四辺支持 RC 版の重錘落下衝撃挙動に及ぼす重錘直径の影響

Effects of falling-weight diameter on impact response behavior of simply supported rectangular RC slabs

室蘭工業大学	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)
（独）寒地土木研究所	正会員	今野　久志	(Hisashi Konno)
室蘭工業大学	○学生会員	相良　光利	(Mitsutoshi Sagara)

1. はじめに

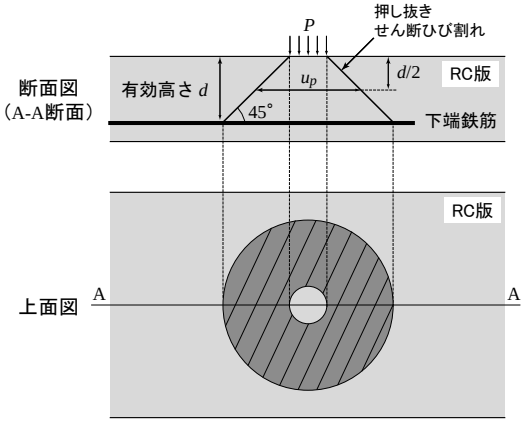
鉄筋コンクリート（RC）床版などの面部材に集中荷重が作用すると押し抜きせん断破壊することが知られており，コンクリート標準示方書[1]（以後，示方書）には，押し抜きせん断耐力の算定式が示されている．上記算定式は，RC 梁のせん断耐力算定式を基本としたもので，大きな違いは載荷版の直径（載荷面の周長）が考慮できるようになっていることである．

式 (1) には示方書の押し抜きせん断耐力算定式を示す．また，**図－1** に押し抜きせん断破壊の破壊モデル概要図を示す．**図－1** に示すように，押し抜きせん断ひび割れが載荷面の端部から下端鉄筋位置まで斜め 45° 下方に進展すると仮定し，押し抜きせん断耐力はそのひび割れの上面からの投影面積にコンクリートの引張強度や鉄筋比，有効高さ，載荷面の周長に関する係数を乗じて算定するものである．

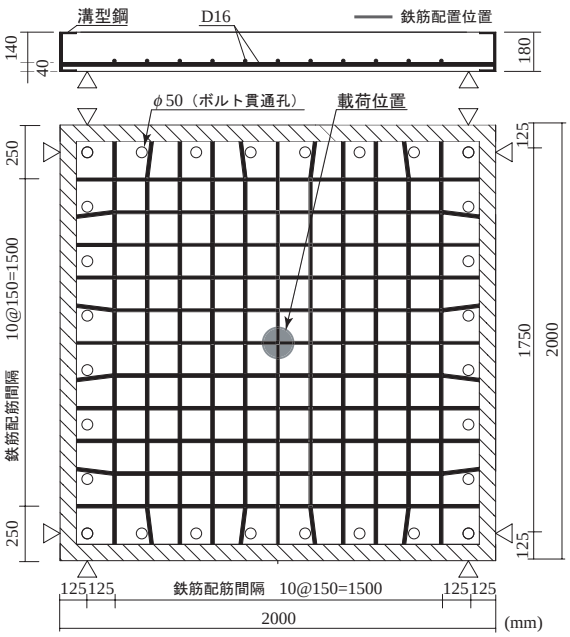
一方，既往の研究[2]より，せん断破壊型 RC 梁の動的せん断耐力は静的せん断耐力の 2.5～3.0 倍程度であることが明らかになっている．本研究では，これらの知見を基に RC 版の動的押し抜きせん断耐力算定式を提案するための基礎資料の収集を目的として，直径が異なる鋼製重錘を用いて 4 辺支持 RC 版の重錘落下衝撃実験を実施した．本実験では，同一形状寸法の RC 版に対して重錘の直径を 4 種類に変化させ，耐衝撃性状に関する検討を行っている．

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f'_{pcd} \cdot u_p \cdot d \qquad (1)$$

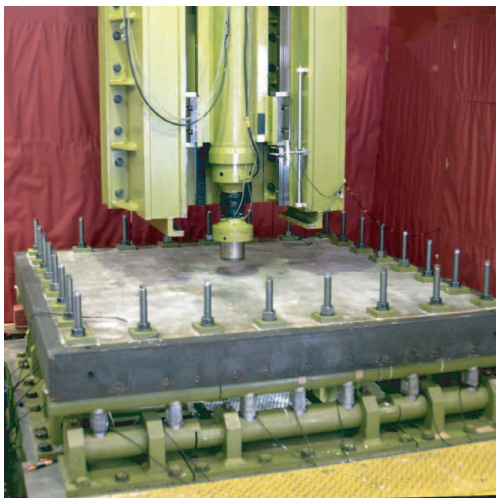
ここに，$f'_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}}$ (N/mm^2),
$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$ (d：m),
$\beta_p = \sqrt[3]{100p}$,
$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$,
f'_{cd}：コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm^2),
u：載荷面の周長,
u_p：設計断面の周長,
d および p：有効高さおよび鉄筋比



図－１　押し抜きせん断破壊のモデル



図－２　RC 版の形状寸法および配筋状況

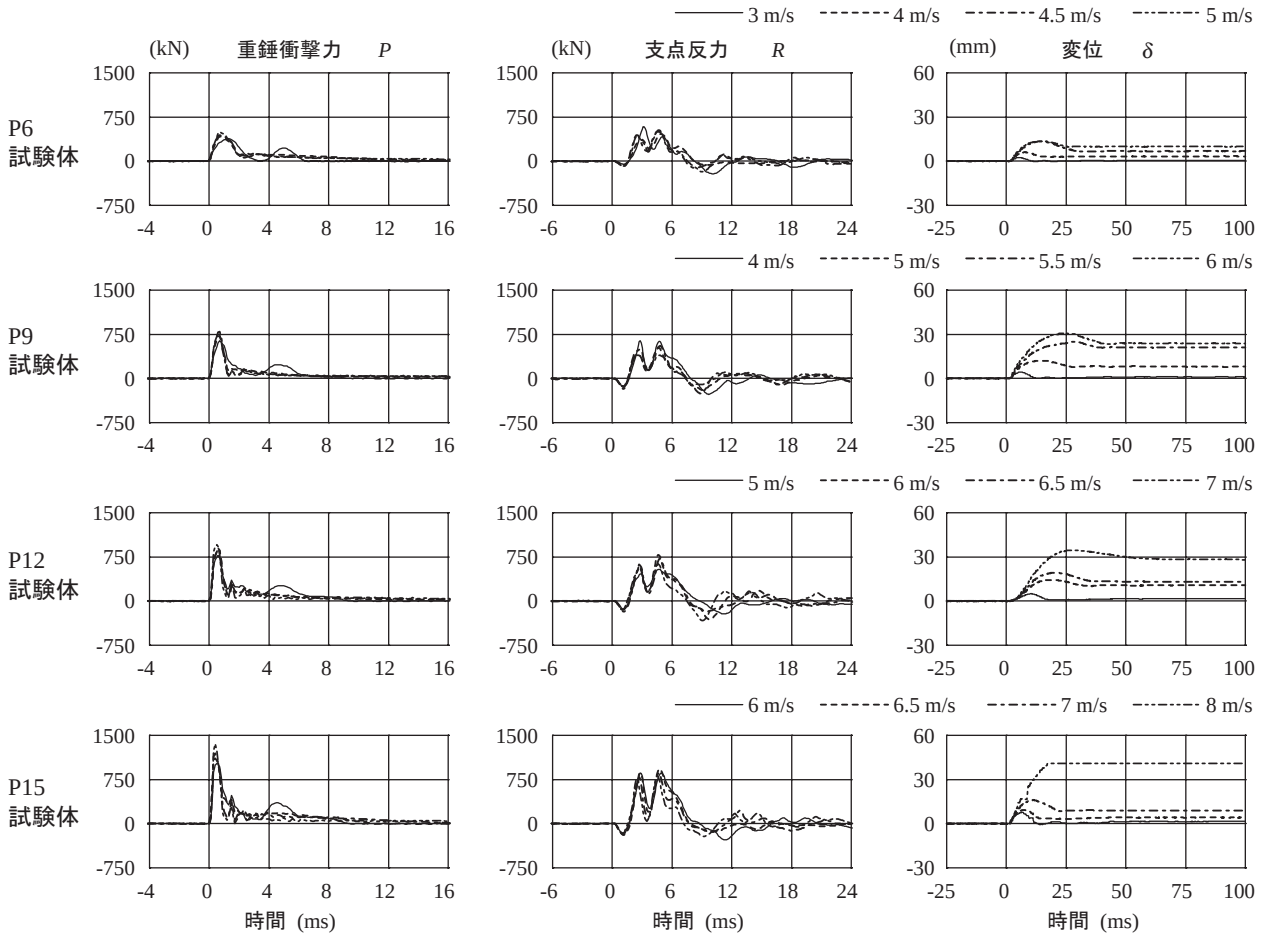


写真－１　P12 試験体設置状況

表－1　実験ケース一覧

試験体名	重錘直径 (mm)	重錘周長 (mm)	鉄筋比 (%)	コンクリート圧縮強度 (MPa)	衝突速度 V (m/s)	計算押し抜きせん断耐力 * V_{pcd} (kN)	実測押し抜きせん断耐力 P_{us} (kN)
P6	60	188.5	1.09	27.2	3, 4, 4.5, 5	247.4	229.3
P9	90	282.7		27.4	4, 5, 5.5, 6	271.9	287.5
P12	120	377.0		20.2	5, 6, 6.5, 7	253.3	336.2
P15	150	472.2		26.3	6, 6.5, 7, 8	311.4	442.2

* $\gamma_b = 1.0$



(a) 重錘衝撃力波形　(b) 支点反力波形　(c) 変位波形

図－3　重錘衝撃力，支点反力および変位に関する応答波形

2. 実験概要

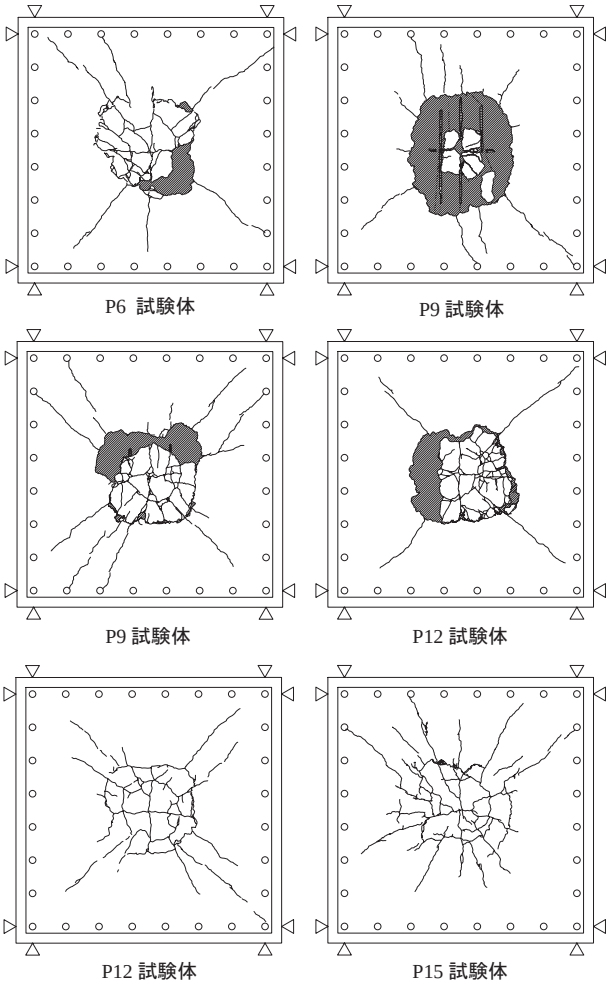
2.1 試験体の概要

図－2 には，本実験に用いた RC 版試験体の形状寸法を示している．試験体は，2000 × 2000 × 180 mm，有効高さ 140 mm の位置に下端鉄筋を配筋した RC 版である．下端鉄筋には D16 を用い，版中央部より 150 mm 間隔で格子状に配筋した．なお，鉄筋は RC 版の 4 辺に設置した溝型鋼に溶接し，定着を確保している．

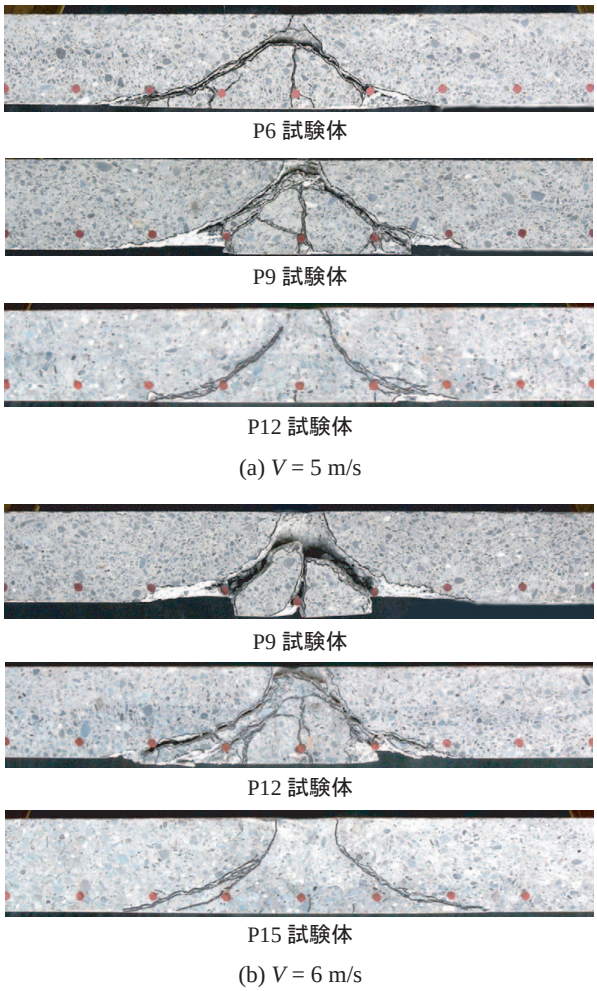
表－1 には，本実験の実験ケースを一覧にして示している．表には，重錘の直径および周長，鉄筋比，コンクリートの圧縮強度，衝突速度の他，示方書に基づいて算出した計算静的押し抜きせん断耐力および別途実施した静的押し抜きせん断実験より得られた実測押し抜きせん断耐力も併せて示している．本実験の試験体名は，英文字 P に重錘の直径 (cm) を組み合わせて示している．なお，コンクリートの圧縮強度は P12 試験体で 20.2 MPa と若干小さいものの，その他は 26 ～ 27 MPa 程度となっている．また，鉄筋の降伏強度は 423 MPa であった．

2.2 実験方法

写真－1 には，本実験の実験状況を示している．支持条件は，純スパン長 1.75 m の四辺支持としている．また，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．衝撃荷重載荷位置は RC 版の中央としている．鋼製重錘の質量は載荷治具の直径に関わらず 300 kg であり，衝突面は片当たりを防止するため 2 mm のテーパが付いた球面状としている．載荷方法は，所



図－4　裏面におけるひび割れ分布性状



写真－2　切断面におけるひび割れ分布性状

定の重錘を設定した衝突速度で一度だけ載荷する単一載荷方法を採用している．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 版の裏面のひび割れおよび版中央部を主鉄筋方向に切断して切断面のひび割れをスケッチし，破壊性状を観察した．

3.　実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力，支点反力および変位波形

図－3 には，各試験体の重錘衝撃力 P，支点反力 R および変位 δ に関する応答波形を試験体ごとに示している．なお，時間軸は重錘衝撃力が励起した時刻を 0 ms として整理した．

図－3 (a) より，重錘衝撃力波形 P は，いずれの試験体も衝撃初期に励起する振幅が大きく周期の短い第 1 波と，その後の振幅が小さく周期の長い第 2 波で構成されている．また，いずれの試験体も最終衝突速度では第 2 波目が消失している．これは，RC 版に押し抜きせん断面が形成され，塑性化が一気に進展したためと考えられる．最大重錘衝撃力は重錘の直径が同じ場合には衝突速度の増加に対応して増大し，一方で重錘の直径が大きくなるとともに最大重錘衝撃力は大きく示される傾向にある．

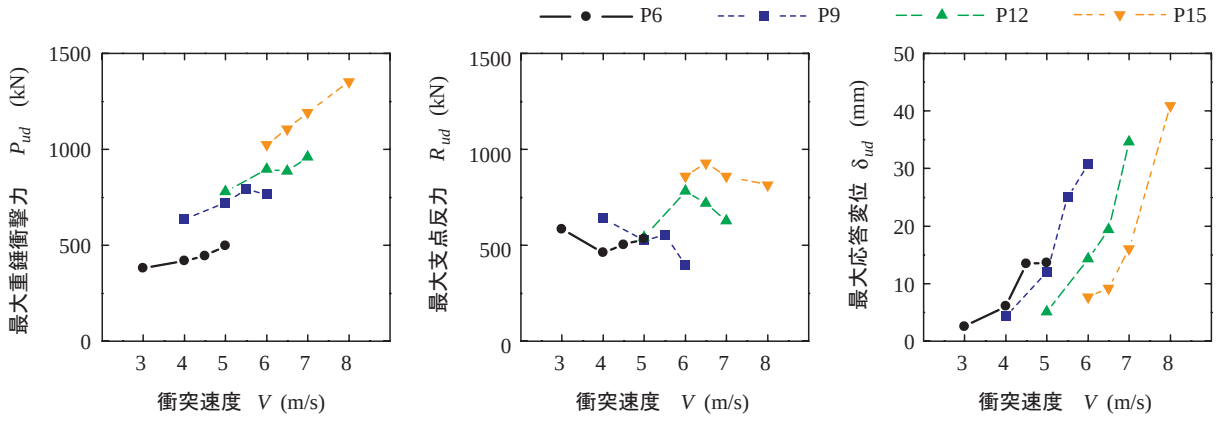
図－3 (b) より，支点反力波形 R は，衝突初期に周期が 3 ms 程度の三角形状の波形と周期が 10 ms 程度の正弦波が合成された性状を呈している．また，重錘衝撃力と同様に重錘の直径が大きくなるほど最大支点反力は大きくなる傾向にある．

図－3 (c) より，変位波形 δ は，各試験体ともに低衝突速度では正弦半波状を示し，衝突速度が増大すると振動状態を呈しない性状となっている．また衝突速度が増加するのにともない残留変位も増大し，押し抜きせん断コーンが明瞭に形成されていることがうかがわれる．

3.2 破壊性状

図－4 の裏面のひび割れ性状より，衝突速度および重錘の直径の大きさにかかわらず，押し抜きせん断コーンの大きさはほとんど変わらないことが分かる．ただし，同一衝突速度の試験体を比較すると，重錘の直径が大きいほど押し抜きせん断コーンの形成が抑制され，損傷程度は軽微となっていることが分かる．

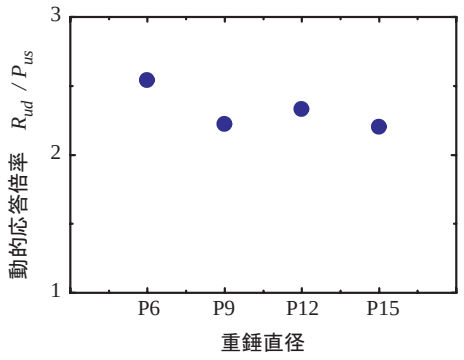
また，**写真－2** の切断面のひび割れ性状より，いずれの試験体も押し抜きせん断ひび割れは載荷面の端部より斜め約 45° 下方に向かって進展しており，大略類似していることが分かる．しかしながら，押し抜きせん断ひび割れの開口幅は重錘の直径が小さいほど広い．これは，同一衝突速度（入力エネルギー）に対して重錘の直径が小さいほど載荷面積が狭く，衝撃荷重が集中して作用するためと考えられる．



図－５　最大重錘衝撃力，最大支点反力および最大応答変位と衝突速度との関係

表－２　動的耐力および静的耐力一覧

試験体名	終局速度 V (m/s)	動的せん断耐力 R_{ud} (kN)	静的せん断耐力 P_{us} (kN)	動的応答倍率 R_{ud} / P_{us}
P6	3	583.1	229.3	2.54
P9	4	638.9	287.5	2.22
P12	6	782.7	336.2	2.33
P15	6.5	929.4	442.2	2.20



図－６　動的応答倍率と重錘直径との関係

3.3 各種応答値と衝突速度との関係

図－5 には，各試験体の (a) 最大重錘衝撃力 P_{ud}，(b) 最大支点反力 R_{ud} および (c) 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－5 (a) より，最大重錘衝撃力はいずれの試験体においても，衝突速度 V の増加に伴って増大していることが分かる．また，同じ速度で比較した場合，5 m/s および 6 m/s どちらに着目しても，重錘の直径が大きいほど最大重錘衝撃力が大きくなる傾向にあることが分かる．

図－5 (b) より，各試験体の最大支点反力は，既往の実験と同様に衝突速度の増加に伴い増大する傾向にあるもののピークを迎えた後は低下する傾向にある．また，重錘の直径が大きいほど最大支点反力は大きくなる傾向にある．

図－5 (c) より，いずれの試験体においても衝突速度 V の増加に伴って最大応答変位が増大していることが分かる．また，押し抜きせん断コーンが明瞭に形成される衝突速度で最大応答変位が急激に増大することが分かる．

3.4 動的耐力および動的応答倍率

表－2 には，本実験に用いた試験体の動的耐力および静的耐力を一覧にして示している．表には，終局速度 V (最大支点反力が生じた衝突速度)，最大支点反力である動的せん断耐力 R_{ud}，別途実施した静載荷実験より得られた静的せん断耐力 P_{us} および動的せん断耐力を静的せん断耐力で除した動的応答倍率をあわせて示している．

図－6 には動的応答倍率と重錘直径との関係を示している．本実験結果より，重錘の直径に関わらず動的応答倍率は 2.2 ～ 2.5 程度であり，動的応答倍率を 2 程度とすることにより RC 版の動的押し抜きせん断耐力を安全側に評価可能であることが明らかとなった．なお，RC 版部材の動的応答倍率がせん断破壊型 RC 梁の動的応答倍率 [2] 2.5 ～ 3 程度に比べて小さいのは，RC 版部材の押し抜きせん断コーンの拡大が重錘の直径にかかわらず衝撃載荷時には顕著でないことに関連するものと考えられる．

4.　まとめ

本研究では，重錘の直径が RC 版の耐衝撃性状に与える影響を実験的に検討した．本研究の範囲内で得られた結果は以下の通りである．

(1) RC 版の各種衝撃応答波形は，重錘の直径に関わらず類似の性状を示す．
(2) 同一衝突速度（入力エネルギー）においては重錘の直径が大きいほど押し抜きせん断による損傷が抑制されるが，押し抜きせん断コーンの大きさに与える影響は小さい．
(3) 重錘の直径に関わらず動的応答倍率は 2.2 ～ 2.5 程度を示し，動的応答倍率を 2 程度とすることにより RC 版の動的押し抜きせん断耐力を安全側に評価可能である．

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書（2002 年制定）構造性能照査編，2002.
2) 岸　徳光，三上　浩，張　広鋒，東中邦夫，：帯鉄筋の鉄筋径が異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状，土木学会北海道支部論文報告集　第 62 号，I － 31，2006.