

論文 敷砂緩衝材を設置した二辺支持 RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験

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

要旨: 本研究では、敷砂緩衝材が設置されたロックシェッドの性能照査型設計法を確立するための基礎的な検討として、数値解析に資するためのデータ収集を目的に、敷砂緩衝材を設置した二辺支持 RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を実施した。その結果、1) いずれの載荷方法の場合においても曲げひび割れが卓越して発生するが、最終的な破壊モードは押抜きせん断破壊であること、2) 最大支点反力を動的耐力と仮定すれば、ラーメ定数を適切に設定し、振動便覧式を用いることで終局落石条件を算定できる可能性があること、3) 押抜きせん断破壊時の RC 版の吸収エネルギーは入力エネルギーの 30 % 程度であること、等が明らかになった。

キーワード: ロックシェッド, 性能照査型設計法, 二辺支持, RC 版, 衝撃荷重載荷

1. はじめに

近年、各種構造物の設計法は許容応力度設計法から性能照査型設計法に移行してきている。現在、許容応力度法で設計が行われているロックシェッド等の落石防護構造物に対しても、より合理的な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。筆者らも上記設計法確立のための取り組みとして、鉄筋コンクリート (RC) 梁, RC 版, ロックシェッド模型等を用いた衝撃荷重載荷実験を実施し、終局に至るまでの耐衝撃挙動の把握を行ってきた¹⁾。また、これらの実験結果を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、終局に至るまでの耐衝撃挙動を適切に評価可能な数値解析手法の開発に関する検討を行っている。その結果、直接衝撃荷重が作用する場合の RC 構造物の耐衝撃挙動は、単一あるいは繰返し等の載荷条件にかかわらず精度よく評価が可能になっている²⁾。

一方、敷砂等の緩衝材を介して衝撃力が作用する場合については、未だ十分な精度で評価可能な状況に至っていない。数値解析の精度向上のためには、敷砂緩衝材の材料構成則モデル構築に関する詳細な検討が必要であるものと判断される。このことから、筆者らは敷砂緩衝材の数値解析用材料構成則モデル構築のための基礎資料の収集を目的と

して、伝達衝撃応力計測用ロードセルを設置した剛基礎上において、敷砂緩衝材の締め固め度や敷砂厚、重錘質量等をパラメータとした重錘落下衝撃実験を実施している³⁾。今後、これらの実験結果を基に、材料構成則モデル構築のための詳細な検討を実施する予定であるが、材料構成則モデルの最終的な妥当性を数値解析的に検証するためには、敷砂緩衝材を設置した状況下での部材実験データが必要不可欠である。

このような背景より、本研究では、敷砂緩衝材を設置した場合における矩形 RC 版を対象に、数値解析に資するための基礎的な耐衝撃挙動データの収集を目的に、二辺支持 RC 版に関する静的および衝撃荷重載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1には、試験体の一覧を示している。試験体数は、載荷方法を3種類に変化させた全5体である。表中の試験体名は、第一項目に支持条件 (S2: 二辺支持) を示し、第二項目は載荷方法 (S: 静載荷, IC: 繰返し衝撃荷重載荷, IS: 単一衝撃荷重載荷) を示している。本研究において、繰返し衝撃荷重載荷実験は、500 kg 重錘を用いて初回の重錘衝突速度を 1 m/s、その後の増分速度を 1 m/s として RC 版が終局に至るまで載荷を行った。本実験では、押抜きせん断破壊により RC 版裏面のかぶりコンクリートの剥落が顕在化する状態を終局と定義した。このことによる最終の衝突速度は 9 m/s であった。単一衝撃荷重載荷実験においては、繰返し衝撃荷重載荷実験時の最終衝突速度 $V = 9\text{ m/s}$ で実施したところ、押抜きせん断破壊が生じたため、衝突速度 $V = 8\text{ m/s}$ および 8.5 m/s の単一載荷実験を実施することとした。

図-1には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた RC 版は、 $2,000 \times 2,000 \times 150\text{ mm}$ の単

表-1 試験体一覧

試験体名	載荷方法	重錘質量 m (kg)	衝突速度 V (m/s)	入力エネルギー E (kJ)
S2-S	静的	-	-	-
S2-IC	繰返し	500	1~9	0.25 ~ 20.3
S2-IS8.0	単一		8.0	16.0
S2-IS8.5			8.5	18.1
S2-IS9.0			9.0	20.3

*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 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 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)

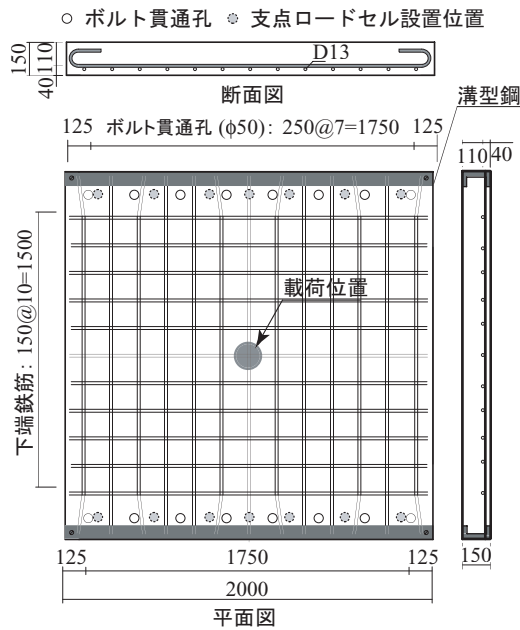


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

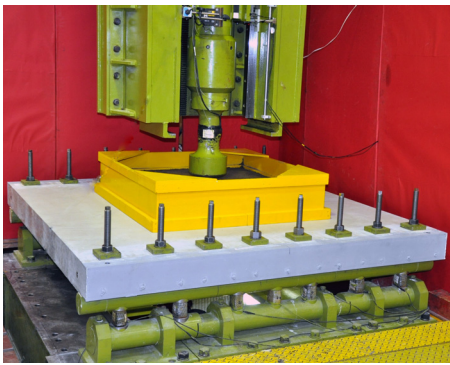


写真-1 実験状況

鉄筋矩形RC版である。鉄筋はD13を用い、版中央部より150 mm間隔で格子状に配置している。鉄筋の定着方法はRC版の両支点側の一对辺に溝型鋼を配置して鉄筋を溶接固定し、他対辺は鉄筋を折り曲げて圧縮側に定着を図っている。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は27.2 MPaであり、鉄筋の降伏強度は381 MPaであった。

2.2 実験方法

写真-1には、衝撃荷重実験の状況を示している。支点部では、RC版の浮き上がりを貫通ボルトとナットを用いて拘束している。スパン長は1.75 mであり、支持部は回転を許容するピン支持に近い境界条件となっている。

衝撃荷重実験は、RC版上に1,000×1,000 mm、高さ250 mmの木枠を設置し、この内部に敷砂緩衝材を設置して行った。敷砂緩衝材は、足踏みにより厚さ125 mmに成形しており、繰返し荷重実験では、実験ケース毎に敷砂緩衝材を再成形している。敷砂緩衝材成形後には、直径75 mmの鋼製円筒を貫入させてサンプリングを行い、湿潤密度、含水比を計測している。実験時の湿潤密度、含水比は、静

表-2 緩衝材砂の物性値

産地	種類	粗粒率	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)
知律狩	細目砂	1.32	2.56	3.27	1.09

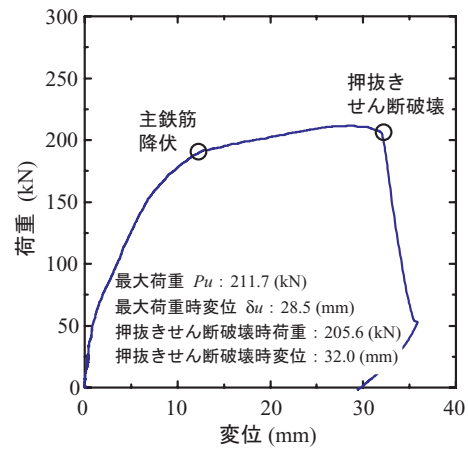


図-2 荷重-変位関係

載荷実験時には1.64 g/cm^3 および7.4%，繰返し衝撃荷重載荷時には平均1.59 g/cm^3 および7.1%，単一衝撃荷重載荷時には平均1.62 g/cm^3 および7.6%であった。表-2には、実験に使用した知律狩産（北海道石狩市）細目砂の物性値一覧を示している。実験は、前述のとおり、質量500 kgで先端部の直径が230 mm、かつ片当たりを防止するために2 mmのテーパを設けた平底鋼製重錘を所定の高さから試験体中央に落下させることにより行っている。

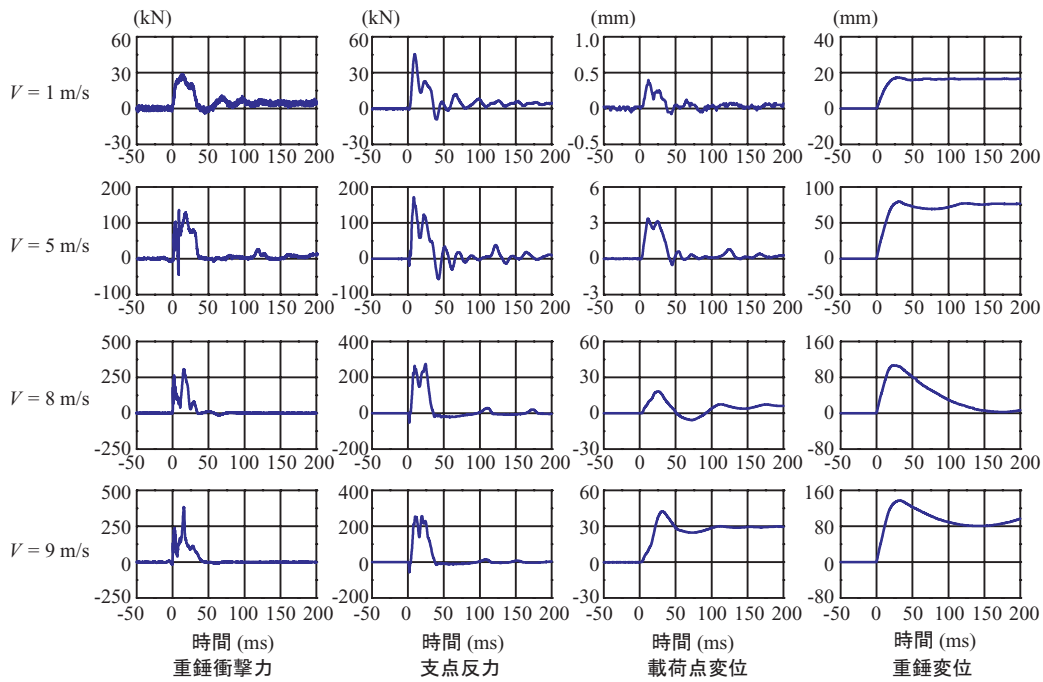
衝撃荷重載荷時の計測項目は、重錘一体型の起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力、支点治具に片側7個設置した起歪柱型ロードセルによる合支点反力（以後、単に支点反力と呼ぶ）、非接触型レーザ式変位計による試験体鉛直方向の変位（以後、単に試験体変位）および重錘変位である。

静載荷実験は、衝撃荷重載荷実験と同様に125 mm厚の敷砂緩衝材を設置した状態で、油圧載荷装置の先端に衝撃荷重載荷実験で使用した重錘を取り付けることにより行っている。計測項目は、載荷荷重および試験体変位である。

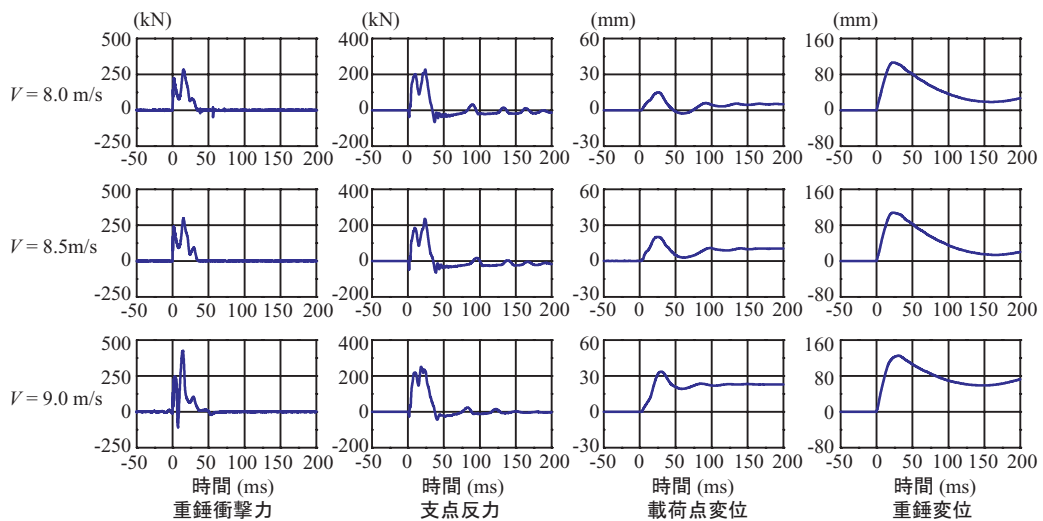
3. 実験結果

3.1 静載荷実験における荷重-変位関係

図-2には、静載荷実験結果の荷重-変位関係を示している。なお、部材係数を $\gamma_b = 1.0$ とした場合における、コンクリート標準示方書に準拠して算出した計算押抜きせん断耐力は、 $V_{pcd} = 243.3$ kNであった。図より、荷重50 kN程度まではほぼ弾性的な挙動を示し、その後ひび割れの発生により剛性勾配が低下していることが分かる。荷重180 kN程度で鉄筋の降伏によりさらに剛性勾配が低下し、載荷点変位28.5 mmで最大荷重211.7 kNを示した後、荷重が若干低下し、載荷点変位32 mmで押抜きせん断破壊が生じて荷重が急激に低下している。除荷後の残留変位は約30 mmで



(a) 繰返し载荷



(b) 単一载荷

図-3 各種応答波形

ある。最大荷重が計算押抜きせん断耐力を下回ったのは終局時近傍まで曲げ破壊が卓越し、支持辺に平行な1方向曲げによる曲げひび割れが多数発生した後、曲げ破壊から押抜きせん断破壊へ移行したためと推察される。

3.2 時刻歴応答波形

図-3(a),(b)には、繰返し载荷および単一载荷実験における重錘衝撃力、支点反力、载荷点変位および重錘変位に関する時刻歴応答波形を示している。なお、重錘変位の時刻歴応答波形は、重錘が敷砂緩衝材に衝突した時点を0 mmとし、鉛直下方への変位を正として整理している。また、(a)図については紙面の関係上、衝突速度の低から高より4ケースを抜粋し、その結果のみを示している。

重錘衝撃力波形に関しては、(a)図の繰返し载荷の場合に

は、いずれの衝突速度においても主波動の継続時間は30 ms程度である。また、波形分布性状については $V = 1$ m/sおよび5 m/sでは2あるいは3個のピークを有する正弦半波の分布を示しているが、重錘衝突速度の増加とともにピーク値近傍の増減が大きくなり鋭い三角形状の波形が顕著に示されている。(b)図の単一载荷の場合において、繰返し载荷の場合における衝突速度の等しい実験ケースと比較すると、主波動の継続時間、波形性状ともほぼ同様となっている。衝突速度が大きい場合において、両载荷時ともに重錘衝撃力の応答波形は、载荷と除荷が繰返される複雑な挙動を示している。また、支点反力波形にも同様の三角形状の波形が示されていることや、RC版の変位波形においても最大変位に至るまで変位の増加勾配が変化することからも

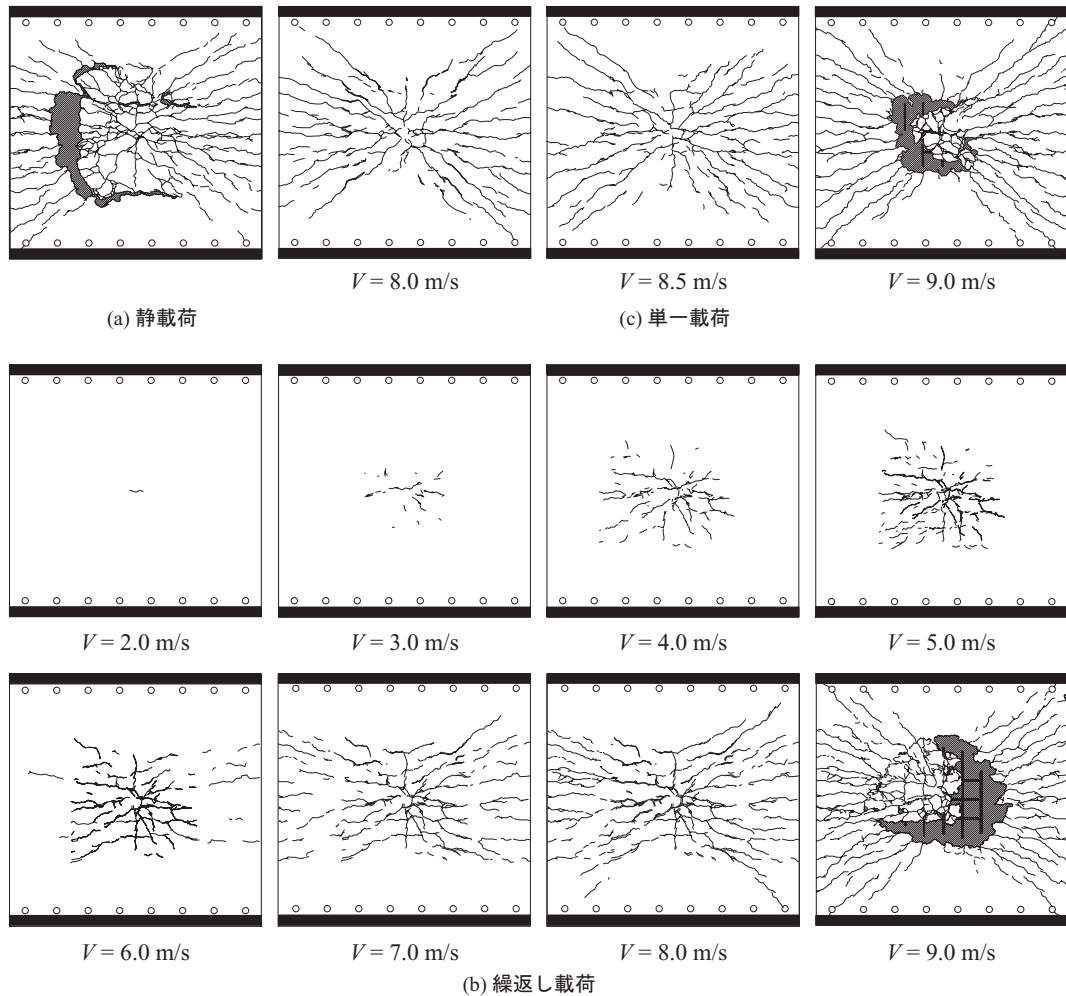


図-4 実験終了後におけるRC版裏面のひび割れ分布性状

複雑な荷重状態となっていることが類推される。これは、本実験に使用した重錘が平底であるため重錘衝突後の敷砂への貫入過程において敷砂の圧密や移動、RC版の変形等が複雑に関係しているものと推察される。

次に、支点反力について見ると、いずれの荷重条件においても重錘衝撃力波形と同様に、ピークの鋭い三角形の波形が連なった波形性状を示している。また、主波動以降の波形性状は、試験体の荷重点変位波形に対応した性状を示していることが分かる。

荷重点変位について見ると、(a)図の繰返し荷重の場合には、いずれの場合も衝撃荷重の荷重に伴う主波動とその後に減衰自由振動波形が示されている。主波動に着目すると、いずれの波形性状も重錘衝撃力における荷重と除荷が繰返される波形の影響が現れている。すなわち、衝突速度 $V=1$ および 5 m/s では最大変位発生直後に荷重と除荷を繰返すため、最大変位近傍に2つのピーク値を有する波形性状を示している。衝突速度 $V=8$ および 9 m/s では、最大変位に到達する以前に荷重と除荷を繰返す衝撃力が作用するため、最大変位到達までの増加勾配に変化が見られる。また、最大変位および残留変位は重錘衝突速度の増加に対応

して大きくなっている。特に、 $V=9\text{ m/s}$ では、押抜きせん断破壊により大きな残留変位が発生している。(b)図の単一荷重実験では、波形性状は繰返し荷重実験と同様となっている。同一の衝突速度で比較すると、最大変位および残留変位ともに単一荷重実験の場合が小さい。

重錘変位について見ると、(a)図の繰返し荷重実験では、 $V=1\text{ m/s}$ の場合には、重錘は敷砂へ衝突後、貫入しながら鉛直下方へ推移し、大きな変動を示さず静止状態に至っている。また、 $V=5\text{ m/s}$ の場合には、重錘は最大貫入量を示した後、除荷傾向を示し、その後静止状態に至っている。 $V=8\text{ m/s}$ の場合には、重錘は最大貫入量を示した後、敷砂表面程度までのリバウンドを示している。一方、 $V=9\text{ m/s}$ の場合には、リバウンド量が $V=8\text{ m/s}$ の場合に比べて小さく 20 mm 程度であり、 80 mm 以上の貫入量を保持している。これは、前述の荷重点変位波形からも明らかのように、RC版が押抜きせん断破壊に至ったことによるものと推察される。最大貫入量は、衝突速度の大きさに対応して増加しており、敷砂も締め固められる傾向にあることが分かる。(b)図の単一荷重実験結果は、繰返し荷重実験結果と類似な波形分布性状を示している。

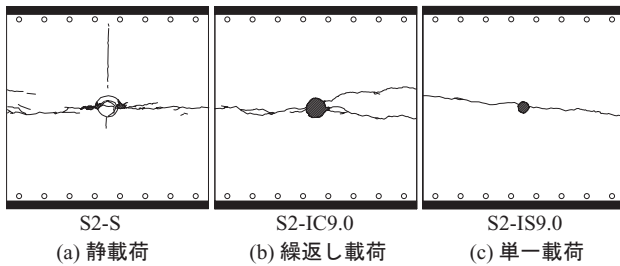


図-5 実験終了後におけるRC版上面のひび割れ分布性状

3.3 ひび割れ分布性状

図-4には、実験終了後のRC版裏面のひび割れ分布性状を示している。

(a) 図より、静載荷実験終了後におけるRC版裏面には、一方向曲げによる支持辺に平行なひび割れが卓越して発生しているが、対角線状の二方向曲げによるひび割れも発生している。しかしながら、最終的には押抜きせん断破壊により裏面のかぶりコンクリートの一部が剥落していることが分かる。

(b) 図の繰返し衝撃載荷の場合には、 $V = 2 \text{ m/s}$ より荷重点近傍部にひび割れが確認でき、 $V = 5 \text{ m/s}$ までは2方向の曲げによるひび割れが法線方向に進展している。その後、衝突速度の増加と共にひび割れが自由端方向に進展しており、1方向曲げが卓越していく状況が確認できる。 $V = 9 \text{ m/s}$ では2方向曲げによる対角線状のひび割れも進展しているが、押抜きせん断破壊により裏面コンクリートが円形状に大きく剥落している。

(c) 図の単一衝撃載荷の場合には、繰返し載荷の場合に比較して2方向曲げによる対角線状のひび割れが多く進展していることが分かる。これは、繰返し載荷の場合には衝突速度の小さい段階から一方向曲げの損傷が蓄積される傾向があるのに対して、単一載荷の場合には局所応答が卓越する傾向にあることを示唆している。

押抜きせん断破壊による裏面コンクリートの剥落範囲を比較すると、静載荷実験時が最も大きく、単一衝撃荷重載荷実験が最も小さくなっている。この大きさは1方向曲げによる支持辺に平行な曲げひび割れの発生範囲に対応していることが分かる。

図-5には、実験終了後のRC版上面のひび割れ分布性状を示している。

(a) 図より、静載荷実験終了後のRC版上面のひび割れ分布性状は、支点到平行な曲げひび割れおよびこれに直交するひび割れがスパン中央部に発生している。また、荷重点部には重錘径に対応した押抜きせん断破壊による円形状のひび割れが発生しており、その近傍にはコンクリートの圧壊による剥離が見られる。

(b) 図の繰返し載荷実験では、支点到平行な曲げひび割れが発生するとともに、荷重点部は重錘径と同程度の大きさでコンクリートが押抜かれている。

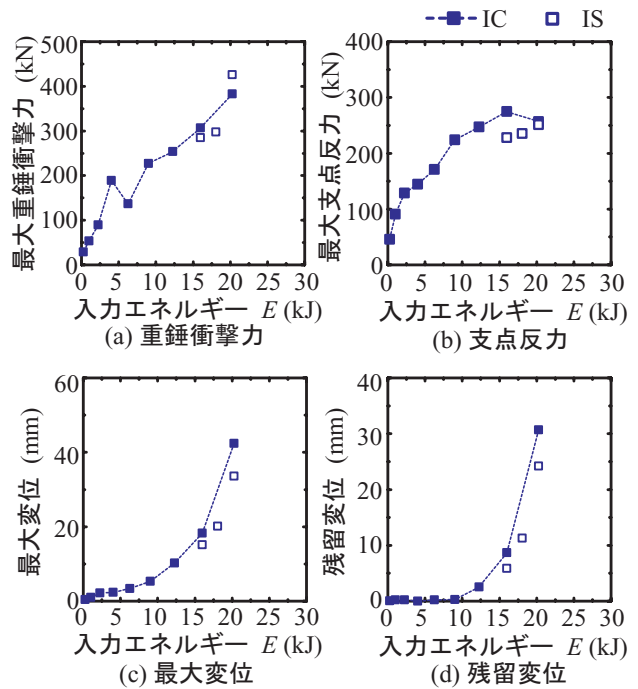


図-6 各応答値と入力エネルギーとの関係

(c) 図の単一載荷実験では、押抜きせん断コーンの直径が重錘径の1/2程度と非常に小さくなっていることが分かる。これは、重錘先端部の片当たり防止のためのテーパにより、重錘中心部近傍の敷砂がその周辺部より過度に厚密されたことや、繰返し載荷の場合には一方向曲げのひび割れが広い範囲に分散し、RC版の剛性が徐々に低下した後に押抜きせん断破壊に至っているのに対して、単一載荷では荷重点直下の狭い範囲に集中荷重が作用し局所応答が卓越したためと推察される。

3.4 各種応答値と入力エネルギーとの関係

図-6(a)~(d)には、重錘衝撃力、支点反力、最大変位および残留変位と入力エネルギーとの関係を示している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力は、多少ばらつきが見られるものの入力エネルギーに対応して増加する傾向が示されている。また、繰返し載荷と単一載荷との差異は余り見られない。

(b) 図より、最大支点反力について見ると、入力エネルギーに対して最大支点反力の増加割合が小さくなる傾向が示されており、繰返し載荷による累積損傷の影響が示唆される。詳細に見ると、 $E = 16 \text{ kJ}$ ($V = 8 \text{ m/s}$)において最大値を示した後、 $E = 20.3 \text{ kJ}$ ($V = 9 \text{ m/s}$)において支点反力が減少しており、 $E = 20.3 \text{ kJ}$ 時点で終局に至っていることがうかがわれる。単一載荷実験では、入力エネルギーの増加に対応して線形に増加しており、 $E = 20.3 \text{ kJ}$ において繰返し載荷実験の結果と同程度の値を示している。

(c),(d) 図の最大応答変位および残留変位分布から、入力エネルギーが $E = 9 \text{ kJ}$ ($V = 6 \text{ m/s}$)までは、残留変位がほぼ零であることや、最大応答変位が入力エネルギーの増加に

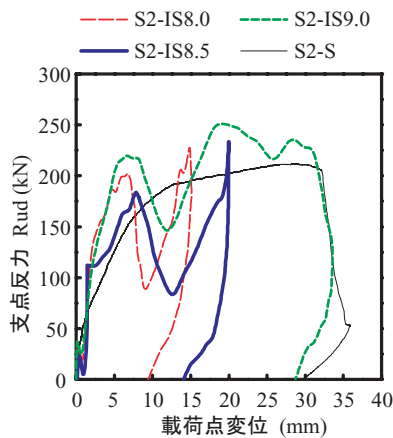


図-7 支反力-載荷点変位関係

対応してほぼ線形に増加していることから、RC版は弾性に近い状態であることが分かる。 $E > 9 \text{ kJ}$ ($V > 6 \text{ m/s}$) では、損傷が累積されることにより最大応答変位および残留変位は2次関数的に増加している。これは、RC版では繰返し載荷による損傷が載荷点直下に集中し、2方向曲げとともに押抜きせん断破壊の傾向を示すためと推察される。単一載荷の場合には、最大応答変位および残留変位共に繰返し載荷の場合よりも小さな値を示しているが、入力エネルギーに対する増加傾向は繰返し載荷の場合とほぼ同様である。

3.5 支反力-載荷点変位関係

図-7には、単一衝撃載荷の場合における支反力-載荷点変位関係と静載荷実験結果の荷重-変位関係を併せて示している。押抜きせん断破壊に至った静載荷実験S2-Sと単一衝撃載荷実験S2-IS9.0を比較すると、単一載荷実験では一旦除荷状態になる部分があることや最大荷重が静載荷実験より大きい点を除けば、荷重の立ち上がり勾配から最大変位発生後の除荷状態に至るまで、全体的に類似の性状を示していることが分かる。また、最大支反力を動的耐力と仮定し、この値を実験結果の静的押抜きせん断耐力で除して動的応答倍率を求めると、1.2 (250.8 kN / 211.7 kN) となる。また、入力エネルギー 20.3 kJ ($m = 500 \text{ kg}$, $H = 2.34 \text{ m}$) の条件下で、振動便覧式により衝撃力 250.8 kN を与えるラメの定数を逆算すると、 $\lambda = 1,300 \text{ kN/m}^2$ となる。このことは、静的押抜きせん断耐力と動的応答倍率および振動便覧式を用いることで、落石による最大入力エネルギー(落石質量と落下高さ)あるいはRC版に対する要求せん断耐力評価が可能になることを示唆している。今後、さらに詳細に検討したいと考えている。

3.6 吸収エネルギーと入力エネルギーとの関係

図-8には、敷砂およびRC版の吸収エネルギーと重錘による入力エネルギーとの関係を示している。ここで、敷砂およびRC版の吸収エネルギーは、それぞれ重錘衝撃力と重錘貫入量および重錘衝撃力と載荷点変位の履歴曲線より求めている。図より、入力エネルギーが小さい範囲では敷砂による吸収エネルギーが非常に大きく、入力エネルギー

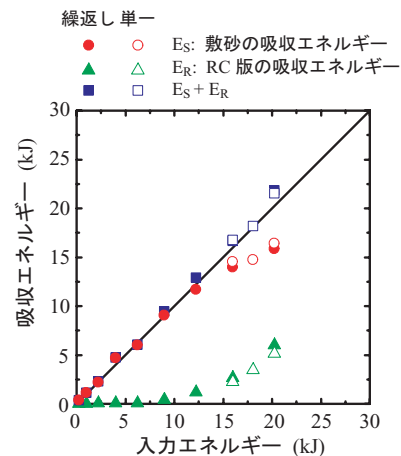


図-8 敷砂および RC 版の吸収エネルギーと入力エネルギーとの関係

の増加とともにRC版による吸収エネルギーの割合が増加している。押抜きせん断破壊が発生した最終ケースでは、RC版の吸収エネルギーは入力エネルギーの約30%となっている。

4. まとめ

本研究では、ロックシェッド等の性能照査型設計法を確立するための基礎的な検討として、敷砂を設置した二辺支持RC版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、静載荷実験および衝撃荷重載荷実験を実施した。本実験で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 静載荷実験を含めたいずれの載荷方法に対しても曲げひび割れが卓越して発生するが、最終的な破壊モードは押抜きせん断破壊である。
- 2) 最大応答変位および残留変位は入力エネルギーの増加に対応して2次関数的に増加する。
- 3) 最大支反力を動的耐力と仮定すれば、ラメ定数を適切に設定し、振動便覧式を用いることで終局落石条件を算定できる可能性が示された。
- 4) 入力エネルギーの小さい範囲では敷砂による吸収エネルギーが大きいのが、RC版の損傷進展とともにRC版による吸収エネルギーが増加し、押抜きせん断破壊に至る状況では入力エネルギーに対して30%程度である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩: RC梁の繰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
- 3) 今野久志, 山口 悟, 岸 徳光, 栗橋祐介: 厚さの異なる敷砂緩衝材の緩衝特性に関する重錘落下衝撃実験, 平成21年度土木学会北海道支部論文報告集, 2011.2