元している。

### 3.4 鉄筋ひずみ波形

図-6には、頂版中央部、柱/側壁上部断面の鉄筋ひずみ波形を示している。図より、頂版部の場合には上・下縁、柱および側壁の場合には内・外縁の鉄筋ひずみが最大振幅を示した後、減衰する波形性状を示している。いずれの箇所においても、重錘衝突後引張側のひずみが圧縮側よりも大きく示されていることから、引張縁にはひび割れが発生し断面中立軸が圧縮縁側に移行していることが推察される。また、各部位の最大ひずみは、碎石緩衝材を用いる場合が敷砂緩衝材を用いる場合よりも大きい。特に頂版中央部および柱上部では  $2,000\mu$  程度のひず

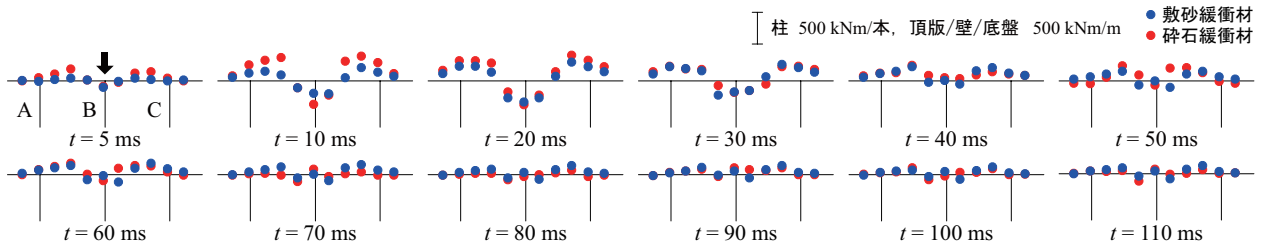


図-8 荷重位置を通る道路軸方向曲げモーメントの道路軸方向分布に関する経時変化

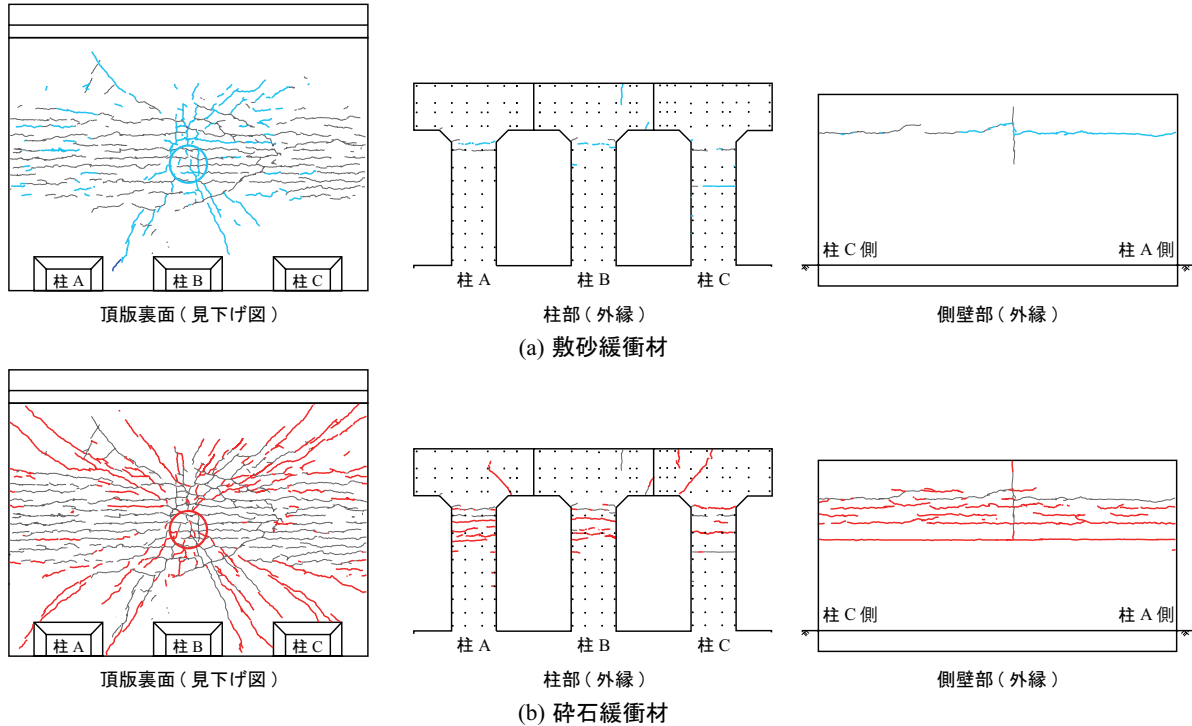


図-9 頂版裏面、柱/側壁外側のひび割れ分布性状

みが発生していることから、鉄筋には許容応力度を大きく超過する応力が作用し、鉄筋が降伏に至っているものと推察される。

### 3.5 曲げモーメント分布の経時変化

図-7には、断面方向曲げモーメントの断面内分布に関する経時変化を示している。なお、曲げモーメントの算定法は、文献4)を参照されたい。図より、各点の曲げモーメントは全般的に碎石緩衝材を用いる場合が敷砂緩衝材を用いる場合よりも大きいことが分かる。また、各断面の曲げモーメントは、緩衝材の種類によらず経過時間  $t$  毎に下記の通り推移していることが分かる。すなわち、1)  $t = 5 \sim 10$  ms においては、B断面頂版部の中央部で正曲げ、その周辺で負曲げを呈する；2)  $t = 20$  ms においては、B断面の柱/側壁部にも曲げ波動が伝播するものの、A/C断面では未だ大きな応答は見られない；3)  $t = 30$  ms では、B断面頂版部の曲げモーメントは減少傾向を示すのに対し、B断面の柱/側壁部では増加傾向を示し、かつA/C断面全体に大きな曲げモーメントが伝播する；4)  $t = 40$  ms では、B断面の曲げモーメントが減少傾向を

示すのに対し、A/C断面では増加傾向を示す；5)  $t = 50$  ms では、いずれの断面においても減少傾向を示す。以上のように、曲げモーメントは、時間経過と共に荷重点からロックシェッド全体に伝播していく性状を示すことが明らかになった。

図-8には、荷重位置を通る道路軸方向断面に関する道路軸方向曲げモーメント分布の経時変化を示している。図より、道路軸方向曲げモーメントにおいても碎石緩衝材を用いる場合が敷砂緩衝材を用いる場合に比べ大きな値を示していることが分かる。また、経過時間  $t = 5 \sim 20$  ms にかけて曲げモーメントが増大し、30 ms 以降において減少傾向を示している。このような傾向は、前述の断面方向曲げモーメントのB断面における断面内分布と同様である。このことから、緩衝材の種類によらず重錘衝突後頂版部に発生する曲げモーメントは道路軸直角方向のみならず道路軸方向にも同様に伝播し、その後収束する性状を示すことが明らかになった。

### 3.6 ひび割れ分布性状

図-9 (a), (b) には、それぞれの実験終了後における頂

表-2 最大応答値一覧

緩衝材の種類	重錘衝撃力 (kN)	ラーメの定数 (kN/m <sup>2</sup> )	重錘貫入量 (mm)	頂版変位 (mm)	載荷断面鉄筋ひずみ(μ)						載荷断面			ひび割れ幅 (mm)
					頂版		柱部		壁部		曲げモーメント*			
					上縁	下縁	内縁	外縁	内縁	外縁	頂版	柱部	壁部	
敷砂	4,754	1,322	639	12.2	-281	1,310	-434	1,047	-213	715	412	819	251	0.5程度
碎石	8,984	6,491	281	27.4	-407	1,942	-696	1,886	-259	1,590	575	1,187	380	1.0程度

\*モーメントの単位は頂版/壁部(kNm/m), 柱部(kNm/本)

版裏面, 柱部, 側壁部外縁のひび割れ分布を示している。図中, 既存のひび割れは黒線, それぞれの実験終了後におけるひび割れを青線, 赤線で示している。なお, 頂版裏面ひび割れは見下げ図とした。

頂版裏面ひび割れに着目すると, 緩衝材の種類によらず道路軸方向に進展する一方向曲げとしてのひび割れと共に, 版としての二方向曲げによる載荷位置から放射状に伸びるひび割れが発生していることが分かる。特に, 碎石緩衝材を用いる場合には放射状ひび割れが頂版端部に到達していることから, その損傷度合いは敷砂緩衝材を用いる場合よりも大きいことが推察される。

柱部外縁のひび割れに着目すると, 柱上部に曲げひび割れが発生していることが分かる。碎石緩衝材の場合には, 敷砂緩衝材の場合よりも多くの曲げひび割れが発生していることから, より大きな曲げモーメントが発生していることが推察される。

側壁部外縁のひび割れに着目すると, 側壁上部においても柱部同様に一方向曲げによるひび割れが発生していることが分かる。また, 碎石緩衝材を用いる場合において, より多くの曲げひび割れが発生していることから, 柱部と同様に大きな曲げモーメントが作用したことが窺える。なお, ひび割れ幅は頂版部の載荷位置近傍で最も大きく, 敷砂緩衝材および碎石緩衝材を用いる場合でそれぞれ0.5および1.0 mm程度であった。ただし, コンクリート片の剥落等が懸念される状況は全く認められないことを確認している。

### 3.7 最大応答値

表-2には, 各測定値項目の最大応答値を整理して示している。表より, 重錘貫入量を除く全ての最大応答値は, 敷砂緩衝材を用いる場合が碎石緩衝材を用いる場合よりも小さいことが分かる。これは, 敷砂緩衝材を用いる場合の作用衝撃力が碎石緩衝材を用いる場合よりも小さいことにより, 対応してロックシェッド全体の各種応答値も小さくなったことによるものである。従って, 本実験の条件下においては, 敷砂緩衝材の緩衝性能が碎石緩衝材よりも大きいことが明らかになった。また, 前述の通り, 碎石緩衝材を用いる場合において鉄筋の降伏が確認されたものの, ひび割れ等の損傷は比較的軽微である。このことから, 設計条件の15倍の入力エネルギーが

作用する場合においても, ロックシェッド内部の安全性が十分に確保されているものと判断される。

なお, 敷砂緩衝材を用いる場合には, 重錘が敷砂厚の70%程度まで貫入していることから, より大きな入力エネルギーが作用する場合には頂版への直接衝突に近い状態となり, 緩衝性能が十分に発揮されない可能性があることに留意する必要がある。

### 4. まとめ

本論文では, ロックシェッドの合理的な耐衝撃設計手法の確立を目的に, 実規模ロックシェッドに設計条件の15倍の入力エネルギーが作用する場合を対象として, その耐衝撃挙動に及ぼす緩衝材種類の影響を重錘落下衝撃実験により検討した。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) 敷砂緩衝材の場合が碎石緩衝材よりも緩衝性能に優れている。
- 2) 碎石緩衝材を用いる場合には, 頂版部の鉄筋が降伏に至るものの, ひび割れ等の損傷は比較的軽微であり, ロックシェッド内部の安全性は十分に確保されている。
- 3) 敷砂緩衝材を用いる場合には, 重錘貫入量が大きくなる傾向にあるため, 1,500 kJよりも大きな入力エネルギーが作用する場合には緩衝性能が十分に発揮されない可能性があることに留意する必要がある。

### 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
- 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) 佐伯侑亮, 今野久志, 栗橋祐介, 岸 徳光: 緩衝材として碎石を設置した実規模RC製ロックシェッドの耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 547-552, 2014.7