論文 支持条件の異なる RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験

又坂 文章*1・岸 徳光*2・三上 浩*3・栗橋 祐介*4

要旨: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,漸増繰返し衝撃載荷および単一衝撃載荷)を変化させた全15体のRC版を 用いて行った。その結果,1)本実験においては,二辺支持および一辺+二隅角点支持の場合が四辺支持の場 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2.2程度,二辺支持および一辺+ 二隅角点支持の場合で1.7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、これらの実験的研究は、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)もし くは一辺支持+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など、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いて検討す る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),4)}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ことより,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,上述の既往の 研究成果の場合よりも版厚を小さくすることによって支持 条件の変化の影響が,より顕著に現れるものと考えられる。

このような観点より,本研究では,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,RC版 に関する重錘落下衝撃実験を行った。なお,版厚は既往の 研究³⁾の場合(180 mm)よりも小さく設定した。

試験体名	支持 条件	コンクリ ート強度 (MPa)	載荷 方法	衝突 速度 (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 <i>P_{us}</i> (kN) (2)	(2)/(1)
S4-S	四辺 支持	27.3	静的	-	167.2	195.2	1.17
S4-II			繰返し	1, 2, 3, 4			
S4-IS-3.5 / 4.0 / 4.5			単一	3.5, 4.0, 4.5			
S2-S	二辺 支持	29.4	静的	-	173.5	186.0	1.07
S2-II			繰返し	1, 2, 3, 4			
S2-IS-4.0 / 4.5 / 5.0			単一	4.0, 4.5, 5.0			
S1-S	一辺+二隅角点支持	30.0	静的	-	175.3	177.3	1.01
S1-II			繰返し	1, 2, 3, 4			
S1-IS-4.0 / 4.5 / 5.0			単一	4.0, 4.5, 5.0			

表-1 試験体一覧

*1 鹿島建設(株) (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)

*4 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 講師 博(工) (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)



(a) 四辺支持

写真-1 実験状況

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。 なお、表中の計算押抜きせん断耐力 Vpcd は、コンクリート 標準示方書 [設計編]5) 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、載荷方法を5種類に変化さ せた全15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, 第二項目は載荷方法 (S:静載荷, II:繰返し載 荷, IS: 単一載荷) を示している。また、単一載荷の場合の 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、写 真-1には、静的および衝撃載荷実験の状況を支持条件毎 に示している。本実験に用いた RC 版は, 寸法が 2,000 × 2,000 × 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150mm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 版の両支点側の一対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。載荷位置は、載荷方法によらず RC 版の中央として いる。重錘には、質量 300 kg, 重錘直径 90 mm の鋼製重錘 を用いた。衝撃荷重載荷実験における載荷方法は、初期お よび増分衝突速度を1m/sとする漸増繰返し衝撃荷重載荷 (以後,繰返し載荷)および所定の衝突速度で一度だけ載荷 する単一衝撃荷重載荷(以後,単一載荷)である。本実験で は、押抜きせん断破壊により RC 版裏面に幅 2 mm 以上の 明瞭なひび割れが形成され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 27.3~30.0 MPa であり,鉄筋の降伏強度は, 393 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 よび載荷点直下の鉛直方向変位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. 実験結果

3.1 静載荷実験結果

(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。図には、各試験体の平均コンクリート強 度 (28.9 MPa) を用い、土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾ に準拠して算出した計算押抜きせん断耐力 Vpcd も併せて示 している。図より、いずれの試験体も最大荷重到達後に荷



図-3 静載荷実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状



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伺われる。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。ただし,支持条件による差異は小さい。 また,これらの最大荷重は全て計算押抜きせん断耐力を上 回っている。最大荷重時変位は,S4-S 試験体の場合が最も 小さく,S2/1-S 試験体は類似の性状を示している。

(2) ひび割れ分布性状

図-3には、静載荷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伺われる。 S4 試験体の場合には、円形状のひび割れの他にねじりモー メントに起因する放射状のひび割れが僅かに確認できる。 また、S2/1 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、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。

3.2 衝擊荷重載荷実験結果

(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 歴応答波形を示し,図-4(a)の繰返し載荷の場合には重錘 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、衝突速度 $V=1\sim3$ m/s では、振幅が大きく継続時間が3 msec 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、衝突 速度V=4 m/s では、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 ん断破壊に至ったことを示しているものと考えられる。

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,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。

変位波形は、衝突速度 $V = 1 \sim 3$ 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ている。なお、残留変 位はほぼ零である。また、衝突速度V = 4 m/s では S4 試験 体の変位が急激に増加している。これは、後述の通り押抜 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,S2/1 試験体の衝突速度V = 4,4.5 m/s 場合にも繰り返し載荷の 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 および S2/1 試験体の衝突速度V = 5.0 m/s の場合には, 第2波目のピークが消失し第1波目に連続する波形を示し ていることより,押抜きせん断破壊に至っていることが伺 われる。

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。

変位波形は、S4 試験体の場合には、衝突速度V = 3.5, 4.0 m/s では、振幅の大きな第1波目が励起した後、過減衰的な性状を示し残留変位に収束している。また、衝突速度V = 4.5 m/s では変位が急激に増大した後、ほとんど復元せずに大きく残留している。これは、S4 試験体はV = 3.5 m/sで、押抜きせん断破壊を伴う損傷状態にあり、衝突速度の



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

増加に伴って最大変位および残留変位が増大し、V = 4.5 m/sで著しい押抜きせん断破壊に至ったことを示している。一方、S2/1 試験体の場合には、衝突速度V = 4.0、4.5 m/sでは繰返し載荷の場合と同様に振幅の大きな第1波が励起した後、減衰自由振動状態に至っている。また、衝突速度V = 5.0 m/sでは、変位が急増しほとんど復元せずに大きく残留している。このことから押抜きせん断破壊に至っていることがわかる。

以上のことから,各応答波形に及ぼす支持条件の影響を 整理すると,以下の通りである。すなわち,1)重錘衝撃力 波形は,支持条件によらず類似の性状を示し,押抜きせん 断破壊に伴い第2波目が消失する,2)支点反力波形は,S2/1 試験体でほぼ同様の性状を示し、S4 試験体の場合には主波 動継続時間がS2/1 試験体に比べて著しく短い、3) 変位波形 もS2/1 試験体でほぼ同様の性状を示す。また、S4 試験体 の場合には、主波動継続時間が他の支持条件に比べ短く、 また低い衝突速度で押抜きせん断破壊に至るため大きな変 位振幅および残留変位を示す。

(2) ひび割れ分布性状

図-5には、衝撃荷重載荷終了後における RC 版裏面の ひび割れ分布性状を示している。図より、いずれの RC 版 においても中央部に押抜きせん断破壊に起因する円形状の ひび割れが確認できる。繰返し載荷の場合には、S4 試験 体では、かぶりコンクリートが著しく剥落しているのに対



図-5 衝撃荷重載荷実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状

し、S2/1 試験体では、かぶりコンクリートは剥落していない。また、単一載荷の場合には、円形状のひび割れ、放射状のひび割れが衝突速度が大きい場合ほど顕著に現れる傾向にある。衝突速度V = 4.5 m/sでは、S4 試験体の場合にはかぶりコンクリートが剥落しているのに対し、S2/1 試験体の場合にはかぶりコンクリートの剥落に伴う押抜きせん断破壊の性状は見られない。このことより、本実験においては、S2/1 試験体の場合が S4 試験体よりも耐衝撃性に優れているものと判断される。

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,最大支持条件や載荷方法の違い によらず衝突速度 Vの増加に伴って増大する傾向にある。 ただし,単一載荷時において押抜きせん断破壊を生じた S4 試験体の V = 4.5 m/s,および S2/1 試験体の V = 5.0 m/s で は, P_{ud} が低下している。

最大支点反力 R_{ud} は,支持条件や載荷方法によらず衝突 速度の増加に伴って増大する傾向にある。ただし,最大重 錘衝撃力 P_{ud} の場合と異なり,押抜きせん断破壊の進行に 伴ってその増加割合が低下し,著しい押抜きせん断破壊に 至る場合には R_{ud} は低下する。また,衝突速度 V によらず, S4 試験体が最も大きな値を示し,S2/1 試験体は共に類似の 性状を示している。このように,最大支点反力 R_{ud} は最大



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15 cm 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版の静載荷および衝撃荷重 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) RC版の耐衝撃性は、二辺支持および一辺+二隅角点 支持の場合が四辺支持の場合よりも優れている。
- 動的応答倍率は、四辺支持の場合で2.2、二辺支持で 1.7、一辺+二隅角点支持で1.9であり、四辺支持の場 合が最も大きい。

参考文献

- 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載荷実験,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.33
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書 [設計編], 2007 年 制定

重錘衝撃力 P_{ud} よりも RC版の剛性や損傷を反映している ことより, RC版の動的耐力の評価には R_{ud} を用いること が適切であるものと考えられる。

図-7 動的応答倍率

S2

試験体名

S1

S4

最大応答変位 δ_{ud} は、衝突速度 V の増加に伴って大きく なる傾向を示している。なお、 δ_{ud} が 15 mm 以上となって いる実験ケースは、全て押抜きせん断破壊によりかぶりコ ンクリートが著しく剥落している。また、最大応答変位 δ_{ud} が、15 mm 以下の場合には載荷方法によらず δ_{ud} と衝突速 度 V が線形関係に近い分布性状となっている。

ここで、押抜きせん断破壊に至ったケースと至っていない実験ケースを分類すると、押抜きせん断破壊に至っていない場合の δ_{ud} と衝突速度Vはほぼ比例関係にあることがわかる。従って、衝突速度V(もしくは入力エネルギー)と最大応答変位 δ_{ud} の関係や押抜きせん断破壊に至る δ_{ud} を明らかにすることにより、RC版の耐衝撃設計が可能になるものと推察される。

3.4 動的応答倍率

図-7には、各試験体の動的応答倍率を示している。本研究では前述のように支点反力波形と変位波形が比較的対応していることより、動的応答倍率は設計的な観点から最大支点反力を静的な耐力で除すことにより評価することとした。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、S4 試験体の場合には、2.2 程度となっており、既往の研究²⁾と対応する