# 敷砂緩衝材を有するRC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact test for half size scale model of RC type rock-shed with sand cushion

寒地土木研究所	〇正 員	西 弘明 (Hiroaki Nishi)
寒地土木研究所	正 員	今野 久志 (Hisashi Konno)
寒地土木研究所	正 員	山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
室蘭工業大学大学院	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院	正 員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

# 1. はじめに

我が国の国土、特に北海道は急峻な地形を呈しており、 山岳部や海岸線の道路には落石災害を防止するためのロッ クシェッドが数多く建設されている。ロックシェッドは、 比較的大きな落石エネルギーに対応した落石対策工であ り、通常斜面に想定される落石要因に応じて個別に設計さ れるため、想定される落石が発生しても問題はない。しか しながら、これらの土木構造物は長期に渡って供用される こととなるため、対象の斜面の経時変化により、設計当初 には想定され得なかった新たな落石要因が生じる場合があ る。こういった場合には、現状のロックシェッドに補強を 実施し、要求される性能を満たす、あるいは道路のルート を変更し危険箇所をかわすなどの対応が必要となる。しか しながら、これらの対応には多大な費用が必要となり、建 設コストの縮減が叫ばれる中で大きな負担となっている。

ここで、現状のロックシェッドの耐衝撃設計は、許容応 力度法に基づいて行われているが、著者らの過去の研究よ り、その耐衝撃性能に関して、構造の限界状態までを考慮 した場合には大きな安全率を有していることが明らかと なっている<sup>1)</sup>。これより、限界状態設計法でロックシェッ ドの耐衝撃設計を実施することが可能となれば、新設設計 の場合には、合理化によって構造のスリム化が可能とな り、補強設計の場合には、補強工を合理的かつ最低限に留 めることができ、どちらの場合においても建設コストの縮 減が見込まれる。また、土木構造物の設計思想は、限界状 態設計法を経て、性能照査型設計に移行しつつあることか ら、ロックシェッドにおいても性能照査型設計の導入が急 がれる。

このような状況下において、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、RC 梁部材に



図-1 試験体の形状寸法

限定して各種 RC 梁の衝撃実験および数値解析的検討を実施し、性能照査型耐衝撃設計に資する静的曲げ耐力算定 式を提案している<sup>2)</sup>。また、構造系に関する検討として実 ロックシェッドの1/4 程度の小型ラーメン模型に関する 衝撃実験を実施し、破壊に至るまでの耐衝撃挙動の把握を 行った<sup>3)</sup>。

本研究では、現行設計と同様に緩衝材として頂版上に90 cm厚の敷砂を設置した、実ロックシェッドの1/2 縮尺模 型試験体を用いた重錘落下衝撃実験を実施し、繰り返し載 荷により終局に至るまでの耐衝撃挙動データを取得したの で、その結果について報告する。

# 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1には、実験に使用した RC 製ロックシェッド模型 試験体の形状寸法を示している。試験体は、実験ヤードの 大きさ、破壊までの重錘衝突エネルギー等を考慮し、1 ブ ロックの道路軸方向長さが12 m、頂版厚1 m、内空幅8 m 程度の一般的な RC 製ロックシェッドの1/2 縮尺模型と している。これより試験体は、外幅5.5 m、道路軸方向長



写真-1 実験状況



図-2 各種応答波形

衝突 重錘 落下 実験 載荷 質量 緩衝工 高さ エネルギー ケース 方法 M(kg) H(m)  $E_k(kJ)$ S-II-H1.0 1.0 98 S-II-H2.5 2.5 245 繰 S-II-H5.0 5.0 490 10,000 返 90cm S-II-H10.0 10.0 980 1 S-II-H15.0 15.0 1470

20.0

25.0

1960

2450

S-II-H20.0

S-II-H25.0

表-1 実験ケース

さ 6.0 m、側壁高さ 3.5 m の箱形構造である。内空断面は幅 4.5 m、高さ 2.5 m であり、内空の四隅にはハンチを設けて いる。部材厚さは、頂版、底版、柱、側壁共に 0.5 m 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 D 22 を 125 mm 間隔(主鉄筋比 0.73 %)で配置している。頂版 の配力筋については、軸方向鉄筋の 50 %を目安に上面、下 面共に D 13 を 125 mm 間隔で配筋している。鉄筋の材質は 全て SD 345 であり、力学的特性は D 22 の降伏強度が 381~ 400 MPa、引張強度が  $549 \sim 571 \text{ MPa}$ 、D 13 の降伏強度 が  $378 \sim 397 \text{ MPa}$ 、引張強度が  $539 \sim 564 \text{ MPa}$  である。コ ンクリートのかぶりは、芯かぶりで 60 mm である。コン クリートの設計基準強度は  $24 \text{ N/mm}^2$ であり、実験時の圧 縮強度は  $29.7 \text{ N/mm}^2$ である。

## 2.2 衝撃実験概要

写真-1には、実験状況を示している。実験は、敷砂を 90 cm の厚さで設置した試験体の頂版中央部に質量 10,000 kg の鋼製重錘をトラッククレーンにより所定の高さまで 吊り上げ、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1.25m、高さが95cmで底部より高 さ30 cmの範囲が半径1mの球状となっている。実験に使 用した敷砂は、アスファルト合材用の細目砂であり、表乾 密度は 2.56 g/cm<sup>3</sup>である。実験に際しては頂版上に型枠を 設置し、厚さ25 cm ごとに足踏みによって締め固めを行い 所定の厚さとしている。実験時の湿潤密度は 1.531 g/cm3、 含水比は平均11.4%である。なお、各実験ケース終了後に は重錘落下位置、敷砂への貫入量を調査した後、敷砂緩衝 材を掘り返し、重錘落下点直下のひび割れ状況を確認した 後、所定の厚さに再設置している。表-1には、実験ケー スの一覧を示している。実験は、頂版中央部での繰り返し 載荷を行っており、弾性範囲内と想定される実験ケース として落下高さ 1.0 m および 2.5 m、その後 H = 5.0 m から 5.0 m ピッチで落下高さを漸増させ、試験体の頂版裏面コ ンクリートが剥落するような状況近傍まで実施している。 実験ケース名は、第1文字目に敷砂緩衝材を示す記号とし てSを、第2文字目には繰り返し載荷実験を示すⅡ、第1 文字目には Hの後ろに重錘の落下高さ(m)を付し、それ らをハイフンで結んで示している。





# 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 200 G および 500 G、 応答周波数 DC ~ 3.5 kHz および 5 kHz) 3 個による重錘衝 撃力、2)非接触式レーザ変位計(測定範囲± 100 mm、応 答周波数約 1 kHz)による試験体変位、3)鉄筋に貼付した ひずみゲージによる鉄筋歪みである。衝撃実験時の各種応 答波形は、重錘衝撃力についてはサンプリングタイム 0.05 ms、鉄筋歪みおよび変位についてはそれぞれ 0.1 ms およ び 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、各実験終了後には、試験体のひび割れ状況を スケッチしている。

## 3. 実験結果

#### 3.1 各種応答波形

全実験ケースに関する重錘衝撃力波形および載荷点直 下の変位波形を示している。波形はいずれも重錘衝突時 刻を零として整理している。なお、落下高さ25mの実験 S-II-H25では、頂版裏面コンクリートが剥落する可能性が あったため変位は計測していない。

(a) 図より、重錘衝撃力波形についてみると、落下高さ の低い S-II-H1.0 および S-II-H2.5 では振幅の小さい 2 つの 正弦半波が合成されたような波形性状を示しているが、落 下高さの増加と共に振幅の大きい第1波と振幅の小さい第 2波とに明確に分離していく様子が示されている。また、 第1波目の正弦半波は落下高さの増加と共に振幅が大きく なっていくが継続時間は約70msと同程度となっている。 また、第2波目の正弦半波については落下高さの増加と 共に振幅および継続時間が若干増加の傾向を示すと共に、 ピーク値発生時刻は落下高さの増加と共に遅くなっている。

(b) 図より、載荷点直下の変位波形についてみると、いず れの実験ケースにおいても重錘衝突時刻より10 ms 程度遅 れて励起されている。波形性状については重錘衝撃力波形 にほぼ対応しており重錘衝突初期の単純な正弦半波とその 後に続く振幅の小さい正弦半波より構成されている。第1 波目の正弦半波は落下高さの増加と共に振幅が大きくなっ ている。また、落下高さの低い S-II-H1.0 および S-II-H2.5 では残留変位が発生していないものの S-II-H5.0 以降の実 験ケースにおいては落下高さの増加と共に残留変位も増加 していることが分かる。

# 3.2 各種応答値と衝突エネルギーの関係

図-3には、最大重錘衝撃力、最大変位、残留変位の各 応答値と衝突エネルギーの関係を示している。 (a) 図 に は、最大重錘衝撃力と衝突エネルギーの関係を示してい る。図中には、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において、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: $\lambda = 1,000 \text{ kN/cm}^2$ 、割増係数: $\alpha =$ (D/T)<sup>1/2</sup> = 1.18、D: 重錘径 125 cm、T: 敷砂厚 90 cm) お よび割り増し係数を考慮しない場合の衝撃力を実験結果と 共に示している。図より、最大重錘衝撃力は落下高さの増 加と共に増大しており、その値は振動便覧式におけるラー メ定数を1.000 kN/cm<sup>2</sup>とし、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することによって評価可能で あることが分かる。(b)図には、S-II-H1.0~S-II-H20.0ま での6実験ケースにおける最大変位と衝突エネルギーの関 係を示している。最大変位は、衝突エネルギー Ek=1,470 kJ まで衝突エネルギーの増加に対応して線形に増大して いるが、Ek = 2,000 kJ ではそれ以前の増加傾向よりも大き な値を示している。 (c) 図には、(b) 図の実験ケースに対 応する残留変位と衝突エネルギーの関係を示している。残 留変位は、最大変位の場合と同様に衝突エネルギー Ek = 1.470 kJを境に衝突エネルギーの増加に対する残留変位の



増加割合が大きくなっており、*Ek*=2,000 kJ では残留変位 の値が急増していることが分かる。これは後述するひび割 れ状況からも分かるように繰り返し載荷による頂版部の損 傷累積により剛性が大きく低下したためと考えられる。

# 3.3 敷砂緩衝材への重錘貫入量

図-4には、敷砂緩衝材への重錘貫入量と衝突エネル ギーの関係を示している。図より、衝突エネルギーが Ek = 980 kJ までは衝突エネルギーの増加に対応して重錘貫入 量も増加しているものの、それ以降の衝突エネルギーでは 貫入量は約 80 cm (層厚の約 90 %)とほぼ一定値となって おり、この程度の値が本敷砂の圧縮量の限界であると推察 される。

## 3.4 ひび割れ発生状況

図-5には、各実験ケース終了後の頂版裏面のひび割れ 状況を示している。なお、実験終了後の調査により頂版上 面には柱および側壁近傍に負の曲げモーメントによるもの と推察される曲げひび割れが発生していることを確認して いるが紙面の都合により割愛する。図より、頂版裏面のひ び割れは、衝突エネルギーの小さい S-II-H 5.0 まではスパ ン中央部に曲げひび割れが発生し、その後 S-II-H 10.0 にお いて載荷点を中心とする放射状のひび割れが発生してい る。さらに衝突エネルギーが増大すると曲げひび割れの増 加および斜めひび割れが延伸する。S-II-H 20.0 では曲げひ び割れおよび斜めひび割れの密度が増加しており、この時 点で残留変位も急増している。最終の実験ケースである S-II-H 25.0 では前述のひび割れが裏面全体に分散すると共 に載荷点直下ではスパン方向の曲げひび割れと断面方向の ひび割れが直行し格子状のひび割れとなっており、コンク リートが剥落間近の状態に至っていたものと推察される

#### 4. まとめ

RC 製ロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法確立の ための基礎資料収集を目的に実施した1/2 縮尺模型試験 体に対する繰り返し重錘落下衝撃実験により以下のことが 明らかとなった。

- 最大重錘衝撃力は、振動便覧式におけるラーメ定数を 1,000 kN/cm<sup>2</sup>とし、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することによって評価可能で ある。
- 載荷点直下の最大変位および残留変位は、衝突エネル ギーの増加に対応して増大するが、繰り返し載荷によ る頂版部の損傷累積により剛性が大きく低下した場合 には残留変位が急増する。
- 敷砂緩衝材を設置した場合のRC製ロックシェッドの 頂版部には曲げ破壊型のひび割れ損傷が卓越して発生 する。

## 参考文献

- 岸 徳光、岡田慎哉、西 弘明、三上 浩:ロック シェッドの終局時入力エネルギー量探索に関する数 値解析的検討、構造工学論文集、Vol.52A、pp.1273 -1284、2006.3
- 2)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
- 岡田慎哉、岸 徳光、西 弘明、今野久志: RC ラーメン構造の耐衝撃挙動に関する実験的検討および数 値解析手法の妥当性検討、構造工学論文集、Vol.55A、 pp.1388 - 1398、2009.3