

二辺支持 RC 版の衝撃耐荷挙動に及ぼす版厚の影響

Effects of slab thickness on impact resistant behavior of two sides support RC slabs

室蘭工業大学大学院 〇 学生会員 中野 雄哉 (Yuya Nakano)
室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
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 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ために、四辺支持 RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を行い、耐衝撃挙動を明らかにすると共に設計式を提案している^{1),2)}。その結果、1) 静的および衝撃荷重載荷時には、RC 版は版厚の違いに関わらず押抜きせん断破壊に至ること、2) 最大重錘衝撃力や最大支点反力および動的応答倍率は RC 版の有効高さに大きく依存すること、3) 最大支点反力と静的耐力を用いて評価した動的応答倍率は 2~3.5 程度であり、曲げ剛性と比較的高い相関が認められること等が明らかになった。

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。RC 版の合理的な耐衝撃設計法を確立するためには、RC 版の版厚や支持条件を変化させた実験研究等、さらなる実験データの蓄積が必要であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、一対辺単純支持他対辺自由 (以後、二辺支持) RC 版に限定して、耐衝撃性に及ぼす版厚の影響を明らかにすることを目的に、静的および衝撃荷重載荷実験を行った。

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。試験体数は、版厚 3 種類、載荷方法 2 種類とした全 13 体である。表中の試験体名のうち、第一項目は版厚を示し、第二項目は載荷方法 (S:静的, I:衝撃)、第三項目は衝突速度を示している。支点部は、回転を許容し試験体の浮き上がり拘束するピン支持に近い構造となっている。なお、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、終局状態を、押し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、もしくは合支点反力が大きく低下した時点と定義した。衝撃荷重載荷実験では、H150/180 試験体は共に衝突速度 $V = 5.0 \text{ m/s}$ で、H210 試験体は $V = 6.5 \text{ m/s}$ 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示している。本実験に用いた RC 版は、寸法が $2,000 \times 2,000 \text{ mm}$ であり、厚さを 150, 180, 210 mm (有効高さで 110, 140, 170 mm) の 3 種類に変化させた単鉄筋 RC 版である。鉄筋は H150 試験体および H180/210 試験体で、それぞれ D13

表-1 実験ケース一覧

試験体名	有効高さ (mm)	載荷方法	衝突速度 (m/s)	コンクリート強度 (MPa)
H150-S	110	衝撃	-	29.4
H150-I-4.0			4.0	29.4
H150-I-4.5			4.5	29.4
H150-I-5.0			5.0	29.4
H180-S	140	衝撃	-	26.2
H180-I-4.0			4.0	26.2
H180-I-4.5			4.5	26.2
H180-I-5.0			5.0	32.1
H210-S	170	衝撃	-	32.0
H210-I-5.0			5.0	34.5
H210-I-5.5			5.5	34.5
H210-I-6.0			6.0	32.0
H210-I-6.5			6.5	32.1

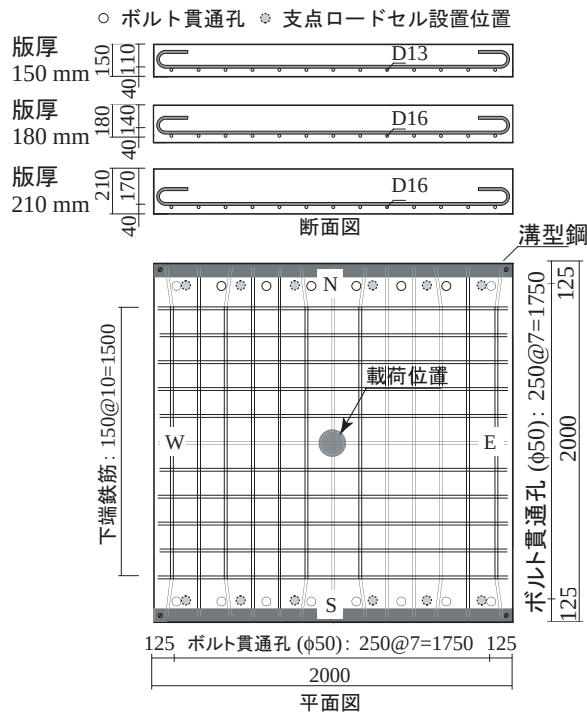
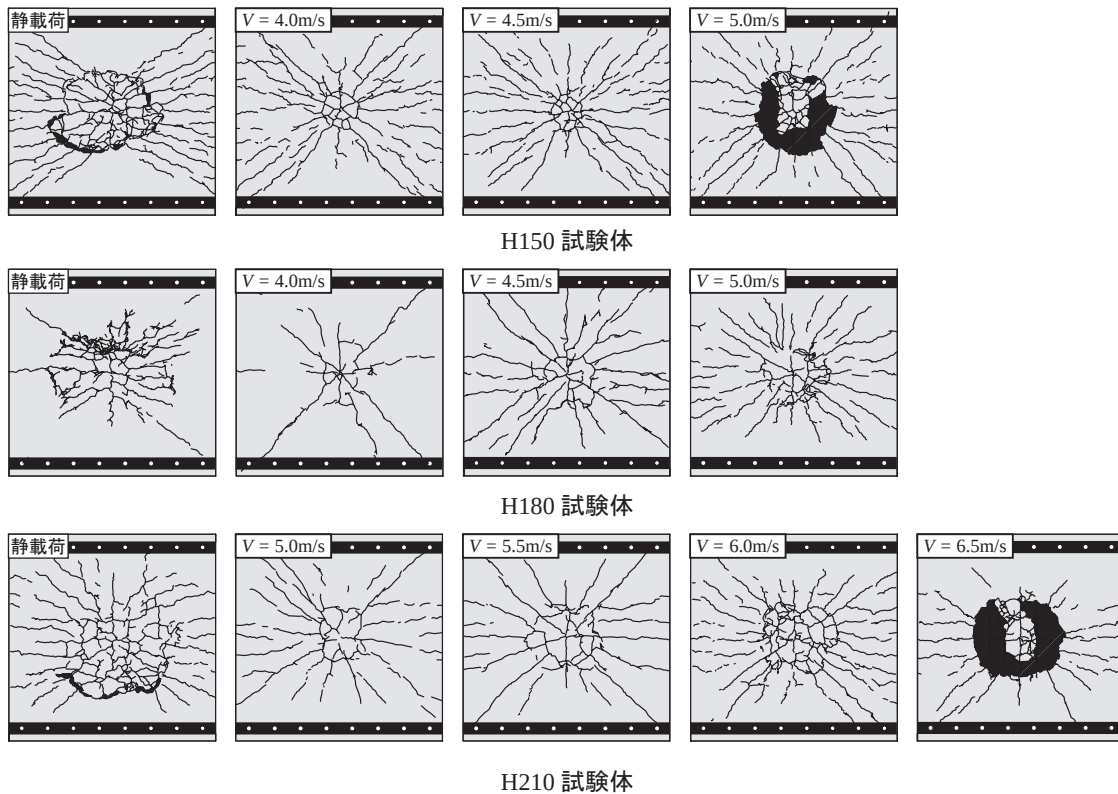


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況



図－2 実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状

および 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 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。

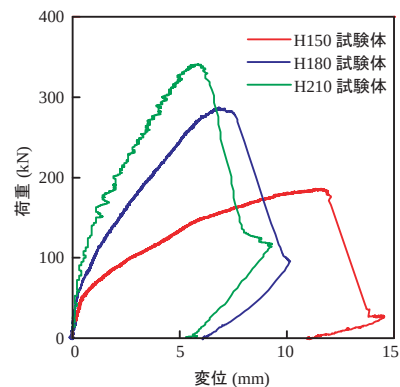
実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 26.2 ～ 34.5 MPa であり、鉄筋の降伏強度は、D13 で 393 MPa、D16 で 395 MPa であった。測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力) および載荷点直下の変位 δ (以後、変位) である。また、実験終了後には、RC 版の裏面を撮影し、ひび割れ性状を観察している。

3. 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、版厚および載荷方法に関わらず曲げモーメントに起因する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、版中央部には押し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。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表れている。また、静載荷実験の場合は衝撃荷重載荷実験の場合よりも円形状のひび割れの直径が大きい。

H150 試験体は衝突速度 $V = 5.0 \text{ m/s}$ でかぶりコンクリートが剥落しているのに対し、H180 試験体では剥落が見られない。H210 試験体の場合には $V = 6.5 \text{ m/s}$ の時点でかぶりコンクリートが剥落した。このことより単一載荷の場合には、H210/180 試験体は H150 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。



図－3 静載荷実験における RC 版の荷重－変位関係

3.2 静載荷実験結果

図－3 には、各 RC 版の荷重－変位関係を版厚ごとに比較して示した。なお、それぞれの RC 版に作用した荷重の最大値を静的押し抜きせん断耐力 (以後、静的耐力) とする。図より、いずれの RC 版も最大荷重到達後、荷重が急激に低下して終局に至っていることから、押し抜きせん断破壊に至ったことがうかがわれる。

最大荷重は版厚が厚いほど大きくなり、最大荷重時変位は版厚が薄いほど大きくなることから分かる。なお、H210 試験体と H180 試験体間の最大荷重および最大荷重時変位の差異は、H180 試験体と H150 試験体間の差異よりも小さく、特に H150 試験体は最大荷重が小さく最大荷重時変位が大きい。また、ひび割れ発生後における剛性勾配の低下は版厚が薄いほど顕著である。

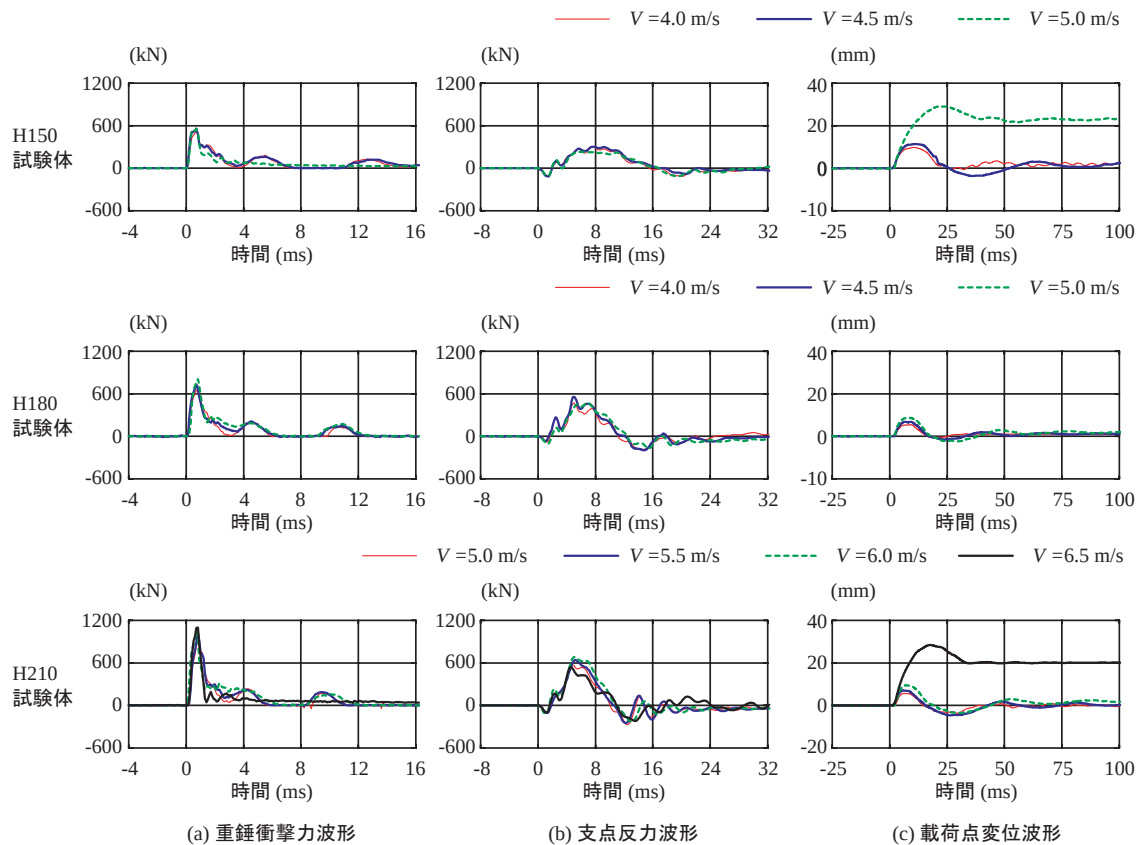


図-4 重錘衝撃力、支点反力および载荷点変位に関する応答波形

3.3 時刻歴応答波形

図-4 には、各種時刻歴応答波形を示している。図(a)より、重錘衝撃力波形は、版厚に関わらず類似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、H210 試験体の場合には、衝突速度 $V = 6.5$ m/s で、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、ひび割れ分布性状で見られたように、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すものである。一方、H150/180 試験体の場合には、衝突速度 $V = 5.0$ m/s の時点で H210 試験体の $V = 6.5$ m/s 時に類似した波形性状を示している。このことより、H150/180 試験体は共に $V = 5.0$ m/s 時点で押抜きせん断破壊に至っていることがうかがわれる。

図(b)より、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と高周波成分が合成された波形性状を示している。

図(c)より、载荷点変位波形は、いずれのRC版も類似の性状を示していることが分かる。すなわち、衝突荷重初期に正弦半波状の振幅の大きな波形が励起し、その後減衰自由振動に至る。また、振幅が大きく継続時間が15 ms 程度の第1波に振幅の小さな負変位を示す第2波が後続する性状を示している。これは、二辺支持されたRC版中央に荷重が作用したことで、1方向曲げが卓越したことによるものと考えられる。また、H210 試験体は V

$= 6.5$ m/s で、H150 試験体は $V = 5.0$ m/s で共に振幅の大きな第1波が励起した後、大きく変位が残留している。これは、押抜きせん断面が貫通し、円形状ひび割れ内部のかぶりコンクリートが剥落するなど壊滅的な破壊に至ったことによるものである。

以上のことから、二辺支持においては、版厚に関わらず1方向曲げが卓越するため、押し抜きせん断破壊に至る前は版全体としての曲げ振動的な応答波形を示すことが明らかになった。

3.4 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} 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 H210 試験体が最も大きく、H150 試験体が最も小さい値を示している。また、版厚に関わらず衝突速度の増加に伴って増大する傾向にある。

支点反力 R_{ud} は、重錘衝撃力 P_{ud} と同様に H210 試験体が最も大きく、H150 試験体が最も小さい値を示している。なお、支点反力 R_{ud} は、版厚に関わらず衝突速度の増加に伴い増大する傾向にあるものの、最大値を示した後は減少する傾向にある。このことより、いずれのRC版も支点反力 R_{ud} が最大値に達した時点で押し抜きせん断面が形成されたものと推察される。また、H210/150 試験体の支点反力 R_{ud} は押し抜きせん断面の貫通により、円形状のひび割れ内部の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、衝突速度によらず、H210 試験体

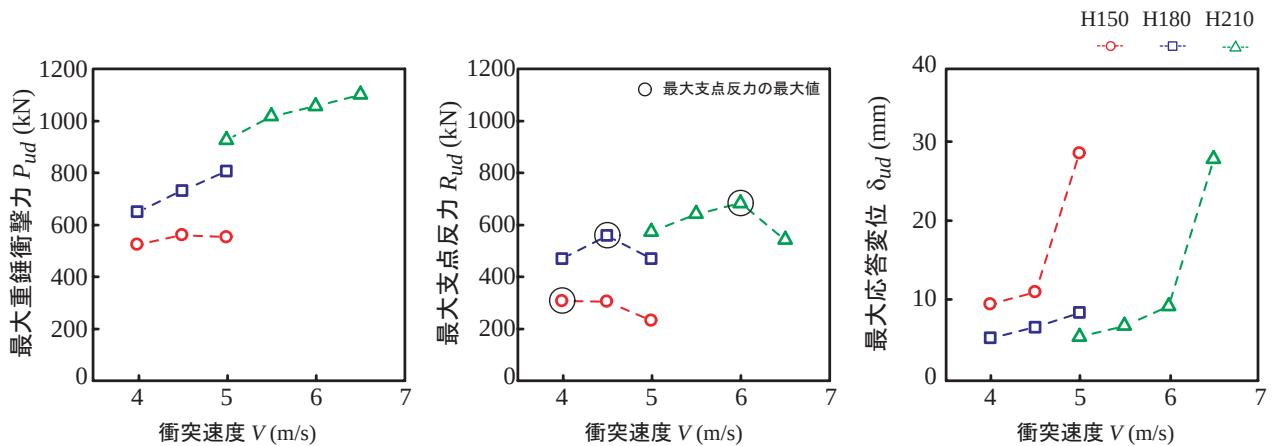


図-5 各種応答値

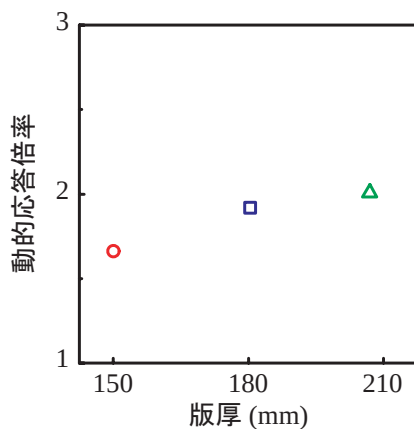


図-6 動的応答倍率

が最も小さな値を示し、H150 試験体が最も大きな値を示している。なお、版厚に関わらず衝突速度の増加に対応して最大応答変位 δ_{ud} が大きくなる傾向を示している。また、H210/150 試験体では押抜きせん断面が貫通して円形状ひび割れ内部のかぶりコンクリートが剥落した衝突速度において、最大応答変位 δ_{ud} が急激に増大している。

3.5 動的応答倍率

図-6 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-5 中に○をつけた最大支点反力を 図-3 中に示した静的耐力で除して評価することとした。図より、動的応答倍率は H210 試験体では 2.0 程度を示し、既往の四辺支持 RC 版に関する研究と対応する結果となっていることが分かる。一方、H180 試験体では 1.9 程度、H150 試験体では 1.7 程度と既往の研究よりも小さな値を示している。これは、1) 二辺支持 RC 版では 1 方向曲げが卓越し、静載荷時には変位量の増加と共に耐力は増加する一方、2) 衝撃荷重載荷時にはより小さな変位量で押抜きせん断破壊に至る傾向にあり、特に版厚の薄い場合には四辺支持 RC 版に比較して小さな耐荷力を与え、3) 結果として動的応答倍率も小さくなっ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、支持条件を二辺支持とした場合において、版厚を 3 種類 (150, 180, 210 mm) に変化させた RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を行った。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) 静載荷実験において、版厚は静的押し抜きせん断耐力および最大荷重時変位、剛性勾配に大きく影響する。
- 2) RC 版の応答変位波形から、二辺支持の場合は 1 方向曲げが卓越するため、押抜きせん断破壊に至る前は版全体としての曲げ振動的な応答性状を示すことが明らかになった。
- 3) ひび割れ性状からみた RC 版の耐衝撃性は、版全体として曲げ振動が卓越する傾向を示すものの、押抜きせん断破壊で終局に至ることから、版厚の増大に対応して向上する。
- 4) 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。
- 5) 動的応答倍率は、版厚が 210 mm の場合で 2.0、180 mm で 1.9、150 mm で 1.7 であり、210 mm の場合が最も大きい傾向を示した。

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載荷実験, 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