論文　版厚の異なる二辺支持 RC 版の耐衝撃挙動

中野　雄哉[*1]・岸　徳光[*2]・三上　浩[*3]・栗橋　祐介[*4]

要旨：本研究では，二辺支持 RC 版の耐衝撃挙動に及ぼす版厚の影響を検討することを目的に，版厚を 3 種類 (150 mm，180 mm，210 mm) に変化させた RC 版に関する載荷実験を行った。実験は，各版厚に対して，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 16 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 RC 版は，載荷方法や版厚によらず，押抜きせん断破壊により終局に至ること，2) 動的応答倍率は，版厚が大きい場合ほど大きな値を示し，四辺支持 RC 版の場合よりも全般的に小さいこと，などが明らかになった。

キーワード：RC 版，二辺支持，版厚，押抜きせん断破壊，動的応答倍率

1. はじめに

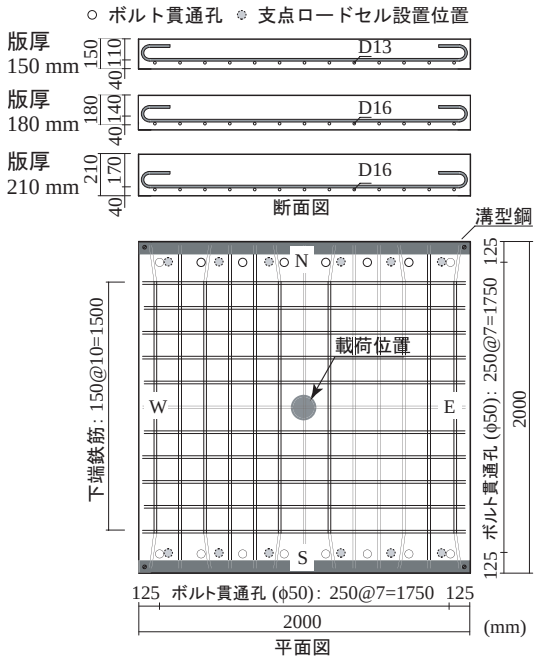
鉄筋コンクリート (RC) 製の面部材に静的かつ局所的に荷重が作用すると押抜きせん断破壊を示すことはよく知られている。著者らは，落石覆工頂版部などに用いられる RC 版の合理的な耐衝撃設計法を確立するために，四辺支持 RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験を数多く実施し，1) 静的および衝撃荷重載荷時には，RC 版は版厚の違いに関わらず押抜きせん断破壊に至ること，2) 重錘衝撃力や支点反力および動的応答倍率は RC 版の有効高さに大きく依存すること，3) 支点反力の最大値と実測押抜きせん断耐力を用いて評価した動的応答倍率は 2 ～ 3.5 程度であり，曲げ剛性と比較的高い相関が認められること，などを明らかにしている。さらに，全実験データを取りまとめて四辺支持 RC 版の耐衝撃設計法を提案している [1),2)]。

これらの知見は四辺支持 RC 版のみを対象とした実験研究により得られたものであることより，提案の耐衝撃設計法をより汎用的なものとするため，支持条件を一対辺単純支持他対辺自由 (以後，二辺支持) および一辺単純支持＋二隅角点支持 (以後，一辺＋二隅角点支持) とする場合についても実験的な検討を行っている [3)~5)]。その結果から，1) 版厚一定の下，支持条件による拘束度を低減することにより，押抜きせん断破壊に曲げ破壊が連成する性状を示すこと，2) 支持条件による拘束度の低減に伴い，動的応答倍率が低下すること，3) 二辺支持および一辺＋二隅角点支持 RC 版はともに比較的類似した耐衝撃挙動を示すこと，などを明らかにしている。しかしながら，これまでの研究では二辺支持および一辺＋二隅角点支持 RC 版の耐衝撃挙動に及ぼす版厚の影響については

表－1　試験体一覧

試験体名	版厚	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)
H150-S	150	静的	-	29.4	186.0	173.5
H150-IC		繰返し	1，2，3，4，4.5	34.5		188.0
H150-IS-4.0		単一	4.0	29.4		173.5
H150-IS-4.5			4.5			
H150-IS-5.0			5.0			
H180-S	180	静的	-	26.2	292.2	265.9
H180-IC		繰返し	1，2，3，4，4.5			
H180-IS-4.0		単一	4.0			
H180-IS-4.5			4.5			
H180-IS-5.0			5.0	32.1		294.3
H210-S	210	静的	-	32.0	340.6	387.7
H210-IC		繰返し	1，2，3，4，4.5	34.5		402.5
H210-IS-5.0		単一	5.0			
H210-IS-5.5			5.5			
H210-IS-6.0			6.0	32.0		387.7
H210-IS-6.5			6.5	32.1		388.2

*1　室蘭工業大学大学院　博士前期課程　建築社会基盤系専攻　(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)
*3　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)
*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)



図－1　試験体の形状寸法および配筋状況

検討されていない。種々の実構造物に適用可能な RC 版の合理的な耐衝撃設計手法を確立するためには版厚の影響についても検討することが重要である。

このような観点より，本研究では，二辺支持の条件の下，RC 版の耐衝撃性に及ぼす版厚の影響を検討することを目的に，版厚を 3 種類に変化させた RC 版の衝撃荷重載荷実験を行った。なお，本実験では，RC 版の複雑な耐衝撃挙動を極力単純化して評価するため，直接衝突により実験を行った。また，各 RC 版の基本的な耐荷性状を把握するため静載荷実験も併せて実施した。

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。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，版厚を 3 種類，載荷方法を 3 種類に変化させた全 16 体である。表中の試験体名のうち，第一項目の H に付随する数値は版厚 (mm) を，第二項目は載荷方法 (S : 静載荷，IC : 繰返し衝撃載荷，IS : 単一衝撃載荷) を，第三項目は衝突速度 (m/s) 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示している。本実験に用いた RC 版は，平面寸法を 2,000 × 2,000 mm とし，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 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。また，鉄筋の定着方法は 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。なお，本実験に用いた RC 版の寸法は，実験装置に設置可能な最大限の寸法とし，その鉄筋比は種々の面部材における一般的な範囲内で設定した。

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。静載荷実験の場合には直径 90 mm の載荷板を用い，衝撃荷重載荷実験の場合には質量 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 1 m/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。

終局の定義は，静載荷実験では，荷重が急激に低下した時点とし，衝撃荷重載荷実験では，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した。また，単一載荷実験の衝突速度は，まず繰返し載荷実験における最大衝突速度よりも 0.5 m/s 大きな衝突速度 (本実験ではいずれの場合も衝突速度 V = 5.0 m/s) を設定して実験を行い，RC 版の押抜きせん断破壊の有無に応じて 0.5 m/s ずつ変化させることとした。

実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 26 ～ 35 MPa であり，鉄筋の降伏強度は，D13 で 393 MPa，D16 で 395 MPa であった。静載荷実験の測定項目は，荷重および載荷点直下の鉛直方向変位 (以後，変位) である。また，衝撃荷重載荷実験の測定項目は，重錘衝撃力 P，合支点反力 R (以後，支点反力)，および載荷点直下の鉛直方向変位 δ (以後，変位) である。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

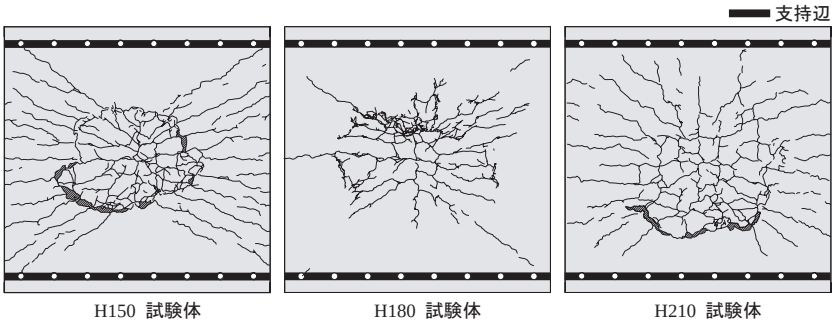
3.1 静載荷実験結果

(1) 荷重－変位関係

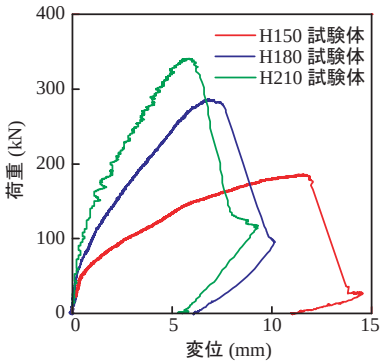
図－2 には，各版厚における試験体の荷重－変位関係を示している。図より，いずれの試験体も最大荷重到達後に荷重が急激に低下していることから，最終的に押抜きせん断破壊により終局に至っていることがうかがわれる。また，版厚が大きい場合ほど最大荷重が大きく，かつ最大荷重時変位が小さいことが分かる。

(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，版厚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。また，いずれの試験体も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や



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



図－2　荷重－変位関係

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，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している。**図－4** (a) の繰返し載荷の場合には，重錘衝撃力波形は，版厚にかかわらず振幅が大きい第 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。なお，最大振幅は版厚が大きい場合ほど大きい。また，衝突速度 $V = 4.5$ m/s 以降では，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。最大振幅は版厚が大きい場合ほど大きい。また，主波動継続時間は，重錘衝撃力波形と同様に版厚が大きい場合ほど短くなる傾向にある。これらは，RC 版の曲げ剛性が大きいことによるものと考えられる。

変位波形は，衝突速度 $V = 1 \sim 4$ m/s では，版厚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，最大変位到達後，負変位を示す傾向にある。これは，二辺支持および繰返し載荷による曲げ損傷の蓄積により 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，主波動継続時間は，重錘衝撃力波形と同様に版厚が大きい場合ほど短くなる傾向にある。衝突速度 $V = 4.5$ m/s の場合には H150/180 試験体の裏面の損傷が著しく，測定が困難であったため H210 試験体の結果のみを示しているが，変位が残留していることが分かる。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。

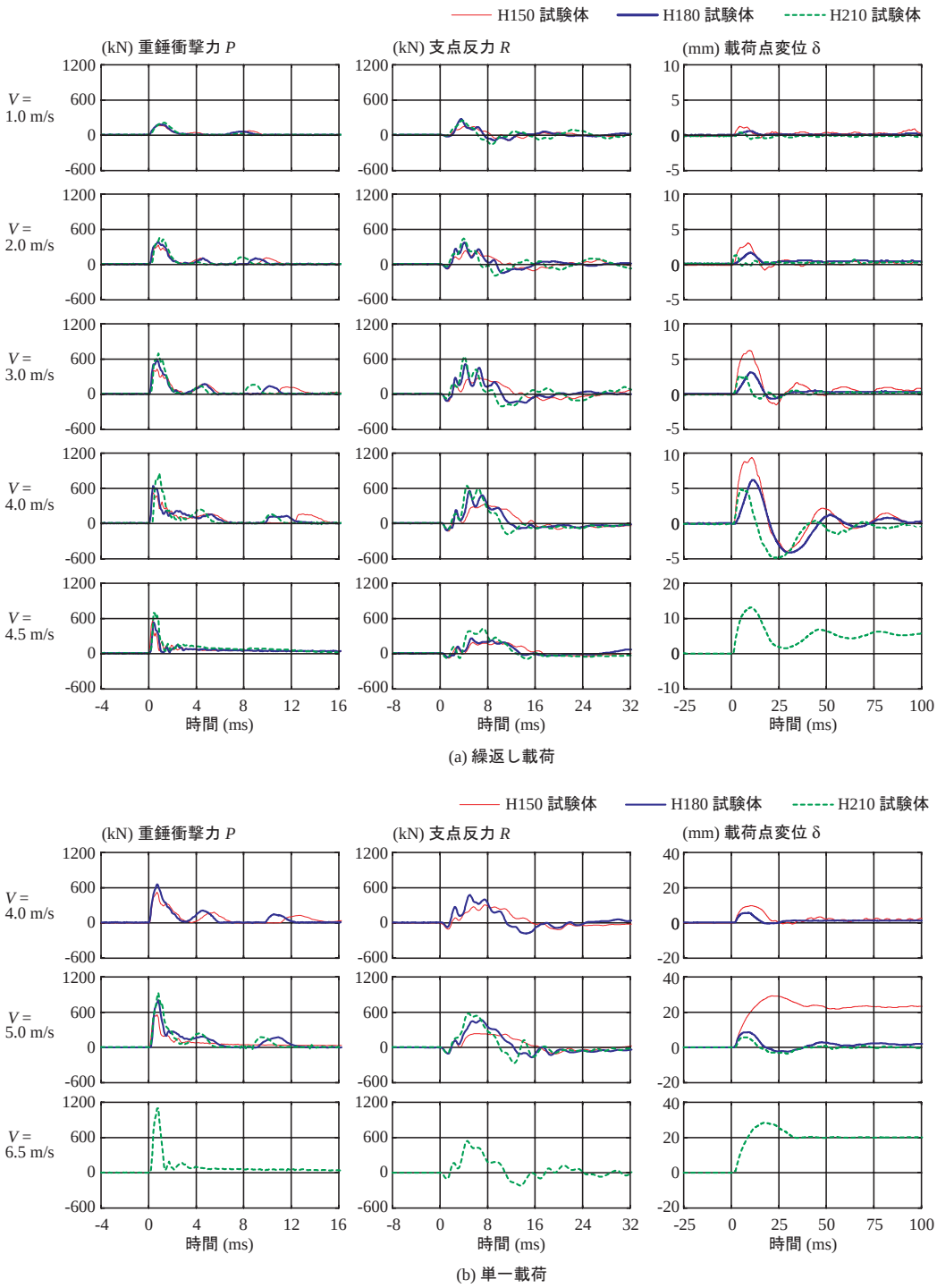
図－4 (b) の単一載荷の場合には，重錘衝撃力波形は，繰返し載荷の場合と同様に 3 波で構成されていることが分かる。また，H210 試験体の場合には，衝突速度 $V = 6.5$ m/s で，第 2 波目のピークが消失し第 1 波目に連続する波形となっている。これは，RC 版が押抜きせん断破壊により抵抗力を失っていることを示すものである。一方，H150/180 試験体の場合には，衝突速度 $V = 5.0$ m/s の時点で H210 試験体の衝突速度 $V = 6.5$ m/s 時に類似した波形性状を示している。このことより，H150/180 試験体は共に衝突速度 $V = 5.0$ m/s 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。

支点反力波形は，繰返し載荷の場合と同様の波形性状を示している。すなわち，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，版厚が大きい場合ほど主波動継続時間が短くなる傾向にある。

載荷点変位波形も，繰返し載荷の場合と同様の波形性状を示している。すなわち，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，その後減衰自由振動に至っている。また，版厚が大きい場合ほど主波動継続時間が短くなる傾向にある。なお，H210 試験体は衝突速度 $V = 6.5$ m/s で，H150 試験体は衝突速度 $V = 5.0$ 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，押抜きせん断面が版裏面まで貫通し，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。

(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繰返し載荷および単一載荷のうち衝突速度 $V = 4$，5，6.5 m/s の場合について示している。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



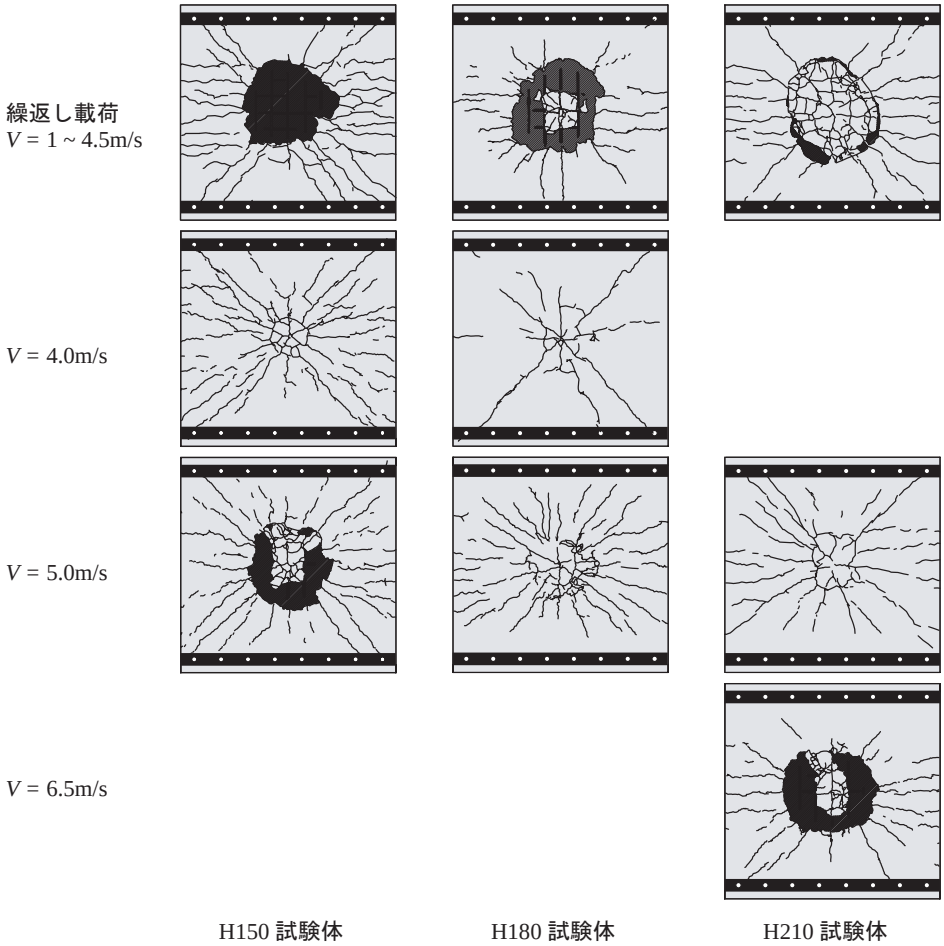
図－4　重錘衝撃力，支点反力および載荷点変位に関する時刻歴応答波形

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，版中央部に円形状のひび割れが発生していることから，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。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。なお，繰返し載荷の場合は，版厚が大きい場合ほど損傷が小さくなる傾向にある。

また，単一載荷の場合は，H150 試験体は衝突速度 V = 5.0 m/s でかぶりコンクリートが剥落しているのに対し，H180/210 試験体では剥落が見られない。H210 試験体は衝突速度 V = 6.5 m/s の時点でかぶりコンクリートが剥落している。このことより，版厚が大きい場合ほど耐衝撃性に優れていることが分かる。

3.3 各種応答値と衝突速度との関係

図－6 には，重錘衝撃力 P_{ud}，支点反力 R_{ud} および応答変位 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} は版厚が大きい場合ほど大きな値を示していることが分かる。また，版厚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。ただし，H210/180 試験体は繰返し載荷時において押抜きせん断破壊を生じた衝



図－5　衝撃荷重載荷実験終了後における各 RC 版裏面のひび割れ分布性状

突速度 V = 4.5 m/s では，重錘衝撃力 P_{ud} が低下している。

支点反力 R_{ud} は，衝突速度によらず，版厚が大きい場合ほど大きな値を示し，H210 試験体は衝突速度 V = 6.0 m/s で最大値を示していることが分かる。一方，H180 試験体は衝突速度 V = 4.5 m/s で，H150 試験体は衝突速度 V = 4.0 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，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。

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。このように，支点反力 R_{ud} は重錘衝撃力 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。本論文では，各 RC 版の単一載荷実験における支点反力の最大値 (図中の○印) を動的耐力として評価することとする。なお，動的耐力を示す衝突速度 V は，版厚が大きい場合ほど大きくなる傾向にある。

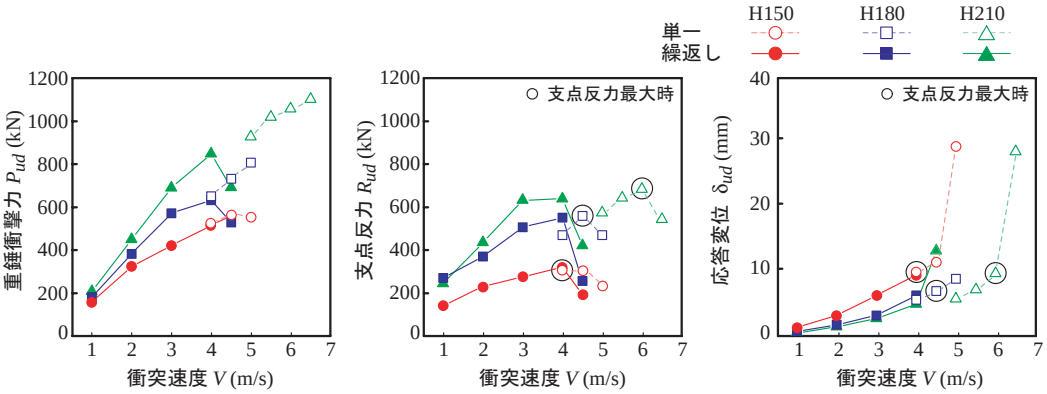
応答変位 δ_{ud} は，衝突速度によらず，版厚が大きい場合ほど小さな値を示していることが分かる。また，版厚に関わらず衝突速度の増加に対応して応答変位 δ_{ud} が大きくなる傾向を示している。なお，支点反力が最大値を示すときの応答変位 (図中の○印) は版厚によらず 7 ～ 9 mm 程度であり，これよりも衝突速度が大きい場合には応答変位が急激に増大している。

以上のことから，衝撃荷重載荷時には版厚が大きい場合ほど同一衝突速度における重錘衝撃力，支点反力が大きく，かつ応答変位が小さくなる傾向にあることが明らかとなった。

3.4 動的応答倍率

図－7 には，本実験で得られた動的応答倍率を示している。本研究では，動的応答倍率は動的耐力を静的耐力で除して評価している。ここで，動的耐力は **図－6** で示した支点反力 R_{ud} の最大値とし，静的耐力は静載荷実験時における実測押抜きせん断耐力として評価している。なお，図には本実験に用いた試験体と同一諸元 [4),5)] の四辺支持 RC 版の結果も併せて示している。また， **表－2** には参考のため，静載荷および衝撃荷重載荷実験結果と動的応答倍率の一覧を示している。

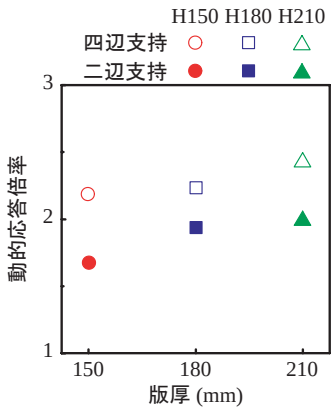
図より，本実験に用いた二辺支持 RC 版の動的応答倍率は，版厚が小さい場合ほど小さくなる傾向にあることが分かる。これは，版厚が小さい場合において，静載荷時には大きく曲げ変形した後に押抜きせん断破壊に至る傾向



図－6　各種応答値

表－2　実験結果と動的応答倍率の一覧

試験体名	静載荷		衝撃荷重載荷		動的応答倍率 (2)/(1)
	静的耐力 (kN) (1)	最大荷重時変位 (mm)	動的耐力 (kN) (2)	応答変位 (mm)	
H150-IS-4.0	186.0	11.6	306.3	9.8	1.7
H180-IS-4.5	292.2	6.8	557.8	6.9	1.9
H210-IS-6.0	340.6	5.8	683.2	9.5	2.0



図－7　動的応答倍率

を示しているのに対し，衝撃荷重載荷時には小さい変位でより脆性的に押抜きせん断破壊に至るため，動的耐力が小さく評価されることによるものと考えられる。また，版厚によらず二辺支持 RC 版の動的応答倍率は，四辺支持 RC 版の場合よりも小さい。これは，二辺支持の場合には，四辺支持の場合よりも 1 方向の曲げ変形が卓越するため，動的耐力が小さく評価されるためと考えられる。

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) 載荷方法や版厚によらず，いずれの RC 版も押抜きせん断破壊により終局に至った。
2) 静載荷時には，版厚が大きい場合ほど最大荷重が大きく，かつ最大荷重時変位が小さくなる傾向を示す。
3) 衝撃荷重載荷時には，版厚が大きい場合ほど同一衝突速度における重錘衝撃力，支点反力が大きく，かつ応答変位が小さくなる傾向を示す。
4) 各種応答波形の主波動継続時間は，版厚が大きい場合ほど短くなる傾向にある。これは，曲げ剛性が大きいことによるものと考えられる。
5) 動的応答倍率は版厚が大きい場合ほど大きくなる傾向にあり，その傾向は四辺支持の場合よりも顕著である。

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) 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.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載荷実験，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