

論文 支持条件の異なる版厚の大きい RC 版の耐衝撃挙動

三上 浩^{*1}・岸 徳光^{*2}・栗橋 祐介^{*3}・山口 悟^{*4}

要旨: 本研究では、支持条件の異なる RC 版の耐衝撃挙動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) に変化させた RC 版に関する載荷実験を行った。実験は、各支持条件に対して、載荷方法 (静載荷および衝撃載荷) を変化させた全 17 体の RC 版を用いて行った。その結果, 1) 本実験においては、四辺支持および二辺支持の場合が一辺+二隅角点支持の場合よりも耐衝撃性に優れていること, 2) 動的応答倍率は、四辺支持の場合で 2.4 程度, 二辺支持の場合で 2.0 程度, 一辺+二隅角点支持の場合で 1.6 程度であること, などが明らかになった。

キーワード: RC 版, 支持条件, 押抜きせん断破壊, 耐衝撃性, 動的応答倍率

1. はじめに

著者らは、これまで鉄筋コンクリート (RC) 製構造部材の中でも落石覆工頂版部などに用いられる 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 版の耐衝撃設計手法を提案している^{1),2)}。しかしながら、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。例えば、落石防護覆工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、二辺支持), あるいは一辺支持+他対辺点支持 (以後、一辺+二隅角点支持) となるのが一般的である。これより、より実用的な耐衝撃設計手法を確立するためには、種々の支持条件下における RC 版に関して検討を行うことが肝要であるものと考えられる。

このような背景より、著者らは、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 種類に変化させた矩形 RC 版の衝撃荷重載荷実験^{3)~5)} を実施した。その結果, 1) 支持条件の違いにかかわらず、RC 版は押抜きせん断破壊すること, 2) 四辺支持の場合は押抜きせん断破壊が卓越するが、一辺+二隅角点支持の場合等では、最終的には押抜きせん断破壊するものの拘束度の減少とともに曲げ破壊の傾向が顕著に表れること, などを明らかにしている。

しかしながら、これらの知見は限定的な条件下における実験的研究により得られたものである。RC 版の耐衝撃性に及ぼす支持条件の影響をより詳細に明らかにするためには RC 版の形状寸法を変化させた実験研究等、さらなるデータの蓄積が必要であるものと考えられる。特に曲げ剛性に大きく関与する版厚の影響に関しては未だ十

表-1 試験体一覧

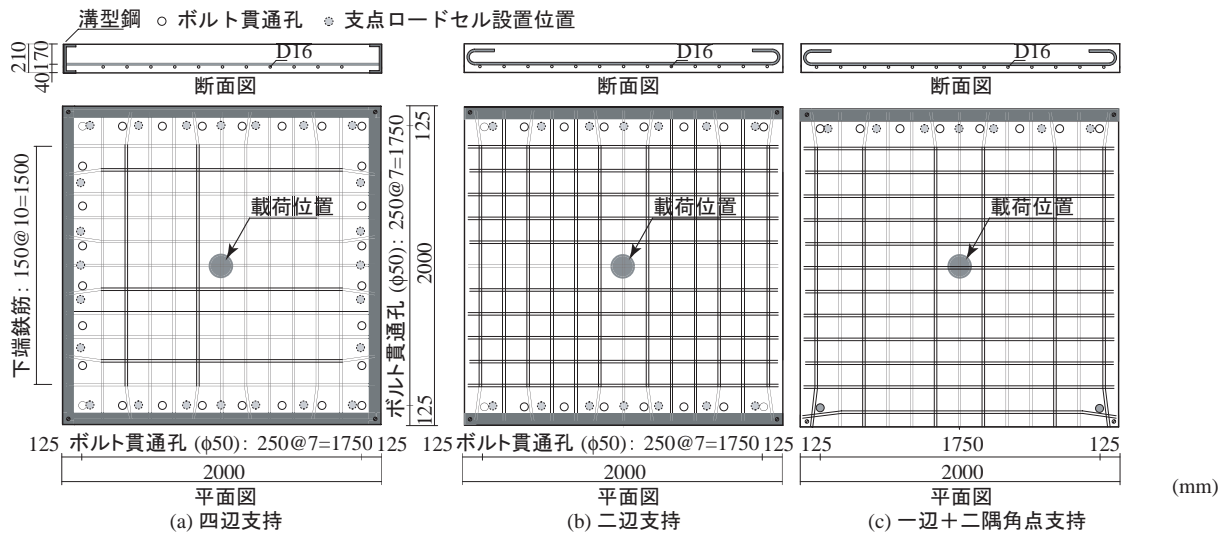
試験体名	支持条件	載荷方法	衝突速度 (m/s)	コンクリート強度 (MPa)	実測押抜きせん断耐力 (kN)	計算押抜きせん断耐力 (kN)
S4-S	四辺支持	静的	-	28.9	359.9	368.3
S4-IC		繰返し	1, 2, 3, 4, 4.5			
S4-I-5.0		単一	5.0			
S4-I-5.5			5.5			
S4-I-6.0			6.0			
S4-I-6.5			6.5			
S2-S	二辺支持	静的	-	32.0	340.6	402.5
S2-IC		繰返し	1, 2, 3, 4, 4.5			
S2-I-5.0		単一	5.0	34.5		
S2-I-5.5			5.5			
S2-I-6.0			6.0	32.0		
S2-I-6.5			6.5	32.1		
S1-S	一辺+二隅角点支持	静的	-	28.1	331.1	363.1
S1-IC		繰返し	1, 2, 3, 4, 4.5			
S1-I-5.0		単一	5.0			
S1-I-5.5			5.5			
S1-I-6.0			6.0			

*1 三井住友建設 (株) 技術研究開発本部 技術開発センター 副センター長 博 (工) (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 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 講師 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配筋状況

な検討が行われていない。

このような観点より、本研究では、版厚を 210 mm とし、支持間隔に対して相対的に版厚の大きい RC 版の耐衝撃性に及ぼす支持条件の影響を明らかにすることを目的に、重錘落下衝撃実験を行った。

2. 実験概要

表－１には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。なお、表中の計算押抜きせん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に準拠して算出したものである。試験体数は、支持条件を 3 種類、荷重方法を 3 種類に変化させた全 17 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、第二項目は荷重方法 (S: 静荷重, IC: 繰返し衝撃荷重, I: 単一衝撃荷重) を、第三項目は衝突速度を示している。

図－１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 × 2,000 × 210 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た。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。

いずれの支持条件においても支点部は、回転を許容し試験体の浮き上がりを拘束するピン支持に近い構造となっている。荷重位置は、荷重方法によらず RC 版の中央としている。静荷重実験の荷重治具には直径 90 mm、長さ

100 mm の鋼製円柱を用い、衝撃荷重実験の重錘には質量 300 kg、重錘直径 90 mm の鋼製重錘を用いた。衝撃荷重実験における荷重方法は、初期および増分衝突速度を 1 m/s とする漸増繰返し衝撃荷重 (以後、繰返し荷重) および所定の衝突速度で一度だけ荷重する単一衝撃荷重 (以後、単一荷重) である。なお、静荷重実験では、荷重が急激に低下した時点を終局と定義した。衝撃荷重実験では、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した状態を終局と定義した。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 28 ～ 35 MPa であり、鉄筋の降伏強度は、395 MPa であった。静荷重実験の測定項目は、荷重および荷重点直下の鉛直方向変位 (以後、変位) である。衝撃荷重実験の測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力)、および荷重点直下の鉛直方向変位 δ (以後、変位) であり、各々、衝撃荷重実験用ロードセルおよび非接触式レーザ変位計にて測定した。また、荷重方法によらず実験終了後には、RC 版の裏面を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

3. 実験結果

3.1 静荷重実験結果

(1) 荷重－変位関係

図－２には、各支持条件における試験体の荷重－変位関係を示している。図より、いずれの試験体も最大荷重到達後に荷重が急激に低下していることから、最終的に押抜きせん断破壊により終局に至っていることがうかがわれる。

最大荷重は、S4-S 試験体の場合が最も大きく、次いで S2-S、S1-S 試験体の順になっていること分かる。ただし、いずれの試験体も押抜きせん断破壊により終局に至っているため、支持条件による差異は顕著ではない。なお、前

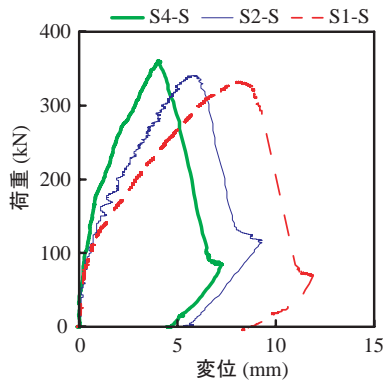


図-2 荷重-変位関係

述の表-1に示しているとおり、各試験体の実測押抜きせん断耐力は計算押抜きせん断耐力とほぼ対応している。

最大荷重時変位は、S4-S試験体の場合が最も小さく、S2-S、S1-S試験体の順になっている。これは、支持条件による拘束度が小さい場合ほど曲げ変形が卓越してくることによるものと考えられる。

以上のことから、支持条件が最大荷重に及ぼす影響は小さいものの、最大荷重時変位に及ぼす影響は大きいことが明らかとなった。

(2) ひび割れ分布性状

図-3には、静載荷実験終了後の版裏面のひび割れ性状を示している。図より、いずれの試験体も版中央部に円形状のひび割れが発生していることから、支持条件の違いによらず押抜きせん断破壊によって終局に至ったことがうかがわれる。S4試験体の場合には、円形状のひび割れの他に曲げモーメントに起因する放射状のひび割れが確認できる。また、S2、S1試験体の場合には、S4試験体に見られた円形状のひび割れおよび放射状のひび割れの他、自由端に直交する形で曲げひび割れが発生している。これは、支持条件による拘束度が小さい場合には、押抜きせん断破壊に曲げ破壊が連成することによるものと推察される。

3.2 衝撃荷重載荷実験結果

(1) 時刻歴応答波形

図-4には、(a)繰返し載荷および(b)単一載荷実験に関する各試験体の重錘衝撃力、支点反力、および変位の時刻歴応答波形を示す。なお、S4試験体の(a)繰返し載荷において、衝突速度 $V = 4.5$ m/sの場合の載荷点変位は、載荷点近傍のかぶりコンクリートが大きく剥落したため測定不能であり、検討から除外している。

図-4(a)の繰返し載荷における重錘衝撃力波形は、支持条件にかかわらずほぼ同様の性状を示していることがわかる。すなわち、振幅が大きく継続時間が3 ms程度の第1波に振幅の小さい第2波および第3波が後続する性状を示している。ここで、第2波および第3波は重錘の再衝突によるものである。また、衝突速度 $V = 4.5$ m/sで

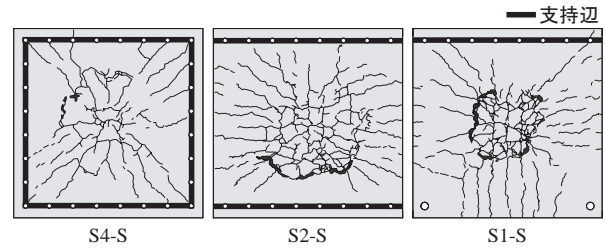


図-3 静載荷実験終了後の裏面ひび割れ分布性状

は、第2波目のピークが消失し第1波に連続する波形性状となっている。これは、RC版が押抜きせん断破壊により抵抗力を失っていることを示している。

支点反力波形は、いずれのRC版も衝突速度によらず、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、全般的にS2、S1試験体に比較して支点反力が早期に励起し、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、S1試験体に比較して拘束度が強く変形しにくいと推察される。

変位波形は、衝突速度 $V = 1 \sim 4$ m/sでは、支持条件によらず衝撃荷重載荷初期に振幅の大きな第1波が励起した後、減衰自由振動状態に至る性状を示し、残留変位はほぼ零である。また、衝突速度 $V = 4.5$ m/sでは変位が残留している。これは、押抜きせん断破壊が生じたことによるものである。

図-4(b)の単一載荷の場合には、重錘衝撃力波形は、繰返し載荷の低衝突速度の場合と同様に3波で構成されている。また、S4、S2試験体に関しては、衝突速度 $V = 6.5$ m/sにおいて、第2波目のピークが消失し第1波目に連続する波形となっている。これは、繰返し載荷の場合と同様にRC版が押抜きせん断破壊により抵抗力を失っていることを示している。一方、S1試験体に関しては、衝突速度 $V = 6.0$ m/sにおいて、前述したS4、S2試験体の衝突速度 $V = 6.5$ m/s時に類似した波形性状を示している。このことより、S1試験体は衝突速度 $V = 6.0$ m/s時点において押抜きせん断破壊に至っていることが推察される。

支点反力波形は、継続時間の長い三角形波に高周波成分が合成された性状を示しており、繰返し載荷の場合と同様の波形性状を示している。

載荷点変位波形は、S4、S1試験体の場合において類似の性状を示していることが分かる。すなわち、衝突速度 $V = 5.0, 5.5$ m/sにおいては、衝撃荷重載荷初期に正弦半波状の振幅の大きな波形が励起し、その後変位が多少残留する傾向にある。一方、S2試験体の場合には、S4、S1試験体に比較して大きな負変位が生じている。これは、版がリバウンドしていることを示しており、S2試験体の変形モードがS4、S1試験体に比較して1方向曲げが卓越するためと推察される。また、S2試験体は衝突速度 $V =$

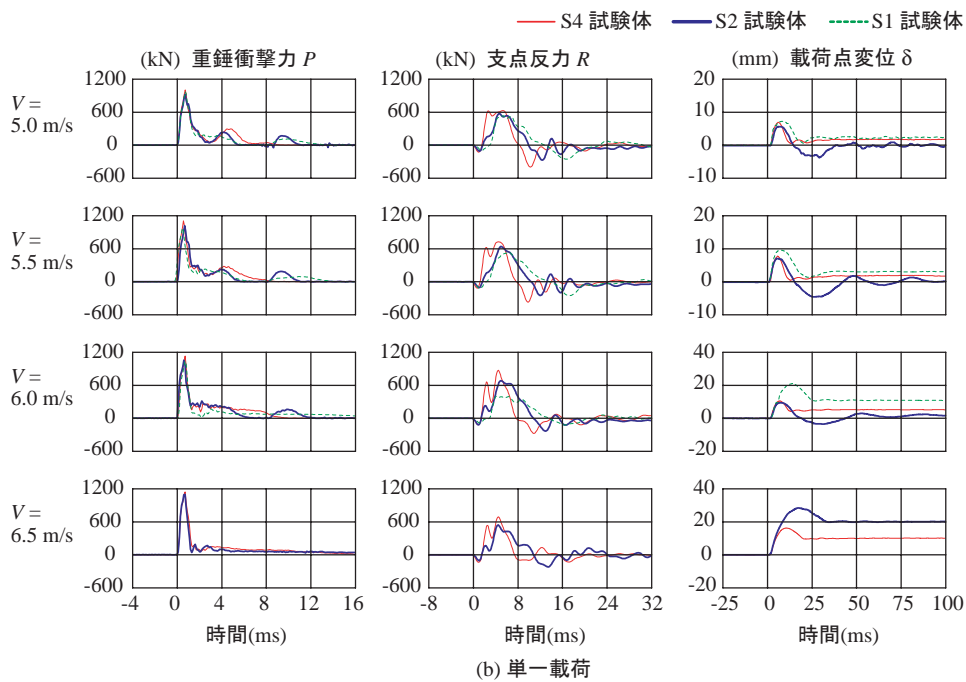
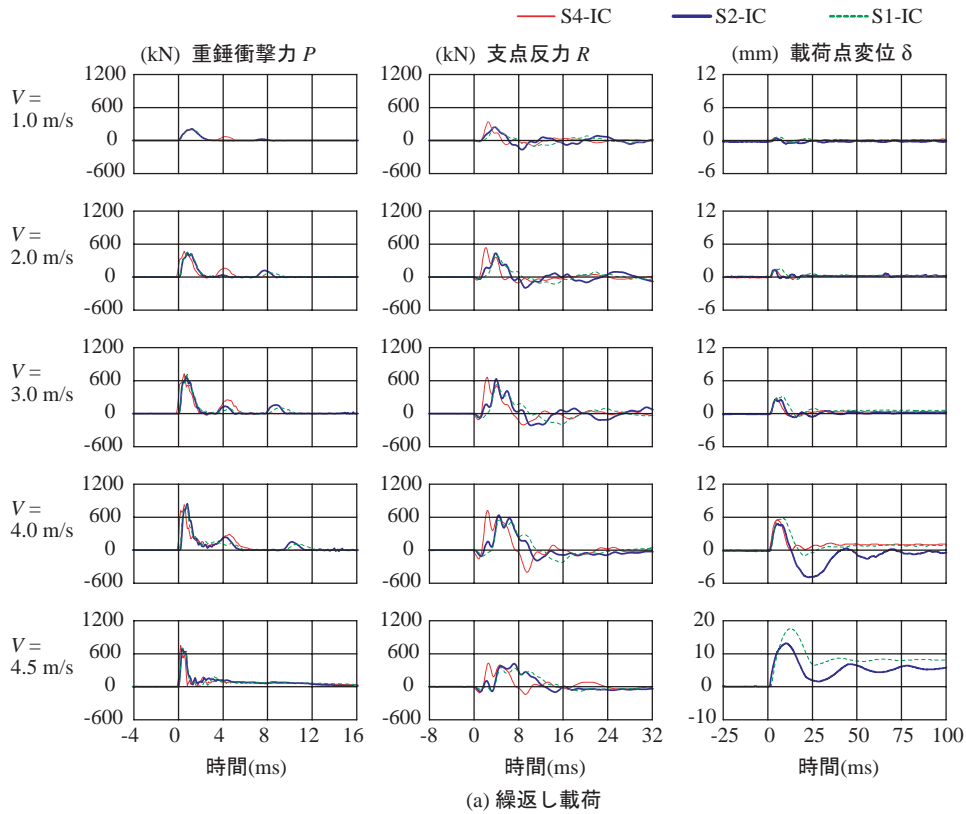


図-4 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形

6.5 m/sにおいて振幅の大きな第1波が励起した後、変位が大きく残留している。これは、RC版が押抜きせん断破壊に至ったことによるものである。一方、S4、S1試験体の場合には、衝突速度によらず振幅の大きな第1波目が励起した後、変位が残留している。すなわち、S4、S1試験体は共に衝突速度 $V = 5.0$ m/s で押抜きせん断破壊に伴うひび割れが生じていることがうかがわれる。これらの試験体は、共に衝突速度の増加に伴って最大変位および

残留変位が増加し、S4試験体は衝突速度 $V = 6.5$ m/s で、S1試験体は衝突速度 $V = 6.0$ m/s で変位が大きく残留し、著しい押抜きせん断破壊に至っている。

以上のことから、四辺支持や一辺+二隅角点支持の場合は、多方向曲げとなり曲げ剛性が大きく評価されるため、押抜きせん断に伴う弾塑性的な性状を示す。一方、二辺支持の場合には1方向曲げが卓越し、曲げ剛性が相対的に小さいことより、終局に至らない状態では曲げ変形

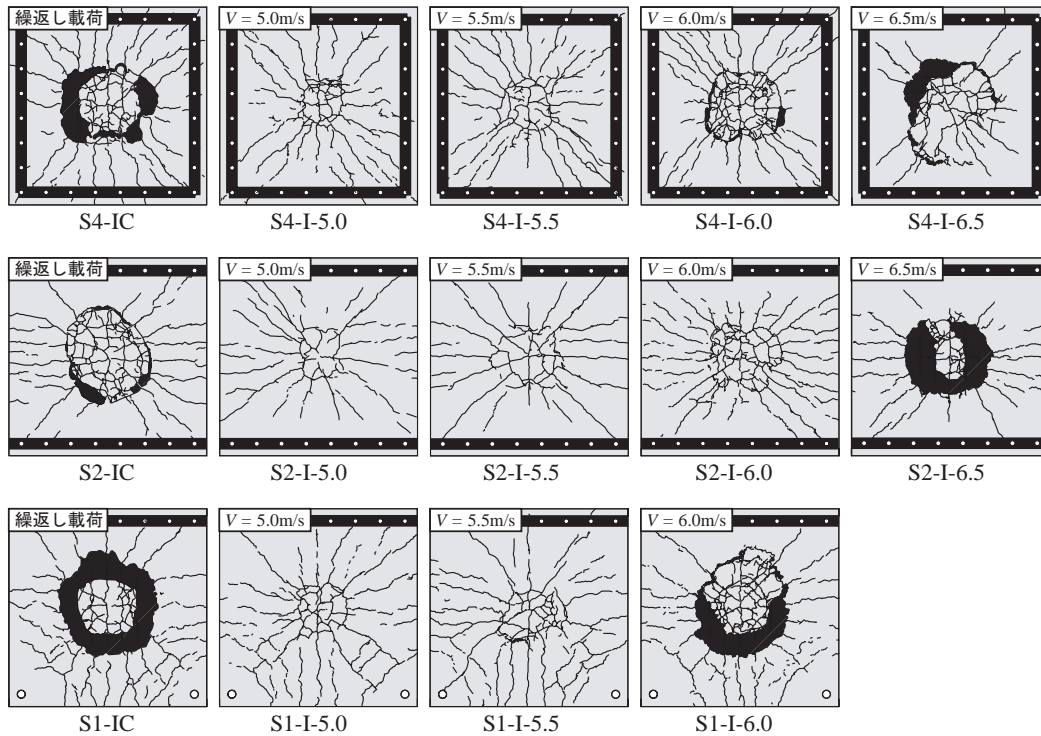


図-5 衝撃荷重実験終了後における各 RC 版裏面のひび割れ分布性状

の応答が卓越することが明らかになった。

(2) ひび割れ分布性状

図-5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。図より、S4 試験体の場合には、曲げモーメントに起因する放射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みられる。S2, S1 試験体の場合には、放射状のひび割れに加え、自由端に直交する形で曲げひび割れが発生している。また、版中央部には S4 試験体と同様、円形状のひび割れが見られる。円形状のひび割れは、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ことが分かる。

また、S1 試験体は衝突速度 $V = 6.0 \text{ m/s}$ でかぶりコンクリートが剥落しているのに対し、S4, S2 試験体でかぶりコンクリートが剥落した衝突速度は $V = 6.5 \text{ m/s}$ であった。このことから、単一載荷の場合には、S4, S2 試験体は S1 試験体よりも耐衝撃性に優れていることがうかがわれる。

3.3 各種応答値と衝突速度との関係

図-6には、最大重錘衝撃力 P_{ud} 、最大支点反力 R_{ud} および最大応答変位 δ_{ud} と衝突速度 V との関係を示している。図より最大重錘衝撃力 P_{ud} は、載荷方法および衝突速度によらず S4 試験体で最も大きな値を示している。しかしながら、最大重錘衝撃力 P_{ud} への支持条件の影響は小さい。また、衝突速度の増加に対応して増大する傾向にある。ただし、繰返し載荷において押抜きせん断破壊を生じた衝突速度 $V = 4.5 \text{ m/s}$ では、最大重錘衝撃力 P_{ud} が低下している。

最大支点反力 R_{ud} は、載荷方法および衝突速度によらず、S4 試験体で最も大きな値を示している。繰返し載荷の場合は支持条件によらず衝突速度 $V = 4.5 \text{ m/s}$ で最大値を示している。また、単一載荷の場合は S4, S2 試験体は共に衝突速度 $V = 6.0 \text{ m/s}$ で最大値を示している。一方、S1 試験体は衝突速度 $V = 5.0 \text{ m/s}$ で最大値を示し、衝突速度の増加に伴って減少する傾向にあることが分かる。このことより、S1 試験体は衝突速度 $V = 5.0 \text{ m/s}$ 時点において押抜きせん断破壊面が形成されたものと推察される。ここで、最大支点反力 R_{ud} が他の計測値に比べて支持条件の影響を受けやすいのは、慣性力や応力波の影響も含めて感度良く計測されているためと推察される。

また、最大支点反力 R_{ud} は、載荷方法および支持条件によらず押抜きせん断破壊により、円形状のひび割れ内部におけるかぶりコンクリートが剥落した衝突速度で大きく減少している。このように、最大支点反力 R_{ud} は最大重錘衝撃力 P_{ud} よりも RC 版の剛性や損傷を感度良く反映していることより、RC 版の動的耐力の評価には最大支点反力 R_{ud} を用いることが適切であるものと考えられる。

最大応答変位 δ_{ud} は、載荷方法及び支持条件によらず、衝突速度の増加に伴って大きくなる傾向を示し、衝突速度が等しい場合にはほぼ同様の値を示している。また、押抜きせん断破壊を生じた衝突速度において、最大応答変位 δ_{ud} は急激に増大している。なお、最大応答変位 δ_{ud} は曲げ成分と押抜きせん断成分が加算されたものであるが、支持条件によらず版の曲げ剛性が同一であること、および破壊が支持条件によらず押抜きせん断破壊型である

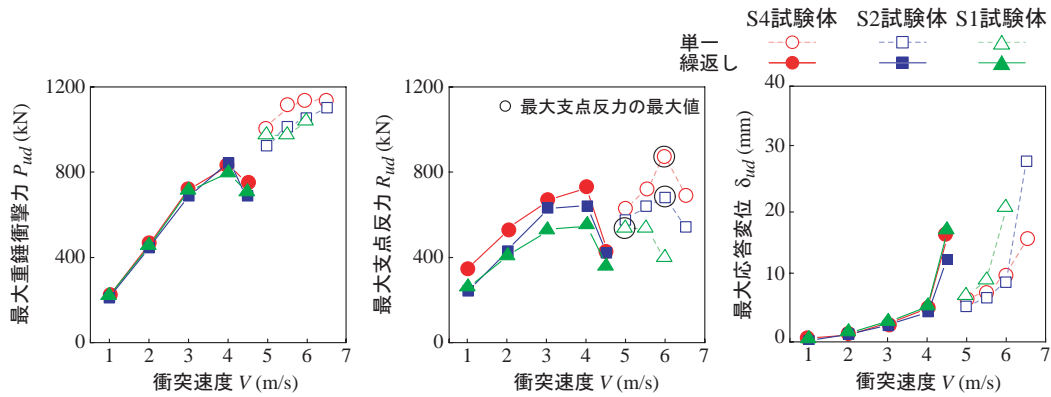


図-6 各種応答値

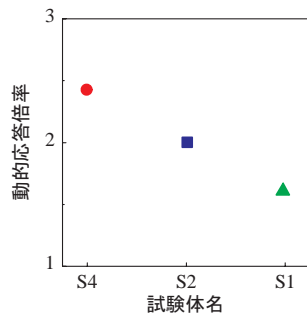


図-7 動的応答倍率

ため、特に損傷が累積する繰返し载荷では支持条件が最大応答変位 δ_{ud} に及ぼす影響は軽微となっている。

3.4 動的応答倍率

図-7には今回の実験で得られた動的応答倍率を示している。本研究では、動的応答倍率は図-6中に○をつけた最大支点反力の最大値を表-1で示した実測押抜きせん断耐力で除して評価することにした。なお、著者らの既往の研究²⁾では、動的応答倍率を用いた耐衝撃設計法を提案している。図より、動的応答倍率はS4試験体では2.4程度、S2試験体では2.0程度を示し、既往の研究²⁾と対応する結果となっていることが確認された。一方、S1試験体の場合は1.6程度とS4、S2試験体よりも大幅に小さな値を示している。これは、S1試験体の場合には、実測押抜きせん断耐力がS4、S2試験体と同程度であるものの、曲げ変形が卓越する支持条件であるため、支持部に伝達される衝撃力(支点反力)が小さく、結果的に動的応答倍率も小さく評価されたものと推察される。

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と版厚の影響を検討することを目的に、版厚を210mmと比較的厚くした場合において支持条件を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版の静载荷および衝撃荷重载荷実験を行った。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) RC版の応答変位波形から、四辺支持や一辺+二隅角

点支持の場合は、多方向曲げとなるため曲げ剛性が大きく評価され、押抜きせん断破壊に伴う弾塑性的な性状を示す。一方、二辺支持の場合は1方向曲げが卓越するため、曲げ剛性が相対的に小さく評価され、全体として曲げ変形の応答を示すことが明らかとなった。

- 2) ひび割れ性状からみたRC版の耐衝撃性は、四辺支持および二辺支持の場合が一辺+二隅角点支持の場合よりも優れている。
- 3) RC版の最大支点反力は、ある衝突速度で最大値を示した後、衝突速度の増加に伴い減少する傾向にある。
- 4) 動的応答倍率は、四辺支持の場合で2.4、二辺支持で2.0、一辺+二隅角点支持で1.6であり、四辺支持の場合が最も大きい。

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) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介: 支持条件の異なるRC版の静的および重錘荷重载荷実験, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1160-1168, 2010.3
- 4) 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, pp.745-750, 2010
- 5) 又坂 文章, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介: 支持条件の異なるRC版の静的および衝撃荷重载荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.799-804, 2011
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2007年制定