

(28) 矩形 RC 版の耐衝撃挙動に及ぼす支持条件の影響

THE EFFECTS OF SUPPORTING CONDITION ON IMPACT RESISTANT BEHAVIOR OF
RECTANGULAR RC SLAB

栗橋祐介*, 岸 徳光**, 三上 浩***

Yusuke KURIHASHI, Norimitsu KISHI, and Hiroshi MIKAMI

*博(工) 室蘭工業大学大学院講師 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)

**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(工) 三井住友建設(株) 技術開発センター 主席研究員 (〒 270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

キーワード：RC 版，支持条件，衝撃荷重載荷実験，耐衝撃挙動

1. はじめに

近年の異常気象により豪雨や大型台風が多発し、岩盤斜面の崩落や落石災害が多発している。そのため、既設の落石防護構造物においては、落石規模が設計当初の想定規模を上回り、落石防護構造物の設計耐力を超過する可能性が考えられる。従って、今後既設の落石防護構造物を安全かつ効率的に維持管理するためには、その耐衝撃性能を適切に評価可能な手法を確立することが肝要である。

著者らは、これまで落石覆工頂版部に用いられる RC 版の耐衝撃性を検討するため、四辺支持 RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を行い、RC 版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)}。しかしながら、これらの実験的研究は、いずれも支持条件が四辺支持の場合に限定されており、実構造物を想定した種々の支持条件に関する検討には至っていないのが現状である。特に落石防護用途の道路構造物において、その頂版部は壁や柱で支持されるため、一対辺支持他対辺自由(以後、二辺

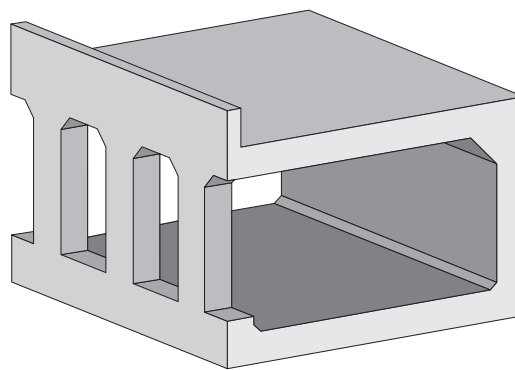


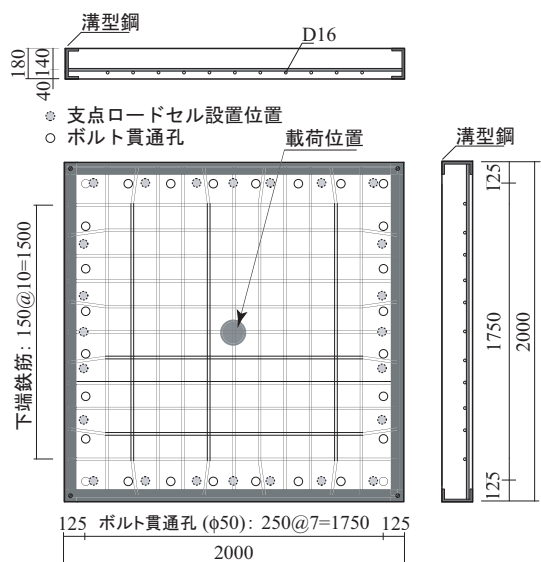
図-1 落石防護覆道 1 ブロックの一例

支持) もしくは一辺支持+他対辺複数点支持(図-1 参照)となるのが一般的である。

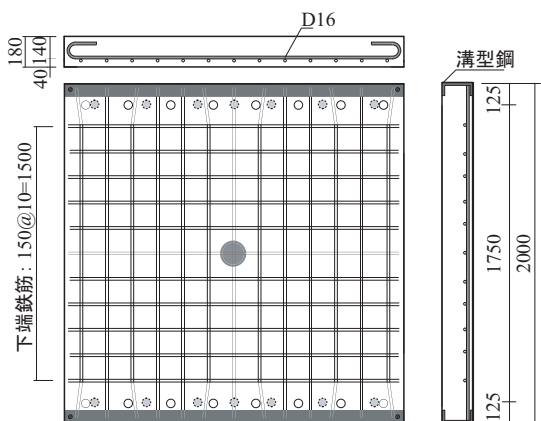
このような背景より、本研究では、RC 版の耐衝撃挙動に及ぼす支持条件の影響を検討することを目的に、支持条件を四辺支持、二辺支持および一辺支持+二隅角点支持の 3 種類に変化させた RC 版の衝撃荷重載荷実験を実施した。

表-1 試験体一覧

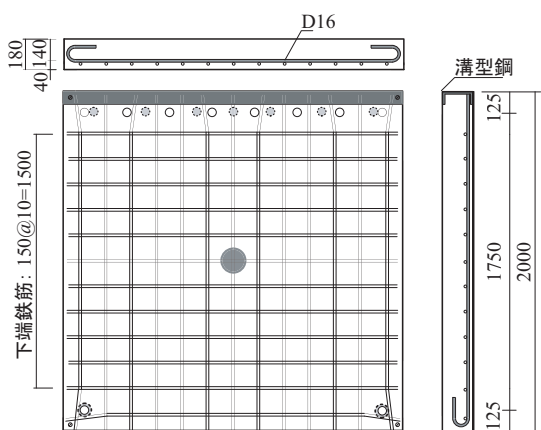
試験体名	支持条件	載荷方法	衝突速度 V (m/s)	計算押抜き せん断耐力 V_{pcd} (kN) (1)	実測押抜き せん断耐力 P_{us} (kN) (2)	(2)/(1)
S4-S	四辺支持	単一	4.0, 4.5	251.6	296.3	1.18
S4-I		繰返し	4.0 → 4.5			
S2-S	二辺支持	単一	4.0, 4.5			
S2-I		繰返し	4.0 → 4.5			
S1-S	一辺+二隅角点支持	単一	4.0, 4.5		278.8	1.11
S1-I		繰返し	4.0 → 4.5			



(a) 四辺支持



(b) 二辺支持

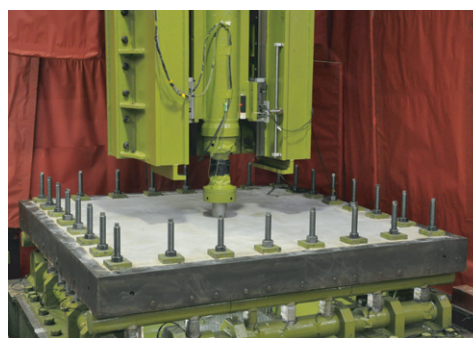


(c) 一辺+二隅角点支持 (mm)

図-2 試験体の形状寸法および配筋状況

2. 実験概要

表-1 には、本実験に用いた RC 版の一覧を示している。また、別途実施した静荷重実験の結果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、後述の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設計編³⁾に準拠して算出したものである。



(a) 四辺支持



(b) 二辺支持



(c) 一辺+二隅角点支持

写真-1 実験状況

なお、部材係数 γ_b 、材料係数 γ_c ともに 1.0 としている。

試験体数は、支持条件を 3 種類、荷重方法と衝突速度を 3 種類に変化させた全 9 体である。表中の試験体名のうち、第一項目は支持条件 (S4: 四辺支持, S2: 二辺支持, S1: 一辺+二隅角点支持) を示し、第二項目は荷重方法 (S: 単一荷重, I: 繰返し荷重) を示している。衝撃荷重荷重位置は RC 版の中央とし、質量 300 kg、先端直径 90 mm の鋼製重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一荷重 ($V = 4.0, 4.5$ m/s) と初回の衝突速度を $V = 4.0$ m/s、その後の衝突速度を $V = 4.5$ m/s として一度ずつ荷重する繰返し荷重により実験を行った。

図-2 には、試験体の形状寸法および配筋状況を支持条件毎に示している。本実験に用いた RC 版は、寸法が $2,000 \times 2,000 \times 180$ mm の単鉄筋 RC 版である。鉄筋には D16 を用い、版中央部より 150 mm 間隔で格子状に配置している。なお、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

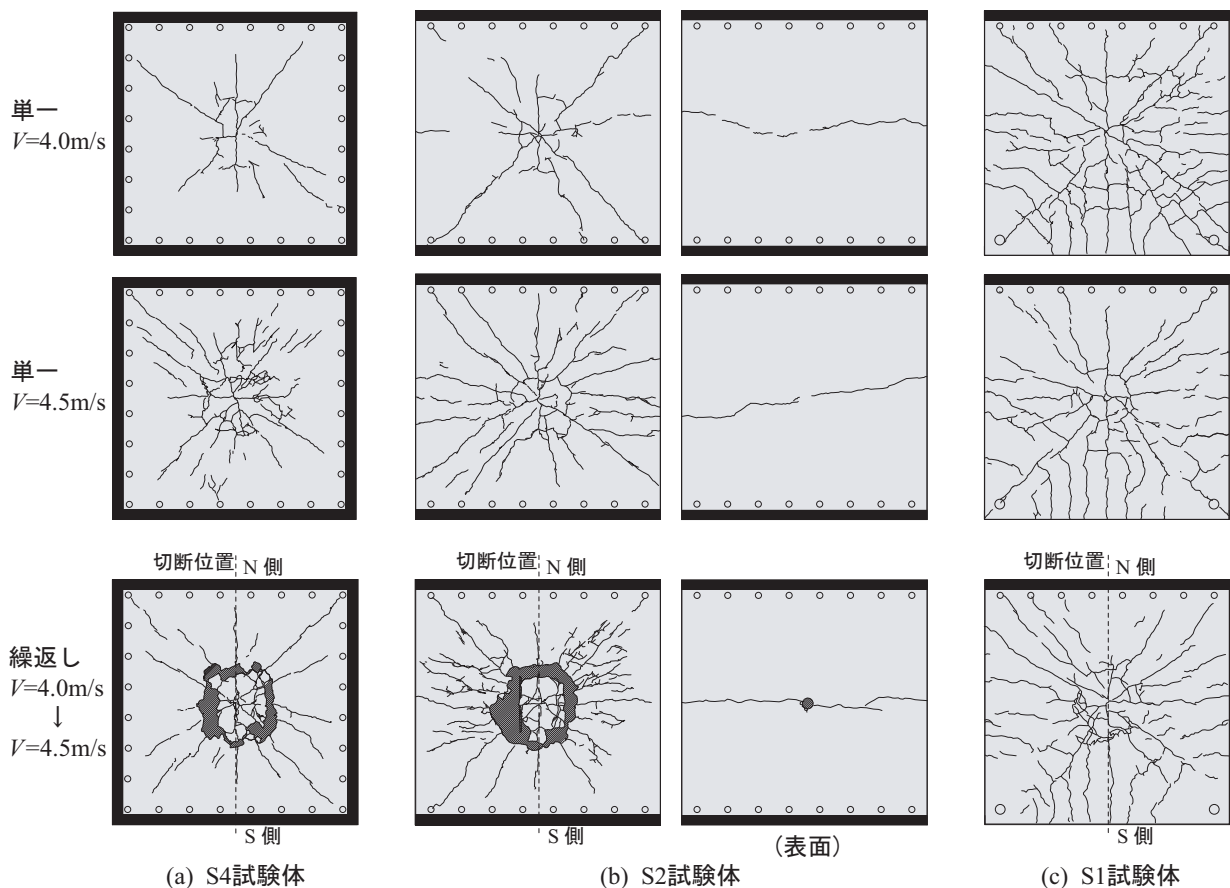


図-3 実験終了後におけるRC版裏面のひび割れ分布性状

の四辺に配置した溝型鋼に鉄筋を溶接固定している。また、二辺支持の場合には、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、他対辺では鉄筋を折り曲げて定着させている。一辺+二隅角点支持の場合には、一辺支持側の一辺にのみ溝型鋼を配置し、他の三辺では鉄筋を折り曲げて定着を図っている。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は26.6 MPaであり、鉄筋の降伏強度は383 MPaであった。

写真-1には、衝撃荷重実験の状況を支持条件毎に示している。各支持部では、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全方向に回転可能な構造となっている。

測定項目は、重錘衝撃力 P 、支点反力 R 、および荷重点直下の変位 δ （以後、変位）である。なお、支点反力は、**図-2**に示した全てのロードセルの応答値を合算した合支点反力である。実験終了後には、RC版の裏面に発生したひび割れをトレースしてひび割れ分布図を作成している。また、RC版を中心線に沿って切断し、版中央部における押抜きせん断ひび割れの発生状況を観察している。

3. 衝撃荷重実験結果

3.1 ひび割れ分布性状

図-3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。なお、S2試験体に関しては、RC版表面にもひび割れが見られたため、表面のひび割れ分布性状も合わせて示している。

図より、単一荷重実験において、S4試験体の場合には、曲げによる放射状のひび割れとねじりモーメントによる対角線状のひび割れに加え、版中央部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る。一方、S2およびS1試験体にもS4試験体と同様に放射線状、対角線状、円形状のひび割れが認められ、さらに、自由端に直交する方向の曲げひび割れが卓越していることがわかる。これらの傾向は、各RC版において衝突速度が大きい場合ほど顕著に現れている。なお、S2試験体の場合には版表面においても曲げ変形に起因するひび割れが支持辺と平行に発生している。

繰返し荷重実験の結果より、S4およびS2試験体の場合には、単一荷重時と同様の放射状および対角線状のひび割れが認められ、RC版の中央部が完全に押し抜けてかぶりコンクリートが大きく剥落していることがわかる。これに対し、S1試験体の場合には円形状のひび割れが発

単一 $V=4.0\text{m/s}$



単一 $V=4.5\text{m/s}$



繰返し $V=4.0\rightarrow 4.5\text{m/s}$



(a) S4 試験体

(b) S2 試験体

(c) S1 試験体

写真-2 実験終了後における RC 版中央部切断面のひび割れ分布性状

生し押抜きせん断破壊の兆候が見られるものの著しい損傷には至っていない。

写真-2には、実験終了後における各 RC 版の中央部切断面のひび割れ状況を示している。写真より、単一載荷実験の場合には、支持条件や衝突速度 V にかかわらず、版中央部に押抜きせん断ひび割れの発生が認められ、衝突速度 V が大きい程ひび割れの開口が大きくなっていることがわかる。ただし、S1 試験体の $V = 4.0 \text{ m/s}$ においては、他の試験体よりも押抜きせん断ひび割れの発生が明瞭ではない。

繰返し載荷実験の結果を見ると、S4 および S2 試験体の場合には RC 版中央部において押抜きせん断ひび割れが大きく開口し、下縁かぶりコンクリートが剥落していることがわかる。一方、S1 試験体の場合には、押抜きせん断ひび割れの発生が認められるものの、ひび割れの大きな開口やかぶりコンクリートの剥落には至っていない。これは、前述の裏面のひび割れ性状を含めて考察すると、S1 試験体の場合には、S4 および S2 試験体の場合よりも支持条件による版の拘束効果が小さいため、RC 版裏面のかぶりコンクリートが著しく剥落する壊滅的な押抜きせん断破壊には至らず、曲げ変形が卓越する耐衝撃挙動を示したことによるものと推察される。

3.2 時刻歴応答波形

図-4には、各試験体の重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形を示している。図より、重錘衝撃力波形は、繰返し載荷の $V = 4.0 \text{ m/s}$ と単一載荷の場合には、振幅が大きく継続時間が 3 ms 程度の第1波に振幅が小さい第2波が後続する性状を示している。繰返し載荷の $V = 4.5 \text{ m/s}$ では、第1波目終了後完全には除荷に至らず第2波目と連続した波形性状を示している。これは、前述のひび割れ分布性状からも明らかのように、RC 版が壊滅的な押抜きせん断破壊に至ったことを示すものである。なお、重錘衝撃力波形の性状に及ぼす支持条件の影響は極めて小さい。

支点反力波形は、いずれの RC 版も衝突速度 V によらず、継続時間の長い三角形波に高周波成分が合成された

波形性状を示している。S4 試験体の場合には、支点反力波形が全般的に S2 および S1 試験体に比較して早期に励起している。また、その振幅は大きくかつ主波動の継続時間は短くなる傾向にある。これは、S4 試験体の場合には、S2 および S1 試験体に比較して支持条件による版の拘束効果が大きいこと、たわみ剛性が大きくなり周期の短い波形性状を示したものと考えられる。

載荷点変位波形を見ると、単一および繰返し載荷の $V = 4.0 \text{ m/s}$ は、同様の支持条件であることより、各 RC 版の波形性状もほぼ同様であることがわかる。すなわち、S4 試験体の場合には最大振幅が 5 mm 程度、継続時間が 10 ms 程度の第一波が励起した後、減衰自由振動を示し、最終的には変位が 1 mm 程度残留している。これに対し、S2 および S1 試験体の場合には全体的な波形性状は S4 試験体の場合とほぼ同様であるものの、第1波目の最大振幅や継続時間は、S4 試験体よりも大きく長くなっている。

単一載荷の $V = 4.5 \text{ m/s}$ の場合は、いずれの RC 版も $V = 4.0 \text{ m/s}$ の場合よりも最大振幅および第一波目の継続時間が大きくなる傾向にあるものの、全体的な波形性状は同様である。ただし、S2 試験体の場合には、第一波が励起した後、正負に交番する減衰自由振動状態を示している。これは、S2 試験体の場合には、S4 および S1 試験体の場合よりも単純支持梁に近い一方の曲げ変形挙動が卓越したことによるものと考えられる。なお、実験時においては、図-3にも示しているように、RC 版表面に曲げひび割れの発生を確認している。

繰返し載荷の $V = 4.5 \text{ m/s}$ の場合には、S4 および S2 試験体において変位が急激に増加し、 15 mm 程度の残留変位が認められる。一方、S1 試験体の場合には、最大振幅が 8 mm 程度となっているものの残留変位はみられない。これは、S4 および S2 試験体の場合には壊滅的な押抜きせん断破壊に至っているのに対して、S1 試験体の場合には曲げ変形が卓越し押抜きせん断破壊に至っていないことと対応している。

3.3 各種応答値と衝突速度との関係

図-5には、重錘衝撃力 P_{ud} 、支点反力 R_{ud} 、最大変位

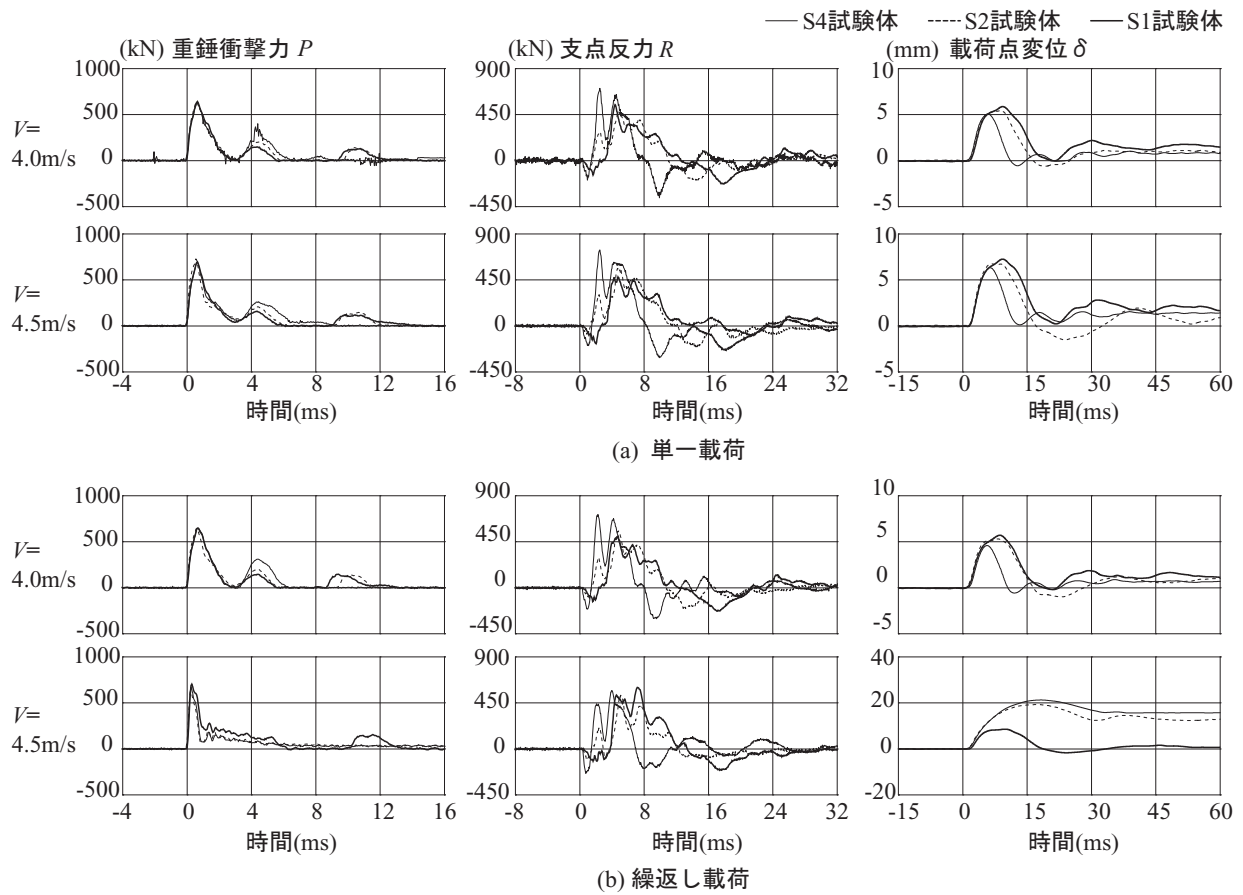


図-4 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する応答波形

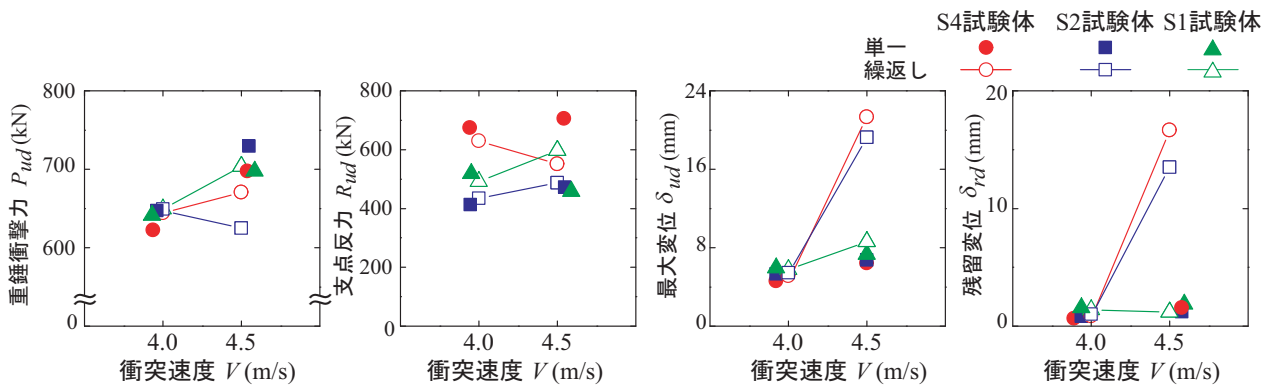


図-5 重錘衝撃力、支点反力、最大および残留変位と衝突速度との関係

δ_{ud} および 残留変位 δ_{rd} と衝突速度 V との関係を示している。なお、前述の通り、単一および繰返し載荷の $V = 4.0 \text{ m/s}$ は同一条件による実験である。また、繰返し載荷における $V = 4.5 \text{ m/s}$ の場合の最大変位及び残留変位は $V = 4.0 \text{ m/s}$ 載荷時の残留変位からの増分として示している。図より、 $V = 4.0 \text{ m/s}$ 時の各 RC 版の各応答値は、単一および繰返しの場合でほぼ対応していることより、実験の再現性は十分に確保されているものと判断される。

重錘衝撃力 P_{ud} は、S2 試験体の繰返し載荷の場合を除き衝突速度 V の増加に伴って大きくなる傾向にある。支点反力 R_{ud} は、S4 試験体の繰返し載荷および S1 試験体の単一載荷の場合を除き、いずれの場合も衝突速度 V の

増加に伴って増加している。また、単一載荷の場合において、S4 試験体の R_{ud} は S2 および S1 試験体の場合よりも大きくなる傾向にあることより、3 試験体の中では最もたわみ剛性が高いことを示唆している。これは、S4 試験体が四辺支持状態であることから類推される。一方、繰返し載荷の場合には、S4 試験体の場合に、 $V = 4.5 \text{ m/s}$ において最大支点反力が減少している。これは、前述のように S4 試験体の場合にはたわみ剛性が高く評価されることより、逆に押抜きせん断破壊の傾向を示していることが窺われる。一方で、S1 試験体の場合には、 $V = 4.5 \text{ m/s}$ 時に最も支点反力が大きい。これは、S4 および S2 試験体が押抜きせん断破壊の傾向を示しているのに対し

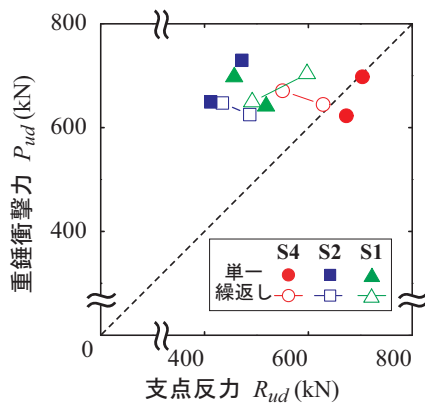


図-6 重錘衝撃力と支点反力との関係

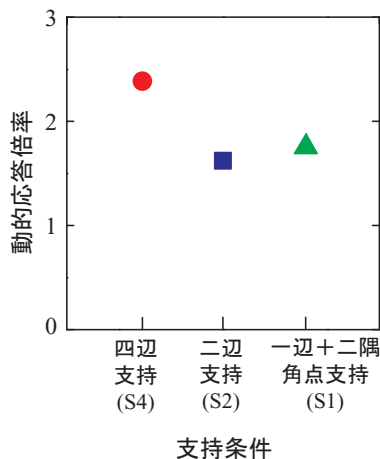


図-7 動的応答倍率

て S1 試験体の場合には曲げ変形が卓越し、著しい破壊状態に至っていないことが推察される。

最大変位 δ_{ud} および 残留変位 δ_{rd} は、ともに同様の分布性状を示している。すなわち、 $V = 4.0 \text{ m/s}$ においては、いずれの試験体もほぼ同様の値を示しているものの、 $V = 4.5 \text{ m/s}$ においては、S4 および S2 試験体の繰り返し載荷時の最大、残留変位が大きく増加している。これは、前述の通り押抜きせん断破壊が生じたためである。

図-6 には、重錘衝撃力 P_{ud} と支点反力 R_{ud} との関係を示している。図より、支点反力 R_{ud} は支持条件の影響を受ける傾向にあるのに対して、重錘衝撃力 P_{ud} は支持条件にほとんど影響されていないことがわかる。このように、支持条件が RC 版の耐衝撃性や破壊性状に影響を及ぼしているにもかかわらず、重錘衝撃力にはその影響が出現していないことより、RC 版の耐衝撃性や動的耐力は支点反力、あるいは最大変位や残留変位を用いて評価することが妥当であるものと考えられる。

図-7 には、終局近傍における支持条件と動的応答倍率の関係を示している。ここで、動的応答倍率は動的耐力

を静的耐力で除した値である。なお、動的耐力としては、各試験体から得られた単一載荷時の支点反力 R_{ud} のうち最も大きい値 (最大支点反力値) を用いた。S4, S2 および S1 試験体の最大支点反力は、それぞれ 704.8, 472.0 および 518.7 kN である。図より、S4 試験体の動的応答倍率は、2.4 程度となっており、既往の研究^{1)~2)}と対応する結果となっていることがわかる。一方、S2 および S1 試験体の場合には 1.5 程度と四辺支持である S4 試験体の場合よりも大幅に小さい。これは、1) S2 および S1 試験体の静的耐力は、四辺支持である S4 試験体と同程度であること、これに対して 2) 動的耐力は、S4 試験体の場合には押抜きせん断破壊の傾向を示していること、また、3) S2 および S1 試験体の場合には押抜きせん断破壊と曲げ破壊が連成していることより耐力が小さく評価されたこと等によるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、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三種類 (四辺支持、二辺支持、一辺+二隅角点支持) に変化させた RC 版の衝撃荷重載荷実験を行った。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) 重錘衝撃力波形は、支持条件によらずほぼ同様の性状を示す。
- 2) 支点反力および載荷点変位波形は、拘束効果の大きい四辺支持の場合に最も周期の短い波形性状を示す。
- 3) 載荷点変位波形において、二辺支持の場合には最大変位到達後、正負に交番する減衰自由振動状態に至る。
- 4) 四辺支持の場合は押抜きせん断破壊に至り、一辺+二隅角点支持の場合には、拘束度が減少し曲げ破壊が卓越してくる。
- 5) 動的応答倍率は、四辺支持の場合で 2.4 程度、二辺支持および一辺+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) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2007 年制定