

(3) 重錘直径を変化させた矩形 RC 版の衝撃荷重実験

Falling-weight impact test of rectangular RC slabs with various loading-ram diameter

三上 浩*, 岸 徳光**, 栗橋祐介***

Hiroshi Mikami, Norimitsu Kishi, and Yusuke Kurihashi

*博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒 270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

**工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***博(工) 室蘭工業大学講師 工学部 建設システム工学科 (〒 050-8585 室蘭市水元町 27-1)

Key Words: loading-ram diameter, rectangular RC slabs, impact response behavior, dynamic response amplitude

キーワード: 重錘直径, 矩形 RC 版, 衝撃耐荷挙動, 動的応答倍率

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 床版などの面部材に, 集中荷重が静的かつ局所的に作用する場合, 脆性的な破壊形式である押抜きせん断破壊に至ることが知られている。また, RC 版に直径の小さな重錘が比較的低速度 (ここでは, 10 m/s 程度以下) で衝突する重錘落下衝撃の場合も, 入力エネルギーが大きくなると静載荷時と類似した押抜きせん断型の破壊に至ることが著者らの既往の研究¹⁾などで明らかになっている。静載荷時における RC 版の押抜きせん断耐力算定式は種々提案されているものの, 行政機関などで最も汎用的に使用されている式は, 土木学会のコンクリート標準示方書²⁾ (以後, 示方書) 式である。この算定式は, ディープビームやコーベルに比べてせん断スパンが比較的大きな RC 梁のせん断耐力算定式を基本としたもので, 大きな違いは重錘の直径 (載荷面の周長) の影響が考慮できるようになっていることである。

式 (1) に示方書の押抜きせん断耐力算定式を示す。

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

ここに, $f'_{cd} = 0.20 \sqrt{f'_c}$ (N/mm²),

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d: \text{m}),$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p},$$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d),$$

f'_c : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²),

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

また, 図-1 に押抜きせん断破壊のモデル図を示す。図-1 に示すように, 押抜きせん断ひび割れが載荷面の

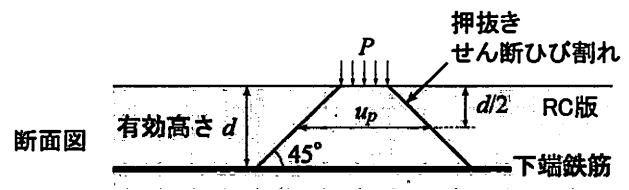


図-1 押抜きせん断破壊のモデル

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, 押抜きせん断耐力は, 押抜きせん断面の平均周長 (設計断面の周長) に有効高さを乗じた押抜きせん断面の表面積にコンクリートの強度や鉄筋比, 有効高さおよび載荷版の大きさに関する影響係数を乗じて算定するものである。一方, 著者らの既往の研究³⁾によれば, せん断破壊型を示す RC 梁が比較的低速度の重錘落下衝撃荷重を受ける場合の動的せん断耐力 (ここでは, 最大支点反力) は, 静的せん断耐力の 2.5 ~ 3 倍程度にな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比較的低速度の重錘落下衝撃荷重を受ける RC 版の動的押抜きせん断耐力算定式を性能照査型設計法に基づき提案するための基礎資料を得ることを目的として実験的検討を行った。著者らは既往の研究で RC 版の衝撃耐荷性状に関する基礎的な検討を実施してきたが, 既往の研究では, (1) 繰返し衝撃載荷実験が多く, 落石などの現象を考えると実挙動と合致しない側面があること, (2) RC 版に衝撃荷重載荷する場合は, 衝突面の局所的な破壊が衝撃耐荷挙動に及ぼす影響が大きいと推察され, その意味でも単一衝撃載荷実験が望ましいこと, (3) 上記の局所破壊の観点から, 衝撃載荷時の重錘の直径 (載荷盤の大きさ) は, RC 版の衝撃耐荷挙動に大きな影響を及ぼすものと考えられるが, これらに関する統一的な検討例はほとんどない⁴⁾ のが現状である。

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

* $\gamma_b = 1.0$

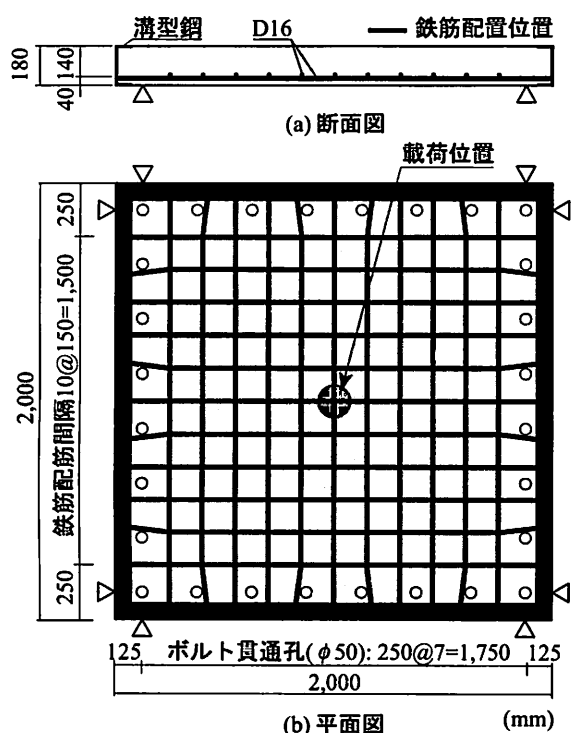


図-2 RC版の形状寸法および配筋状況

そこで本研究では、衝撃荷重時の重錘直径がRC版の衝撃耐荷挙動に及ぼす影響を検討するため、4種類の直径の重錘を用いて単一衝撃荷重実験を実施した。衝突速度は重錘の直径に対して適宜4種類を設定し、衝突速度の範囲は3 m/s ~ 8 m/sである。用いた重錘の質量は直径にかかわらず300 kgとし、RC版の形状寸法、鉄筋比、支持条件は全て同一とした。用いたRC版の総数は全20体である。

2. 実験概要

図-2には、本実験に用いたRC版の形状寸法と配筋状況を示している。RC版の形状寸法は、2,000 × 2,000 × 180 mm、有効高さ140 mmの位置に下端鉄筋を配筋している。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。支持条件は、荷重方法にかかわらず純スパン長1.75 mの4

辺支持としている。なお、支点となる4辺および隅角部でRC版の浮き上がりを拘束している。また、荷重治具は先端部を直径60, 90, 120, 150 mmの4種類の鋼製円柱に交換できるようになっており、荷重面は片当たりを防止するために2 mmのテーパをつけた球面状となっている。荷重方法は、版中央部に所定の高さから質量300 kgの鋼製重錘を一度だけ自由落下させる単一衝撃荷重方式を採用している。落下高さは、実験前に衝突速度の検定を行い、所定の衝突速度となるように決定している。

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。ここで、コンクリートの圧縮強度は3本の供試体による試験結果の平均値である。また、鉄筋の降伏強度は423 MPaであった。測定項目は、重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力、支点治具に内蔵された起歪柱型ロードセルによる合支点反力(以後、支点反力)と非接触式レーザー変位計による荷重点変位とした。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ことが分かる。なお、第1波の継続時間は重錘直径

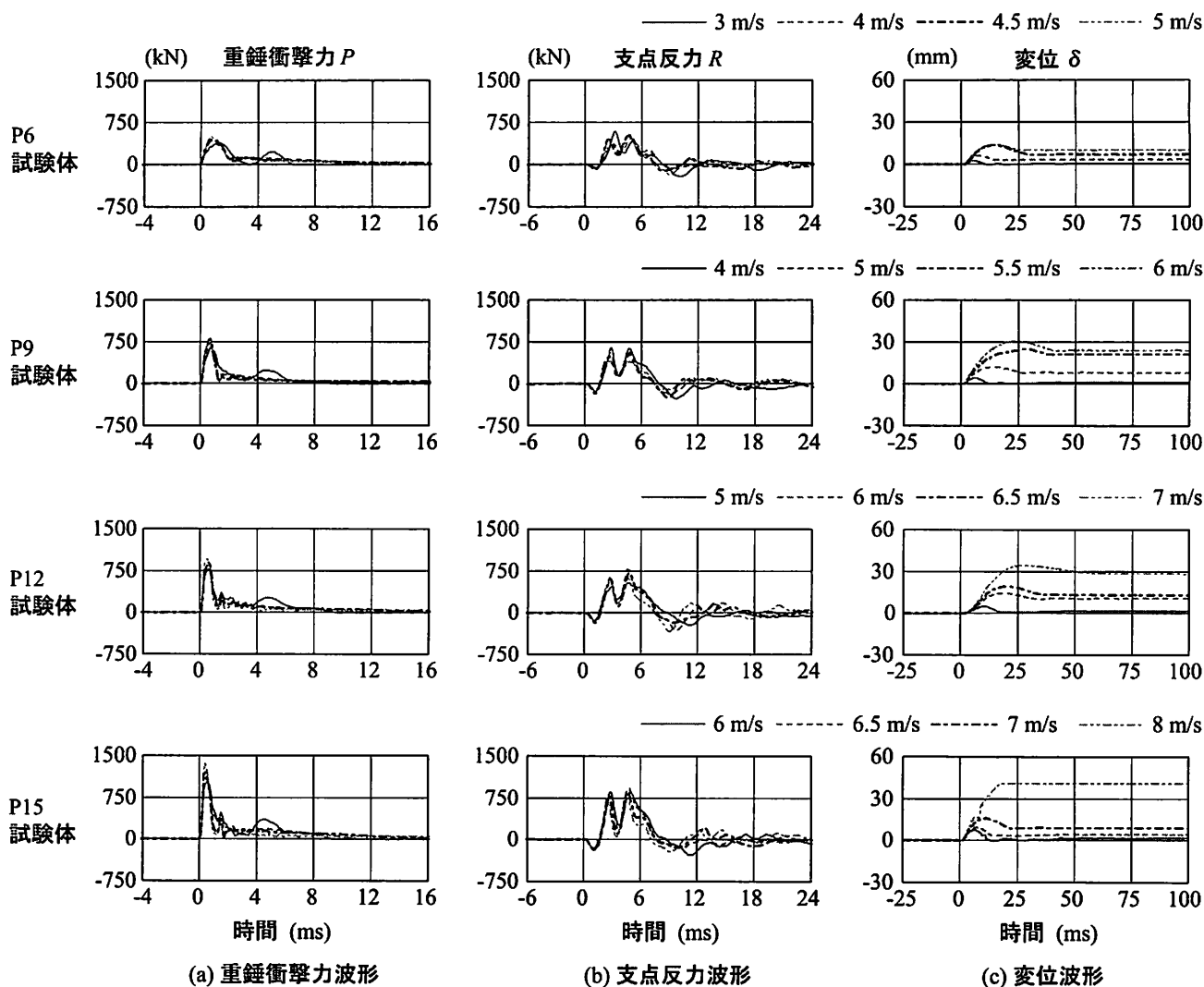


図-3 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

が大きくなるほど短くなる傾向にある。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。

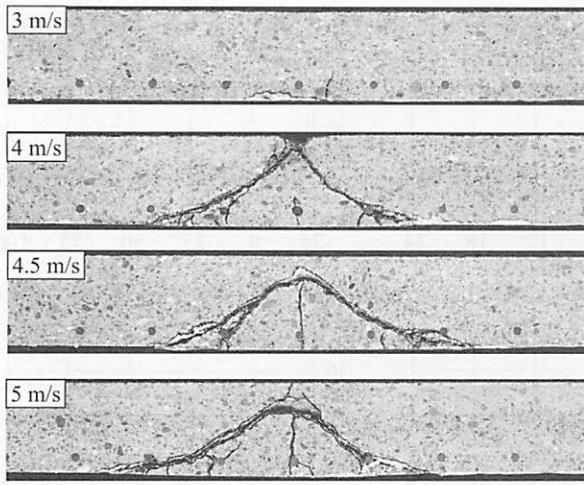
図-3(b)より、支点反力波形 R は、周期が10 ms程度の正弦波に周期が3 ms程度の三角形の波形が合成された性状を呈している。また、重錘衝撃力と同様に重錘の直径が大きくなるほど最大支点反力は大きくなる傾向にある。なお、重錘の直径や衝突速度が支点反力波形の外観や振動周期に与える影響は軽微であることが分かる。

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ほとんど振動状態を示さず、変位が大きく残留していることが分かる。これより、衝突速度の増大にともなって押抜きせん断面が明瞭に形成されたことがうかがわれる。

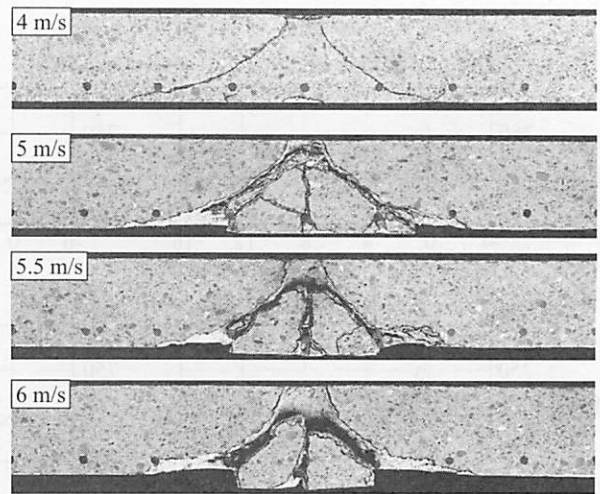
以上のように、重錘落下衝撃荷重を受けるRC版の各種応答波形の性状は、重錘の直径にかかわらずほぼ同様であることが明らかとなった。

3.2 ひび割れ性状

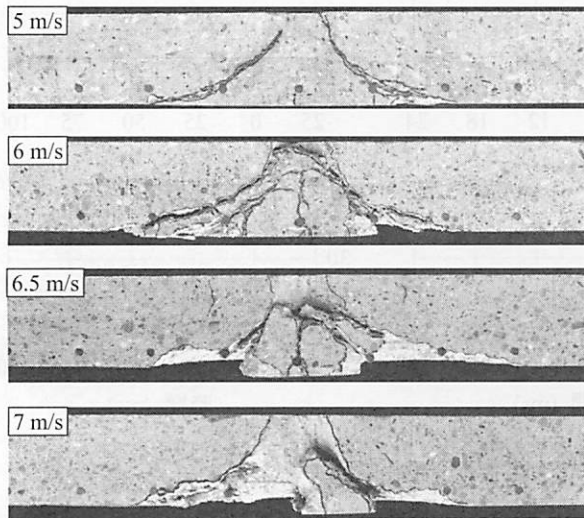
写真-1には、実験終了後におけるRC版の中央部切断面のひび割れ性状を示している。写真-1より、いずれの試験体も押抜きせん断ひび割れが載荷面の端部より斜め約45°下方に向かって進展しており、ひび割れ性状は大略類似していることが分かる。しかしながら、同一衝突速度における押抜きせん断ひび割れの開口幅は重錘の直径が小さいほど広がる傾向にあることが分かる。これは、同一衝突速度（入力エネルギー）に対して重錘の直径が小さいほど載荷面積が小さく、衝撃荷重が集中して作用するためと考えられる。一方、押抜きせん断面は、同一の重錘直径（同一試験体）の場合、衝突速度が大きくなるほど版上縁よりも浅部から形成される傾向にあることが分かる。この傾向は特にP6、P9試験体で明瞭に示されている。これは、重錘の直径が小さい



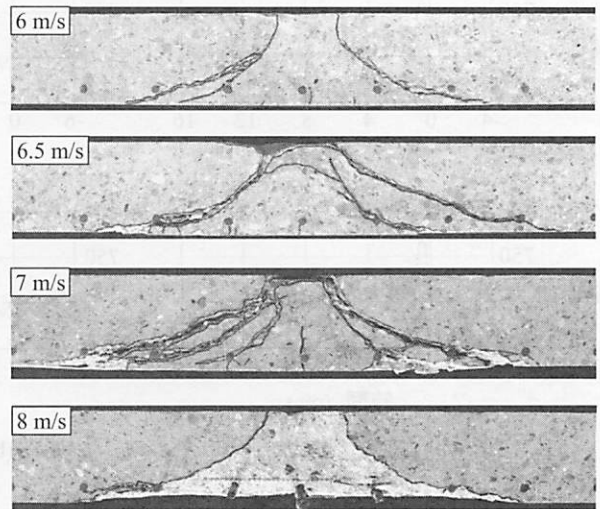
P6 試験体



P9 試験体



P12 試験体



P15 試験体

写真-1 衝撃実験終了後の切断面のひび割れ性状

場合は、衝突速度が大きくなるほど重錘の版内部への貫入が大きくなることに対応するものと考えられる。なお、P12、P15 試験体では衝突速度にかかわらず載荷面の端部から押抜きせん断面が形成される傾向にある。

3.3 各種応答値と動的応答倍率

図-4 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-4 (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 の増加にともなって増大する傾向にあることが分かる。また、同じ衝突速度で比較すると、5 m/s および 6 m/s にかかわらず、重錘の直径が大きいほど最大重錘衝撃力が大きいことが分かる。

図-4 (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ともな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こと

が分かる。また、同一衝突速度で比較すると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。この傾向は特に $V = 6$ m/s 載荷で顕著である。図-4 (c) より、いずれの試験体においても衝突速度 V の増加にともなって最大応答変位が2次曲線的に増大していることが分かる。なお、写真-1 から、最大応答変位が急増する衝突速度において、押抜きせん断面が明瞭に形成されるか、もしくは完全に押抜けていることが分かる。

図-5 に、最大支点反力と変位（最大応答変位および残留変位）の関係を示す。図-5 より、最大支点反力と最大応答変位および最大支点反力と残留変位の関係は、ほぼ同様な傾向を有していることが分かる。すなわち、重錘落下衝撃を受ける RC 版の動的耐力式を変位に基づいて規定する場合、最大応答変位または残留変位のいずれを用いても良いものと判断される。なお、図-5 で白抜きの点は、各試験体の最大支点反力を示す点であり、

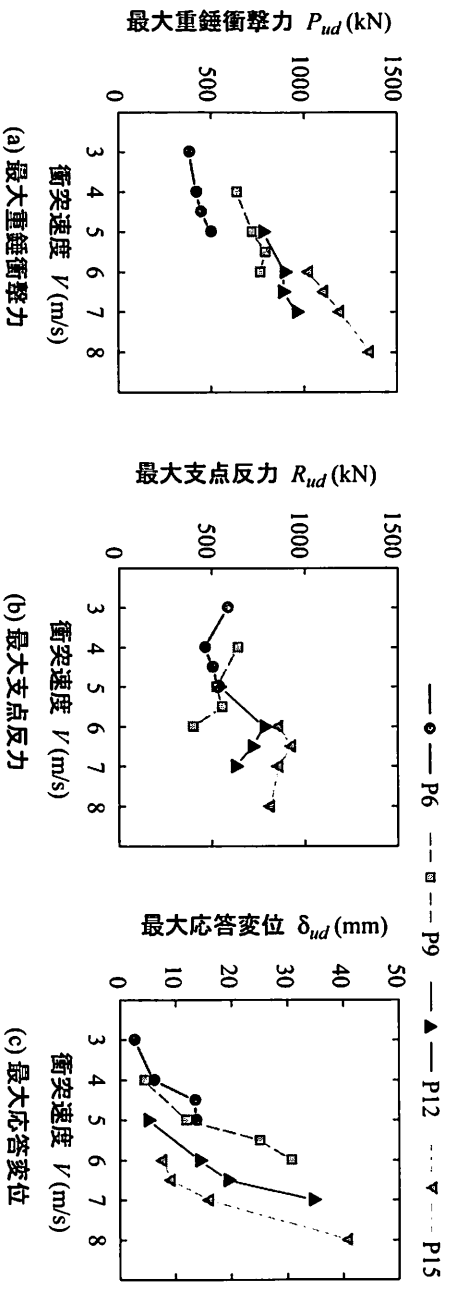
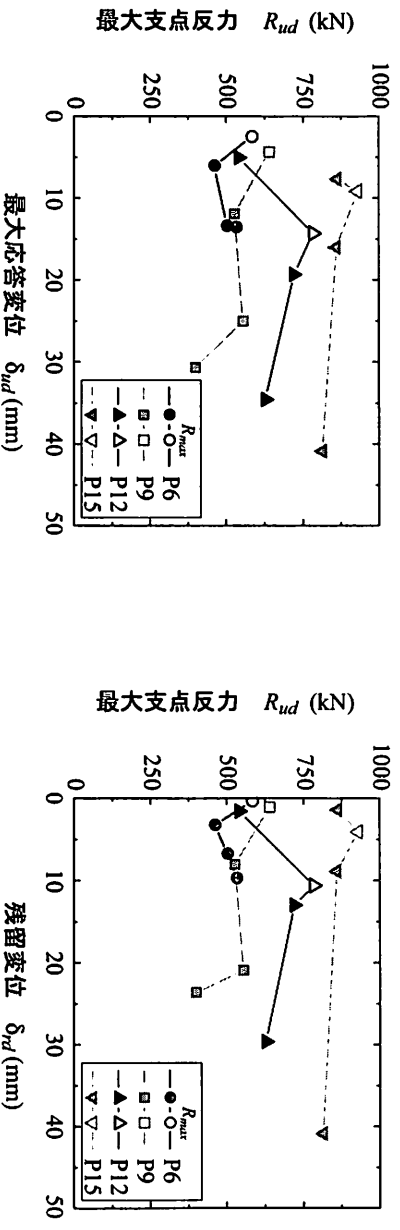


図 4 衝突速度と各種最大応答値の関係



(a) 最大支点反力と最大応答変位との関係

(b) 最大支点反力と残留変位との関係

図 5 最大支点反力と変位との関係

その時の残留変位は、試験体によってバラツキがあるものの最大で 10 mm 程度であり、版の純スパンの 0.6% 程度である。曲げ破壊型 RC 梁の終局時残留変位が、純スパンの 2% 程度と定義される⁵⁾ことが多いことを考えると、その 3 割程度と小さいことが分かる。

ここで、P6, P9 試験体は、最大支点反力時の最大応答変位および残留変位が P12, P15 試験体に比べて大幅に小さいことが分かる。これは、重錘の直径が小さいため、重錘が RC 版内部に貫入しやすく、版としての全体挙動よりも局部損傷の影響が大きくなるためと推察される。すなわち、RC 版の限界状態を変位で規定する際には、重錘直径の影響を考慮する必要があるものと考えられる。

表 1-2 には、本実験に用いた試験体の静的耐力および動的耐力を一覧にして示している。表中の終局速度とは、最大支点反力（動的耐力）が生じた衝突速度である。静的耐力は、計算値と別途実施した静載荷実験より得られた実測の押抜きせん断耐力の両方を示した。また、動的耐力（ここでは、最大支点反力）を静的耐力で除した動的応答倍率を併せて示した。なお、動的応答倍率は、実測の静的押抜きせん断耐力を用いた場合と計算値の静的

押抜きせん断耐力を用いた場合の両方について示している。表 1-2 より、動的せん断耐力も静的押抜きせん断耐力と同様に、重錘直径の増加に対応して増大する傾向にあることが分かる。

図 6 には、動的応答倍率と重錘直径の関係を示している。動的応答倍率は、実測値の静的押抜きせん断耐力と計算値を用いた場合を併せて示した。図 6 から、実測値の静的押抜きせん断耐力を用いた動的応答倍率は、重錘の直径にかかわらず 2.2 ~ 2.5 程度であり、動的応答倍率を 2 程度と考えることで、RC 版の動的押抜きせん断耐力を安全側に評価可能であることが分かる。一方、計算値の静的押抜きせん断耐力を用いた動的応答倍率は、2.4 ~ 3.1 程度であり、重錘の直径が大きい P12, P15 試験体では 3 程度を示している。

なお、本研究における衝突速度は最大で 8 m/s であり、ひずみ速度の影響は顕著でないものと推察される。また、実測の動的応答倍率は 2.2 ~ 2.5 程度を示したが、全般的には重錘の直径が大きいほど小さくなる傾向にある。このように、RC 版の動的応答倍率は、既往の研究³⁾におけるせん断破壊型 RC 梁の動的応答倍率 2.5 ~ 3 程度

表-2 静的耐力および動的耐力一覧

試験体名	終局速度 V(m/s)	計算押抜き せん断耐力 V_{pcd} (kN) (i)	静的 せん断耐力 P_{us} (kN) (ii)	動的 せん断耐力 R_{ud} (kN) (iii)	動的 応答倍率 (iii) / (ii)	計算動的 応答倍率 (iii) / (i)
P6	3	247.4	229.3	583.1	2.54	2.36
P9	4	271.9	287.5	638.9	2.22	2.35
P12	6	253.3	336.2	782.7	2.33	3.09
P15	6.5	311.4	442.2	929.4	2.20	2.98

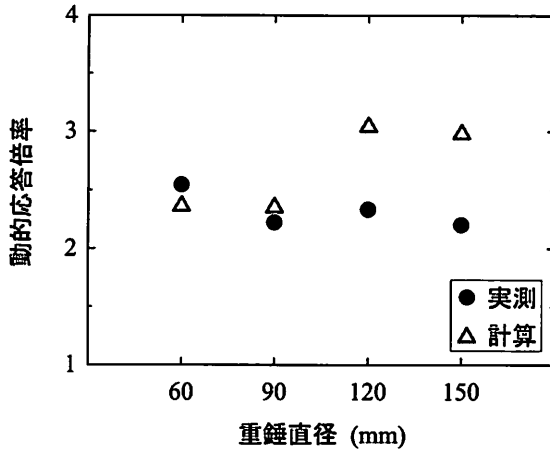


図-6 動的応答倍率と重錘直径との関係

に比べて多少小さい。これは、曲げ変形しにくい RC 版の方が、変形しやすい RC 梁に比べて動的応答倍率が小さくなるためと考えられる。また、重錘の直径が大きい場合には、見掛け上、版の剛性が大きく、変形しにくい状態となるため動的応答倍率は小さく示されるものと考えられる。一方、P12、P15 試験体の計算動的応答倍率が 3 程度と大きいのは、重錘直径が大きい場合の計算押抜きせん断耐力が実測値の 70～75% 程度と小さかったことに起因している。

4. まとめ

本研究では、比較的低速度の重錘落下衝撃荷重を受ける RC 版の動的耐力算定式提案のための基礎資料の収集を目的に、同一の形状寸法、配筋、支持条件を有する RC 版を用いて、重錘の質量を同一として直径を 4 種類に変化させた単一衝撃載荷実験を行った。本研究の範囲内で

得られた結論を以下に要約する。

- 1) RC 版の各種応答波形の性状は、重錘直径にかかわらずほぼ同様である。
- 2) 重錘直径が小さいほど載荷治具が版内部に貫入し、押抜きせん断面が版上縁よりも浅部から形成される。
- 3) RC 版の限界状態を変位で規定する場合、重錘の直径が応答変位や残留変位に大きな影響を与えるため、重錘直径の影響を考慮する必要がある。なお、変位の規定は最大応答変位でも残留変位でも可能と考えられる。
- 4) 実測の静的押抜きせん断耐力を用いた動的応答倍率は、重錘直径にかかわらず 2.2～2.5 程度であり、動的応答倍率を 2 程度と考えることで安全側の評価が可能である。

参考文献

- 1) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 田口史雄: PVA 短繊維混入による 4 辺支持 RC 版の耐衝撃性向上効果に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1249-1259, 2006.3
- 2) 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.
- 3) 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 (CD-R), 2006.
- 4) 土木学会: 構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004.
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.177-190, 2000.4