

論文 2 辺支持大型 RC スラブの重錘落下衝撃実験

今野 久志^{*1}・岸 徳光^{*2}・山口 悟^{*3}・西 弘明^{*4}

要旨: 本研究では、RC 製ロックシェッドの頂版部に着目し、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。その結果、1) 入力エネルギーの増加に対応して最大重錘衝撃力や最大変位はほぼ線形に増加すること、2) 残留変位は、入力エネルギーの増加に対応して大きくなるが、RC スラブの剛性低下に伴い入力エネルギーの増加に対する残留変位の増加割合は大きくなること、3) 最終的な破壊モードは曲げ破壊と押し抜きせん断破壊の複合したモードになること、等が明らかになった。

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、押し抜きせん断破壊

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線における道路網には落石災害を防止するための落石覆道（以後、ロックシェッド）が数多く建設されている。これらの設計は、現在のところ許容応力度法の下に行われている。近年、様々な構造物の設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法へ移行してきていることから、ロックシェッド等の耐衝撃設計においても各性能に対する断面設計を可能とする性能照査型耐衝撃設計法の確立が望まれている。このような背景から、著者らはロックシェッドの動的耐衝撃挙動を考慮したより合理的な設計法を確立するために、これまで部材レベルでの衝撃実験^{1)~4)}や、全体系小型模型レベルでの衝撃実験⁵⁾および数値解析の検討を実施してきた。しかしながら、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。そこで、筆者らは、実ロックシェッドの 2/5 縮尺模型試験体を製作し、重錘落下衝撃実験により終局に至るまでの耐衝撃挙動に関するデータを取得した。実験は、緩衝材の影響を受けない状態でのロックシェッドの耐衝撃挙動の把握および現行設計法を考慮して敷砂緩衝材を設置した状態での耐衝撃挙動把握を目的に 2 体の縮尺模型に対して行った。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、頂版部に集中的に発生することが明らかとなった。

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、緩衝材の影響を受けない状態での 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、著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 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 125 mm 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

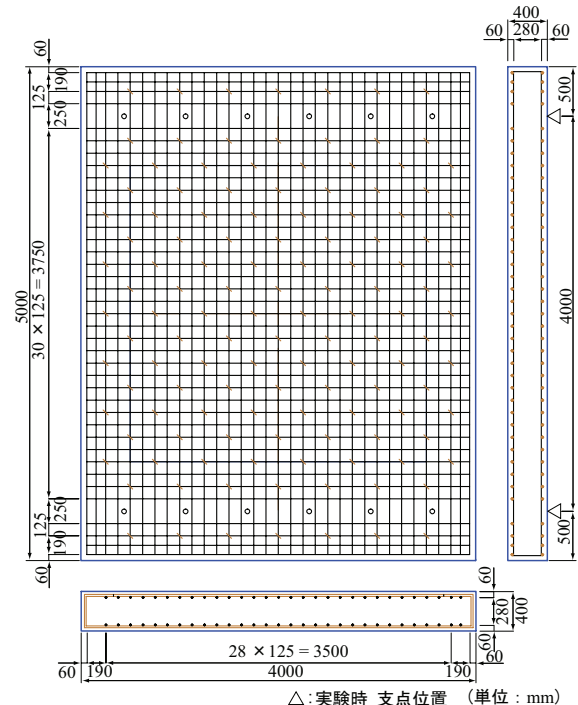


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

*1 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工) (正会員)
 *2 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 教授 工博 (正会員)
 *3 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 (正会員)
 *4 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 上席研究員 博(工) (正会員)

表-1 実験ケース

実験ケース	緩衝工	重錘質量 M(kg)	荷重方法	落下高さ H(m)	入力エネルギー E _k (kJ)
N-II-H0.25	無	2,000	繰り返し	0.25	5
N-II-H0.50				0.50	10
N-II-H0.75				0.75	15
N-II-H1.00				1.00	20
N-IS-H1.00			単一	1.00	20



写真-1 実験状況 (N-IS-H1.00)

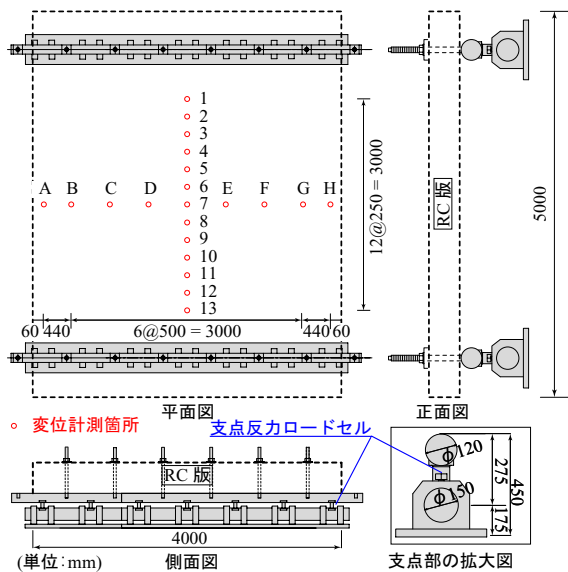


図-2 支点治具および変位計測位置

ている。鉄筋の材質は全てSD345である。力学的特性値はD19の降伏強度、引張強度がそれぞれが393 MPa、580 MPaであり、D13の場合には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。コンクリートの設計基準強度は24 N/mm²であり、実験時圧縮強度は34.2 N/mm²であった。

2.2 衝撃実験概要

写真-1には、衝撃荷重実験状況を示している。実験は、質量2,000 kgの鋼製重錘をトラッククレーンを用いて所定の高さまで吊り上げ、着脱装置によりスラブ中央部に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1.0 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。また、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所定の質量に調整している。なお、試験体は図-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いる。重錘衝突時のスラブ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を用いて固定している。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ことより、ピン支持に近い状態となっている。

表-1には、実験ケースの一覧を示している。実験は、繰り返し荷重実験1体、単一荷重実験1体の合計2体に対して実施している。繰り返し荷重実験では落下高さ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するような状況に至るまで実施している。単一荷重実験については、繰り返し荷重実験の最終落下高さである1 mで実施した。実験ケース名は、第1文字目に緩衝材を使用していないことを示すN、第2文字目には荷重方法（II：繰り返し荷重実験、IS：単一荷重実験）、第3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500 G、応答周波数DC～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) 非接触型レーザー式変位計（応答周波数約1 kHz）による試験体変位である。なお、レーザー式変位計は、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、いずれも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 各種応答波形

図-3には、全実験ケースに関する重錘衝撃力波形、支点反力（図-2に示す全てのロードセルの応答値を時間軸を統一して加算したもの。以後、単に支点反力）波形および荷重点変位波形をそれぞれのピーク値とともに示

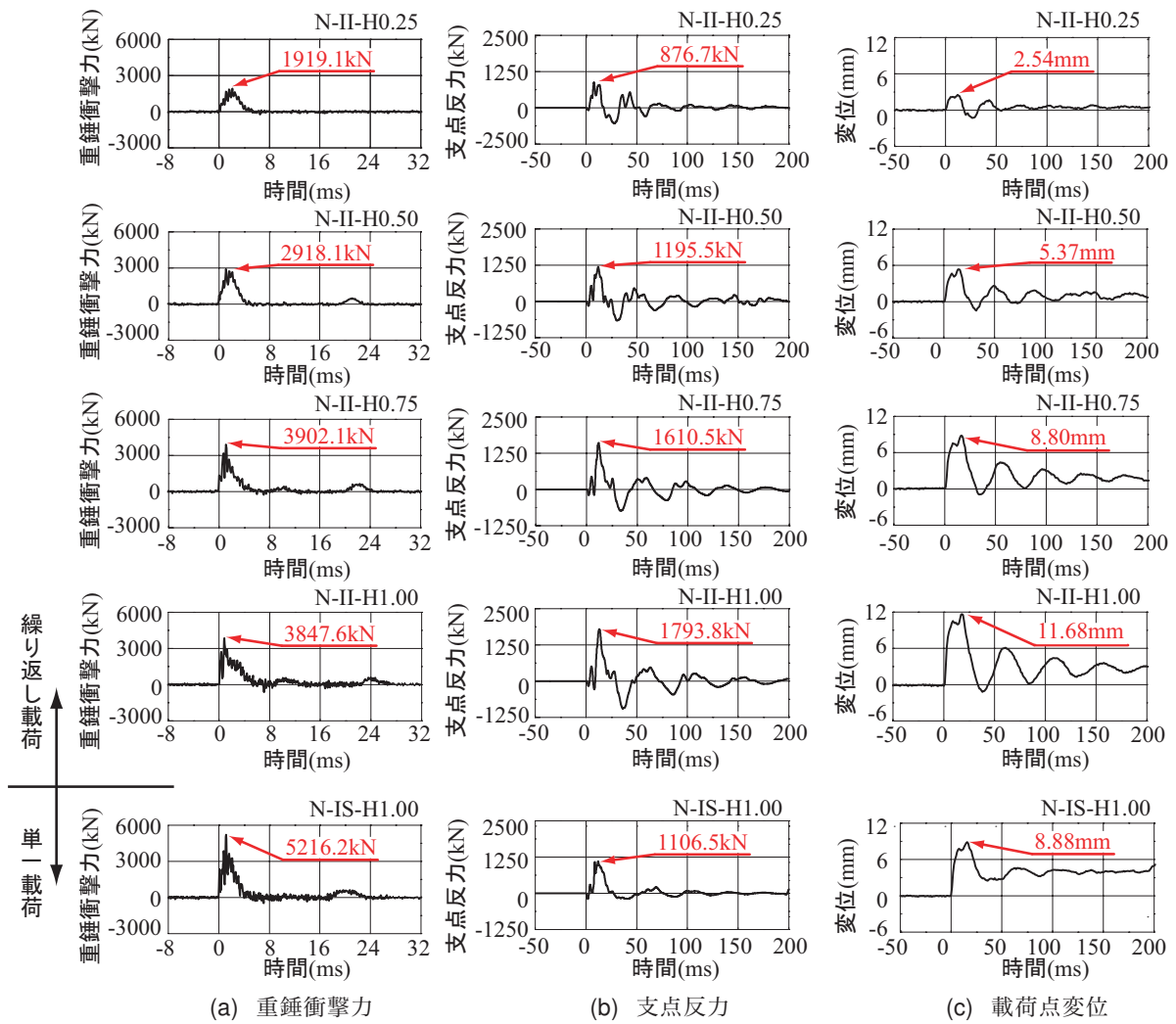


図-3 各種応答波形

している。また、各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、支点反力波形に関しては、ノイズを含んだ高周波成分を除去するために波形収録後に0.5 ms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、繰り返し载荷実験であるN-II-H0.25～N-II-H1.00の重錘衝撃力波形は、落下高さが低いN-II-H0.25の場合にはピーク近傍が比較的滑らかな正弦半波状の波形性状を示しているが、落下高さの増加と共に波形の立ち上がり勾配が大きくなると共にピーク値近傍が鋭い三角形の波形性状を示している。波形の継続時間はN-II-H0.25の場合で約5 msであり、落下高さの増加と共に若干増加の傾向が示されている。次に、落下高さが同一で载荷方法の異なるN-II-H1.00とN-IS-H1.00の波形を比較すると、波形の立ち上がりからピークに至るまでの性状はほぼ同様であるものの、N-II-H1.00の場合にはN-IS-H1.00よりもピーク値が小さく波形の継続時間も長くなっている。これは、それ以前の繰り返し载荷により試験体にひび割れが多数発生し、剛性が低下していたためと推察される。

(b) 図より、支点反力波形についてみると、繰り返し载荷実験であるN-II-H0.25～N-II-H1.00では、いずれも重錘衝撃力波形より若干遅れて励起しており、正弦半波状の波形に高周波成分が合成されたような波形性状を示している。落下高さの増加と共に支点反力の最大値が増加し、かつ最大値発生までの時間が遅くなる傾向が示されている。最大値発生以降は、減衰自由振動に対応した支点反力波形が励起している。次に、N-II-H1.00とN-IS-H1.00を比較すると、波形の立ち上がりは両者共にほぼ同様であるものの、単一载荷実験であるN-IS-H1.00のピーク値がN-II-H1.00それよりも小さくなっていることが分かる。

(c) 図より、载荷点変位波形についてみると、繰り返し载荷実験ではいずれも重錘衝突によって励起する第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。また、緩衝材を設置していない実験であることから、各波形は重錘衝突時刻との時間遅れがなく励起している。最大変位および残留変位は、落下高さの増加に対応して増加する傾向を示しており、共に除荷後の振動周期も延びる傾向を示している。次に、N-II-H1.00と

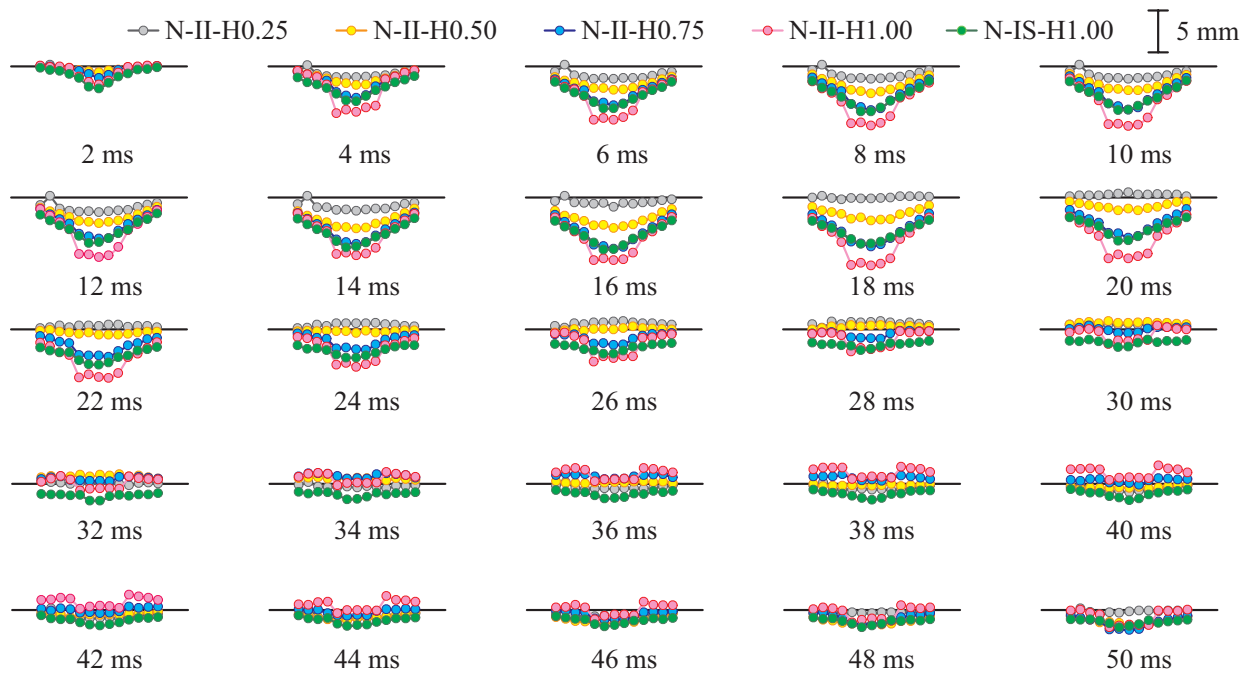


図-4 スパン方向変位分布

N-IS-H1.00を比較すると、波形性状は両者ほぼ同様であるものの、最大値は繰り返し载荷の場合が大きくなっている。これは繰り返し载荷によって損傷が蓄積され剛性が低下しているためと推察される。一方、残留変位は単一载荷の場合が繰り返し载荷の場合よりも大きい。これは、以下のような挙動を示すことによるものと推察される。繰り返し载荷の場合には载荷履歴の影響により既に曲げひび割れや押し抜きせん断破壊の傾向を示し(後述の図-7参照)、1.0m落下時には、コンクリートのひび割れを伴う塑性変形よりも鉄筋の剛性に依存した弾塑性挙動が卓越する。これに対して、単一载荷の場合にはコンクリートのひび割れを伴う塑性変形によって曲げや押し抜きせん断破壊面が形成され、かつ鉄筋の剛性に依存した弾塑性挙動も示すため、より残留変位も大きくなるものと推察される。

なお、いずれの変位波形においても第1主波動が2つのピークよりなっているが、2つ目のピーク発生時刻が重錘衝撃力の第2波目と近似していることから、重錘衝突により鉛直下方に変位したRCスラブが最大変位を発生し、その後復元しようとした際に再度重錘が衝突しスラブが鉛直下方に押し戻されるためと推察される。

3.2 変位分布

図-4には、各実験ケースのスパン方向における変位分布を2ms間隔の時系列で示している。なお、変形倍率はいずれも150倍である。

図より、繰り返し载荷実験では実験ケースN-II-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とする滑らかな放物線状

の分布性状を示し、12~16ms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。最大応答値の発生時刻は落下高さが増加するほど遅くなる傾向が示されている。繰り返し载荷実験の最終実験ケースN-II-H1.00では、载荷直後より台形状の変位分布を示し、载荷点近傍の変位がほぼ同程度の値を示しながら18ms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。

単一载荷実験ケースのN-IS-H1.00では、同一落下高さの実験ケースN-II-H1.00に比較してRCスラブの損傷程度が小さく、押し抜きせん断破壊性状も顕著に現れていないことから、载荷点直下を最大変位とする滑らかな放物線状の分布性状を示している。最大応答値発生時まではN-II-H0.75とほぼ同様の時系列分布を示しているものの、その後は大きな残留変位を示しながら減衰自由振動状態に移行している。

図-5には、スパン直角方向の変位分布を2ms間隔の時系列で示している。なお、変形倍率はいずれも150倍である。また、実験ケースN-II-H0.25およびN-II-H0.50の一部データに不具合が見つかったため、分布図より削除している。

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-II-H1.00では、重錘衝突後18ms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般的な値を示し

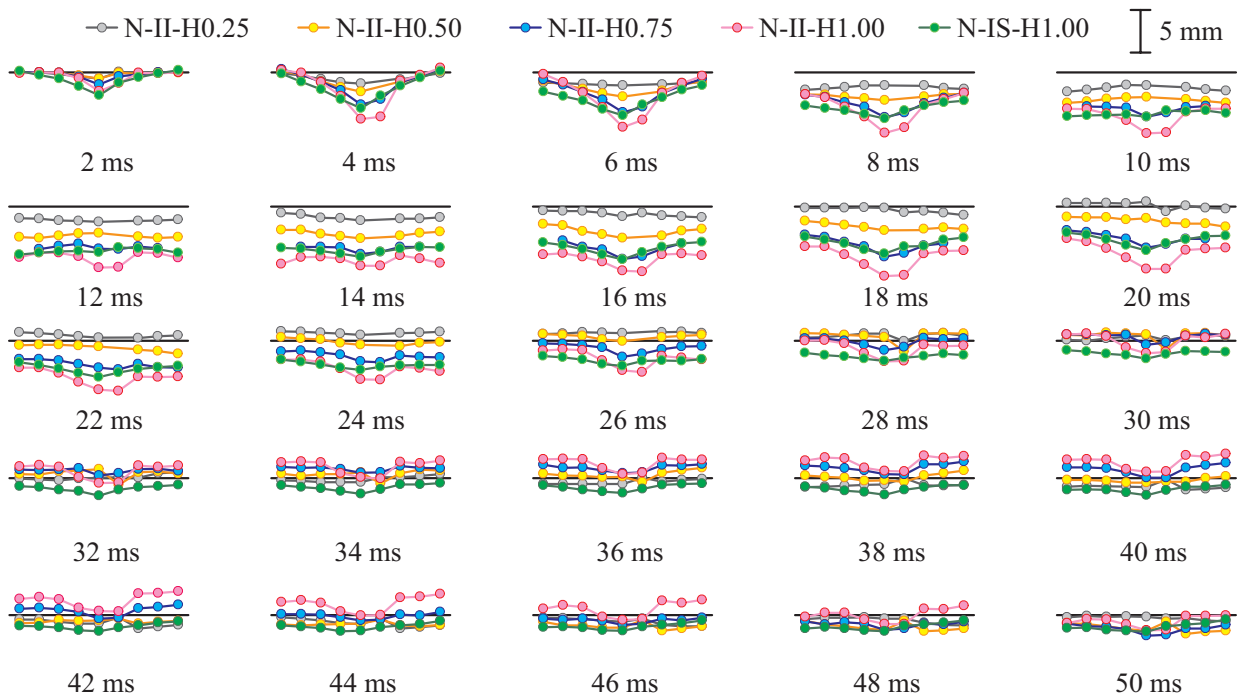


図-5 スパン直角方向変位分布

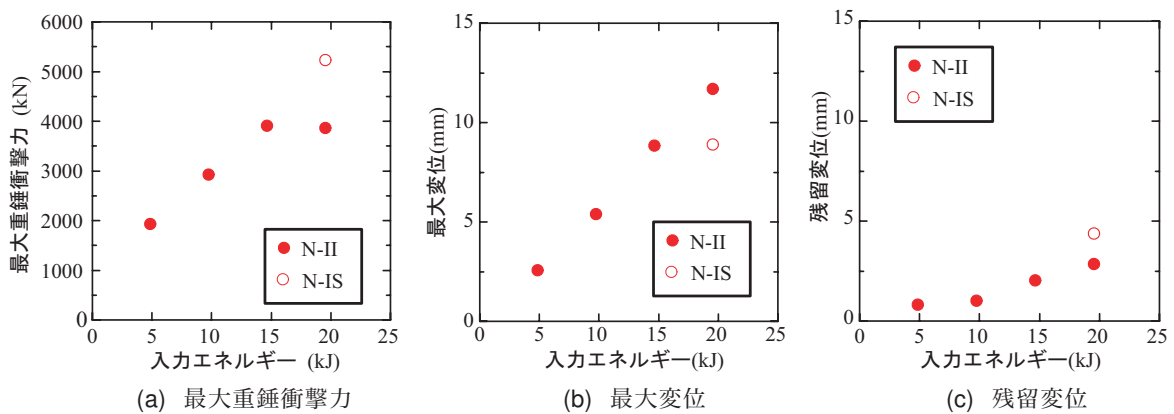


図-6 各種応答値と入力エネルギーの関係

ている。その後、減衰自由振動状態を呈している。荷重点近傍の変位が突出し対称な分布性状を示していないのは、図-4に示すスパン方向の変位分布からも明らかのように、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。

3.3 各種応答値と入力エネルギーの関係

図-6には、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。なお、繰り返し荷重実験における最大変位及び残留変位は、各実験ケースにおいて計測された応答値を示している。

(a) 図には、全実験ケースの最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係を示している。繰り返し荷重実験における最大重錘衝撃力は、入力エネルギーが $E_k = 5$ kJ である N-II-H0.25 から $E_k = 15$ kJ の N-II-H0.75 までほぼ線形に増加しているものの、 $E_k = 20$ kJ の N-II-H1.00 では N-II-H0.75

における最大重錘衝撃力とほぼ同程度の値を示している。これは、繰り返し荷重による RC スラブの剛性低下や曲げ破壊および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、単一荷重実験である N-IS-H1.00 の最大重錘衝撃力は、N-II-H0.25 から N-II-H0.75 までの最大重錘衝撃力の増加傾向とほぼ線形的な関係を示していることから、試験体の衝突時の剛性低下が小さければ最大重錘衝撃力は衝突速度に比例して増加するものと考えられる。

(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。繰り返し荷重実験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わかる。一方、単一荷重実験である N-IS-H1.00 の最大変位は、試験体に繰り返し荷重による損傷の累積がないことから、繰り返し荷重実験の N-II-H1.00 に比較して 24% 程度小

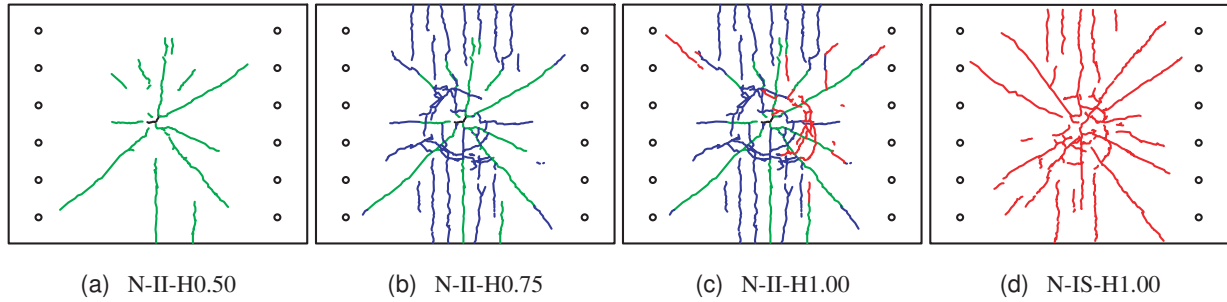


図-7 RCスラブ下面のひび割れ状況

さな値を示している。

(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。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。単一载荷実験である N-IS-H1.00 の残留変位は、繰り返し载荷実験の N-II-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。この原因は、前述の通りである。ただし、累積残留変位に関しては、繰り返し载荷時の場合が単一载荷時よりも大きい。

3.4 ひび割れ発生状況

図-7には、各実験終了後のスラブ下面のひび割れ状況を示している。なお、N-II-H0.25 の場合には、载荷点直下のスラブ下面に微細なひび割れが若干発生しているが、紙面の都合より割愛した。

繰り返し载荷実験では、N-II-H0.50 において载荷点直下を中心に放射状に曲げひび割れと、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-II-H0.75 および N-II-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。単一载荷実験である N-IS-H1.00 の場合には、曲げと押し抜きせん断破壊の傾向を示すひび割れ分布を示しているが、同一の入力エネルギーである N-II-H1.00 に比較してひび割れの数は少なく、N-II-H0.50 と N-II-H0.75 の中間的なひび割れ状況を示している。これは、载荷履歴の有無による差であると推察される。

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を確立するための基礎的研究として、ロックシェッドの頂版部に着目し、緩衝材の影響を受けない状態でのRCスラブに関して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、2辺支持大型RCスラブの重錘落下衝撃実験を

実施した。本研究の結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 入力エネルギーの増加に対応して最大重錘衝撃力はほぼ線形に増加するが、曲げ破壊および押し抜きせん断破壊モードが顕在化することにより最大重錘衝撃力は増加しなくなる。
- 2) 最大変位は、入力エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加する。
- 3) 残留変位は、入力エネルギーの増加に対応して増加するが、剛性低下に伴い入力エネルギーの増加に対する増加割合は大きくなる。
- 4) 2辺支持大型RCスラブの最終的な破壊モードは、曲げ破壊および押し抜きせん断破壊の複合したモードとなる。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩: 衝撃荷重载荷時に曲げ破壊が卓越する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.53A, pp.1251-1260, 2007.3
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 矩形RC版の衝撃耐荷挙動に及ぼす重錘直径の影響, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.1034-1043, 2008.3
- 5) 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