

(36) 敷砂および碎石緩衝材を用いた大型 RC スラブの重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact test of large scale RC slabs with a sand cushion of gravel cushion

山口 悟\*, 岸 徳光\*\*, 西 弘明\*\*\*, 今野 久志\*\*\*\*  
 Satoru Yamaguchi, Norimitsu Kishi, Hiroaki Nishi, and Hisashi Konno

\*寒地土木研究所 研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)  
 \*\*工博, 室蘭工業大学 教授, 社会基盤ユニット 暮らし環境系領域 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1)  
 \*\*\*博(工), 寒地土木研究所 上席研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)  
 \*\*\*\*博(工), 寒地土木研究所 総括主任研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

Key Words: large scale RC Slabs, Falling weight Impact loading test, Sand cushion, Gravel cushion  
 キーワード: 大型 RC スラブ, 重錘落下衝撃実験, 敷砂緩衝材, 碎石緩衝材

1. はじめに

北海道の道路は急峻な地形や海岸線などを通過し築造されている場合も少なくなく, 大規模な岩盤崩壊や落石を始めとする道路災害が発生し, 道路防災水準を向上させるための研究開発が急務となっている。

このため著者らは, 落石から道路交通網を守るために建設されているRC 製落石防護覆道(以後, ロックシェッド)の頂版部に着目し, RC 梁, RC スラブ等に関する縮尺模型や実物大の試験体を対象に, 衝撃載荷実験および弾塑性衝撃応答解析を実施してきた<sup>1)~4)</sup>。また, 同一試験体に対する繰り返し衝撃載荷実験を実施し, 斬増する衝撃荷重に対する損傷の進展過程やひび割れ性状に関する実験結果も取り纏めている。さらに, それらの動的性状を再現できる数値解析手法も提案している<sup>5)</sup>。

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。

設計手法を確立するためには, 各種緩衝材を設置した状態下での, 載荷位置や入力エネルギーを変化させた様々な載荷条件に対する終局状態までの挙動を把握することが必要となる。このようなことから, 最終的には数値解析的な検討に頼らざるを得ないものと考えられる。

このような観点から, 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耐衝撃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 製ロックシェッドの 2/5 模型を製作し, 入力エネルギーを変化させ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衝撃載荷実験を行った。その結果, ロックシェッドが終局状態に至る場合の損傷は, 頂版部において集中的に発生することが明らかになった<sup>6)</sup>。

そこで, 本研究ではロックシェッドの 2/5 模型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に関する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載荷実験を実施した。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碎石についてもその緩衝特性を把握するために合わせて実験を実施した。本論文では, 上記実験ケースの中から緩衝材として敷砂および碎石を設置して実施した重錘落下衝撃載荷実験の結果について報告するものである。

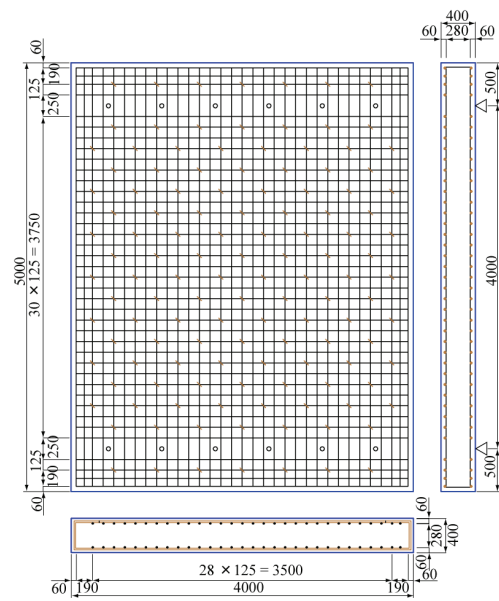


図-1 試験体の形状寸法および配筋図

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の形状寸法および実験方法

図-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、筆者らが別途実施した 2/5 スケールの覆道模型実験試験体の頂版部を参考に、厚さおよび配筋を決定している。すなわち、長辺が5 m、短辺 4 m、純スパン長 4 m、版厚0.4 m 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125 mm 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 393 MPa、580 MPa、D13 の降伏強度と引張強度が 382 MPa、550 MPa である。コンクリートのかぶり、鉄筋からの芯かぶり60 mm としている。コンクリートの実験時圧縮強度は敷砂を使用した実験の試験体が平均 32.0 N/mm<sup>2</sup>、碎石を使用した実験の試験体が平均 30.9 N/mm<sup>2</sup> であった。

コンクリート標準示方書に基づいて算定した大型 RC スラブの静的曲げ耐力は  $P_{usc} = 1,193$  kN、静的せん断耐力は  $V_{usc} = 3,839$  kNである。従って、せん断余裕度  $\alpha (= V_{usc}/P_{usc})$  は、 $\alpha = 3.22 > 1.0$  であり、設計的には静載荷時に曲げ破壊型で終局に至る断面設計となっている。

### 2.2 衝撃実験ケース

表-1には、実験ケースの一覧を示している。実験は、敷砂および碎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1.0 m、その後  $H=5.0$  m から2.5 m 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  $H=10.0$  m、および  $H=12.5$  m 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、碎石：G）、第 2 文字目には載荷方法：II（impact iteratively）：繰り返し載荷、IS（impact singly）：単一載荷、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

写真-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、敷砂あるいは碎石を50 cm 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 5,000 kg 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。

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	緩衝工	重錘質量 M(kg)	載荷方法	落下高さ H(m)	入力エネルギー $E_L$ (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
S-IS-H12.5	12.5	613			
G-II-H1.0	碎石	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
G-IS-H12.5	12.5	613			



写真-1 実験状況(G-II-H10.0)

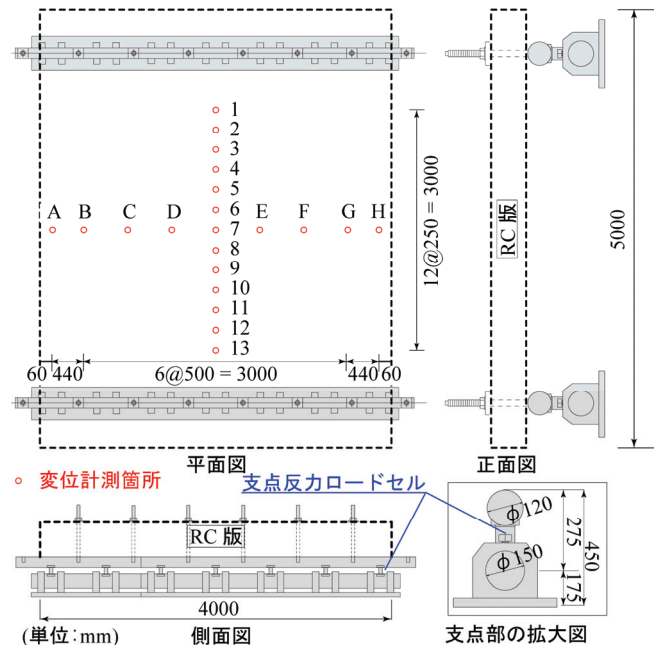


図-2 支点反力計測架台および変位計測位置

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 の球状となっている。なお、重錘は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ている。

試験体は、図-2 に示す支点反力測定用のロードセル

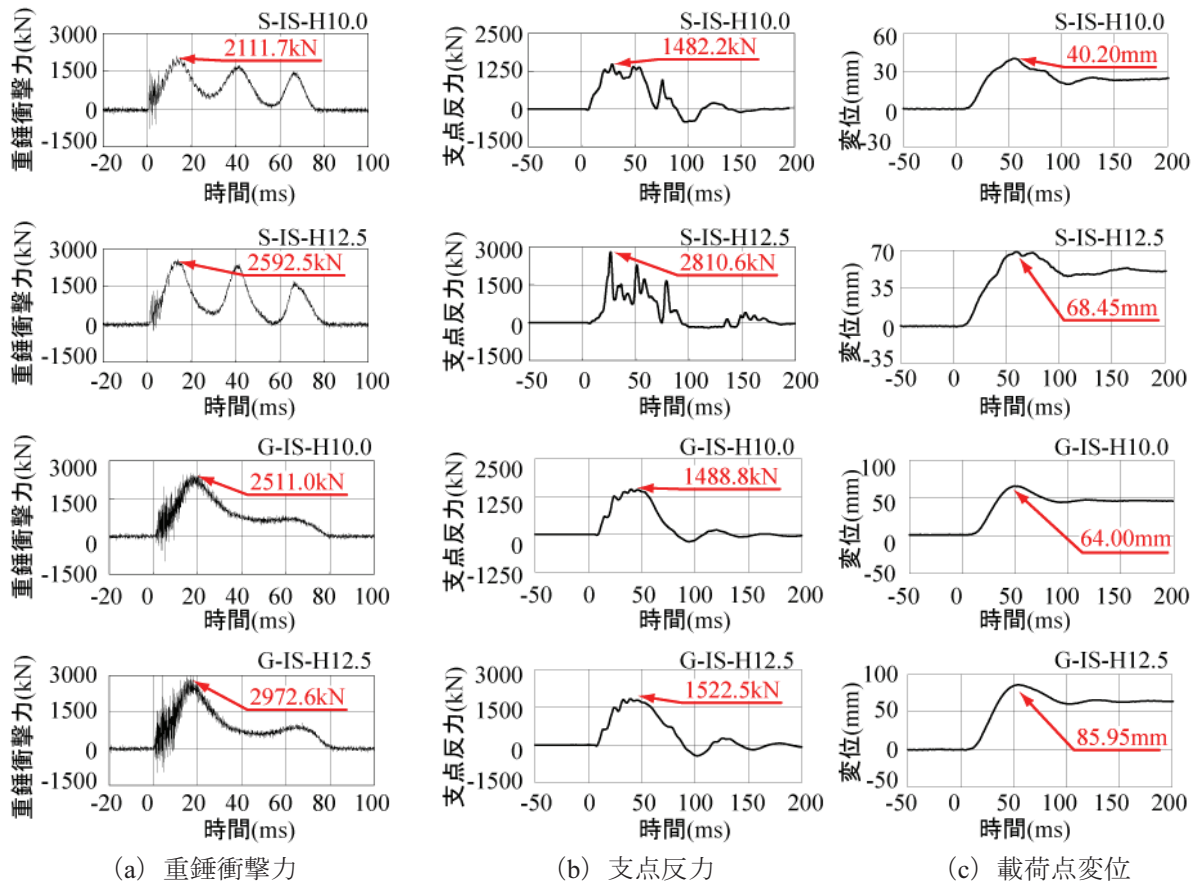


図-3 各種応答波形

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を防止するために、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  $2.56 \text{ g/cm}^3$  である。実験に際しては RC スラブ上に型枠を設置し、厚さ25 cm ごとに足踏みによって締め固めを行い、所定の厚さに整形している。実験時の湿潤密度は平均  $1.45 \text{ g/cm}^3$ 、含水比は平均 9.45%である。

実験に使用した碎石は、札幌市硬石山産の路盤用切込碎石 (0 ~ 30 mm) であり、粒度試験結果は、13.2mm, 2.36mm, 600  $\mu$  のふるい通過率がそれぞれ56, 25, 15%であり、表乾密度は  $2.61 \text{ g/cm}^3$  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、敷砂および碎石とも、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。

## 2.4 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, 応答周波数 DC ~ 3.5 kHz) 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セルによる支点反力、3) 非接触型レーザ式変位計 (測定範囲  $\pm 100 \text{ mm}$ , 応答周波数約 1 kHz) による試験体変位である。なお、レーザ式変位計は、図-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 0.05 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 重錘衝撃力波形

図-3には、敷砂および碎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-2に示す合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

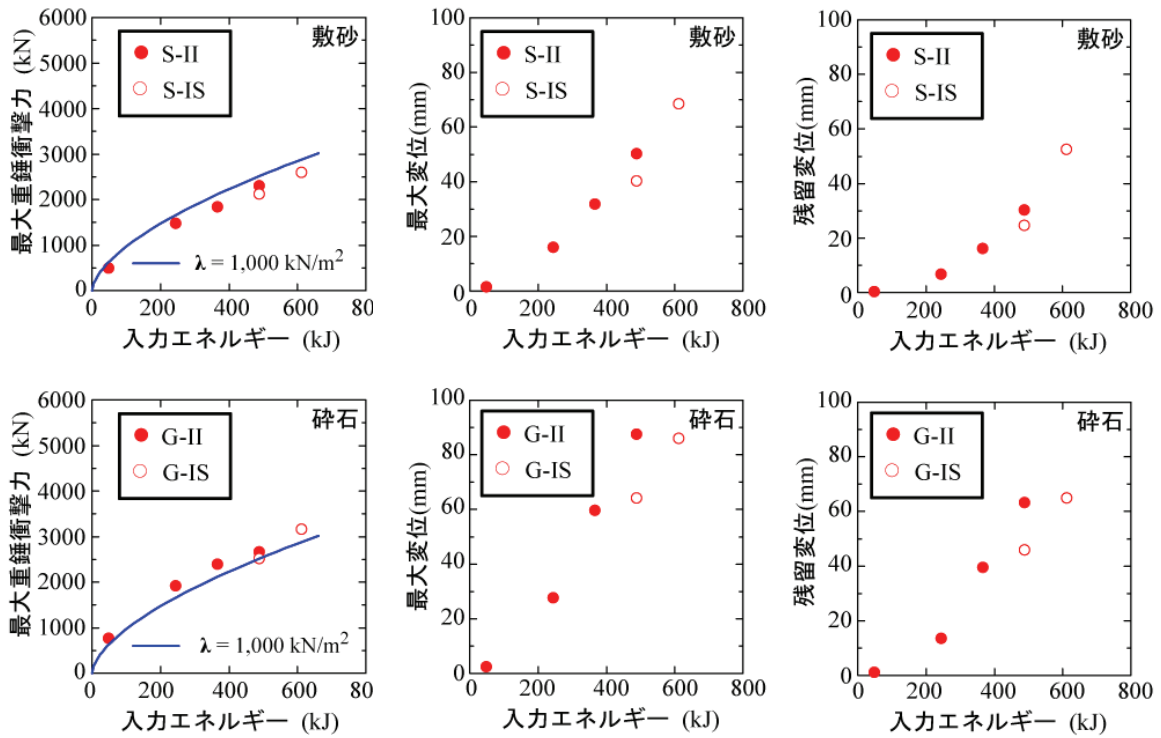


図-4 各種応答値と入力エネルギーの関係

理している。なお、重錘衝撃力波形と载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50 cm 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、落下高さの増加と共に増加していることが分かる。

一方、碎石を設置した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 80 ms 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。碎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。

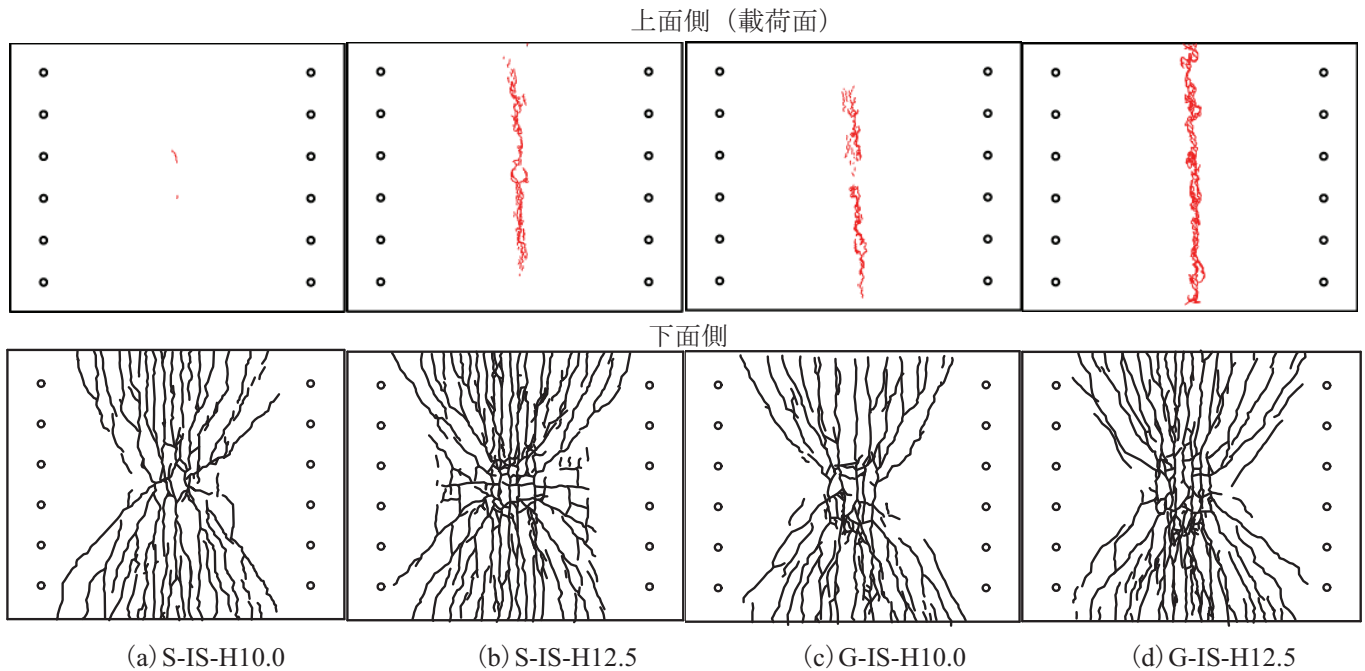
最大支点反力は、敷砂および碎石の両ケースともに落下高さの増加と共に大きくなっているが、敷砂を用いた場合の増加割合が大きい。また、波形の継続時間はいずれの実験ケースも重錘衝撃力波形と同程度であり、約 80 ms である。

(c) 図より、载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続く減衰自由振動波形より構成されている。碎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、敷砂および碎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。敷砂および碎石の最大変位を比較すると、碎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-4には、敷砂および碎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<sup>7)8)</sup>により算出した衝撃力(ラーメの定数： $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ 、割増係数： $\alpha = D/T = 1.41$ 、 $D$ ：重錘直径 1.00 m、 $T$ ：敷砂厚 50 cm)を示している。ここでの割増係数とは、緩衝材である敷



図－5 各種応答値と入力エネルギーの関係

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、碎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碎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 $H = 10\text{ m}$ の同一入力エネルギー $Ek = 490\text{ kJ}$ における最大重錘衝撃力値は、繰り返し載荷実験と単一の載荷実験による比較では、碎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、ラーメンの定数を $\lambda = 1,000\text{ kN/m}^2$ 、 $\alpha = 1.41$ とする振動便覧式の結果よりも若干小さく、また、碎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、かつラーメンの定数を $\lambda = 1,000\text{ kN/m}^2$ 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、碎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。敷砂および碎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 $Ek = 250\text{ kJ}$ 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、 $Ek = 250\text{ kJ}$ 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、最大変位は碎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。敷砂および碎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 $Ek = 250\text{ kJ}$ を境に増加割合が大きくなっており、 $Ek = 250\text{ kJ}$ 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、最大変位と同様に碎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－5には、敷砂および碎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 $H=10.0\text{ m}$  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、碎石を設置した場合(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 $H=12.5\text{ m}$  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、碎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-4 (b) の最大変位分布において、碎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  $H=10.0\text{ m}$  では、両緩衝材を設置する場合ともに载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 $H=12.5\text{ m}$  の場合には、 $H=10.0\text{ m}$  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 $H=12.5\text{ m}$  の場合には、载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、碎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、作用衝撃力が载荷点部に集中して作用しているように推察される。以上より敷砂緩衝材は、碎石緩衝材より作用衝撃力を分散する傾向にある。

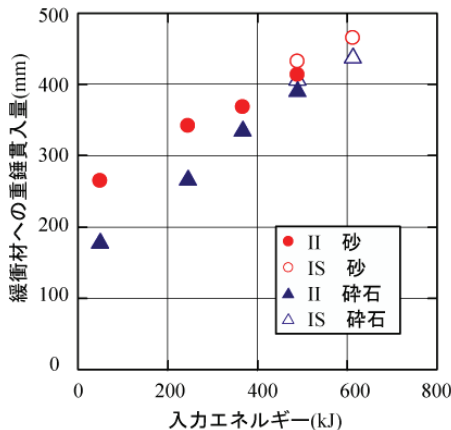


図-6 重錘貫入量と入力エネルギーの関係

### 3.4 緩衝材への重錘貫入量

図-6には、敷砂および碎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。敷砂と碎石の場合の重錘貫入量を比較すると、繰り返し载荷実験、単一载荷実験とも、碎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。 $E_k = 490\text{ kJ}$  の結果について比較すると、単一载荷実験の場合が繰り返し载荷実験の場合よりも大きく示されている。

これは、単一载荷の場合には、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碎石を設置した 2 辺支持大型 RC スラブに対する、 $5,000\text{ kg}$  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。

- 1) 同一入力エネルギーにおける最大重錘衝撃力と最大変位および残留変位は、碎石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも大きい。
- 2) 同一入力エネルギーにおける緩衝材への重錘貫入量は、碎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、敷砂緩衝材は、碎石緩衝材より作用衝撃力を分散する傾向にある。
- 4) 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

- 1) 西 弘明, 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一: 敷砂緩衝材を用いた実規模 PC 落石覆工の衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, 17(2), pp.691-696, 1995.6
- 2) 川瀬良司, 今野久志, 牛渡裕二, 岸 徳光: 各種緩衝材を設置した場合のトンネル坑口部の落石衝撃挙動解析, コンクリート工学年次論文集, 27(2), pp.871-876, 2005.6
- 3) 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, Vol.55A, pp.1313-1325, 2009.3
- 4) 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
- 5) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩: RC 梁の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1225-1237, 2009.3
- 6) 山口 悟, 西 弘明, 今野久志, 岸 徳光: 敷砂緩衝材を有する RC 製ロックシェッド模型(2/5)に関する衝撃载荷実験, 寒地土木研究所月報 No.687, (独)土木研究所 寒地土木研究所, pp.10-20, 2010.8
- 7) 土木学会: 土木技術者のための振動便覧, 1985
- 8) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6

(2010年11月5日受付)