# 6.2 道路防災工の合理化・高度化に関する研究

研究予算:運営費交付金(一般勘定) 研究期間:平18~平22 担当チーム:寒地構造チーム 研究担当者:西弘明、今野久志、山口悟、表真也

【要旨】

本研究は、道路防災工のうち落石対策工に関して、その設計法の合理化・高度化を目的に実施している。

落石覆工の性能照査型設計法を確立するための検討として、落石覆工の頂版部に着目し、緩衝材(敷砂および 砂利)を設置した場合の2辺支持大型RCスラブに対する重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、最大重錘衝 撃力、最大変位および残留変位は、砕石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも大きくなること、緩衝材を設置 した大型RCスラブの最終的な破壊モードは曲げ破壊であることなどが明らかとなった。さらに、落石覆工の終 局までの耐衝撃挙動データを取得することを目的に、落石覆工の縮尺模型に対する重錘落下衝撃実験を実施した。 その結果、自由端近傍部への衝撃荷重載荷の場合には、版効果が十分期待できないことにより、押し抜きせん断 破壊型と曲げ破壊型のモードが複合して発生するとともに、最大変位および残留変位は中央部載荷時よりも1.8 倍程度大きくなることなどが明らかとなった。

キーワード:道路防災工、性能照査型設計法、重錘落下衝撃実験、大型RCスラブ、落石覆工

## I. 大型 RC スラブの耐衝撃挙動に関する検討

# 1.はじめに

本研究は、RC 製ロックシェッド等の耐衝撃用途構 造物の性能照査型耐衝撃設計法を確立することを最終 目的としている。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、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<sup>1-1~3</sup>。そこで、本研究ではロックシェッドの頂版部 のみに着目し、RC スラブの終局までの耐衝撃挙動デ ータを取得することを目的として、2 辺支持大型 RC スラブの重錘落下衝撃実験を実施した。また、緩衝材 としては従来から使用されている敷砂の他に、ヨーロ ッパ (スイス)等で同種の構造物上に使用されている 砕石についてもその緩衝特性を把握することを目的に、 合わせて実験を実施している。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

図-I-1 には、実験に供した大型 RC スラブ試験 体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、 長辺が 5m、短辺 4m、純スパン長 4m、版厚 0.4m であ る。

配筋は、下面および上面の軸方向鉄筋として D19 を 125mm 間隔(主鉄筋比 0.67%)、配力筋についても軸 方向鉄筋と同様に下面、上面共に D19 を 125mm 間隔 で配置している。また、スターラップとして D13 を千 鳥配置している。鉄筋の材質は全て SD345 であり、力 学的特性値は D19 の降伏強度と引張強度が 393MPa、 580MPa、 D13 の降伏強度と引張強度が 382MPa、 550MPa である。コンクリートのかぶりは、鉄筋から





写真-I-1 実験状況(G-II-H10.0)

表-I-1 実験ケース一覧

実験 ケース	緩衝工	重錘	載荷 方法	落下	入力
		質量		高さ	エネルギー
		M(kg)		H(m)	Ek(kJ)
S-II-H1.0	敷砂	5,000	繰り 返し	1.0	49
S-II-H5.0				5.0	245
S-II-H7.5				7.5	368
S-II-H10.0				10.0	490
S-IS-H10.0			単一	10.0	490
S-IS-H12.5				12.5	613
G-II-H1.0	砕石	5,000	繰り 返し	1.0	49
G-II-H5.0				5.0	245
G-II-H7.5				7.5	368
G-II-H10.0				10.0	490
G-IS-H10.0			単一	10.0	490
G-IS-H12.5				12.5	613

の芯かぶりで 60mm としており、コンクリートの設計 基準強度は 24N/mm<sup>2</sup>であり、実験時圧縮強度は敷砂を 使用した実験の試験体が平均 32.0N/mm<sup>2</sup>、砕石を使用 した実験の試験体が平均 30.9N/mm<sup>2</sup>である。

#### 2.2 衝撃実験概要

写真-I-1には、重錘落下衝撃載荷実験の状況を 示している。実験は、敷砂あるいは砕石を 50cm の厚 さで設置し、RC スラブ中央部にトラッククレーンを 用いて質量 5,000kg の鋼製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。使用した鋼製重錘は、直径が 1.0m、高さ が 97cm で底部より高さ 17.5cm の範囲が半径 80cm の 球状となっており、鋼製円筒の内部に鋼塊とコンクリ ートを充填して質量を調整したものである。

試験体は図−I−2 に示す支点反力測定用のロード セルを設置した鋼製治具上に設置しており、重錘衝突 時の跳ね上がり防止のために、支点治具上より試験体 を貫通させた鋼棒により固定されている。また、支点 治具はロードセル下部の鋼材位置で回転できる構造と



## 図-I-2 支点反力計測架台および変位計測位置

なっており、ピン支持に近い状態となっている。

実験に使用した敷砂は、石狩市厚田産のアスファル ト合材用の細目砂であり、粒度試験結果は、0.6mm、 0.3mm、0.15mm のふるい通過率がそれぞれ 98、70、2% で、表乾密度は 2.56g/cm<sup>3</sup>である。実験に際しては RC スラブ上に型枠を設置し、厚さ 25cm ごとに足踏みに よって締め固めを行い、所定の厚さに整形している。 実験時の湿潤密度は平均 1.45g/cm<sup>3</sup>、含水比は平均 9.45%である。

実験に使用した砕石は、札幌市硬石山産の路盤用切込砕石(0~30mm)であり、粒度試験結果は、13.2mm、2.36mm、600 µ のふるい通過率がそれぞれ56、25、15%で、表乾密度は2.61g/cm<sup>3</sup>である。実験に際しては敷砂と同様に厚さ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。なお、敷砂および砕石とも、繰り返し載荷実験では、各実験ケース終了後に重錘落下位置において貫入量を調査した後、緩衝材を掘り返して、RC スラブ上面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-I-1 には、実験ケースの一覧を示している。 実験は、敷砂および砕石それぞれに対して、繰り返し 載荷実験1体、単一載荷実験2体の合計6体に対して 実施した。

繰り返し載荷実験では、弾性範囲内の実験ケースと して落下高さ 1.0m、その後 H=5.0m から 2.5m ピッチ で落下高さを漸増させ、試験体の裏面コンクリートが 剥落するような状況まで実施している。単一載荷実験 に関しては、繰り返し載荷実験の最終落下高さである



図-I-3 各種応答波形

H=10.0m、および H=12.5m で実施した。実験ケース名 は、第1文字目に緩衝材の種類を示す記号(敷砂:S、 砕石:G)、第2文字目には載荷方法(II(impact iteratively):繰り返し載荷実験、IS(impact singly):単 一載荷実験)、第3文字目にはHの後ろに重錘落下高 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 200G、応答周波数 DC~3.5kHz)による重錘衝撃力、2)支点治具上に設置した起歪柱型ロードルによる支点反力、3)非接触型レーザ式変位計(測定範囲±100mm、応答周波数約1kHz)による試験体変位である。なお、レーザ式変位計は、図-I-2に示すように重錘落下点に対して直交するように配置している。

衝撃実験時の各種応答波形は、全てサンプリングタ イム 0.05ms 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。 実験結果

## 3.1 各種応答波形

図-I-3 には、敷砂および砕石を設置した単一載 荷実験ケースに関する重錘衝撃力波形、図-I-2 に 示す支点反力測定用ロードセル(14個)から得られた 合支点反力(以後、単に支点反力)波形および載荷点 変位波形を示している。また、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、重錘衝撃力波 形と載荷点変位波形に関してはフィルター処理を施し ていない。支点反力波形に関しては、ノイズを含んだ 高周波成分が含まれているため、波形収録後に 0.5ms の矩形移動平均法により、数値的なフィルター処理を 施している。

(a)図より、敷砂を設置した S-IS-H10.0 および S-IS-H12.5 の重錘衝撃力波形は、ピーク値および周期 が同程度の正弦半波が3波連なった波形性状を示して いる。このような波形性状は過去に実施した同種の実 験では得られていない。これは、敷砂厚が50cmと薄 いことや、RC スラブと連成し、重錘、敷砂、RC スラ ブの相互作用により生じたものと推察される。第1波 目のピーク値および波形全体の継続時間は、落下高さ



図-I-4 各種応答値と入力エネルギーの関係

の増加と共に増加していることが分かる。

一方、砕石を設置した G-IS-H10.0 および G-IS-H12.5 の重錘衝撃力波形は、重錘衝突初期の正弦半波とそれ に続く周期が長く振幅の小さい半波が合成された波形 性状を示している。重錘衝撃力波形の立ち上がりは敷 砂を用いた場合よりも高周波成分が卓越している。第 1 波目のピーク値は落下高さの増加と共に増加してい るものの、波形継続時間は敷砂の場合とほぼ同程度の 約 80ms となっている。

(b)図より、各支点反力波形は、いずれの実験ケース においても重錘衝撃力波形より若干遅れて励起してい ることが分かる。敷砂を設置した場合には、重錘衝撃 力波形と対応して3波が合成された波形性状を示して おり、落下高さの大きいS-IS-H12.5においてその傾向 が顕著に示されている。砕石を設置した場合の実験ケ ースでは、重錘衝撃力波形と同様に比較的滑らかな正 弦波が励起されているが、波形の立ち上がりは重錘衝 撃力波形と同様に高周波成分が励起している。最大支 点反力は、敷砂および砕石の両ケースともに落下高さ の増加割合が大きい。また、波形の継続時間はいずれ の実験ケースも重錘衝撃力波形と同程度であり、約 80msである。

(c)図より、載荷点変位波形について見ると、いずれの実験ケースにおいても重錘衝突によって励起される

第1波目の主波動とその後に続く減衰自由振動波形 より構成されている。砕石を用いた場合の主波動は、 波形の立ち上がりからピークに至るまで非常に滑らか な性状を示している。一方、敷砂を用いた場合にはピ ーク値近傍に重錘衝撃力の影響と思われる若干周波数 の高い波形が現れている。最大変位は、敷砂および砕 石の両ケースともに落下高さの増加と共に増加する傾 向を示している。敷砂および砕石の最大変位を比較す ると、砕石を用いた場合の方が敷砂を用いる場合より も大きい。

#### 3.2 各種応答値と入力エネルギーの関係

図-I-4 には、敷砂および砕石を用いた場合の全 実験ケースにおける最大重錘衝撃力、最大変位、残留 変位の各種応答値と入力エネルギーの関係を示してい る。

(a) 図には、最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係 を示している。図中には、敷砂緩衝工を用いる場合の Hertz の接触理論に基づく振動便覧式により算出した 衝撃力 (ラーメの定数: $\lambda$ =1,000kN/m<sup>2</sup>、割増係数: $\alpha$ =(D/T)<sup>1/2</sup>=1.41、D:重錘直径 1.00 m、T:敷砂厚 50cm) を示している。ここでの割増係数とは、緩衝材である 敷砂層厚が、落石直径より小さい場合の落石衝撃力の 増幅倍率である。

敷砂を設置した場合には、いずれの実験ケースにお いても、最大重錘衝撃力は入力エネルギーの増加に対



応して増加している。一方、砕石を用いた場合におけ る繰り返し載荷実験では、入力エネルギーが大きくな るに従って最大重錘衝撃力の増加割合が減少する傾向 が見られる。これは、最大変位および残留変位も増加 の傾向を示していることより、スラブの剛性低下が大 きくなるためと推察される。また、同一入力エネルギ ーにおける最大重錘衝撃力は、敷砂を設置した場合よ りも砕石を設置した場合の方が大きくなる傾向を示し ている。

落下高さ H=10m の同一入力エネルギー $E_k$ =490kJ に おける最大重錘衝撃力値は、繰り返し載荷実験と単一 載荷実験による比較では、砕石と敷砂ともに繰り返し 載荷実験結果の場合が単一載荷実験の場合よりも大き い値を示している。

図より、敷砂を用いた場合の最大重錘衝撃力は、ラ ーメの定数を $\lambda$ =1,000kN/m<sup>2</sup>、 $\alpha$ =1.41 とする振動便覧 式の結果よりも若干小さく、また、砕石を用いる場合 には若干大きい値を示している。

以上より、敷砂を用いた場合の重錘衝撃力は、落石 径と敷砂厚の影響を考慮(割増係数: $\alpha$ )し、かつラ ーメの定数を $\lambda$ =1,000kN/m<sup>2</sup>としたHertzの接触理論に 基づく振動便覧式を用いることにより、適切に評価可 能であることが明らかになった。

これに対して、砕石を用いる場合の最大重錘衝撃力 は、上記と同様にして、振動便覧式により得られた重 錘衝撃力分布よりも若干大きめの値を示すことが明ら かになった。

(b)図には、最大変位と入力エネルギーの関係を示し

ている。敷砂および砕石を用いた場合の繰り返し載荷 実験における最大変位は、入力エネルギーE<sub>k</sub>=250kJを 境にして入力エネルギーの増加に対する最大変位の増 加割合が大きくなり、E<sub>k</sub>=250kJ以降は入力エネルギー の増加に対してほぼ線形に増加していることが分かる。 また、最大変位は単一載荷実験の場合が繰り返し載荷 実験の場合よりも、若干小さい値を示している。緩衝 材の影響を検討すると、最大変位は砕石を用いた場合 が敷砂を用いる場合よりも大きくなる傾向を示してい ることが分かる。

(c)図には、残留変位と入力エネルギーの関係を示している。敷砂および砕石を設置した場合の繰り返し載荷実験における残留変位は、最大変位の場合と同様に入力エネルギー $E_k=250$ kJを境に増加割合が大きくなっており、 $E_k=250$ kJ以降は、ほぼ線形に残留変位が増加していることが分かる。また、単一載荷実験結果は、繰り返し載荷実験結果よりも若干小さい値を示している。残留変位の大きさは、最大変位と同様に砕石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも大きくなる傾向が示されている。

#### 3.3 ひび割れ発生状況

図-I-5 には、敷砂および砕石を設置した場合の 単一載荷実験終了後のスラブ上面のコンクリート圧壊 状況および下面のひび割れ状況を示している。

RC スラブ上面のコンクリートの損傷状況を見ると、 落下高さ H=10.0m での場合には、敷砂を設置した場合 (S-IS-H10.0)には、コンクリートはほとんど圧壊し ていない。それに対して、砕石を設置した場合



図-I-6 重錘貫入量と入力エネルギーの関係

(G-IS-H10.0)には、版中央部において、支持辺と平行に圧壊が生じている。落下高さ H=12.5m の場合には、両者とも前述と同様の圧壊が発生しているが、砕石を用いた場合の方が著しく、版幅全域に渡って発生している。この結果は、図-I-4(b)の最大変位分布において、砕石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも大きく示されていることに対応している。

RC版下面のひび割れ状況に関しては、落下高さ H=10.0mでは、両緩衝材を設置する場合ともに載荷点 を中心に斜め方向のひび割れと支点部に平行な曲げひ び割れが多数発生している。曲げひび割れの密度は敷 砂を設置した場合が大きい。次に、落下高さH=12.5m の場合には、H=10.0m場合よりもひび割れが支点方向 に拡大する傾向を示している。また、敷砂を設置した 場合のH=12.5mの場合には、載荷点近傍においてひび 割れが格子状に発生している。両者のひび割れ分布性 状を比較すると、砕石を用いる場合には、敷砂を用い る場合よりもひび割れの分散程度も小さく、作用衝撃 力が載荷点部に集中して作用しているように推察され る。

# 3.4 緩衝材への重錘貫入量

図-I-6 には、敷砂および砕石を設置した場合の 緩衝材への重錘貫入量と入力エネルギーの関係を示し ている。

いずれの実験ケースにおいても、緩衝材への重錘貫入 量は入力エネルギーの増加に対応して、ほぼ線形に増 加していることが分かる。敷砂と砕石の場合の重錘貫 入量を比較すると、繰り返し載荷実験、単一載荷実験 とも、砕石を設置する場合が敷砂を設置する場合より も大きいことが分かる。E<sub>k</sub>=490kJの結果について比 較すると、単一載荷実験の場合が繰り返し載荷実験の 場合よりも大きく示されている。これは、単一載荷の 場合には、RC スラブの剛性低下が小さいことにより 作用衝撃力が大きくなるため、重錘もより大きく貫入 するためと推察される。

## 4. まとめ

緩衝材として敷砂あるいは砕石を設置した2辺支持 大型 RC スラブに対する 5,000kg 重錘を用いた重錘落 下衝撃実験により、以下の事項が明らかとなった。

- 同一入力エネルギーにおける最大重錘衝撃力、最 大変位および残留変位は、砕石を用いる場合が敷 砂を用いる場合よりも大きい。
- 同一入力エネルギーにおける緩衝材への重錘貫入 量は、砕石よりも敷砂の方が大きい。
- 3) ひび割れ分布性状の比較により、砕石を用いる場合の方が敷砂を用いる場合よりも作用衝撃力が載荷点部に集中して作用する傾向にある。
- 緩衝材を設置した2辺支持大型RCスラブの最終 的な破壊モードは、本実験では曲げ破壊になった。

## 参考文献

- I-1) 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、2006.6
- I-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
- I-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

## II. RC 製ロックシェッド模型に関する検討

## 1.はじめに

今後、ロックシェッド等の耐衝撃用途構造物に関す る設計法が限界状態設計法や性能照査型設計法に移行 する場合においては、各種限界状態の定義も含め、終 局入力エネルギー量あるいは動的終局耐力評価法を確 立することが主要な課題となる。

このような観点から、本研究では耐衝撃用途 RC 構 造物の限界状態設計法あるいは性能照査型設計法の確 立に向けた基礎資料を得ることを目的に、現在設置さ れている RC 製ロックシェッドを対象に、2/5 スケール





(a)形状寸法

(b) 道路軸直角方向断面の配筋図

図-Ⅱ-1 試験体の形状寸法および配筋状況

のロックシェッド模型を製作し、入力エネルギーを変 化させた衝撃荷重載荷実験を実施し、終局限界近傍ま でのロックシェッドの弾塑性衝撃挙動に関する検討を 行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体概要

本研究では、より実物に近いロックシェッド模型(縮 尺:2/5)を製作し、耐衝撃挙動を検証することとした。 なお、実際の落石覆工には頂版上に敷砂が t=90cm、飛 散防止材が t=20cm 設置されていることから、敷砂緩 衝材も模型の縮尺(縮尺:2/5)に対応して、厚さを t=50cm に設定した。

図-II-1(a)には、重錘落下衝撃実験に使用した RC 製ロックシェッド模型の形状寸法を示している。模型 は、外幅 4.4m、長さ 4.8m、高さ 2.8m の矩形断面であ り、内空断面は幅 3.6m、高さ 2m で、頂版厚は 40cm である。なお、ロックシェッドの基部には 1,200 mm 厚のコンクリート剛基礎を配置している。

図-I-1(b)には、道路軸直角方向断面の配筋状況 を示している。模型縮尺を考慮し、鉄筋比については 実ロックシェッドと同程度とすることとした。すなわ ち、頂版下面および上面の断面方向には D13 を 50mm 間隔(主鉄筋比 0.75%)で 53 本配置している。頂版、 底版、柱の配筋についても、実ロックシェッドに準拠 して配置している。使用した鉄筋の材質は全て SD345 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、実験時の圧縮強度は 29.7N/mm<sup>2</sup>であ った。

# 2.2 衝撃実験概要

表-II-1には、実験ケースを実施した順に一覧に して示している。実験ケース名は、緩衝工(S:敷砂)、 重錘落下位置(C:中央、L:柱側から側壁に向かって 左側、R:右側)、および 重錘落下高さを示すHとそ の高さ(m)を付し、それらをハイフンで結び簡略化して 示している。

**写真-Ⅱ-1**には、重錘落下衝撃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 10,000kg 重錘を所定の高さまで吊り上げ、着脱装置を介して落 下させることにより実施している。衝撃荷重作用位置 は、ロックシェッドの道路軸直角方向にはスパン中央 部、道路軸方向には各柱中心位置の各点とした。

実験は、1 試験体に対して繰り返し重錘を衝突させる繰り返し斬増載荷により実施した。重錘は、写真-II-2に示すように直径 1.25m、高さ 95cm で底部よ り高さ 30cm の範囲が半径 1m の球状となっている。 また、重錘全体の質量は、鋼製円筒の内部に鋼塊とコ ンクリートを充填することにより調整を行っている。

#### 2.3 敷砂緩衝材

本実験で用いた敷砂緩衝材は、表乾密度 2.56g/cm<sup>3</sup>、 吸水率 3.23%、単位体積重量 14.4kN/m<sup>3</sup>の石狩厚田産 細目砂である。粒度試験結果は、0.6、0.3、0.15 mm の ふるい通過率がそれぞれ 98、70、2%となっている。

実ロックシェッド上の砂の締め固まり程度に関する 明確な測定値がないことより、実ロックシェッドの状態を再現することは不可能である。そのため、これま での実験方法と同様に 25cm 毎に足踏み式によって締 め固めを行い、整形を行うこととした。なお、実験は 斬増繰り返し載荷を行うことより、実験毎に敷砂緩衝

実験ケース名	緩衝工	重錘質量	載荷方法	載荷位置	落下高さ	衝突エネルギー
		M(kg)			H (m)	E (kJ)
S-C-H1.0					1.0	100
S-C-H5.0	またて小			中央C	5.0	500
S-C-H10.0	<u> 新</u> 迎	10,000	繰り返し		10.0	1,000
S-L-H2.5	1-30CIII			左柱 L	2.5	250
S-R-H5.0				右柱 R	5.0	500

表-Ⅱ-1 実験ケース一覧



写真-Ⅱ-1 実験状況

材を重錘径の倍以上の範囲で取り除き、頂版上面のク ラックの有無を確認の後、再整形を行っている。

敷砂緩衝材の湿潤密度および含水比の測定は、実験 ケース S-C-H1.0の実験前に実施した。実験時の湿潤密 度は、14.1kN/m<sup>3</sup>、また含水比は、7.33%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100G、応答周波数DC~2kHz)による重錘衝撃力、2)図-II-2に示す位置に設置した非接触型レーザ式変位計(容量500mm、応答周波数約1kHz)による内空変位、および3)鉄筋に貼付したひずみゲージによるひずみである。これらの各センサーからの出力波形は、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、各実験ケースの終了後には、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 重錘衝擊力波形

**図−Ⅱ−3**には、重錘が緩衝材に衝突した時間を 0 ms として、重錘衝撃力波形を示している。

図より、S-C-H1.0とS-C-10.0以外の波形性状は類似の性状を示している。S-C-H5.0は波動継続時間(以後、継続時間)が t=60ms 程度の正弦半波状の第1波と継



写真-II-2 重錘(10,000kg)と衝突状況

続時間が t=40ms 程度の正弦半波状の第 2 波から成る 波形性状を示している。主波動継続時間は 125ms 程度 である。端部載荷である S-L-H2.5 と S-R-H5.0 の場合 には、継続時間が t=75ms 程度の正弦半波状の第 1 波 と継続時間が t=75ms 程度の正弦半波状の第 2 波の波 形性状を示している。全体の主波動継続時間は S-C-H5.0 の場合より若干長い。これは、端部載荷であ ることより版の拘束効果が低減することによるものと 考えられる。また、2 波の波形から構成されるのは、 敷砂を介して重錘とロックシェッド頂版が連成し、重 錘が小さくリバウンドのような挙動を示すことに起因 するものと考えられる。

S-C-H1.0の場合には、入力エネルギーが小さいこと により、振幅も小さいが、主波動継続時間はS-C-H5.0 の場合と類似している。S-C-H10.0の場合には、継続 時間が80ms程度の三角形状の1波形状となっている。 このように1波の形状を示すのは、入力エネルギーが 大きいことにより、頂版の載荷点近傍部の損傷が大き いため、重錘は頂版との相互作用によって生ずるリバ ウンドに類似した挙動を示すことなく敷砂中に貫入し、 最大衝撃力に達した後大きくリバウンドして除荷状態 に至るためと推察される。

中央載荷である S-C-Hn の波形より、重錘の落下高 が小さいほど主波動継続時間が長いことが分かる。こ れは、過去の実験結果<sup>1)</sup>と同様に、入力エネルギーが 小さい場合には重錘貫入量も小さくなるが、一方で重



図-Ⅱ-3 重錘衝撃力波形

錘がリバウンドして除荷状態に至るまでの動的応答継 続時間は、貫入後の敷砂厚に対応して長くなることに 起因しているものと推察される。

図-II-4 には、最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係を示している。図中には、敷砂緩衝工を用いる場合の Hertz の接触理論に基づく振動便覧式<sup>2)</sup>により 算出した衝撃力 (ラーメの定数: $\lambda$ =1,000kN/m<sup>2</sup>、および $\lambda$ =450 kN/m<sup>2</sup>、割増係数: $\alpha$ =(D/T)<sup>12</sup>=1.58、D:重 錘径 125cm、T:敷砂厚 50cm)を示している。ここでの割増係数とは、緩衝材である敷砂層厚が、落石直径より小さい場合の落石衝撃力の増幅倍率である。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、中央載荷と端部載荷における最大重錘衝撃力の関係をみると、同一入力エネルギーの 500kJ では、S-C-H5.0 が S-R-H5.0 よりも 1.4 倍程度大きな値を示している。これは、後述する図 -II-8(a)の最大変位分布からも明らかなように、自



図-Ⅱ-4 最大重錘衝撃力-入力エネルギー関係

由端近傍載荷の場合には載荷点近傍頂版部の曲げ剛性 が境界条件に基づく拘束効果の低減によって見かけ上 低下することによるものと推察される。



図-Ⅱ-7 S-C-Hnにおける道路軸方向の変位分布図(変形倍率 20倍)

図より、実験結果の最大重錘衝撃力は、ラーメの定数を $\lambda$ =1,000kN/m<sup>2</sup>とし、 $\alpha$ を 1.58 とした場合の振動 便覧式より得られた重錘衝撃力分布とほぼ同程度の値 を示すことが分かる。また、端部載荷時の重錘衝撃力 に関しては、ラーメの定数を $\lambda$ =450kN/m<sup>2</sup>とした場合 にほぼ対応している。 以上より、敷砂緩衝工を設置した場合のロックシェ ッドの中央部載荷時における重錘衝撃力は、落石径と 敷砂厚を考慮(割増係数: $\alpha$ )し、かつラーメの定数 を $\lambda = 1,000$ kN/m<sup>2</sup>としたHertzの接触理論に基づく振動 便覧式により適切に評価可能であると考えられる。



図-Ⅱ-9 最大変位および残留変位と入力エネルギーの関係

## 3.2 変位波形

図-II-5 には、頂版下面の重錘落下点における鉛 直方向変位波形を示している。図より、各変位波形は 重錘衝突時点から 10ms 程度経過後に励起しているこ とが分かる。しかしながら、波形性状は重錘衝撃力波 形に類似している。また、S-C-H1.0、S-L-H2.5 の場合 には入力エネルギーが小さいことより、残留変位はほ とんど発生していない。しかしながら、S-C-H5.0/10.0、 S-R-H5.0の場合には入力エネルギーが大きいことによ り、残留変位が発生している。特に S-C-H10.0 の場合 には、除荷後減衰自由振動を呈していないことより、 著しく損傷を受けていることが見てとれる。

## 3.3 変位分布

図-Ⅱ-6~8 には、各実験ケースのロックシェッド 内縁における変位分布を 10ms 間隔で 200ms まで示し ている。

中央載荷時(S-C-Hn)の場合には、載荷点を含む道路 軸直角方向断面と道路軸方向について示している。ま た、端部載荷である S-L-H2.5 と S-R-H5.0 においては、 端部における載荷点を含む道路軸直角方向断面についてのみ示している。なお、変形倍率は全て20倍である。

図-I-6、7には、中央点載荷である S-C-Hn にお ける断面内変位分布を示している。図-Ⅱ-5の載荷 点変位波形からも明らかなように落下高さ H≦5m の 場合には、最大変位が 10mm 程度でかつ残留変位も 1mm 程度であることより、ほぼ弾性的な挙動を示して いることが分かる。しかしながら H=10m 落下時にお いて、断面方向には載荷点を中心に逆釣鐘状の分布を 示しており、最大変位は 60ms 程度経過後に約 80mm に達している。また、変位波形(図-Ⅱ-5)でも述べ ているように、90ms 程度経過以降には経過時間にかか わらず一定の分布を示し、変形が残留していることが 分かる。柱および側壁部の変形分布を見ると、柱部で 若干変位が残留しているが、頂版と比較して損傷の程 度は軽微であるものと推察される。図-Ⅱ-7の道路 軸方向分布から軸方向への影響範囲もほぼ全域に及ん でおり、構造全体で著しく損傷していることがうかが える。一方、図-I-8のS-L/R-Hnにおける変位分布



図-Ⅱ-10 S-C-H5.0 におけるひび割れ状況図

の時間的な推移状況において、落下高さ H=5m におけ る分布を図-II-6の中央載荷時と比較すると、端部 載荷の場合が、2 倍以上の応答を示しているが残留変 位は大きくはない。また、柱および側壁部の変位応答 も小さいことが分かる。

# 3.4 最大変位および残留変位と入力エネルギー

図-Ⅱ-9 には、には、最大変位および残留変位と 入力エネルギーの関係を示している。なお、いずれも 載荷点直下で発生している。

まず、(a)図の最大変位に直目すると、中央載荷の場合には、入力エネルギーが  $E_k \leq 500 kJ$  と  $E_k > 500 kJ$  では最大変位の増加傾向が異なっている。端部載荷の場合における結果より、 $E_k \leq 500 kJ$  までは線形な増加の傾向を示していることが分かる。また、端部載荷時の

最大変位は、中央載荷時に比べて 1.8 倍程度大きい値 を示している。これは、2 次元的に考えると、端部載 荷時の頂版曲げ剛性は、自由端があることにより版の 拘束効果が低減し、見かけ上中央載荷時の 1/2 程度に なることを暗示している。

(b) 図の残留変位の分布を見ると、中央載荷の場合に は、入力エネルギー $E_k=1,000kJ$ の場合に顕在化してい る。一方、 $E_k=500kJ$ では 2mm 程度で、損傷が小さい ことが分かる。端部載荷の場合においても  $E_k=500kJ$ の場合で 8mm 程度であり、前述のとおり、損傷がそ れほど著しくないことが分かる。

(a) (b) 図の最大変位と残留変位の分布を比較すると、 入力エネルギー $E_k$ =1,000kJ の場合における最大変位に 対する残留変位の比は 0.75 程度となっている。また、

![](_page_12_Figure_1.jpeg)

図-Ⅱ-11 S-C-H10.0 におけるひび割れ状況図

残留変位の道路軸直角方向全幅に対する割合を見ると 1.6%(=60/3600)程度であり、終局に近い状態である ことが確認できる。一方、 $E_k \leq 500 kJ$ の場合には、端 部載荷の場合で、残留変位の道路軸直角方向全幅に対 する割合が、0.05%(=2/3600)、0.2%(=8/3600)程度 であることより、ひび割れが発生しつつも損傷も顕在 化せず、供用可能な状態にあることが推察される。

# 3.5 ひび割れ発生状況

図-Ⅱ-10~12 には、には、各実験ケース終了後の ひび割れ発生状況を示している。なお、S-C-H1.0 の場 合には、ひび割れの発生は確認できなかった。

S-C-H5.0 の場合には、残留変位が 2mm 程度である が、図−Ⅱ−10より頂版下面の載荷点を中心に RC 版 特有の放射状のひび割れや各柱および側壁の頂部に道 路直角方向の2次元曲げに対応した曲げひび割れが発 生している。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。

図-II-11のS-C-H10.0の場合において、後述のように重錘の敷砂への貫入量が41cmに達しており、重 錘直下の敷砂は過度に締め固められた状態となっている。このため、頂版の上面には重錘が直撃した場合と 類似の円形状の押し抜きせん断破壊型のひび割れが発 生している。また、頂版下面には、放射状のひび割れ が一層拡大し、かつ一方向曲げを示す道路軸方向のひ び割れや3重円形状のひび割れも確認でき、押し抜き せん断破壊の傾向も確認できる。柱部においても、頂 部外側、底部内側に道路軸方向に沿ったひび割れが発 生しており、箱型ラーメン構造に対応した曲げモーメ

![](_page_13_Figure_1.jpeg)

図-Ⅱ-12 全実験ケースにおけるひび割れ状況図

ント分布を形成していることが確認できる。また、砂 止めのパラペット部にも中央部の柱を中心に上方から 下方に進展するひび割れが発生しており、重錘のリバ ウンドに伴う構造全体の負曲げが作用していることが うかがわれる。大きなかぶりコンクリートの剥落は確 認できないものの、上述のように残留変位が道路軸直 角方向スパン長の1.6%に達しており、押し抜きせん断 破壊の兆候も見られることから、終局限界に近い状況 であることが示唆される。

図-I-12より、S-L-H2.5の場合には、載荷点近傍の頂版下面に一方向曲げを示す数本の曲げひび割れを確認できるが、それ以外の損傷は見あたらない。また、S-R-H5.0の場合においても頂版上面には目立ったひび割れの発生は確認できないが、頂版下面および側壁外

面頂部に断面方向の曲げに伴う道路軸方向のひび割れ が進展している。

以上より、落下高さが H=5m で入力エネルギー  $E_k=500kJ$ では、十分供用可能な状態である。しかしな がら、H=10mで $E_k=1,000kJ$ の場合には、損傷がブロ ック全体に広がり、2 方向の曲げひび割れと共に押し 抜きせん断破壊型の円形状のひび割れも顕在し、終局 に近い状態であることが確認された。なお、この場合 の残留変位は道路軸直角方向スパン長の 1.6%程度と なる。

## 3.6 敷砂緩衝材の緩衝性能

図-Ⅱ-13には、敷砂緩衝材への重錘貫入量と入力 エネルギーの関係を示している。図より、入力エネル ギーE<sub>k</sub>の増加に伴い重錘の貫入量も増加しているこ

![](_page_14_Figure_0.jpeg)

図-Ⅱ-13 重錘貫入量と入力エネルギーの関係

とが分かる。詳細に見ると、重錘落下高さが H=1mの 場合には 30cm 程度の貫入を示し、その後、 $E_k \ge 500kJ$ においては、ほぼ 40cm 前後の値に漸近していること が分かる。従って、 $E_k \ge 500kJ$  では  $E_k = 500kJ$  以上の入 力エネルギーを効率よく緩衝できないことを暗示して いる。これより、敷砂厚が 50cm の場合には、 $E_k = 500kJ$ 程度ではほぼ設計に対応した緩衝性能を発揮すること が明らかになった。一方で、本実験に用いたロックシ ェド模型は  $E_k = 1,000kJ$  において緩衝材が対応した緩衝 性能を発揮できない状況下でも、中央載荷において終 局状態に近い耐衝撃性を示すことが明らかになった。

# 4. まとめ

本研究では、敷砂緩衝工を設置した RC 製ロックシェッドの耐衝撃挙動を明らかにすることを目的に、敷

砂緩衝工を設置した 2/5 スケールのロックシェッド模型を用いた斬増繰り返しによる重錘落下衝撃載荷実験を実施した。実験は、敷砂緩衝工を 50cm 厚で設置し、 重錘落下位置を試験体の中央部、各柱中心の道路縦断 方向に変化させた全6ケースについて実施した。 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。

- 敷砂緩衝工を設置したロックシェッドの中央部載 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 =1,000kN/m<sup>2</sup>としたHertzの接触理論に基づく振動 便覧式により評価可能と考えられる。
- 2) 重錘衝撃力は、端部載荷の場合には自由端の存在 によって版効果が低減することにより、中央載荷 時の 1/1.4 程度に低減する。一方で最大変位や残 留変位は、端部載荷においてそれぞれ約2倍、4 倍程度大きくなる。
- 50cm 厚の敷砂緩衝材の緩衝効果は、入力エネルギ ーが E<sub>k</sub> =500kJ までは使用限界を十分確保可能で ある。また、E<sub>k</sub>=1,000kJ の場合には、残留変形が 道路軸直角方向幅の 1.6%程度となり、終局限界に 近い状態となる。

### 参考文献

- II-1) 川瀬良司、岡田慎哉、鈴木健太郎、岸 徳光: 敷砂緩衝工を設置した RC 製アーチ構造の耐衝 撃挙動に関する実規模重錘落下実験、構造工学 論文集、Vol55A、 pp.1313-1325、 2009.3
- II-2) 土木学会:土木技術者のための振動便覧、 1985.

# RESEARCH FOR EFFICIENCY AND UPGRADING OF ROAD DISASTER PREVENTION STRUCTURES

Abstract: This study was conducted for the purpose of rationalizing and sophisticating design methods for rockfall countermeasures to prevent road disasters.

As a study for establishing a performance verification-type method of designing rock sheds, focus was placed on their top parts and falling-weight impact tests were conducted for two-side-supported large RC slabs in cases with and without buffer materials (paving sand and gravel). The results revealed that the ultimate status was reached as a result of punching shear failure in the case without buffer materials. It was also found that the maximum falling-weight impact, maximum displacement and residual displacement in the case where buffer materials were used became greater with crushed stone than with paving sand, and that the final failure mode of large RC slabs with buffer materials involved bending failure. A falling-weight impact test was also conducted using a scale model of a rock shed to obtain data on impact resistance behavior before the structure reaches its ultimate state. The results indicated that the punching shear failure-type and bending failure-type modes occurred in combination as an adequate plate effect could not be expected in the case where the impact load was applied near the free end, and that the maximum and residual displacement became approximately 1.8 times as large as that when the load was applied to the central part.

Keywords: road disaster prevention structure, performance verification method, falling-weight impact test, large RC slab, rock shed