

## 2 辺支持大型 RC スラブに関する重錘落下衝撃実験

A falling-weight impact test of large-scale RC slabs with two opposite edges simply supported

岸 徳光\*, 西 弘明\*\*, 今野 久志\*\*\*, 牛渡 裕二\*\*\*\*, 保木 和弘\*\*\*\*

Norimitsu Kishi, Hiroaki Nishi, Hisashi Konno, Ushiwatari Yuji, and Kazuhiro Hoki

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

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

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

\*\*\*\*(株) 構研エンジニアリング 防災施設部 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

In order to confirm the impact resistant performance of large-scale RC slabs with two opposite edges simply supported, the single and consecutive falling-weight impact tests were conducted by varying absorbing materials. Here two kinds of absorbing material were applied; sand cushion; and crushed gravel cushion. The slab without absorbing system was also tested as control slab. The consecutive impact loading tests were conducted from elastic region up to the ultimate state of the slabs. From this study, following results were obtained: 1) the failure mode can be shifted from punching shear failure type to flexural failure type by applying sand cushion and/or crushed gravel cushion; 2) the absorbing performance of sand cushion is superior to that of crushed gravel cushion; and 3) sand cushion can more widely disperse the impact force than crushed gravel cushion.

*Key Words : RC rock-shed, Performance based design method, RC slab, Anti-impact response  
Sand cushion, Crushed gravel cushion*

キーワード: RC 製ロックシェッド, 性能照査型耐衝撃設計法, RC スラブ, 耐衝撃挙動  
敷砂緩衝工, 碎石緩衝工

### 1. はじめに

日本は国土の約 7 割が山地・丘陵地であり, 地形が急峻な上, 地層・地質が複雑で地震の発生頻度が高く, また台風や降雨, 降雪など厳しい自然環境下にある。

このような中, 北海道においては, 海岸線などの急峻な地形に建設されている道路も多く, 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。

また, 多くの土木構造物が性能照査型設計法に移行している中, ロックシェッドにおいても性能照査型設計法への移行が求められている現状にある。しかしながら, 衝撃荷重が作用する構造物を適切に性能評価する手法を確立するためには, 荷重の大きさや緩衝工の効果などについて膨大な検討が必要となるため, 種々の実験および数値解析による同定が不可欠な状況である。

著者らは, これまで道路交通網を落石から守るために建設されている RC 製ロックシェッドの頂版部に関する耐衝撃問題に着目し, 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, 漸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性能照査型設計法に移行するような場合においては, 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, 著者らは耐衝撃用途 RC 構造物の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, 実規模 RC 製ロックシェッドの 2/5 縮尺模型を製作し, 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<sup>6,7)</sup>。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, 頂版部で集中的に発生することが明らかになった。

そこで, 本研究ではロックシェッドの 2/5 縮尺模型の頂版部に着目し, 緩衝工を設置しない状態および緩衝工を設置した状態での 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

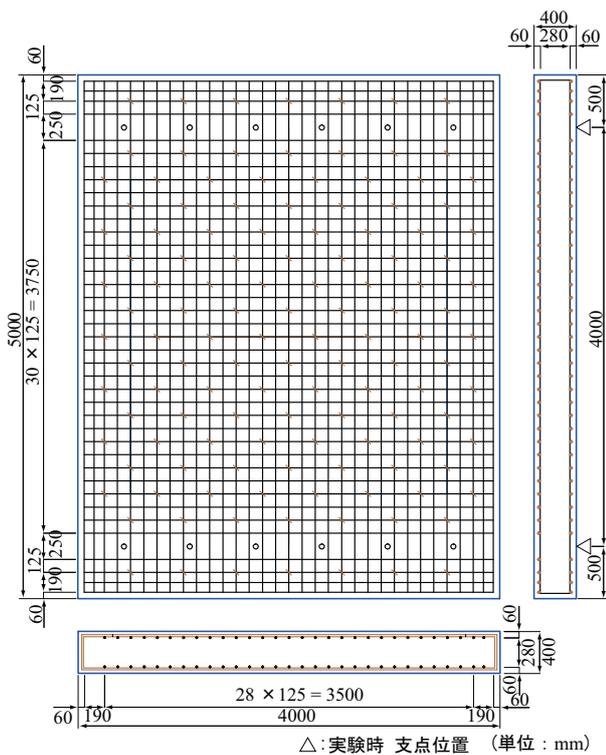


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

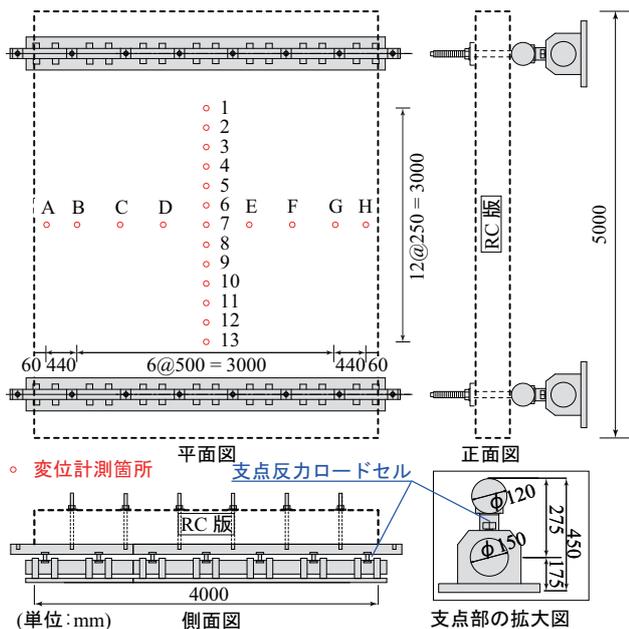


図-2 支点治具および変位計測位置

物上に使用されている碎石についても併せて実験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1には、実験に使用した大型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、著者が別途実施した2/5スケールの覆道模型実験



写真-1 実験状況

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、上下面の軸方向鉄筋としてD19を125 mm間隔（主鉄筋比0.67%）に、配力筋についても軸方向鉄筋と同様に上下面共にD19を125 mm間隔で配置している。スターラップはD13を千鳥配置することとした。

鉄筋の材質は全てSD345である。その力学的特性値は、D19の降伏強度と引張強度が393 MPa、580 MPaであり、D13の場合にはそれぞれ382 MPa、550 MPaである。かぶりは60 mmとしている。コンクリートの設計基準強度は24 MPaとしたが、緩衝工を設置しない場合における実験時圧縮強度は平均で34.2 MPa、緩衝工として敷砂を使用する試験体の場合には平均32.0 MPa、碎石を使用する試験体の場合には平均30.9 MPaであった。

### 2.2 衝撃実験概要

写真-1には、重錘落下衝撃載荷実験の状況を示している。本実験において、緩衝工を設置しない場合（以後、単に緩衝工無し）には質量2,000 kgの鋼製重錘を用いている。また、緩衝工を設置する場合（以後、単に緩衝工有り）には、敷砂あるいは碎石を50 cmの厚さで設置し、5,000 kgの鋼製重錘を用いて実験を行うこととした。いずれの場合もトラッククレーンにより重錘を所定の高さまで吊り上げ、脱着装置を介してRCスラブ中央部に自由落下させることにより実験を実施している。

使用した鋼製重錘は、いずれも直径が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を組み込んだ鋼製治具上に設置し、重錘衝突時の跳ね上がりを防止するために、支点治具に固定した鋼棒を用い、貫通孔を通して固定している。また、支点治具は、ロードセルの反力を受ける働きを持たせ、かつ回転できる構

表-1 実験ケース

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 <sub>k</sub> (kJ)
N-CL-H0.25	無	2,000	繰返	0.25	5
N-CL-H0.50				0.50	10
N-CL-H0.75				0.75	15
N-CL-H1.00				1.00	20
N-OL-H1.00			単一	1.00	20
S-CL-H1.0	敷砂	5,000	繰返	1.0	49
S-CL-H5.0				5.0	245
S-CL-H7.5				7.5	368
S-CL-H10.0				10.0	490
S-OL-H10.0			単一	10.0	490
S-OL-H12.5				12.5	613
G-CL-H1.0	碎石	5,000	繰返	1.0	49
G-CL-H5.0				5.0	245
G-CL-H7.5				7.5	368
G-CL-H10.0				10.0	490
G-OL-H10.0			単一	10.0	490
G-OL-H12.5				12.5	613

造であり、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る。粒度試験結果は、0.6 mm, 0.3 mm, 0.15 mm のふるい通過率がそれぞれ 98%, 70%, 2% で、表乾密度は 2.56 g/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 1.45 g/cm<sup>3</sup> であり、含水比は平均 9.45% であった。

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（最大粒径：30 mm）である。粒度試験結果は、13.2 mm, 2.36 mm, 600 μm 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 g/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、繰返し載荷実験では、敷砂および碎石とも実験終了後に重錘落下位置における貫入量を調査した後、掘り返して RC スラブ上面のひび割れ状況を確認し、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。緩衝工無しの場合では、繰返し載荷実験 1 体、単一載荷実験 1 体の計 2 体に対して実施した。緩衝工有りの場合には、敷砂および碎石それぞれに対して、繰返し載荷実験 1 体、単一載荷実験 2 体の計 6 体に対して実施した。実験は、繰返し載荷、単一載荷合わせて計 17 ケースを実施している。

実験は、緩衝工無しの場合における繰返し載荷実験では、落下高さ  $H = 0.25$  m から 0.25 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押し

抜きせん断破壊によって剥落に至るまで実施した。また、単一載荷実験は、繰返し載荷実験の最終落下高さで実施している。

一方、緩衝工有りの場合における繰返し載荷実験では、弾性範囲内の実験ケースとして落下高さ  $H = 1.0$  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まで実施した。単一載荷実験に関しては、繰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（緩衝工無し：N, 敷砂：S, 碎石：G）、第 2 文字目には載荷方法（CL：繰返し載荷; Consecutive loading, OL：単一載荷; One time loading）、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) 重錘衝撃力を評価するために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）による減速度、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（応答周波数約 1 kHz）による試験体の鉛直方向変位である。なお、レーザ式変位計は、図-2 に示すように、重錘衝突点の RC スラブ下面で、直交するスパン方向と道路軸方向の 2 方向に配置している。

各応答波形は、全てサンプリングタイム 0.05 ms で、

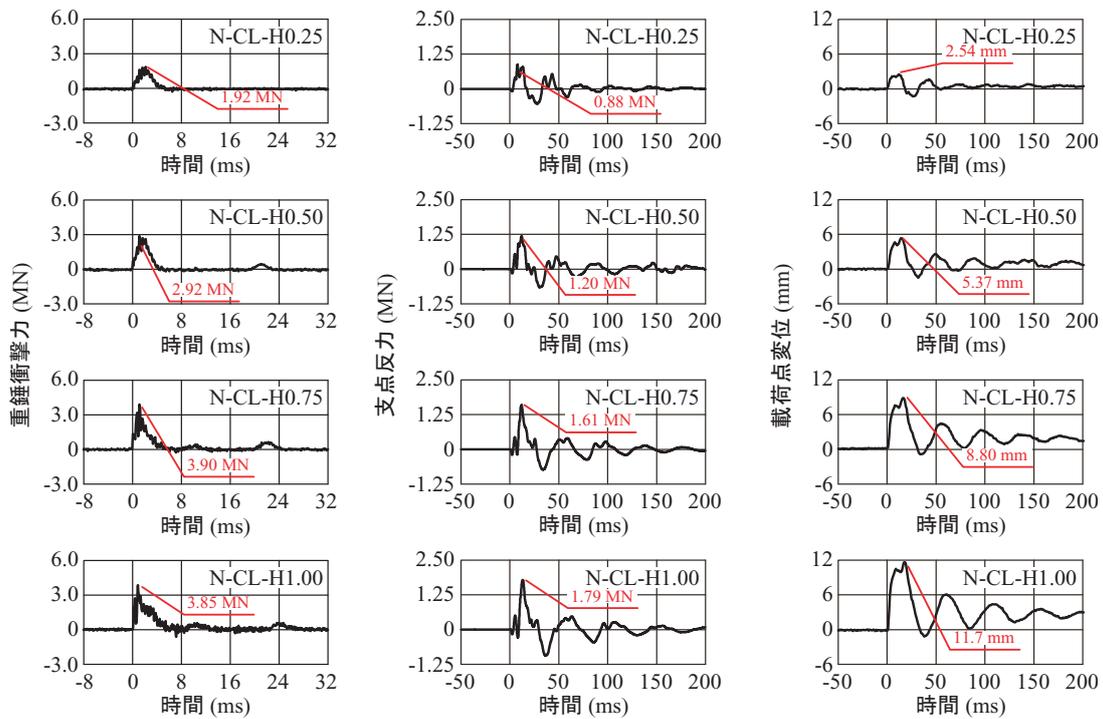


図-3 各種応答波形 (繰り返し载荷実験, 緩衝工無し)

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

図-3および図-4には、繰り返し载荷時における重錘衝撃力波形、支点反力波形、载荷点直下の鉛直変位 (以後、単に変位) 波形を示している。なお、支点反力は、図-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) である。

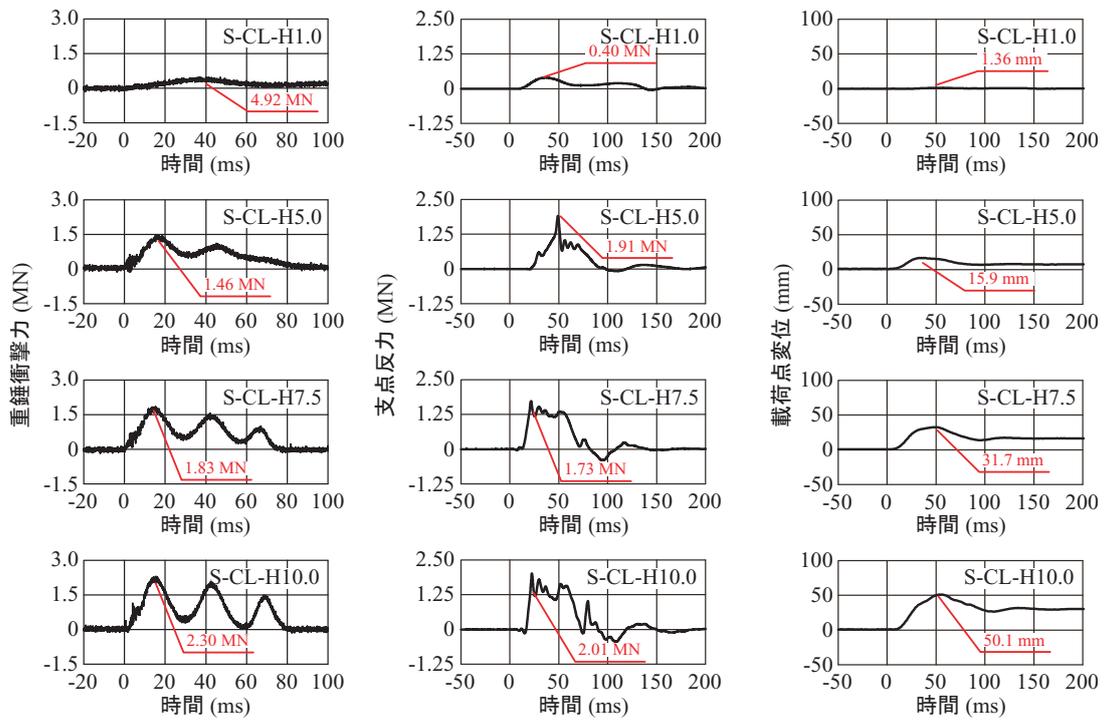
図-3より、重錘衝撃力波形に着目すると、緩衝工無しの場合には、落下高さ  $H = 0.75$  m までは継続時間が  $t = 4$  ms 程度の三角形の分布性状を示していることがわかる。また、 $H = 1.00$  m の場合には、継続時間が  $t = 6$  ms 程度に長くなっているが、最大重錘衝撃力は  $H = 0.75$  m 落下時とほぼ同程度の値を示した。これは、 $H = 0.75$  m 落下時において押し抜きせん断型のひび割れが発生し、剛性が低下していたためと推察される。

一方、図-4に示す敷砂を設置した場合に着目すると、落下高さ  $H = 7.5$  m 以上の場合において、最大応答値や周期が同程度の正弦波が3波連続した波形性状を示している。これは、1) 3波の周期が、図-3の緩衝工無しの応答変位波形から類推すると RC スラブの最低次固有振動周期とも異なること、2) 緩衝工有りの

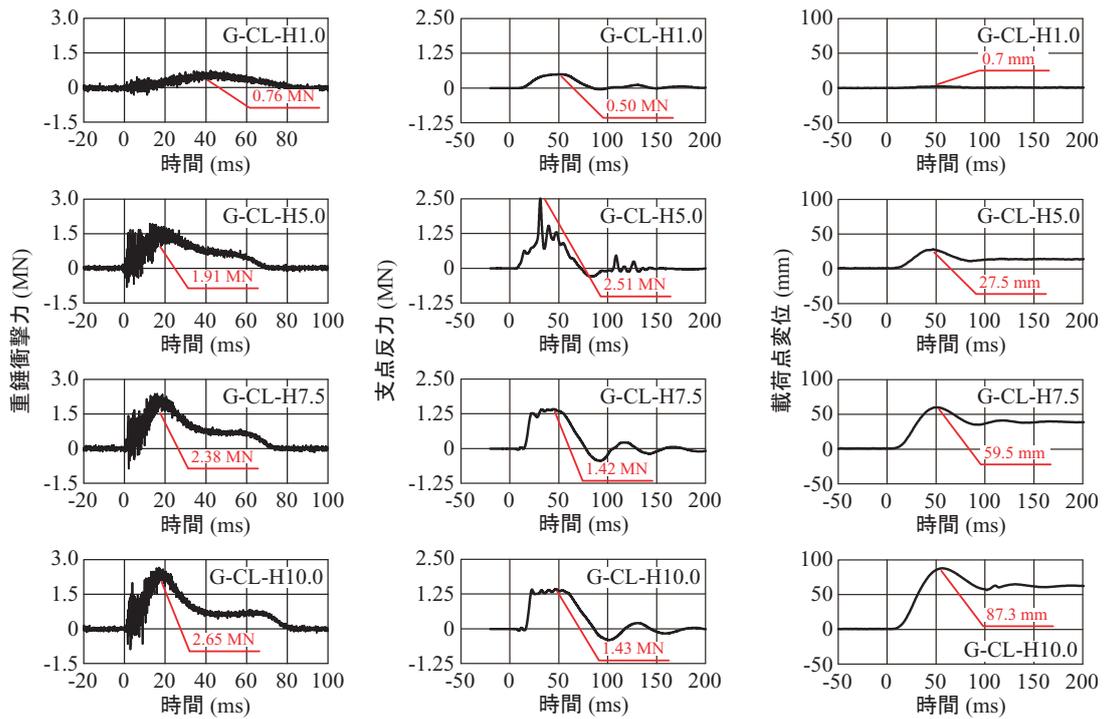
応答変位波形から類推すると RC スラブの最低次固有振動周期が両者類似しているにもかかわらず、重錘衝撃力の波形性状は異なることより、RC スラブの固有振動特性が影響していることは勿論であるが、特に敷砂と重錘間の相互作用が大きく関与して発生したものと推察される。今後、数値解析手法の確立の後、詳細に検討したいと考えている。なお、落下高さ  $H = 1.0$  m,  $5.0$  m ではそれぞれ1波、2波から形成される波形性状であり、波動継続時間は落下高さにかかわらず  $t = 70 \sim 80$  ms であった。なお、緩衝工として碎石を設置した場合においても同様に、 $t = 70 \sim 80$  ms の波動継続時間であった。

支点反力波形に着目すると、緩衝工無しの場合には、落下高さの増加に伴い、最大応答値も増加する傾向にあることが分かる。波形性状は、第1波の継続時間が  $20 \sim 25$  ms 程度の三角形の波形を示した後、減衰自由振動を呈している。一方、緩衝工有りの場合には、緩衝材の種類にかかわらず、 $H = 1.0$  m 落下時は緩やかな2波から構成される波形であるが、落下高さ  $H = 5.0$  m では継続時間が  $t = 60 \sim 70$  ms 程度の三角形の波形性状となっている。また、 $H = 7.5$  m,  $10.0$  m 落下時には台形状の波形分布を示している。これは、 $H = 5.0$  m 落下時までには累積された損傷が、 $H = 7.5$  m 落下時以降に進行したことによるものと推察される。

変位波形に着目すると、緩衝工無しの場合には、いずれも継続時間が  $t = 20 \sim 30$  ms である第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。最大変位および残留変位は、落下高さの増加に



(a) 敷砂



(b) 碎石

図-4 各種応答波形 (繰り返し载荷実験, 緩衝工有り)

に伴い増加する傾向を示している。また、緩衝工有りの場合には、緩衝材の種類にかかわらず、重錘衝突時点から若干遅れて波形が励起し、継続時間が  $t = 70 \sim 80$  ms の正弦半波状の波形を示した後、減衰の大きい自由振動を呈している。また、最大変位および残留変位の傾向は、緩衝工無しの場合と同様に、落下高さの増

加に伴い増加する傾向を示している。

図-5には、単一载荷時における重錘衝撃力波形、支点反力波形、载荷点直下の変位波形を示している。

重錘衝撃力波形に着目すると、緩衝工無しである N-OL-H1.00 の場合には、最大応答値近傍が鋭い三角形形状の分布を示しており、荷重継続時間は  $t = 4$  ms 程

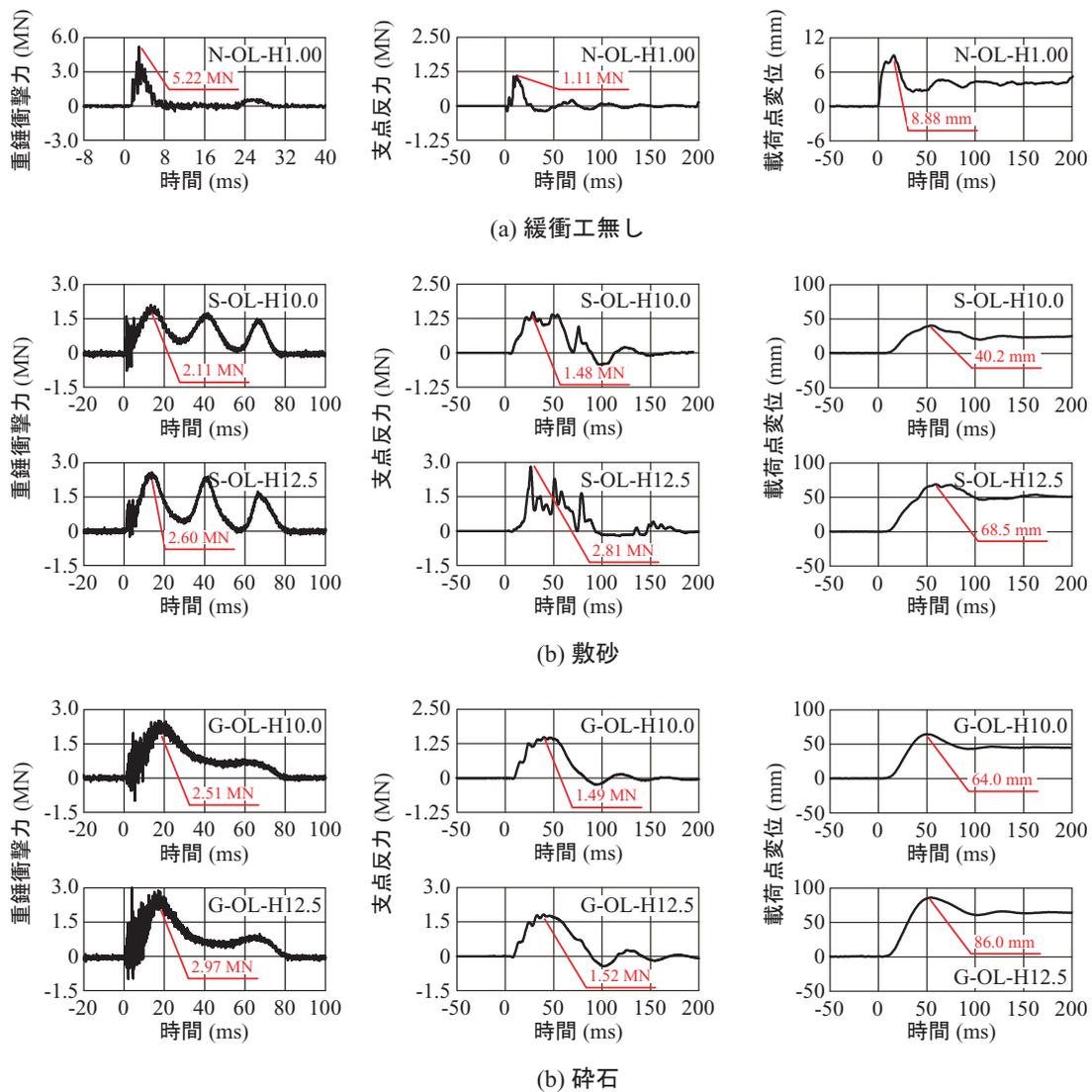


図-5 各種応答波形(単一载荷実験)

度である。一方、緩衝工有りの場合における波形性状は、緩衝工の種類にかかわらず、正弦波が連なった性状を示しており、荷重継続時間も  $t = 80 \text{ ms}$  程度と緩衝工無しの場合に比較して長くなっていることが分かる。

また、敷砂を設置した場合の重錘衝撃力波形は、繰り返し载荷の場合と同様に、最大応答値や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。一方、碎石を設置した場合には、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。

支点反力波形に着目すると、緩衝工無しである N-OL-H1.00 には波形の継続時間が  $t = 25 \text{ ms}$  程度の三角形状の波形性状であるが、緩衝工有りの場合には重錘衝突時点から若干遅れて励起し、継続時間が  $t = 60 \text{ ms} \sim 70 \text{ ms}$  程度の波形となっている。また、敷砂を設置した場合には、S-OL-H10.0 において振幅が小さいものの重錘衝撃力波形に対応して3波が合成された波形

性状が確認できる。落下高さの大きい S-OL-H12.5 の場合には、S-OL-H10.0 の場合よりその傾向が顕著に示されている。碎石を設置する場合には、継続時間が重錘衝撃力波と同様である比較的滑らかな正弦半波の波が励起しその後減衰自由振動状態に移行している。

変位波形に着目すると、緩衝工無しである N-OL-H1.00 の場合には、継続時間が  $t = 30 \text{ ms}$  程度である第1波目の主波動とその後の減衰自由振動から構成されている。緩衝工有りの場合には、緩衝工の種類にかかわらず、第1波目の継続時間が  $t = 80 \text{ ms} \sim 100 \text{ ms}$  であった。敷砂を設置する場合には、最大応答値近傍に若干周波数の高い波形が現れているが、碎石を設置する場合の主波動は滑らかな性状を示している。最大変位を比較すると、碎石を用いる場合が敷砂を用いる場合よりも大きい。また、前述のように、重錘衝撃力波形は緩衝材の種類によって大きく異なっている。しかしながら、変位波形は両者類似であることが分かる。これより、敷砂を用いる場合において重錘衝撃力に発

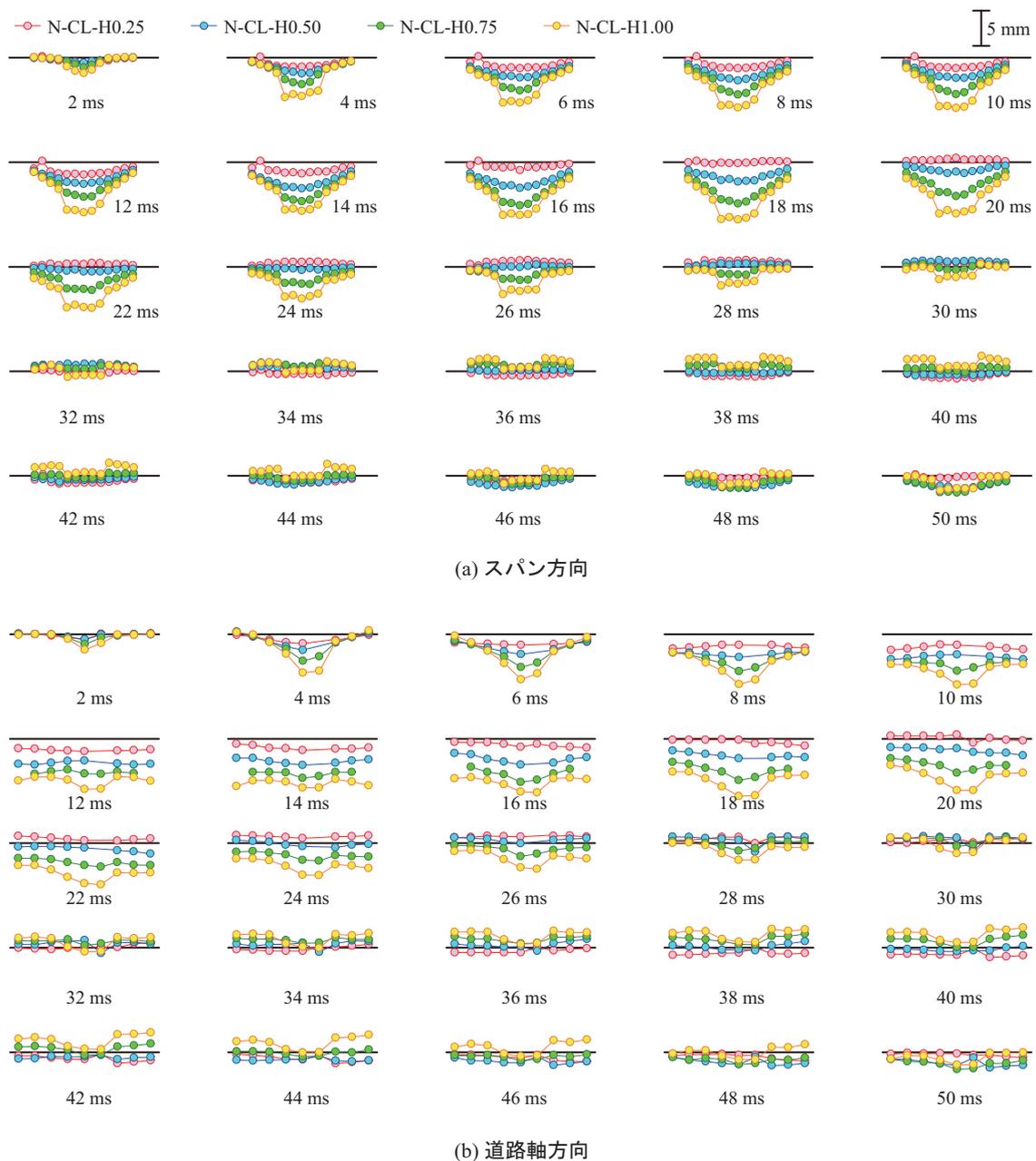


図-6 変位分布（緩衝工無し，変形倍率 150 倍）

生している 3 波の正弦波は，変位応答にそれほど影響してないことが推察される。

ここで，緩衝工無しの場合の N-OL-H1.00 と緩衝工有りの場合における S-OL-H10.0 と G-OL-H10.0 の各最大応答に関して比較検討を行う。入力エネルギーはそれぞれ  $E_k = 20 \text{ kJ}$ ,  $500 \text{ kJ}$  で緩衝工有りの場合が 25 倍大きいものに対して，S-OL-H10.0 の場合には，最大重錘衝撃力は約 1/2.5，最大支点反力は同程度，最大変位は 4.5 倍程度である。一方，G-OL-H10.0 の場合には，最大重錘衝撃力は 1/2 以下，最大支点反力は 1/1.3 程度，最大変位は 7.2 倍程度である。これより，砕石を用いる場合には敷砂を用いる場合に比較して緩衝性能が劣るものの，いずれの場合においても緩衝材によ

る緩衝効果が十分発揮されていることが分かる。

### 3.2 変位分布

図-6~8 には，緩衝工無し，敷砂，砕石を設置した場合の変位分布をそれぞれ示している。変形倍率は緩衝工無しの場合が 150 倍，敷砂または砕石を設置する場合が 20 倍である。なお，かぶりコンクリートの剥落時にレーザー光を横切る等により変位計測が不能になった箇所は，棄却している。

図-6(a) 図より，緩衝工無しの場合のスパン方向変位分布に着目すると，繰り返し载荷実験では実験ケース N-CL-H1.00 を除くいずれの実験ケースにおいても，変位分布は载荷直後より载荷点直下を最大変位

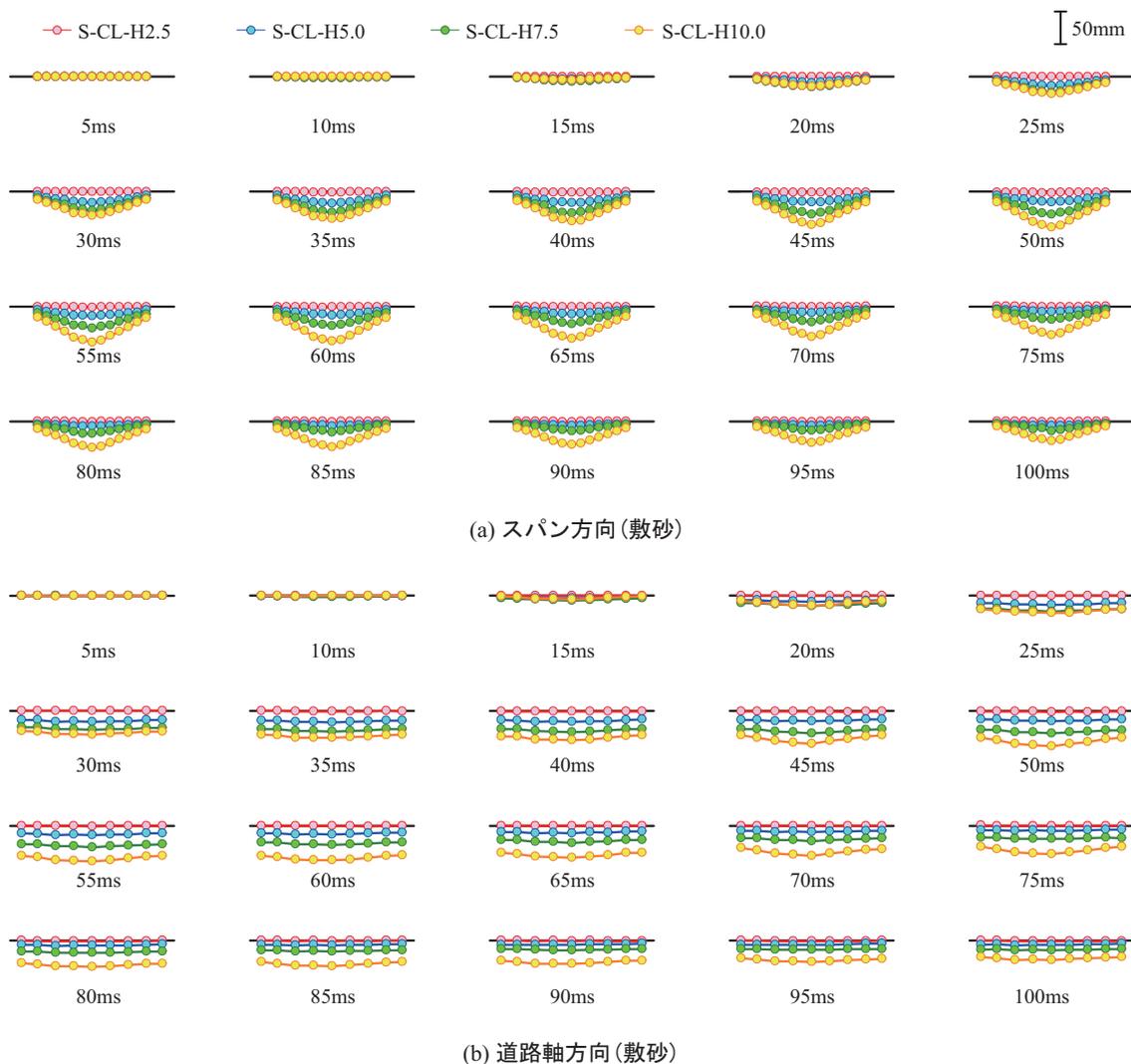


図-7 変位分布 (敷砂, 変形倍率 20 倍)

とする滑らかな放物線状の分布性状を示し、 $t = 12 \sim 16$  ms 程度で最大応答値を示した後、減衰自由振動状態を呈している。最終落下高さである N-CL-H1.00 では、载荷直後より台形状の変位分布を示し、载荷点近傍がほぼ一樣な値で変位しながら  $t = 18$  ms 程度で最大応答値を示した後、減衰自由振動状態へと移行している。これは、後述するひび割れ状況からも明らかのように、押し抜きせん断破壊により RC スラブのコンクリートがコーン状に押し抜かれたためと推察される。

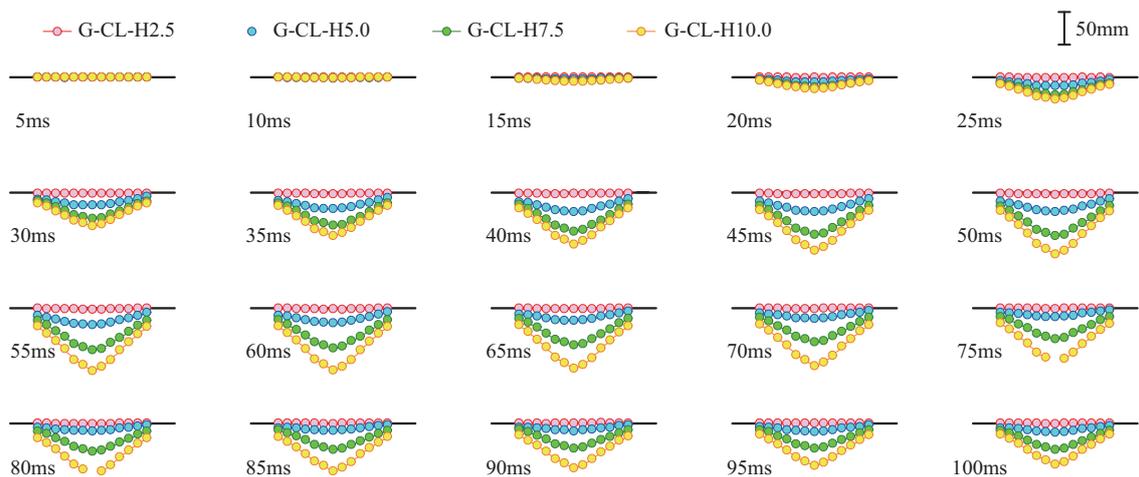
図-6(b) 図には、道路軸方向変位分布を示している。図より、変位分布は、重錘衝突後における载荷点直下の変位が突出した形で増加傾向を示し、時間の経過と共に自由端近傍の変位も対応して増加している。N-CL-H1.00 では、重錘衝突後  $t = 18$  ms 程度で载荷点部の変位が最大値を示すと共に、自由端近傍の変位がほぼ一樣な値で分布している。その後、減衰自由振動状態を呈している。载荷点近傍の変位のみが突出しているのは、図-6(a) 図に示すスパン方向の変位分布

からも明らかのように、スラブの押し抜きせん断破壊による影響であるものと推察される。

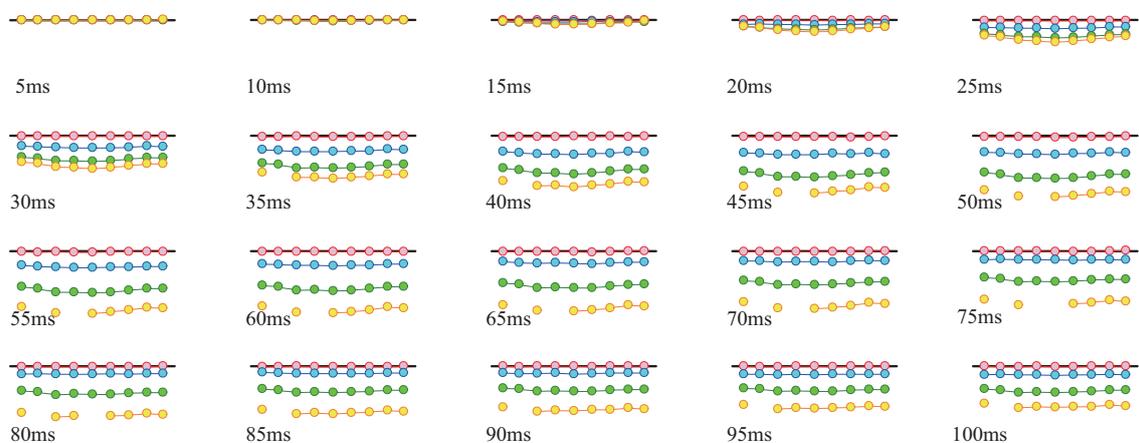
図-7(a) 図より、緩衝工として敷砂を設置した場合のスパン方向変位分布に着目すると、いずれのケースも衝突時点から  $t = 15$  ms 程度まで変位は発生していない。その後、最大応答値となる  $t = 50$  ms 程度まで徐々に変位が増大している。なお、変位分布は最終落下高さである S-CL-H10.0 においても滑らかな放物線状の分布性状を示していることが分かる。

図-7(b) 図に示す道路軸方向の変位分布に着目すると、緩衝工無しの場合とは異なり、軸方向に同程度の変位が分布する性状を示している。これは、後述するひび割れ分布から、支持辺に平行な曲げひび割れが卓越しており、曲げ破壊により終局に至ったためと推察される。

図-8(a) 図より、緩衝工として碎石を設置した場合のスパン方向変位分布に着目すると、敷砂を設置した場合と同様に、 $t = 15$  ms 程度まで変位は発生していない。その後、最大応答値となる  $t = 50$  ms 程度



(a) スパン方向(碎石)



(b) 道路軸方向(碎石)

図-8 変位分布(碎石, 変形倍率 20 倍)

に至るまで変位が増大する傾向を示している。また、G-CL-H7.5 以降において変位の増分が顕著に大きい傾向を示している。これは G-CL-H5.0 の段階で試験体の剛性が低下する程度の損傷があったことを示唆している。また、分布性状はいずれのケースにおいても滑らかな放物線状の分布性状であった。

図-8(b)に示す道路軸方向の変位分布においても敷砂を設置した場合と同様の性状を示しているが、変位量は敷砂を設置する場合の 1.6 ~ 2.0 倍程度の値であった。これより、変形に着目した場合の緩衝効果は、最大変位の場合と同様に、碎石よりも敷砂を用いる場合が優れていることが明らかとなった。

### 3.3 各種応答値と衝突エネルギーの関係

図-9には、最大重錘衝撃力、最大変位、残留変位の各応答値と入力エネルギーとの関係を示している。ここで着目している残留変位は、各载荷実験時における残留変位を示しており、処女载荷時からの累積した

残留変位ではない。

最大重錘衝撃力に着目すると、緩衝工無しの場合においては、入力エネルギーが  $E_k = 5 \sim 15$  kJ までほぼ線形に増加しているものの、 $E_k = 20$  kJ では 15 kJ の場合とほぼ同程度の値を示している。これは繰り返し载荷による RC スラブの剛性低下や曲げ破壊と押し抜きせん断破壊が顕在化したことに起因しているものと推察される。一方、緩衝工として敷砂または碎石を設置した場合には、入力エネルギーの増加に伴って、最大重錘衝撃力が増加していることが分かる。

また、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(以後、単に振動便覧式)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(ラメ定数:  $\lambda = 1,000$  kN/m<sup>2</sup>, 割増係数:  $\alpha = (D/T)^{1/2} = 1.41$ ,  $D$ : 重錘径 100 cm,  $T$ : 敷砂厚 50 cm)と比較すると、敷砂を設置した場合には振動便覧式の結果よりも若干小さく、碎石を設置した場合には若干大きい傾向を示して

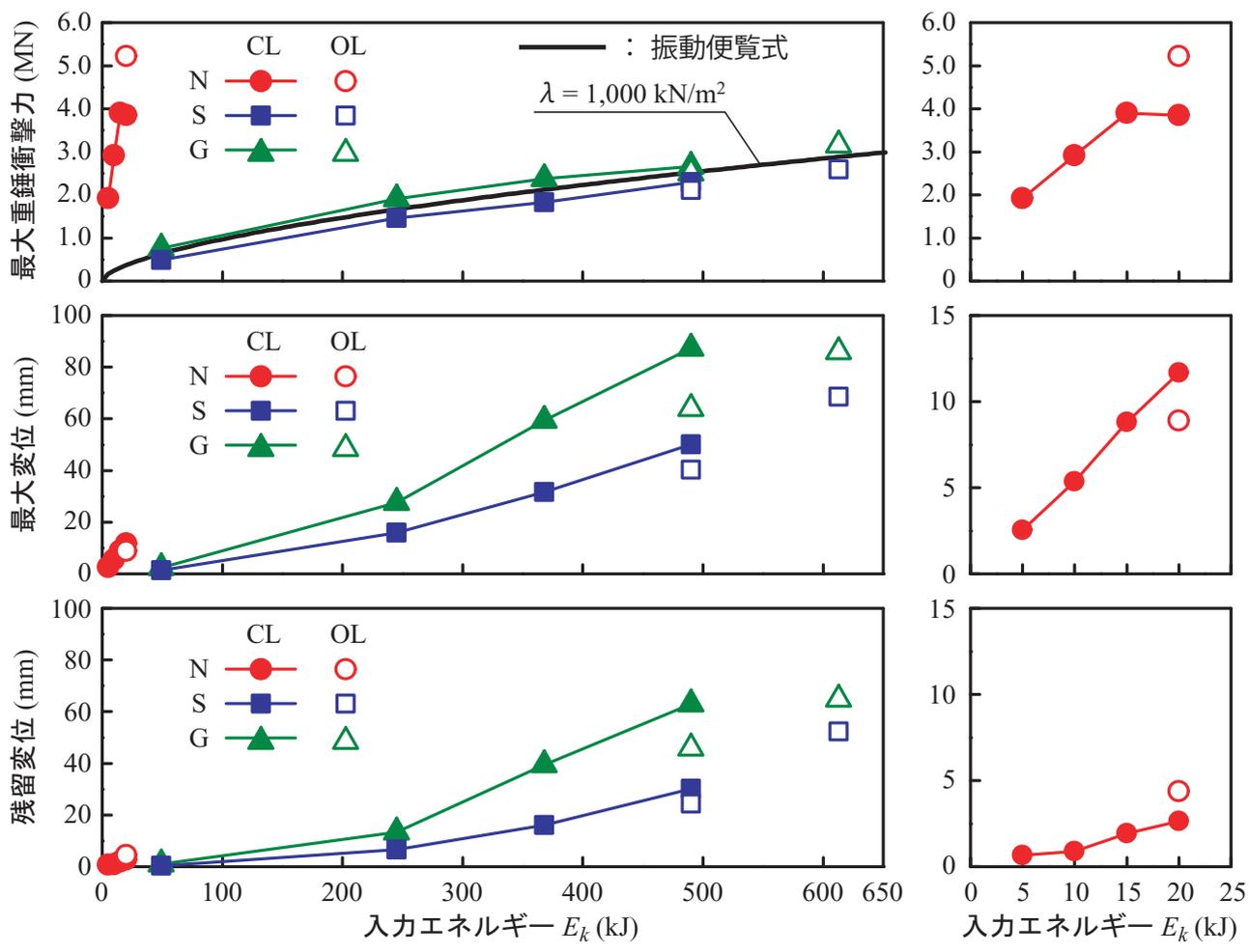


図-9 入力エネルギーと各種応答値の関係

いることが分かる。

剛基礎上で実験結果によれば、ラーメの定数が  $2,000 \text{ kN/m}^2$  以上である振動便覧式に対応することが明らかになっている<sup>8)</sup>。一方で、本実験の場合には、緩衝工にかかわらず、ラーメの定数が  $1,000 \text{ kN/m}^2$  の振動便覧式にほぼ対応していることが分かる。これは、RCスラブに緩衝工を設置する場合には、緩衝工のみならずスラブの振動によっても衝撃力が大きく緩和されることを示唆している。なお、敷砂を設置する場合において正弦波が3波連続することの最大重錘衝撃力への効果は、碎石を設置する場合において振幅の小さい2波が励起している場合と大差がないことより、それほど大きいものではないものと推察される。

以上より、(1) 緩衝工無しの場合における重錘衝撃力は、押し抜きせん断ひび割れ発生前において、入力エネルギーに比例して増加すること、(2) 敷砂を設置した場合の重錘衝撃力は落石径と敷砂厚の影響を考慮し、かつラーメの定数を  $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$  とした振動便覧式を用いることにより評価可能であることが明らかとなった。

最大変位と入力エネルギーの関係より、緩衝工無し

で繰り返し载荷実験の場合における最大変位は、入力エネルギーに対してほぼ線形に増加していることが分かる。一方、単一载荷実験である N-OL-H1.00 (入力エネルギー  $E_k = 20 \text{ kJ}$ ) の最大変位は、繰り返し载荷実験での N-CL-H1.00 に比較して 24% 程度小さな値を示している。敷砂および碎石を用いた場合の繰り返し载荷実験における最大変位は、入力エネルギー  $E_k = 250 \text{ kJ}$  を境にして増加勾配が大きくなり、 $E_k \geq 250 \text{ kJ}$  でほぼ線形に増加していることが分かる。また、最大変位は、単一载荷実験の場合が繰り返し载荷実験の場合よりも若干小さい値を示している。緩衝材の影響に着目すると、前述のとおり最大変位は碎石を設置した場合が敷砂を設置した場合よりも大きくなる傾向を示している。

残留変位と入力エネルギーの関係より、緩衝工無しの場合に着目すると、繰り返し载荷実験における残留変位は、入力エネルギー  $E_k = 10 \text{ kJ}$  を境に残留変位の入力エネルギーに対する増加割合が増加していることが分かる。これは、繰り返し载荷によって損傷が累積したことによるものと推察される。

単一载荷実験である N-OL-H1.00 の残留変位は、繰

り返し載荷実験の N-CL-H1.00 に対して約 25%増加しており、最大変位とは逆の傾向を示している。これは、以下のような理由によるものと推察される。すなわち、1) 繰り返し載荷の場合には処女載荷時から変位が残留していることより、載荷点近傍部の鉄筋は既に降伏している、2) 従って、処女載荷以降の載荷時には、既に降伏した鉄筋はひずみ硬化によって、見かけ上降伏点強度が向上したように挙動する。3) 一方で、単一載荷の場合 (N-OL-H1.00) は、処女載荷であることより鉄筋のひずみ硬化が期待できない。4) これより、単一載荷時 (N-OL-H1.00) の載荷点近傍部における鉄筋の降伏点強度は、繰り返し載荷時の N-CL-H1.00 の場合より小さく評価される。5) このことより、結果として単一載荷時の残留変位が繰り返し載荷時のそれよりも大きくなったものと推察される。

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  $E_k = 250 \text{ kJ}$  を境に増加割合が大きくなっており、 $E_k \geq 250 \text{ kJ}$  では、ほぼ線形に増加していることが分かる。また、単一載荷時の結果は、繰り返し載荷時よりも若干小さい値を示している。これは、繰り返し載荷時には緩衝工無しの場合と同様に鉄筋のひずみ硬化が期待できるものの、緩衝工無しの場合に比較して変形量が多いことや繰り返し載荷によるコンクリートの損傷が大きいこと等により、単一載荷時よりも大きな残留変位が発生したものと推察される。緩衝工の違いによる残留変位量を比較すると、碎石を用いる場合が敷砂を用いる場合に比較して大きく、前者の緩衝性能が後者より劣ることを暗示している。

### 3.4 ひび割れ発生状況

図-10 には、繰り返し載荷実験終了後におけるひび割れ状況を示している。緩衝工無しの場合においては、N-CL-H0.50 において載荷点直下を中心とした放射状の曲げひび割れと、支持辺と平行な曲げひび割れが中央部に発生している。入力エネルギーを増加させた N-CL-H0.75 および N-CL-H1.00 では、放射状の斜めひび割れが延伸し、支持辺と平行な曲げひび割れが多数発生すると共に押し抜きせん断破壊に起因する円形状のひび割れが顕在化している。

緩衝工として敷砂および碎石を設置した場合においては、落下高さ  $H = 1.0 \text{ m}$  において、ひび割れは発生していない。落下高さ  $H = 5.0 \text{ m}$  である S-CL-H5.0 において、支持辺と平行な曲げひび割れが発生している。その後、落下高さが増加する毎に曲げひび割れも増加している。また、緩衝工として碎石を設置した場合には、スパン中央部の曲げひび割れが敷砂の場合に比較して多く発生している。なお、円形状のひび割れは発生していない。ただし、 $H = 10.0 \text{ m}$  においては、いずれの緩衝工を設置した場合においても、中央部に円形

状のひび割れが確認でき、曲げ破壊と共に押し抜きせん断破壊が連成して生じていることが推察される。

図-11 には、単一載荷実験終了後におけるひび割れ状況を示している。緩衝工無しである N-OL-H1.00 の場合には、載荷点から放射状に伸びる版としての曲げひび割れと、支持辺に平行な一方方向曲げとしてのひび割れ、および載荷点部を中心とする円形状の押し抜きせん断破壊の傾向を示すひび割れが混在して分布している。同一の入力エネルギーである N-CL-H1.00 に比較してひび割れの数は少ない。これは、載荷履歴の有無および合計の入力エネルギー差によるものと推察される。

緩衝工として敷砂を設置した S-OL-H10.0 においては、載荷点からの放射状の曲げひび割れおよび支持辺に平行なひび割れが発生している。落下高さを増加させた S-OL-H12.5 では、載荷点近傍において格子状のひび割れが確認できる。また、緩衝工として碎石を設置した場合には、敷砂を設置した場合よりも中央部におけるひび割れ密度が高く、作用衝撃力が載荷点近傍に集中する傾向にあることが類推される。これはまた、敷砂を設置した場合がより荷重分散効果が大きいことを示唆している。

以上より、単一載荷と繰り返し載荷の載荷方法にかかわらず、緩衝工を設置することにより、2 辺支持 RC スラブは押し抜きせん断破壊型から曲げ破壊型へ移行する傾向にあることが明らかとなった。

### 3.5 緩衝材への重錘貫入量

図-12 には、緩衝工として敷砂および碎石を設置した場合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、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。それぞれ敷砂と碎石を設置した場合における重錘貫入量を比較すると、繰り返し載荷実験、単一載荷実験共に、敷砂を設置する場合が碎石を設置する場合よりも大きいことが分かる。これは、碎石の場合には粒径が大きく形状が鋭角であることより、骨材のかみ合わせによって密実になる傾向があり貫入量が小さいのに対して、敷砂の場合には細粒であることにより含有している水分や空隙も多いことより締め固まり度も大きく、結果として貫入量も大きくなるものと推察される。また、入力エネルギーの増加に伴い、敷砂と碎石の貫入量の差が小さく示される傾向にある。これは、碎石の場合には大きな衝撃力により粉碎されることにより締め固まり度も大きくなることによるものと推察される。

$E_k = 490 \text{ kJ}$  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、繰り返し載

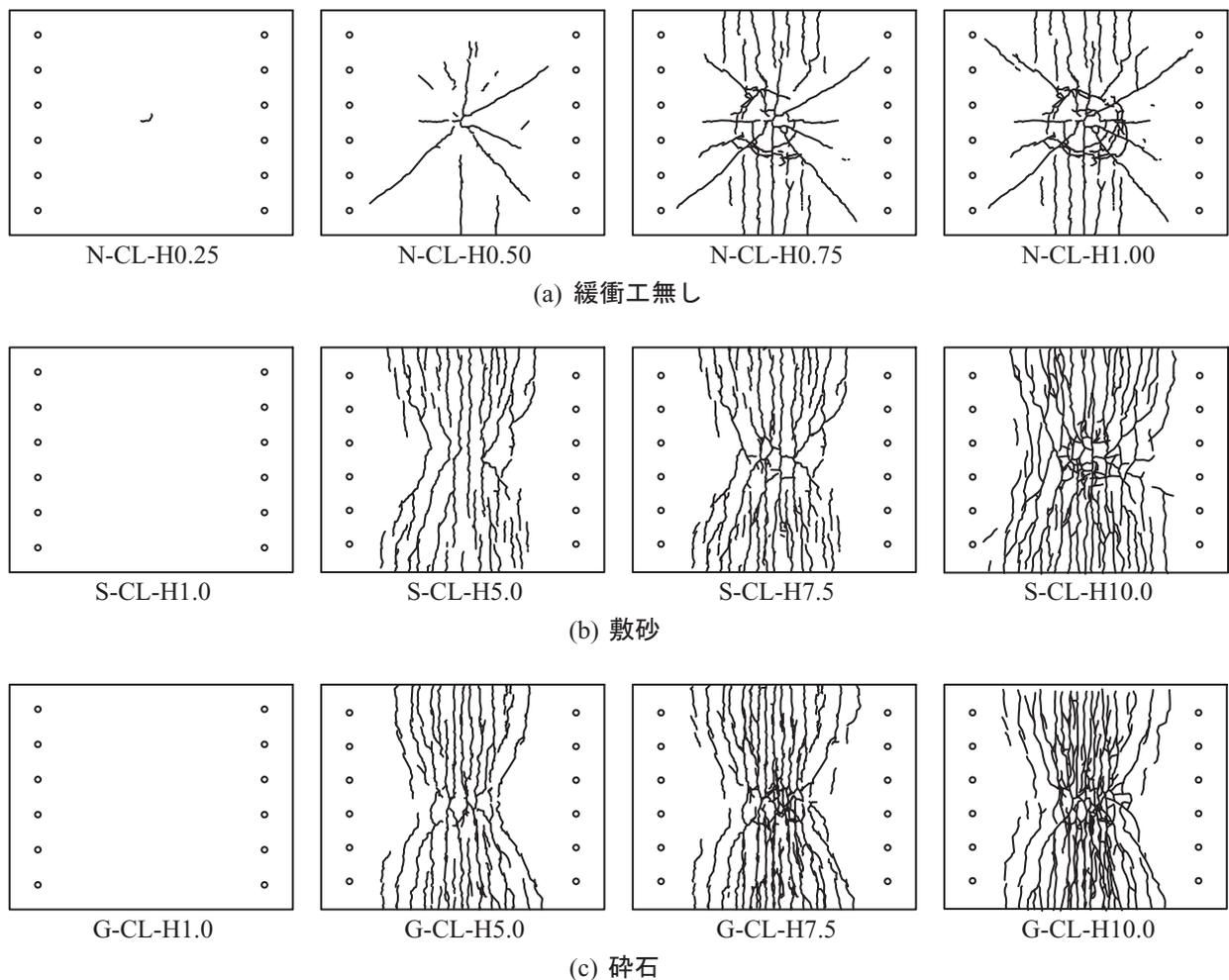


図-10 ひび割れ分布図(繰り返し载荷)

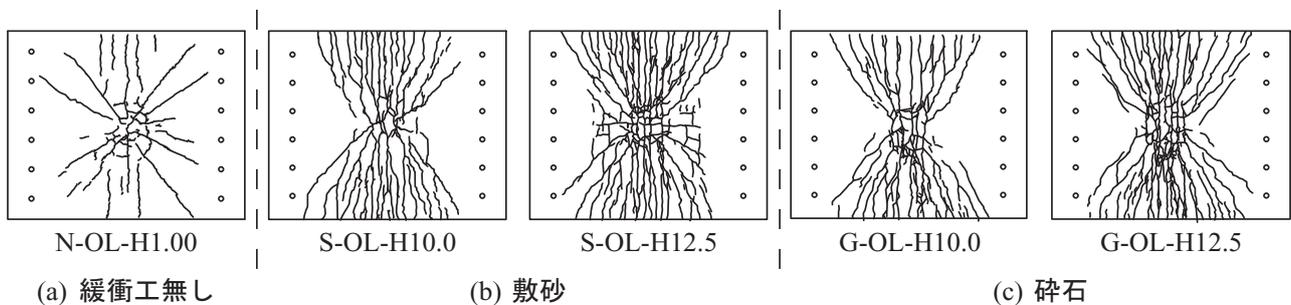


図-11 ひび割れ分布図(単一载荷)

荷時に比較してRCスラブの剛性低下が小さいことにより発生する衝撃力も大きくなるため、その衝撃力に対応して貫入量も大きくなるものと推察される。

#### 4. まとめ

本研究では、RC製ロックシェッドの頂版部に着目し、緩衝材を敷設しない場合および緩衝材としてそれぞれ敷砂、砕石を設置した場合における2辺支持大型RCスラブの耐衝撃挙動を把握することを目的に、重錘落下衝撃実験を実施し、RCスラブの終局までの耐

衝撃挙動について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 緩衝工を設置することにより、破壊モードが押し抜きせん断破壊型から曲げ破壊型へ移行する。
- (2) 緩衝工として砕石よりも敷砂を設置した場合が、頂版に対する変形抑制効果が大きい。
- (3) 緩衝工として砕石を用いる場合が、敷砂を用いる場合よりもひび割れ密度が高く、载荷点近傍における格子状のひび割れが顕著であることより、砕石を用いる場合には作用衝撃力が载荷点近傍に集中する傾向があると考えられる。これは、敷砂が

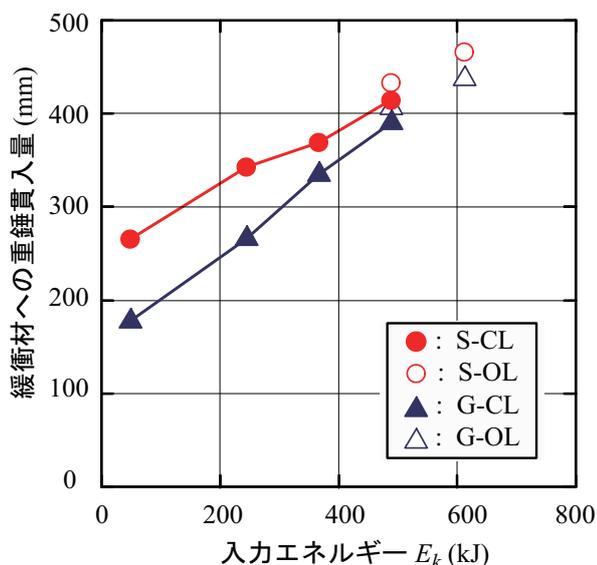


図-12 重錘貫入量と入力エネルギーの関係

碎石よりも荷重分散効果が大きいことを示唆している。

- (4) 同一入力エネルギーにおける緩衝材への重錘貫入量は、碎石よりも敷砂のほうが大きく示されるものの、入力エネルギーの増加に伴い、貫入量の差は小さくなる。
- (5) 緩衝工を設置しない場合における重錘衝撃力は、押し抜きせん断ひび割れ発生前までは、入力エネルギーに比例して増加する。
- (6) 敷砂を設置した場合の重錘衝撃力は、落石径と敷砂厚の影響を考慮し、ラーメ定数を  $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$  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評価可能である。

**謝辞：**本研究を行うにあたり、室蘭工業大学大学院工学研究科博士前期課程建築社会基盤系専攻構造力学研究室の花岡健治君ならびに又坂文章君には、多大なる

ご支援を戴いた。ここに記して謝意を表する。

#### 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) 今野久志, 岸 徳光, 栗橋祐介, 山口 悟, 西 弘明: 敷砂緩衝材を設置しない RC 製ロックシェッド模型の耐衝撃挙動に関する重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 1101-1112, 2010.3.
- 7) 山口 悟, 岸 徳光, 今野久志, 西 弘明: 敷砂緩衝材を有する RC 製ロックシェッド模型に関する衝撃載荷実験, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 1149-1159, 2010.3.
- 8) 土木学会: 構造工学シリーズ 8 ロックシェッドの耐衝撃設計, 1998.

(2010年9月16日受付)