

種々の支持条件下における版厚の大きい RC 版の衝撃耐荷挙動

Impact resistant behavior of relatively thick RC slabs with various support conditions

三井住友建設（株） ○フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 製の面材に静的かつ局所的に荷重が作用すると押抜きせん断破壊を示すことはよく知られている。著者らは、落石覆工頂版部などに用いられる RC 版の合理的な耐衝撃設計法を確立することを目的に、四辺支持 RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を行い、設計式を提案している^{1),2)}。

しかしながら、実構造物を想定した、種々の支持条件を有する場合の設計法に関しては未だ提案には至っていない。このようなことから、著者らは、支持条件を四辺支持、一対辺単純支持他対辺自由 (以後、二辺支持)、一辺単純支持二隅角点支持 (以後、一辺支持+二隅角点支持) の3種類に変化させ、版厚を180 mmとした2 m 四方の矩形 RC 版に関する衝撃荷重載荷実験³⁾を実施した。その結果、1) 支持条件の違いに関わらず 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、二辺支持および一辺支持+二隅角点支持の場合には、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共に徐々に曲げ破壊の傾向が表れること等を明らかにした。しかしながら、版厚が大きい場合における耐衝撃特性は明らかになっていない。

本研究では、版厚が大きい場合における RC 版の衝撃耐荷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、衝撃荷重載荷実験を行った。なお、本研究では、2 m 四方の RC 版に対して 210 mm の版厚を設定した。

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、別途実施した静載荷実験の結果も支持条件ごとに示している。試験体数は、支持条件を3種類に変化させた全11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、第二項目は衝突速度を示している。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。衝撃荷重載荷位置は 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

表-1 実験ケース一覧

試験体名	支持条件	衝突速度 (m/s)	コンクリート強度 (MPa)	静的耐力 (kN)
S4-5.0	四辺支持	5.0	28.9	359.9
S4-5.5		5.5	28.9	
S4-6.0		6.0	28.9	
S4-6.5		6.5	32.1	
S2-5.0	二辺支持	5.0	34.5	340.6
S2-5.5		5.5	34.5	
S2-6.0		6.0	32.0	
S2-6.5		6.5	32.1	
S1-5.0	一辺+二隅角点支持	5.0	28.1	331.1
S1-5.5		5.5	28.1	
S1-6.0		6.0	28.1	

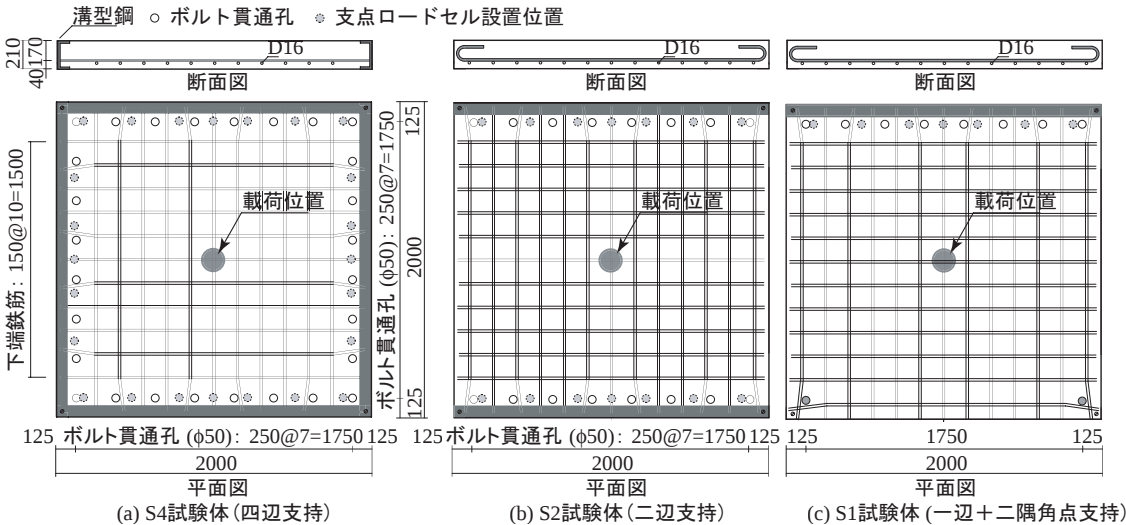
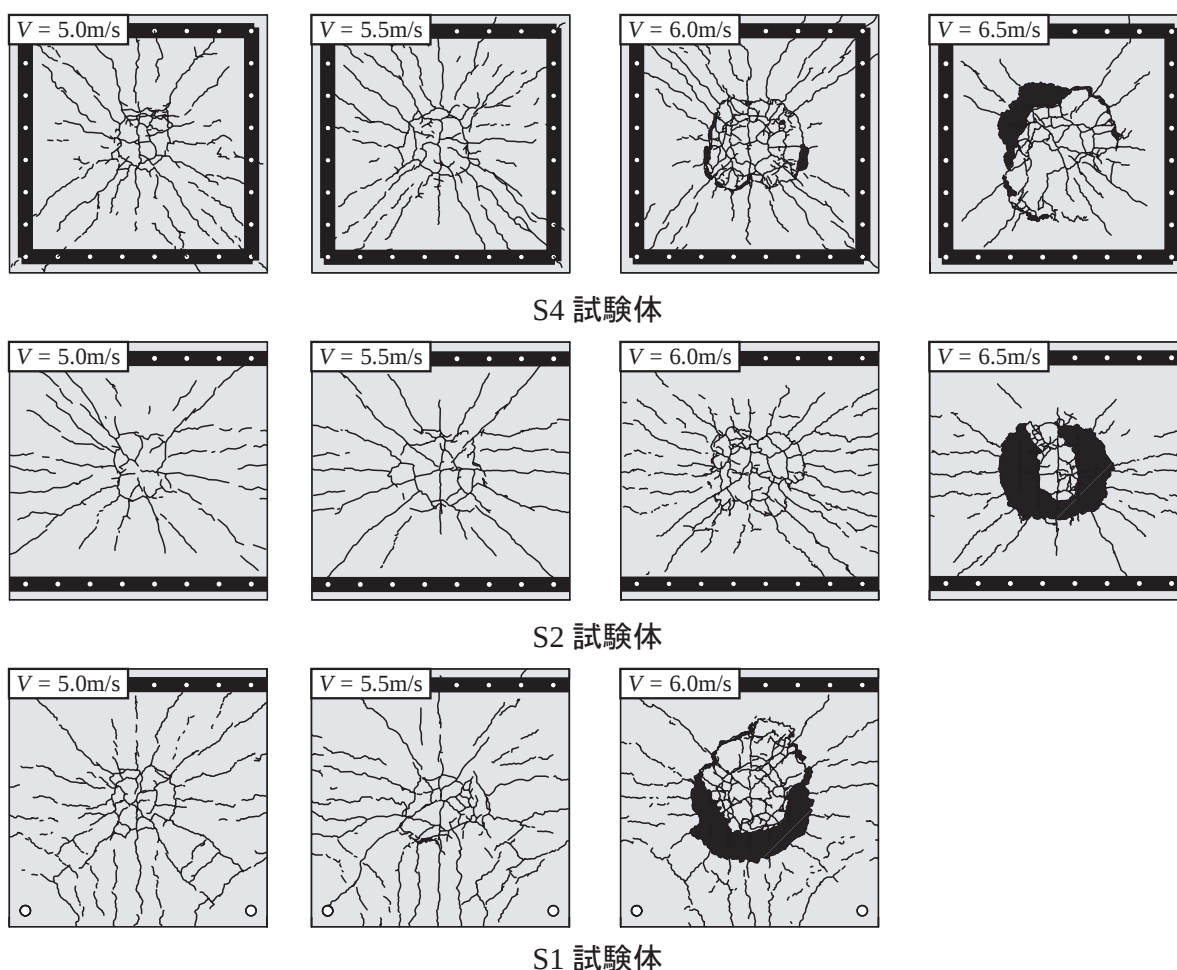


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況



図－２ 実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状

下させる単一載荷により衝撃荷重載荷実験を行った。なお、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した状態を終局と定義した。本実験では、S1 試験体は衝突速度 $V = 6.0 \text{ m/s}$ で、S4/2 試験体は共に $V = 6.5 \text{ m/s}$ で終局に至った。

図－１には、試験体の形状寸法および配筋状況を支持条件ごとに示している。本実験に用いた RC 版は、寸法が $2,000 \times 2,000 \times 210 \text{ mm}$ 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。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は $28.1 \sim 34.5 \text{ MPa}$ であり、鉄筋の降伏強度は 395 MPa であった。測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力) および載荷点直下の変位 δ (以後、変位) である。また、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. 衝撃荷重載荷実験結果

3.1 ひび割れ分布性状

図－２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。S2/1 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、S4/2 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、S4/2 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。

3.2 時刻歴応答波形

図－３には、各種時刻歴応答波形を示している。図より、重錘衝撃力波形は、支持条件に関わらずほぼ同様の性状を示していることが分かる。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。また、S4/2 試験

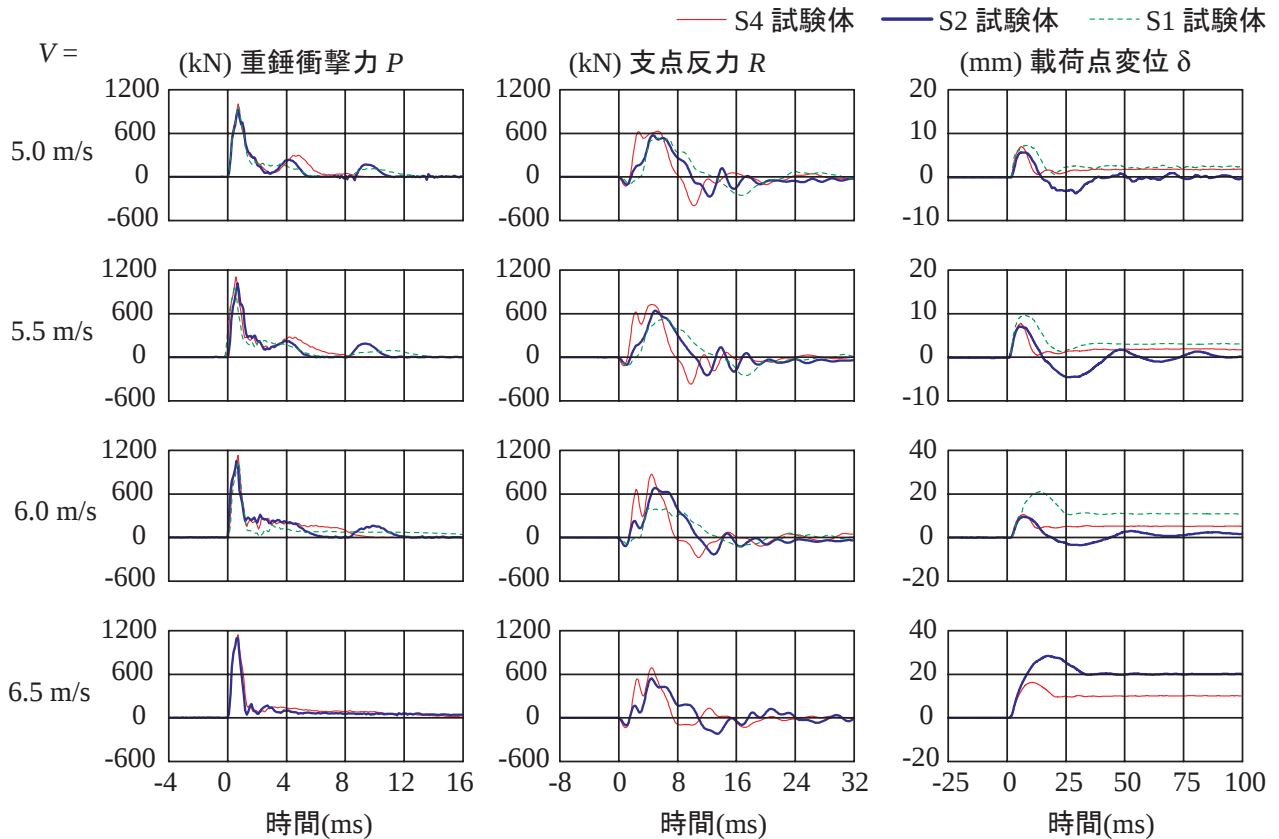


図-3 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する応答波形

体については衝突速度 $V = 6.5 \text{ m/s}$ においては、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、ひび割れ分布から明らかなように、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試験体の場合には、衝突速度 $V = 6.0 \text{ m/s}$ において前述した S4/2試験体の $V = 6.5 \text{ m/s}$ 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 $V = 6.0 \text{ m/s}$ 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、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S2/1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、S2/1試験体に比較してたわみ剛性が高いことによるものと考えられる。

載荷点変位波形は、S4/1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 $V = 5.0, 5.5 \text{ m/s}$ においては、衝突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、S4/1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S4/1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 $V = 6.5 \text{ m/s}$ 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

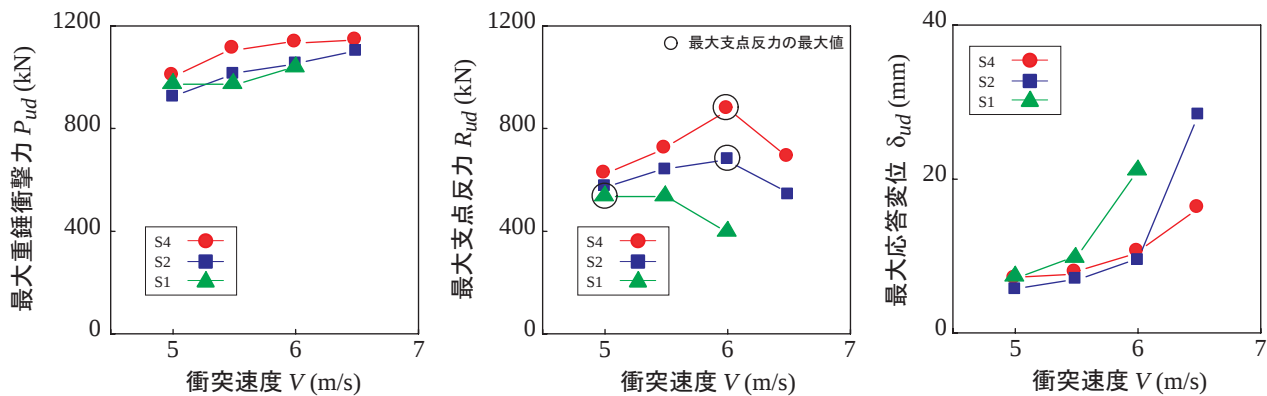
る。これは、RC版が押抜きせん断破壊に至ったことによるものである。一方、S4/1試験体の場合には、衝突速度によらず振幅の大きな第1波目が励起した後、変位が残留している。すなわち、S4/1試験体は共に $V = 5.0 \text{ m/s}$ で押抜きせん断破壊に伴うひび割れが生じていることがうかがわれる。これらの試験体は、共に衝突速度の増加に伴って最大変位および残留変位が増加し、S4試験体は $V = 6.5 \text{ m/s}$ で、S1試験体は $V = 6.0 \text{ m/s}$ で変位が大きく残留し、著しい押抜きせん断破壊に至っている。

以上のことから、四辺支持や一辺+二隅角点支持の場合は、2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の応答が卓越することが明らかになった。

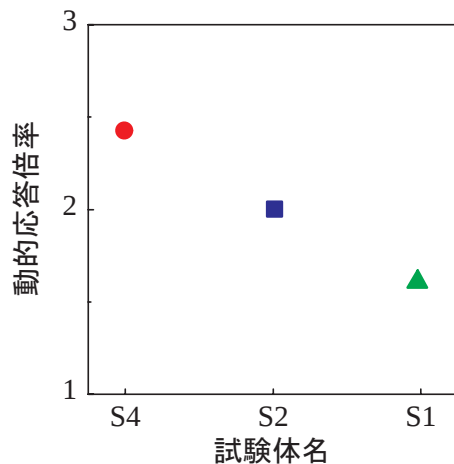
3.3 各種応答値と衝突速度との関係

図-4には、重錘衝撃力 P_{ud} 、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、重錘衝撃力 P_{ud} はS4試験体が最も大きく、S1試験体が最も小さい値を示している。また、支持条件に関わらず衝突速度の増加に対応して増大する傾向にある。

支点反力 R_{ud} は、衝突速度によらず、S4試験体が最も大きな値を示し、S4/2試験体は共に $V = 6.0 \text{ m/s}$ で最大値を示している。一方、S1試験体は $V = 5.0 \text{ m/s}$ 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 $V = 5.0 \text{ m/s}$ 時点にお



図－4 各種応答値



図－5 動的応答倍率

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。なお、支点反力 R_{ud} は、支持条件に関わ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。

最大応答変位 δ_{ud} は、支持条件に関わ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。なお、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。

3.4 動的応答倍率

図－5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－4中に○をつけた最大支点反力を表－1で示した静的耐力で除して評価することにした。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S4/2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、静的耐力がS4/2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210 mmと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版の衝撃荷重実験を行った。本研究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、2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、全体としての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実験, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1160-1168, 2010.3
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2007年制定