

論文 敷砂緩衝材を設置した支持条件の異なる RC 版の重錘落下衝撃実験

岡田 伸之^{*1}・岸 徳光^{*2}・今野 久志^{*3}・山口 悟^{*4}

要旨: 本研究では、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、敷砂を設置した RC 版の耐衝撃挙動に及ぼす支持条件の影響を明らかにすることを目的に、支持条件を3種類（四辺支持、二辺支持、一辺+二隅角点支持）に変化させた RC 版の単一衝撃荷重実験を実施した。実験は、各支持条件に対して重錘衝突速度を3種類に変化させた全9体で行った。その結果、1) 四辺支持の場合には押抜きせん断破壊が卓越するが、二辺支持および一辺+二隅角点支持の場合には、曲げ変形が卓越してくること、2) いずれの支持条件においても、最終的な破壊モードは押抜きせん断破壊であること、などが明らかになった。

キーワード: RC 版, 支持条件, 静荷重実験, 衝撃荷重実験, 耐衝撃性

1. はじめに

近年、耐衝撃用途構造物の合理的な設計手法および適切な維持管理手法の確立を目的に、性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討が進められている。筆者らもこれまで、落石防護構造物の合理的な耐衝撃設計法の確立を目的として、鉄筋コンクリート (RC) 梁、RC 版および門型 RC 製ラーメン模型を用いた重錘落下衝撃実験等を実施している。特に、落石覆道の頂版部に用いられる RC 版の耐衝撃性の検討では、四辺支持 RC 版の静的および衝撃荷重実験を行い、その静的耐荷挙動や耐衝撃挙動に及ぼす重錘直径、版厚、鉄筋比およびコンクリート強度等の影響について検討するとともに、RC 版の耐衝撃設計手法を提案している^{1),2)}。

さらにロックシェッド等の実構造物では、その頂版部が壁や柱で支持されていることから、支持条件が耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討するための実験も行っている³⁾。ただし、これまでの実験では、緩衝材を設置しない条件下で検討を行ってきた。一方、実構造物の場合には標準的に敷砂緩衝材が設置されていることから、より汎用性の高い RC 版の耐衝撃設計手法を確立するためには、同様の条件下における検討を行うことが重要であるものと判断される。

このような背景より、本研究では、敷砂緩衝材を設置した RC 版の耐衝撃挙動に及ぼす支持条件の影響を検討すること

を目的に、支持条件を四辺支持、二辺支持および一辺+二隅角点支持の3種類に変化させた敷砂緩衝材を有する RC 版の単一衝撃荷重実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1には、本実験に使用した RC 版の一覧を示している。また、表中には別途実施した静荷重実験の結果 P_{us} も併せて示している。なお、表中の計算押抜きせん断耐力 V_{pcd} は、敷砂緩衝材を考慮せず、重錘と同一の直径 230 mm の範囲に荷重が作用するものと仮定して、コンクリート圧縮強度試験結果を用い、コンクリート標準示方書に準拠して算出している。なお、部材係数 γ_b 、材料係数 γ_c はともに 1.0 としている。

試験体数は、支持条件を3種類、衝突速度を3種類に変化させた全9体である。試験体名は、支持条件 (S4: 四辺支持, S2: 二辺支持, S1: 一辺+二隅角点支持) を用いて表している。単一衝撃荷重実験 (以後、単一荷重実験) の重錘衝突速度は、別途実施した漸増繰返し衝撃荷重実験 (以後、繰返し荷重実験) における最終衝突速度に基づいて決定した。なお、繰返し荷重実験は、初回の衝突速度および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実施しており、各 RC 版の最終衝突速度は S4 および

表-1 試験体一覧

試験体名	支持条件	荷重方法	衝突速度 V(m/s)	計算押抜きせん断耐力 V_{pcd} (kN) (1)	実測押抜きせん断耐力 P_{us} (kN) (2)	(2)/(1)
S4	四辺支持	単一	9, 9.5, 10	244.5	277.1	1.13
S2	二辺支持		8, 8.5, 9		211.7	0.87
S1	一辺+二隅角点支持		8, 8.5, 9		200.6	0.82

*1 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 (正会員)
 *2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 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 総括主任研究員 博(工) (正会員)
 *4 (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)

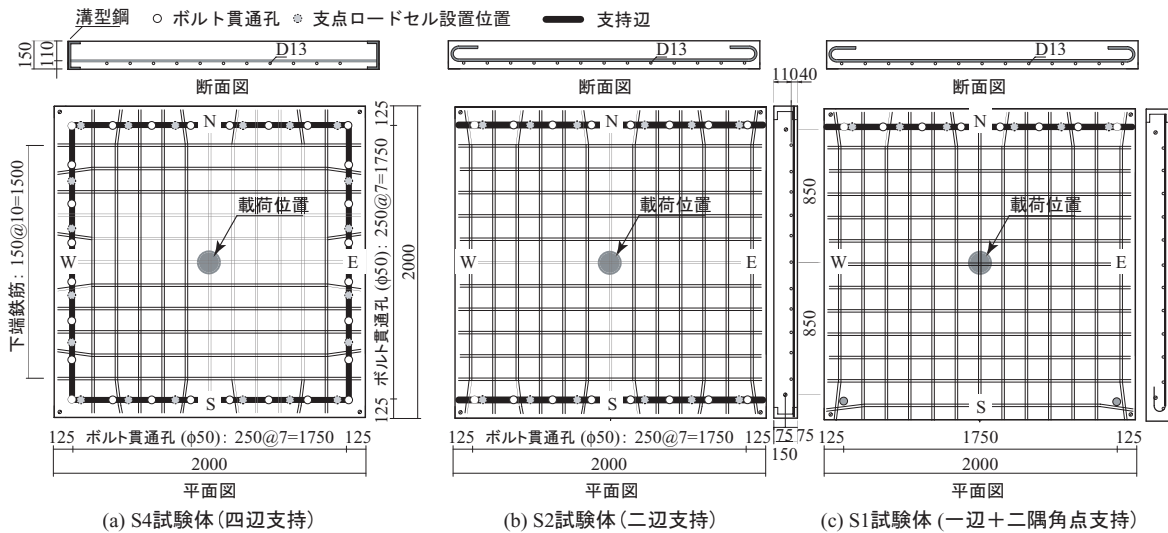


図-1 試験体の形状寸法および鉄筋状況

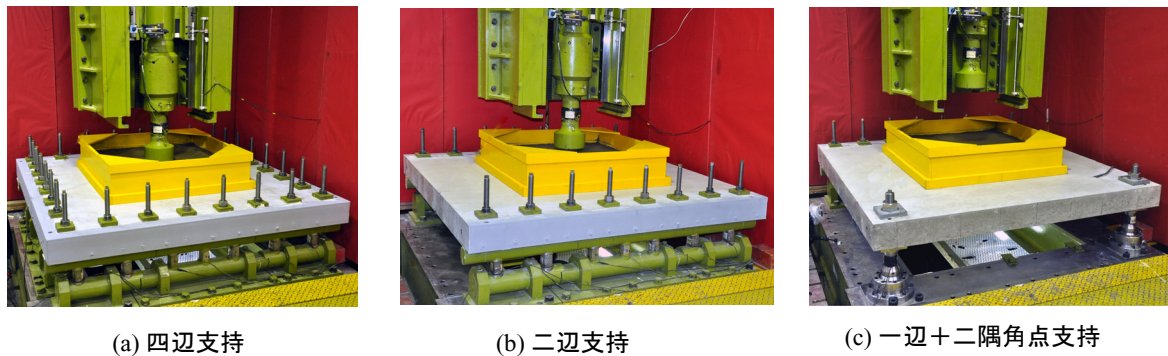


写真-1 実験状況

S2/I の場合でそれぞれ 10 および 9 m/s であった。終局の定義は、押抜きせん断破壊により版裏面のかぶりコンクリートの剥落が顕在化した状態とした。

本研究における単一荷重実験では、まず繰返し荷重実験時の最終衝突速度で実験を行い、いずれの RC 版も押抜きせん断破壊に至ることを確認し、それ以降の実験における衝突速度を最終衝突速度よりも 0.5 および 1.0 m/s 小さく設定することとした。

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、寸法が 2,000 × 2,000 × 150 mm の単鉄筋 RC 版である。鉄筋には 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。鉄筋の定着方法は支持条件によって異なっている。すなわち、四辺支持の場合には、RC 版の四辺に配置した溝型鋼に鉄筋を溶接固定し定着長を節約している。また、二辺支持および一辺+二隅角点支持の場合には、支持辺にのみ溝型鋼を配置して鉄筋を溶接固定し、その他の端部では鉄筋を折り曲げて圧縮側に定着を図っている。なお、実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 27.8 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支持条件の異なる各 RC 版毎に示している。各支点部では、支持条件によらず 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。また、各辺の支点間距離は、いずれの場合も 1.75 m であり、各辺の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。なお、一辺+二隅角点支持の場合における隅角点支持部は、図-2 に示すように全方向に回転可能な構造となっている。

重錘落下衝撃実験は、RC 版上に平面寸法が 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 に成形している。また、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、平均で四辺支持の場合が 1.62 g/cm³ および 8.1 %、二辺支持の場合が 1.63 g/cm³ および 7.5 %、一辺+二隅角点支持の場合が 1.62 g/cm³ および 7.2 % であった。表-2 には、実験に使用した知律産（北海道石狩市）細目砂の物性値一覧を示している。

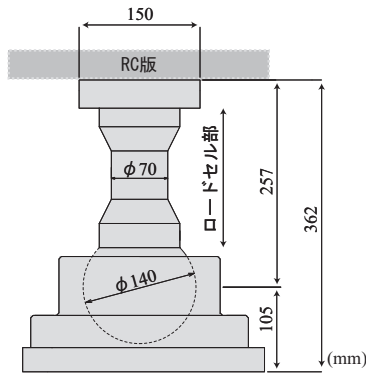


図-2 隅角点支持部

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

実験は、質量 500 kg で先端部の直径が 230 mm、かつ片当たり防止用に 2 mm のテーパが施された平底鋼製重錘を所定の高さから試験体中央に 1 回だけ落下させることにより行っている。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変位および重錘変位である。別途実施した静荷重実験は、衝撃荷重荷重実験と同様に、厚さ 125 mm に成形した敷砂緩衝材を設置した状態で、油圧式荷重装置の先端に本衝撃荷重荷重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。

3. 実験結果

3.1 時刻歴応答波形

図-3 には、各種支持条件における実験結果の重錘衝撃力、支点反力、荷重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。

重錘衝撃力波形について見ると、いずれの支持条件においても正弦半波状の波形に周期の短い三角形の波形が合成されたような波形性状を示している。波形の継続時間は、S4 の場合が 25 ms 程度と最も短く、S2 および S1 の場合には、30 ms 程度のほぼ同様な値を示している。また、S2 および S1 の場合が S4 の場合よりも波形継続時間が長いことより、三角形の波形が顕著に示されていることが分かる。なお、重錘衝撃力波形の主波動を積分して求めた力積 I は、初期運動量 $m \cdot V$ (m : 重錘質量) と大略同等であることを確認している。

次に、支点反力波形について見ると、いずれの支持条件においても、重錘衝撃力波形と同様にピークの鋭い三角形

状の波形が連なった波形性状を示している。波形継続時間は重錘衝撃力波形と対応しており、また主波動以降の波形性状は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。

荷重点変位波形について見ると、いずれの支持条件の場合においても、衝撃力の荷重に伴う主波動とその後続く減衰自由振動波形で構成されている。主波動の継続時間は S4 が最も短く、同一衝突速度における最大変位および残留変位も S4 が最も小さい。S2 および S1 の場合には、波形性状および応答値はほぼ同じである。また、いずれの支持条件においても、最大衝突速度で荷重した場合には、押抜きせん断破壊によりコンクリートがコーン状に押抜かれたため大きな残留変位が発生している。

重錘変位について見ると、支持条件によらず同様の波形性状を示している。重錘は敷砂へ衝突後、貫入しながら鉛直下方へ移動しているが、RC 版のリバウンドに伴い重錘も鉛直上方にリバウンドしている。重錘のリバウンド量は、RC 版の最大変位に対応して大きくなっているが、最大衝突速度ではいずれの支持条件においても RC 版が押抜きせん断破壊し大きな残留変位が発生したため、それより小さな衝突速度における場合よりも小さくなっている。

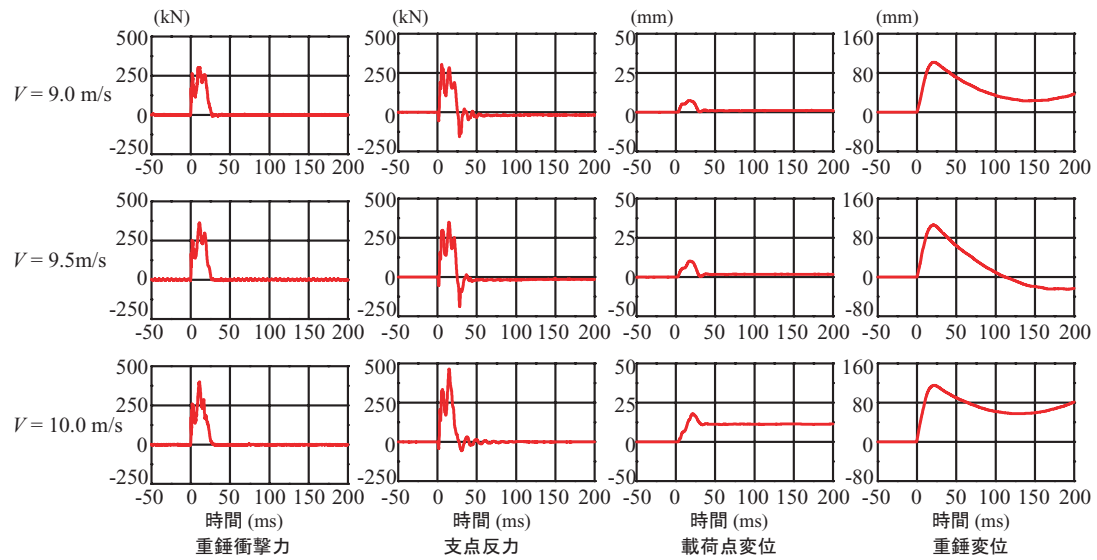
3.2 ひび割れ分布性状

図-4 には、実験終了後における各 RC 版裏面のひび割れ分布性状を示している。

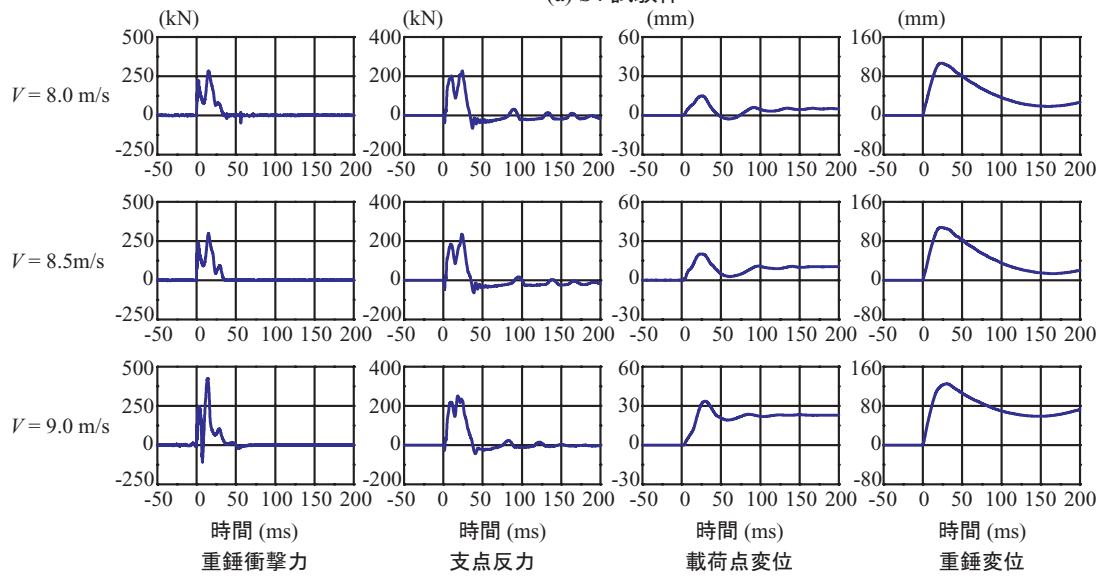
S4 における衝突速度 $V = 9.0$ m/s では、荷重点直下で交差する 2 方向曲げによる対角線状のひび割れが発生している。 $V = 9.5$ m/s では、衝突速度の増加に対応してひび割れが進展すると共にひび割れ本数も増加していることが分かる。さらに最大衝突速度 $V = 10$ m/s では、ひび割れが支持部まで延伸すると共にひび割れ本数もさらに増加し、荷重点直下には押抜きせん断破壊に起因する円形状のひび割れが見られ、かぶりコンクリートの一部が剥落している。

S2 における衝突速度 $V = 8.0$ m/s では、2 方向曲げによる対角線状のひび割れと共に、自由端近傍には自由端に直交する一方向曲げによるひび割れが多数発生している。 $V = 8.5$ m/s では、衝突速度の増加に対応して荷重点近傍のひび割れが若干増加しているが、 $V = 8.0$ m/s のひび割れ状況と大きな違いは見られない。最大衝突速度 $V = 9.0$ m/s では、ひび割れ本数が増加し、荷重点直下には押抜きせん断破壊に起因する円形状のひび割れが見られ、かぶりコンクリートの一部が大きく剥落している。

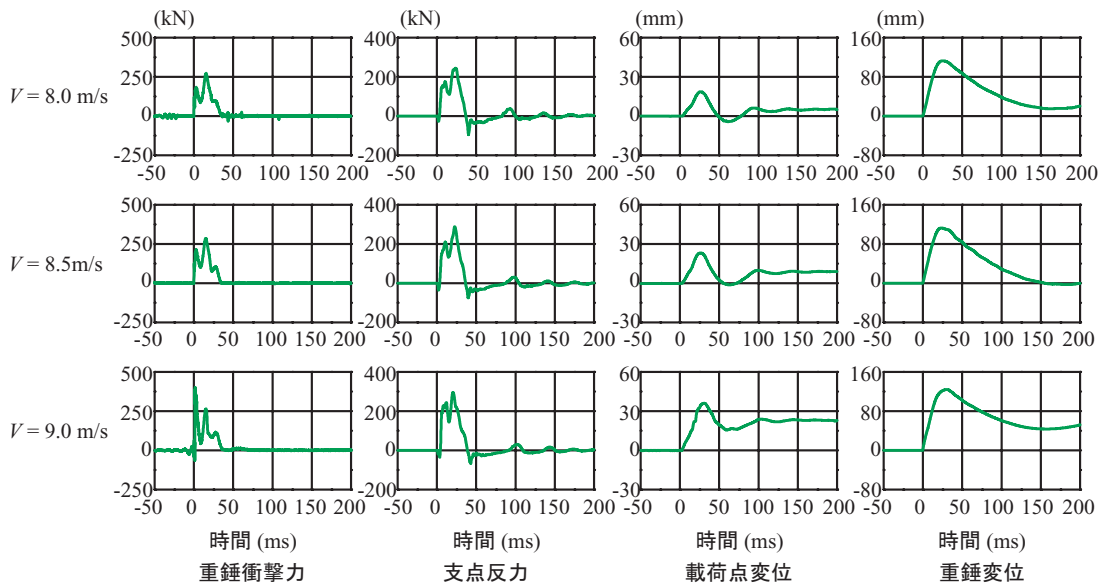
S1 における衝突速度 $V = 8.0$ m/s では、各自由支持辺の中間部には各一方向曲げに対応する曲げひび割れが発生している。 $V = 8.5$ m/s では、衝突速度の増加に対応して上記と同様のひび割れが進展すると共に、ひび割れ本数も増加している。最大衝突速度 $V = 9.0$ m/s では、ひび割れ本数の増加と共に一辺の両端部に向かう 2 方向曲げに対応する斜



(a) S4 試験体



(b) S2 試験体



(c) S1 試験体

図-3 各時刻歴応答波形

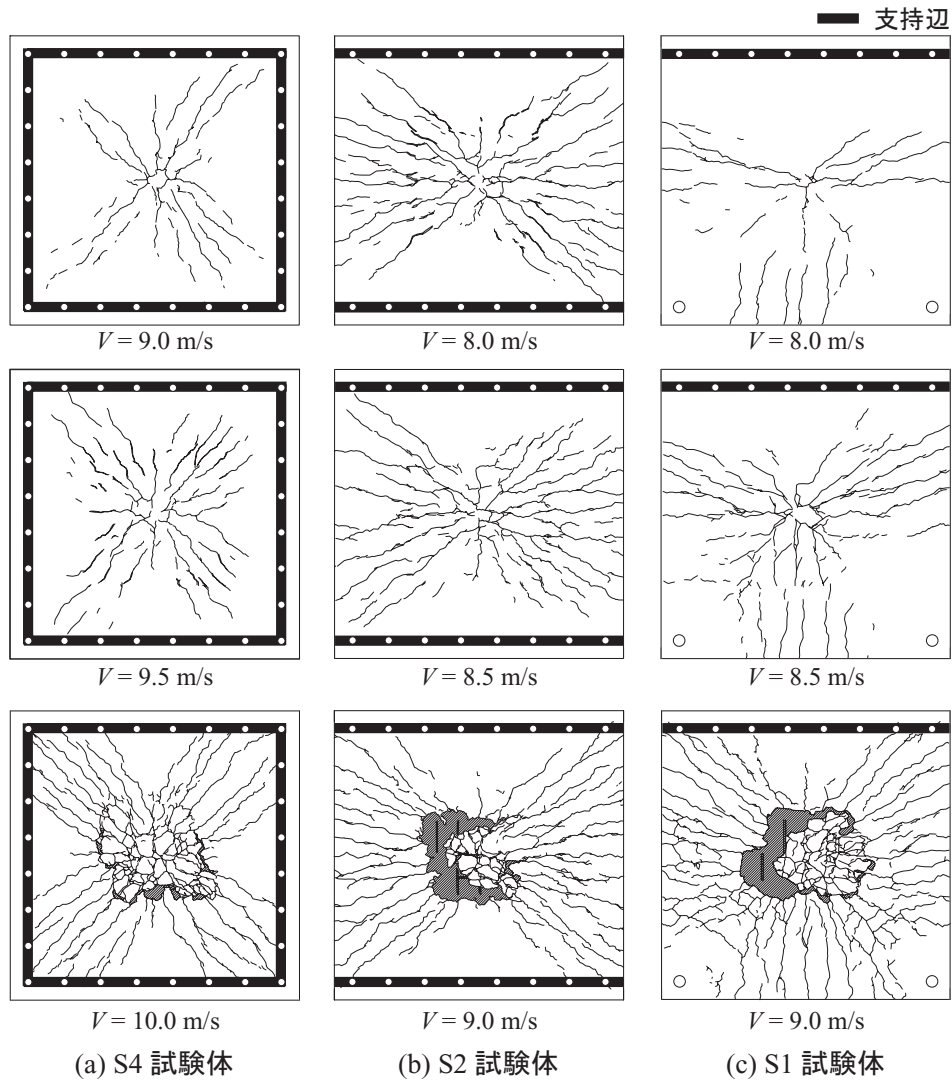


図-4 実験終了後におけるRC版裏面のひび割れ分布性状

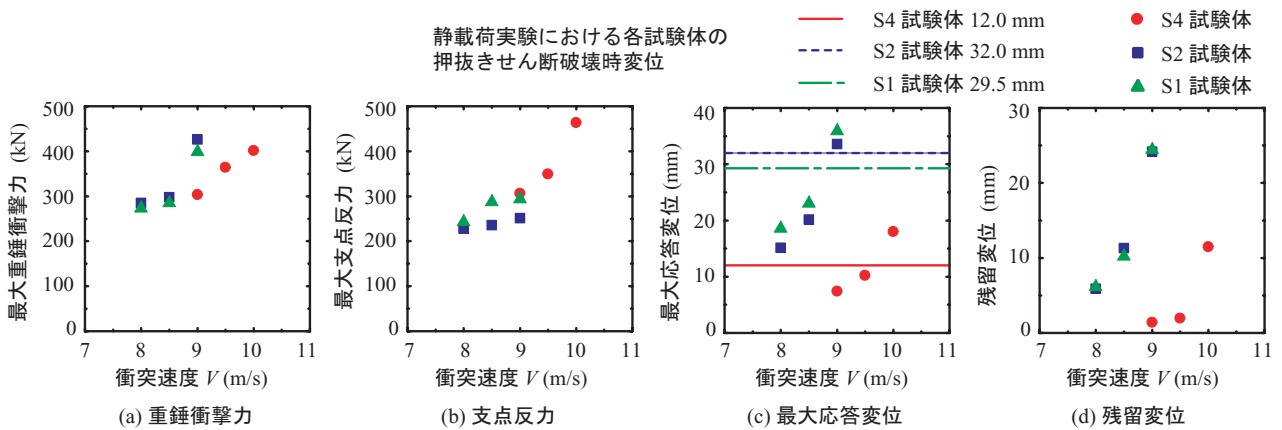


図-5 各応答値と衝突速度との関係

めひび割れが顕在化し、かつ荷点直下には押抜きせん断破壊に起因する円形状のひび割れが見られ、かぶりコンクリートが大きく剥落している。

3.3 各種応答値と衝突速度との関係

図-5 (a)~(d) には、それぞれ重錘衝撃力、支点反力、最

大変位および残留変位と重錘衝突速度との関係を示している。(c) 図には、各支持条件の静荷実験において押抜きせん断破壊が生じた時点での変位量（以後、静的終局変位）を併せて表示している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力と衝突速度との関係について

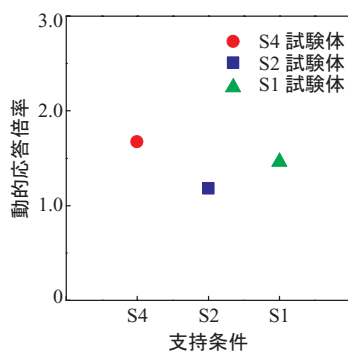


図-6 動的応答倍率

見ると、S4 の場合には衝突速度の増加に対応して重錘衝撃力もほぼ線形に増加しているのに対して、S2 および S1 の場合には、衝突速度 $V=9.0$ m/s において、重錘直下の敷砂が過度に締め固められて、重錘が RC 版に直接接触するような状況に至ったことによるものと推察される。

(b) 図より、最大支点反力と衝突速度の関係について見ると、衝突速度の増加に伴う支点反力の増加割合は、S4 の場合が S2/S1 の場合に比べて大きい。これは、S2/S1 の場合には曲げ変形が卓越する耐衝撃挙動を示しているのに対し、S4 の場合には支持条件による拘束度が大きく 2 方向曲げが卓越したわみ剛性の高い耐衝撃挙動を示したことによるものと考えられる。

(c), (d) 図より、最大応答変位および残留変位と衝突速度との関係を見ると、衝突速度の増加に伴って両変位が指数関数的に増加する傾向にあることが分かる。特に、最大衝突速度時には、押抜きせん断破壊に至っているため、変位が急激に増加している。なお、S2/S1 は類似の分布性状を示している。また、S4 の残留変位は、押抜きせん断破壊に至らない場合には、極めて小さな値を示している。

ここで、(c) 図より、各支持条件における最大応答変位と静的終局変位を比較すると、衝撃载荷実験における最大応答変位が静的終局変位を超過していない実験ケースでは、いずれも押抜きせん断破壊には至っていないことが分かる。一方、衝撃载荷時の最大応答変位が静的終局変位を超過した実験ケースでは、いずれも押抜きせん断破壊を呈している。以上より、敷砂緩衝材を設置した場合には、静的終局変位を用いることにより、衝撃荷重載荷時における押抜きせん断破壊に至る変位を予測できる可能性が示唆される。

図-6 には、終局近傍における動的応答倍率を支持条件と共に示している。ここで、動的応答倍率とは、支点反力の最大値までの波形性状と载荷点変位波形のそれが類似していることから、最大支点反力を動的耐力と仮定し、実測静

的押抜きせん断耐力で除した値である。図より、S4, S2 および S1 の動的応答倍率はそれぞれ 1.7, 1.2 および 1.5 程度となっており、敷砂緩衝材を設置しない既往の研究結果³⁾よりも小さくなる傾向が示されている。これは、敷砂緩衝材を設置した場合には、設置しない場合に比較して重錘衝撃力の継続時間が長くなるとともに最大重錘衝撃力は小さくなり、これに対応して最大支点反力も小さくなる。このことから動的応答倍率が小さく評価されたものと推察される。また、敷砂緩衝材を設置した場合には、静載荷時と衝撃荷重載荷時で荷重分散範囲が異なる可能性もあることから、今後この点についても詳細に検討したいと考えている。

4. まとめ

本研究では、敷砂を設置した RC 版の耐衝撃挙動に及ぼす支持条件の影響を検討することを目的に、支持条件を 3 種類 (四辺支持、二辺支持、一辺+二隅角点支持) に変化した RC 版の重錘落下衝撃実験を実施した。実験は、各支持条件に対して、重錘衝突速度を変化させた全 9 体の RC 版を用いて行った。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) 四辺支持の場合には押抜きせん断破壊が卓越するが、二辺支持および一辺+二隅角点支持の場合には、拘束度の減少により曲げ変形が卓越してくる。
- 2) いずれの支持条件においても、最終的な破壊モードは押抜きせん断破壊である。
- 3) 静的終局変位を用いることにより、衝撃荷重載荷時における押抜きせん断破壊時の変位を予測できる可能性がある。
- 4) 最大支点反力を動的耐力と仮定すれば、敷砂を設置した場合の動的応答倍率は、四辺支持の場合で 1.7、二辺支持の場合で 1.2、一辺+二隅角点支持の場合で 1.5 程度である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 低速度衝撃を受ける四辺単純支持 RC 版の耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1327-1336, 2009.3
- 3) 又坂文章, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: 支持条件の異なる RC 版に関する重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010