

## 低速度衝撃を受ける四辺支持 RC 版の耐衝撃設計法に関する一提案

An impact resistant design procedure for simply supported RC slabs under low-velocity impact loading

岸 徳光\*, 三上 浩\*\*, 栗橋 祐介\*\*\*

Norimitsu Kishi, Hiroshi Mikami and Yusuke Kurihashi

\*工博 室蘭工業大学理事・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) 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)

\*\*\*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)

In this paper, compiling the experimental data of simply supported RC slabs under low-velocity impact loading which is below the impact velocity of 10 m/s, impact resistant behavior of the RC slabs is investigated and a new concept of impact resistant design procedure is proposed. For this research, total 45 specimens are used, in which the specimens for static loading test are included and the parameters of effective height of the slab, main rebar ratio, diameter of the falling-weight and compressive strength of concrete are considered. From this study, following results are obtained; 1) effects of the compressive strength of concrete and diameter of the falling-weight on impact resistant behavior are significant; 2) impact forces estimated by using Hertz's contact theory are five times greater than the measured weight impact forces and those are better correlated each other; and 3) impact resistant design procedure is formulated using calculated impact force, dynamic amplification factor and calculated static load-carrying capacity.

**Key Words** :low-velocity impact, RC slab, impact resistant design

キーワード：低速度衝撃，RC 版，耐衝撃設計

### 1. はじめに

現在まで、写真-1 に示すロックシェッド (落石覆工) や砂防ダムなどの耐衝撃構造物が数多く建設され、安全・安心な国土形成に大きく貢献してきた。一方で近年の異常気象により、各地で土砂災害などが頻発し、これらに対応するべく社会資本整備がより一層重要となっている。ロックシェッドの頂版などに見られる鉄筋コンクリート (RC) 版など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が知られている。一方、これらの RC 版部材に衝突体が高速度 (数 10 m/s 以上) で衝突すると、貫入、貫通や裏面剥離などの高速衝突特有の破壊形式を示すことも良く知られている。RC 版部材の高速衝突に関する研究は古くから世界の多くの研究機関で実施され、精度の高い設計式<sup>1)</sup>も提案されている。また、高速衝突を受ける RC 版部材を鋼製のプレートで補強する検討<sup>2)~3)</sup>も既に行われている。

これに対して、ロックシェッドの頂版のように比較的 low-velocity の衝撃を受ける RC 版部材の耐衝撃性に関しても多くの研究例があるものの、ロックシェッドを対象とすることから、衝突体が直接的に版に衝突するのではなく、頂版上に設置された敷砂緩衝材や三層緩衝



写真-1 ロックシェッドの例

構造などに衝突することを想定した研究<sup>4)~5)</sup>が多い。衝突体が比較的 low-velocity で RC 版に直接衝突する場合の検討例は、著者らの既往の研究例<sup>6)~7)</sup>を含め幾つか報告されているものの、耐衝撃設計法にまで言及した検討例はほとんど見受けられない。

前述したように、高速度で衝突体が RC 版部材に直接衝突する際の各種限界状態 (貫入、貫通、裏面剥離など) に対応可能な設計式が多くの実験データをもと

に提案されている。一方、落石などの衝突速度は前述した実験における衝突速度よりもかなり低く、衝突体の質量が大きいなど、上記設計式の適用範囲外であることが多い。また、ロックシェッド頂版上には緩衝材が設置されており、落石が頂版に直接衝突することは少ないものと考えられる。しかし、緩衝材を設置することで伝達される衝撃力が軽減され、衝撃荷重の分布範囲が広がるものの RC 版部材に衝撃力が作用することには変わりがなく、伝達された衝撃荷重を設計荷重として RC 版部材の安全性を照査する必要がある。すなわち、ロックシェッドの頂版などに適用可能な耐衝撃設計法を確立するためには、その基本となる比較的 low 速度かつ直接衝突を想定した耐衝撃設計法を最初に確立することが肝要と考えられる。

本研究では、著者らが実施した比較的 low 速度 (10 m/s 程度以下) の直接衝突を受ける RC 版に関する実験結果を総合的に取りまとめ、耐衝撃性に与える影響因子や影響度合を明らかにするとともに、RC 版の耐衝撃設計法を提案した。実験は、RC 版の有効高さや下端鉄筋比および重錘の直径に着目して実施しているが、コンクリート強度が 20.2 ~ 37.4 MPa まで分布したことから、コンクリート強度の影響についても併せて検討した。本実験内における破壊形式が静載荷実験と同様な押抜きせん断破壊型であったことから、提示の耐衝撃設計法は、作用衝撃力が静載荷時と類似であるものと仮定し、動的耐力を照査する形で定式化している。なお、作用衝撃力はヘルツの接触理論を基に算出し、実測値の重錘衝撃力と比較検討した結果を踏まえ、ヘルツ式による計算値を補正して用いることとした。一方、設計用の動的耐力は、実験結果の最大支点反力とし、実験結果から得られた動的応答倍率 (最大支点反力を静的押抜きせん断耐力で除した値) を基に算定評価することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 RC 版の形状寸法および実験方法

表 1 には、試験体の一覧を示している。試験体は、重錘の直径や下端鉄筋比および RC 版の有効高さ (かぶり厚さは全て同一) を変化させた全 9 種類である。なお、試験体の種類は試験体名の第 1 項目で分類することとし、各々 P: 重錘の直径, D: 下端鉄筋比および, H: 版の有効高さを変化させた試験体であることを示している。また、後続の数値では、重錘の直径 (cm 単位), 鉄筋径および版の有効高さ (mm 単位) を示している。なお、D16 と H180 試験体は同一の試験体である。また、P6 試験体の有効高さ、鉄筋比および重錘直径は D16 および H180 試験体と同様であるが、コンクリート強度が大幅に異なるため、ここでは異なる試験体として扱っている。

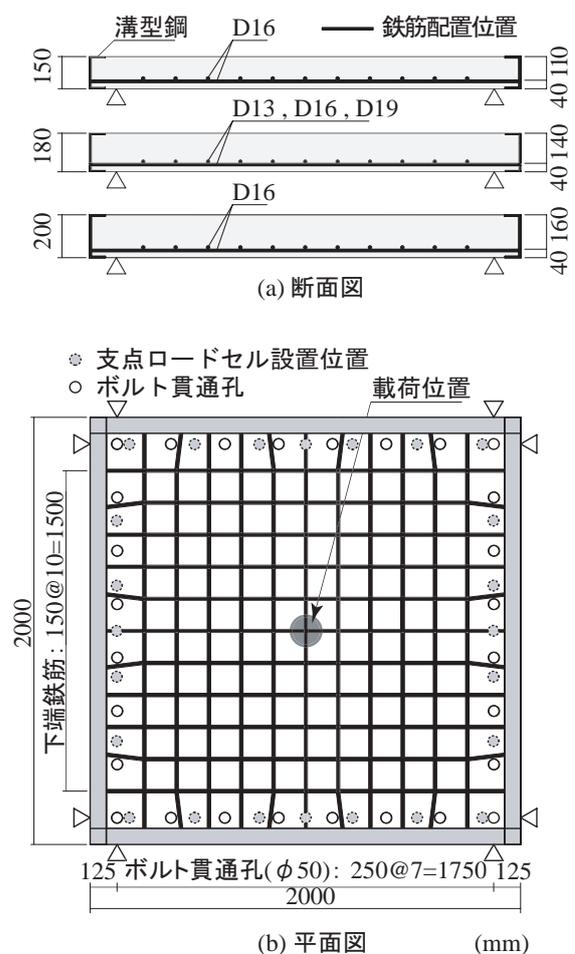


図 1 RC 版の形状寸法および配筋状況

各試験体には、直径に関わらず質量が 300 kg の重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一衝撃載荷方式で衝撃荷重を作用させた。また、既往の研究例<sup>6)~7)</sup>を参考に各々の試験体種類で衝突速度を 4 段階に変化させて衝撃載荷実験を行っている。試験体数は、別途実施した静載荷実験 (静的押抜きせん断実験) と併せて 9 種類 × 5 体の合計 45 体である。なお、表 1 には、静載荷実験の結果と計算値をあわせて示している。計算値は土木学会のコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に準拠し、表中の材料試験結果を用い  $\gamma_b = 1.0$  として算出している。

図 1 には、RC 版の形状寸法、配筋の状況を示している。RC 版の寸法は全ての試験体で 2,000 × 2,000 mm であり、版の厚さは全ての試験体で 110, 140, 160 mm (有効高さ) のいずれかである。いずれの RC 版も版下端に所定の鉄筋を芯かぶり 40 mm で配置している。なお、各鉄筋は版中央部より 150 mm 間隔で格子状に配筋し、4 辺に設置した溝型鋼に溶接して定着を確保している。写真 2 には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。支持条件は、載荷方法 (静載荷、衝撃載荷) に関わらず、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

表-1 試験体一覧

試験体名	重錘直径 (mm)	有効高さ (mm)	鉄筋径	鉄筋比 $p$ (%)	降伏強度 (MPa)	コンクリート圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	衝突速度 $V$ (m/s)	計算押抜きせん断耐力* $V_{pcd}$ (kN)	実測押抜きせん断耐力 $P_{us}$ (kN)
P6	60	140	D16	1.1	423	27.2	3, 4, 4.5, 5	247.4	229.3
P9	90					27.4	4, 5, 5.5, 6	271.9	287.5
P12	120					20.2	5, 6, 6.5, 7	253.3	336.2
P15	150					26.3	6, 6.5, 7, 8	311.4	442.2
D13	60	140	D13	0.7	377	26.6	4, 4.5, 5, 6	210.6	253.3
D16(H180)			D16	1.1	380	37.4	4, 5, 5.5, 6	289.9	284.5
D19			D19	1.6	403	30.4	4, 4.5, 5, 6	295.7	283.9
H150	60	110	D16	1.4	380	32.2	3, 4, 5, 6	189.4	200.7
H200		160		1.0		34.1	5, 6, 6.5, 7	338.0	324.5

\*  $\gamma_b = 1.0$

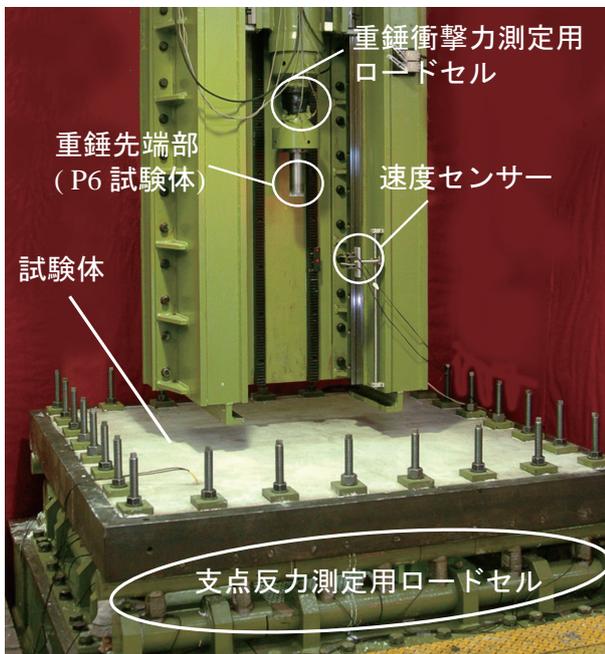


写真-2 実験状況

部でRC版の浮き上がりを拘束しているが、支点治具全体は回転を許容する構造となっている。重錘落下衝撃実験および静荷重実験ともに、載荷治具先端は直径60, 90, 120, 150 mmの4種類の鋼製円柱に交換可能であり、載荷面はいずれの直径に対しても2 mmのテーパが付いた球面状となっている。なお、重錘落下衝撃実験における落下高さは、実験前に衝突速度の測定を行い、所定の衝突速度になるように決定している。試験体に用いたコンクリートの圧縮強度は最小で20.2 MPa、最大で37.4 MPaであった。なお、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。用いた鉄筋は全てSD345であり、降伏強度は鉄筋径にかかわらず377~423 MPa程度であり大差はない。

## 2.2 測定項目と測定機器

本実験での測定項目は、載荷荷重  $P$  (以後、静荷重実験では静荷重、重錘落下衝撃実験では重錘衝撃力と呼ぶ)、合支点反力  $R$  (4辺の支点反力の合計、以後単に支点反力と呼ぶ)、載荷点変位  $\delta$  (以後、単に変位と呼ぶ)の各応答波形である。ここで、支点反力は合計24個のロードセルから得られた波形を合算したものである。なお、各ロードセルの波形は、載荷点とロードセルの位置関係に影響されるため必ずしも同様とはならないが、載荷点に関して対称な位置に設置されたロードセルの波形はほぼ同様であることを確認している。実験終了後には、版裏面のひび割れをトレースし、ひび割れ図を作成している。また、RC版の中心線に沿って切断し、切断面の状況を観察している。

静荷重測定には、容量500 kNの静荷重測定用ロードセルを用い、重錘衝撃力測定には容量が1,470 kN、応答周波数がDC~4.0 kHzのロードセルを用いている。支点反力は容量が980 kN、応答周波数がDC~2.4 kHzのロードセルを24個用いた。なお、支点反力測定用のロードセルは図-1に示すように支点治具に内蔵されている。変位は容量500 mm、応答周波数が915 Hzの非接触式レーザー変位計を用いて版下面中央部を測定している。本実験ではコンクリート片の飛散、剥落が主としてRC版裏面に形成される円形状ひび割れ周辺で生じることから、版中央部のみに限定して変位計測を行うこととした。その結果、すべての試験体、衝突速度で変位は良好に計測可能であった。変位計測を多点で行う場合や押し抜きせん断コーン内部のコンクリートが一気に飛散、剥落する衝突速度下では、レーザー変位計に変わる変位計測手法の導入が必要になるものと考えられる。

なお、重錘落下衝撃実験では、各応答波形を広帯域用データレコーダで一括収録し、メモリレコーダを用いて最大200 msまで0.1 ms/wordでA/D変換してい

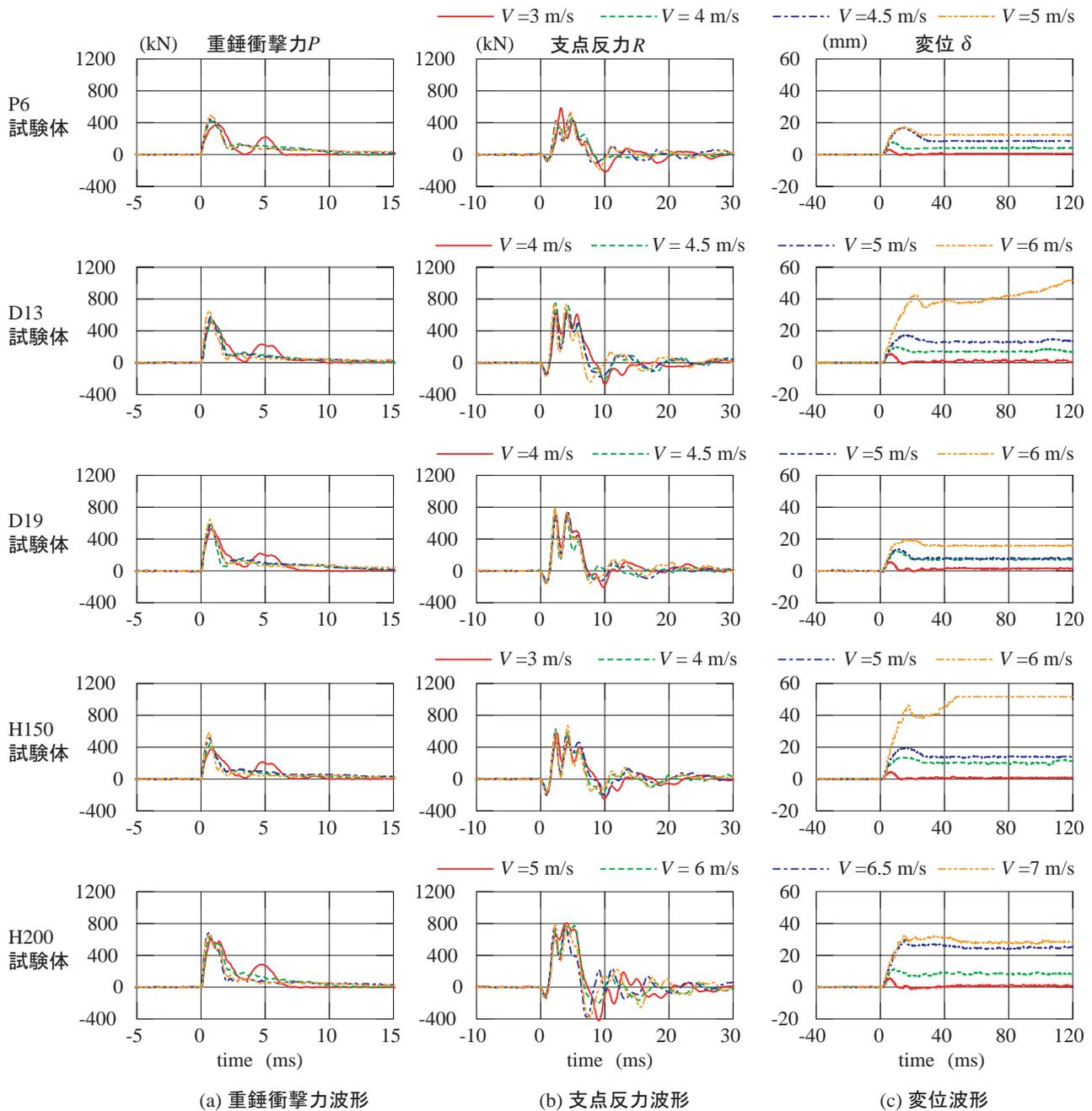


図-2 重錘衝撃力，支点反力および変位波形

る。重錘衝撃力波形は高周波成分が卓越するため、また、変位波形は卓越する成分が少ないことから原波形を用いることとした。一方、支点反力波形は低周波成分が大きく卓越することより、矩形移動平均法でノイズ処理のための平滑化を行っている。なお、移動平均の範囲は原波形の性状を変化させないように0.5 ms (5word) とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 各種応答波形

図-2には、各種試験体の重錘衝撃力，支点反力および変位波形の一例を示している。ここでは、紙面の

都合から、後述する衝撃耐荷挙動が特徴的であった試験体に着目して整理した。すなわち、基準となるP6試験体に対して鉄筋比が小さいD13と大きいD19試験体および版厚の小さいH150と版厚の大きいH200試験体の5体に着目して取りまとめた。なお、重錘直径の影響に関しては、既往の研究<sup>7)</sup>にて、その影響を詳細に報告していることから、ここでは割愛することとした。

図-2より、各試験体の重錘衝撃力および支点反力の波形性状は大略類似しており、試験体の種類が両波形性状に及ぼす影響は顕著でないことがわかる。ただし、H200試験体の支点反力波形は他の試験体と多少異なり、特に衝突速度が小さい場合に明瞭な減衰自由

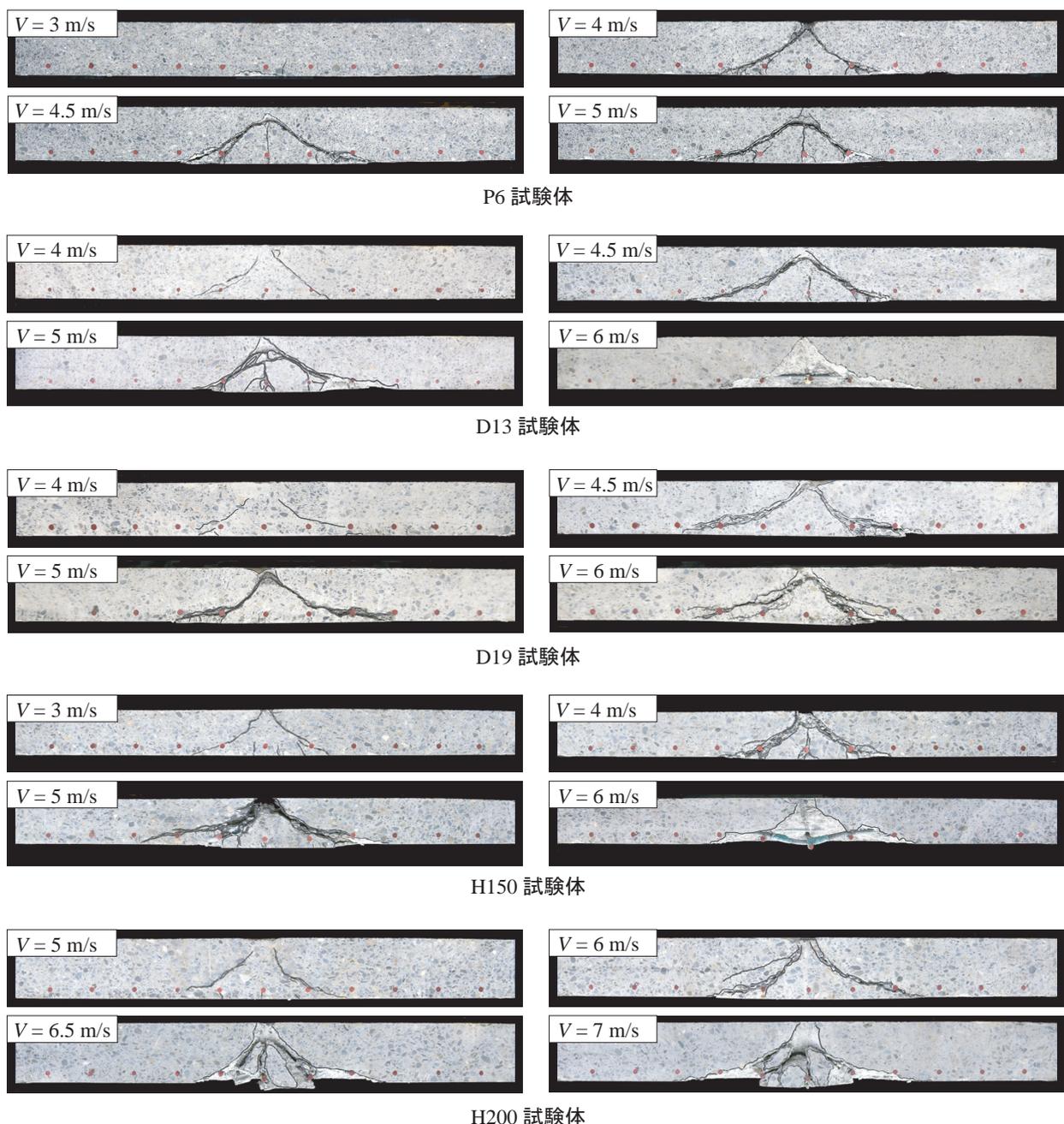


写真-3 衝撃実験終了後の切断面のひび割れ性状

振動状態を示していることがわかる。これは、H200試験体は有効高さが大きく、RC版の質量が大きいことに関連するものと考えられる。一方、変位波形の性状は、衝突速度が小さい場合には正弦半波状を示した後変位がほぼ零程度に回復するものの、衝突速度が大きい場合には変位が大きく残留する傾向が認められる。変位が大きく残留する衝突速度は試験体の種類によって異なるが、特にD13、H150試験体の最終衝突速度において大きく残留する傾向が認められる。上記の2試験体は、いずれも曲げ剛性が小さい試験体であることより、曲げ剛性が残留変位に大きな影響を及ぼしていることがうかがわれる。

一方、衝突速度の重錘衝撃力および支点反力への影

響は顕著ではないものの、応答変位や残留変位の影響は大きい。すなわち、応答変位や残留変位は明瞭な押抜きせん断面が形成され、せん断面の開口が拡大するか否かで大きく異なるものとの推察される。なお、P6、H200試験体では、後述の表-2に示すように、各々 $V = 3 \text{ m/s}$ 、 $5 \text{ m/s}$  载荷で最大支点反力が生じたが、その際の応答変位や残留変位は極めて小さい。一方、D13、D19 および H150 試験体で最大支点反力が生じた衝突速度は各々 $V = 4.5$ 、 $6.0$ 、 $6.0 \text{ m/s}$  载荷時であったが、その際の応答変位や残留変位は極めて大きい。このように、最大支点反力発生時における応答変位や残留変位は試験体によって大きく異なることがわかる。

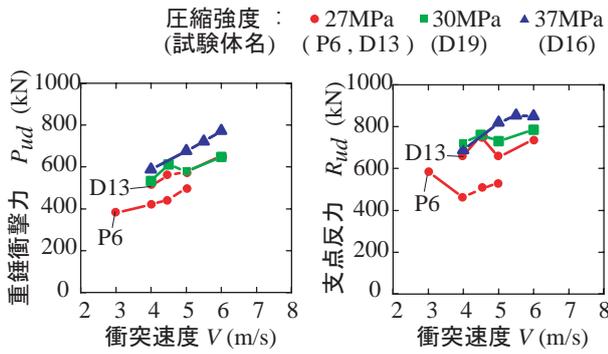


図-3 衝突速度と重錘衝撃力，支点反力の関係

### 3.2 ひび割れ性状

写真-3には、各種試験体の実験終了後における切断面のひび割れ性状を示している。ここでも3.1節と同様の試験体に着目して結果を整理している。P6試験体の $V = 3 \text{ m/s}$  載荷では、押抜きせん断面が未だ形成されていないことより、試験体は弾性に近い挙動を示したものと考えられる。 $V = 4 \text{ m/s}$  以降では押抜きせん断面が明瞭に形成されており、特に $V = 4.5$  および $5 \text{ m/s}$  では、押抜きせん断面は版の上縁からではなく、より低い位置から形成されている。これは、版内部に重錘が貫入したためと考えられる。なお、最大支点反力は $V = 3 \text{ m/s}$  載荷時に生じたことから、重錘の直径が小さい場合には、衝突速度のわずかな増加で版に押抜きせん断面が形成され、さらに重錘が版内部に貫入しやすい傾向にあることがうかがわれる。

一方、鉄筋比が小さいD13試験体では、 $V = 4 \text{ m/s}$  載荷時に押抜きせん断面が既に形成されているもののひび割れの開口は小さい。一方、 $V = 4.5$  および $5 \text{ m/s}$  載荷時には、押抜きせん断面が明瞭に形成され、ひび割れが大きく開口している。また、押抜きせん断面がP6試験体と同様に版上縁よりも低い位置から形成されていることがわかる。なお、D13試験体では、 $V = 4.5 \text{ m/s}$  載荷時に最大支点反力が生じ、 $V = 6 \text{ m/s}$  載荷時には押抜きせん断面より内側のコンクリートが全て剥落していることがわかる。これは衝撃荷重の作用により押し抜きせん断コーン内部のコンクリートが粉体化し、それが版切断時に剥落したことによるもので、衝撃荷重作用時に内部コンクリートが一気に剥落したものではない。

D19試験体もD13試験体と同様に $V = 4 \text{ m/s}$  載荷時には、押抜きせん断面が形成されているもののひび割れの開口は顕著ではない。その後、衝突速度の増加に対応してひび割れの開口は顕著となるが、P6やD13試験体に見られた重錘の版内部への貫入は顕著ではない。それに対して、版下端の鉄筋に沿う水平ひび割れが顕在化しており、鉄筋比がひび割れ性状に影響を及ぼしていることがわかる。なお、後述の表-2に示すように、最大支点反力は最も大きい衝突速度である

$V = 6 \text{ m/s}$  載荷時に生じているが、最大支点反力の大きさはD13試験体に比べて小さい。

H150およびH200試験体のひび割れ性状を比較すると、H150試験体では $V = 3 \text{ m/s}$  載荷時に、H200試験体では $V = 5 \text{ m/s}$  載荷時に押抜きせん断面が明瞭に形成されているものの、未だひび割れの開口は少ないことがわかる。ともに衝突速度の増加に対応してひび割れの開口や押抜きせん断面内部コンクリートの損傷が顕在化している。なお、最大支点反力は、H150試験体の場合には最も大きな衝突速度である $V = 6 \text{ m/s}$  載荷時に生じており、H200試験体の場合には最も小さな衝突速度である $V = 5 \text{ m/s}$  載荷時に生じている。しかしながら、最大支点反力の大きさは、H200試験体の方がH150試験体よりも2割程度大きい。

以上から、1)各試験体ともに衝突速度を増加させることにより、押抜きせん断型の破壊性状を示すこと、2)最大支点反力は必ずしも同様な押抜きせん断面の形成状況、すなわち損傷状況で生じるものではないこと、3)試験体の種類によって押抜きせん断面の形成状況は微妙に異なること、などが明らかになった。これらは、後述するように最大支点反力発生時の応答変位や残留変位が試験体間で大きく変動することの要因になっているものと考えられる。

なお、構造物の安全性照査は、設計荷重のもとで全ての構成部材が断面破壊の限界状態に至らないことを確認することで行われる必要がある。本論文では、最大支点反力(動的耐力)が生じる衝突速度以上において押し抜きせん断破壊が顕在化し、RC版裏面に形成される円形状ひび割れ周辺のコンクリートが飛散して第三者被害を及ぼす危険性のあることが明らかになったため、最大支点反力発生時(動的耐力時)をRC版部材の安全性に関する限界状態と定義することとした。

### 3.3 各種応答値

図-3に重錘直径が60mmの試験体の衝突速度と重錘衝撃力および支点反力の関係をコンクリートの圧縮強度に着目して取りまとめた。重錘衝撃力は、各試験体ともに衝突速度の増加に伴い線形的に増大する傾向にあることがわかる。また、コンクリートの圧縮強度が高いほど重錘衝撃力が大きくなる傾向にある。

一方、支点反力は線形的に増加する傾向にはなく、ある衝突速度で最大値を示した後、減少するかほぼ一定値を示す傾向にある。なお、支点反力もコンクリート強度が高いほど大きくなる傾向が認められる。これより、各試験体の実測値を総合的に比較検討して耐衝撃性を把握するためには、コンクリート強度の影響を考慮する必要があるものと考えられる。

以上の観点から、今後の考察ではコンクリート強度で補正した実測値を用いることとする。補正方法は、衝撃載荷実験および静載荷実験ともに破壊形式が押抜

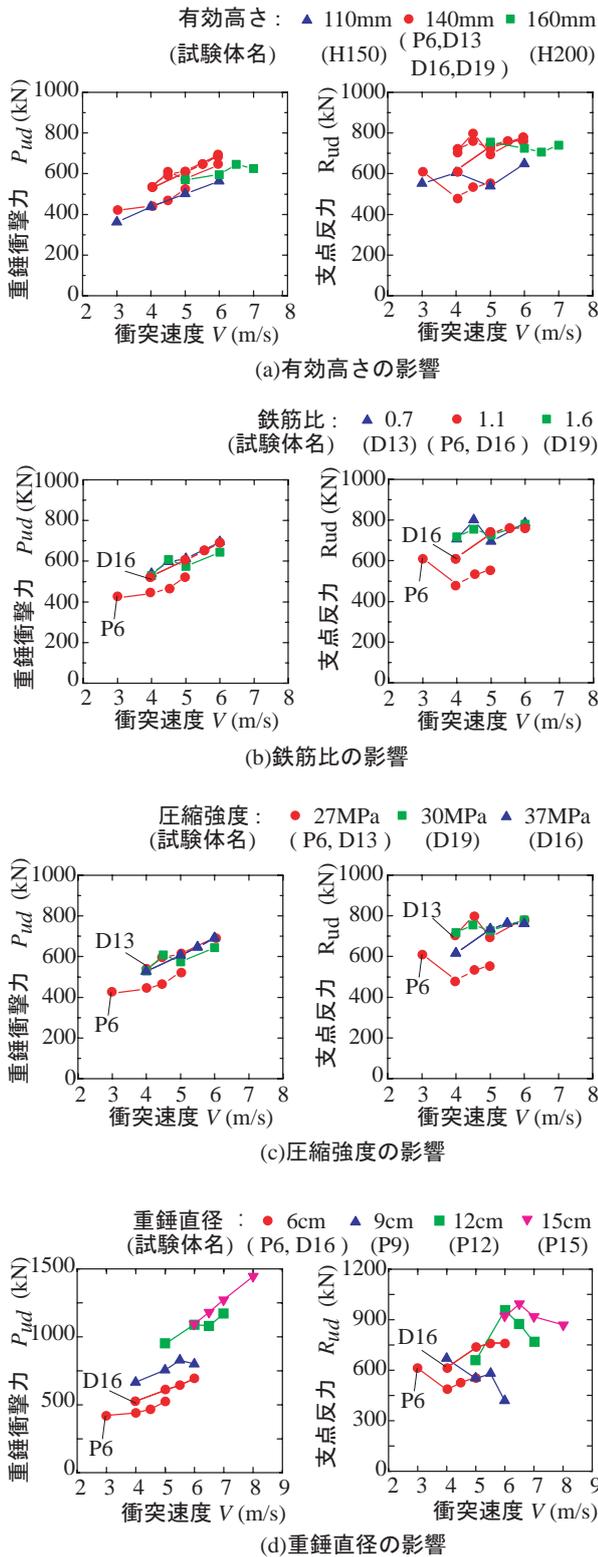


図-4 衝突速度と補正後の重錘衝撃力，支点反力の関係

きせん断破壊型であることから，コンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力算定式<sup>8)</sup>を援用することとした。すなわち，荷重(力)を示す物理定数である重錘衝撃力および支点反力はコンクリート強度の1/2乗に比例するものとし，全試験体の平均的なコンクリート

強度である 30 MPa を基準として正規化を行った。具体的には，ある試験体のコンクリート強度を  $f'_c$  とすると，実測の重錘衝撃力や支点反力に  $(30 / f'_c)^{1/2}$  を乗じて正規化を行っている。

図-4 に強度補正を行った後の重錘衝撃力および支点反力と衝突速度の関係をとりまとめた。(a) は版の有効高さ，(b) は鉄筋比，(c) は圧縮強度に着目して整理したものである。なお，いずれも重錘の直径が 60 mm の試験体の結果である。(a) 図から，版の有効高さが 110 mm の場合，160 mm と比較して重錘衝撃力および支点反力が小さいことがわかる。しかし，140 mm の実験結果には 110 mm や 160 mm の結果と同程度の場合もあることから，版の有効高さは重錘衝撃力や支点反力に影響を及ぼすものの，その他にも影響する因子があることがわかる。

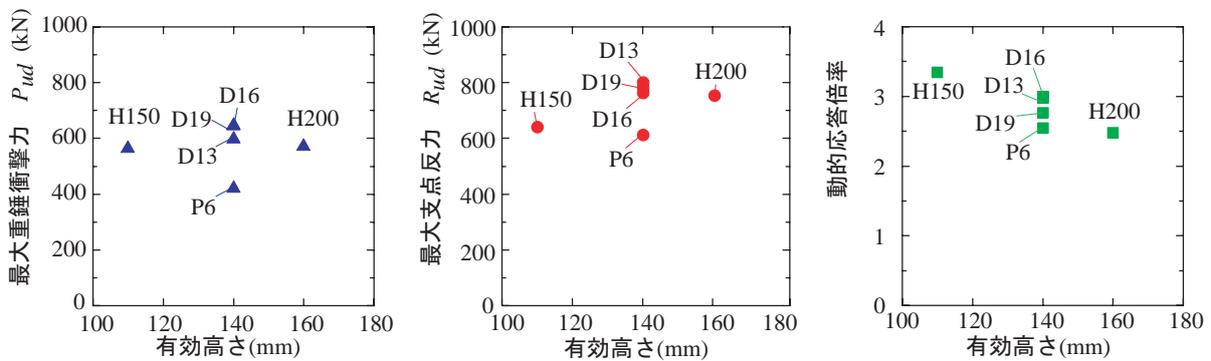
一方，(b) 図から，P6 試験体の結果を除いて鉄筋比にかかわらず重錘衝撃力および支点反力が同程度の分布性状を示していることから，鉄筋比が重錘衝撃力および支点反力に及ぼす影響は軽微であることがわかる。ただし，鉄筋比が最も小さい D13 試験体の支点反力は他の試験体に比べて変動が大きく， $V = 4.5$  m/s 載荷時に生じた最大支点反力は他の試験体に比べて大きい。これは後述するように，曲げ剛性によるものと推察される。(c) 図から，P6 試験体の実験結果を除いて圧縮強度を用いて補正することにより重錘衝撃力および支点反力がほぼ同等になることがわかる。すなわち，圧縮強度を補正することで各試験体の耐衝撃性を統一的に比較・検討できることがわかる。なお，P6 試験体で一般的に重錘衝撃力および支点反力が小さい理由は，今後の検討課題である。(d) 図は，重錘の直径に着目して整理したもので，一般的に重錘衝撃力は重錘の直径が大きいほど大きくなる傾向が認められる。また，支点反力も重錘直径が大きいほど大きくなる傾向にあるが，その傾向は重錘衝撃力ほど明瞭ではない。

### 3.4 最大応答値

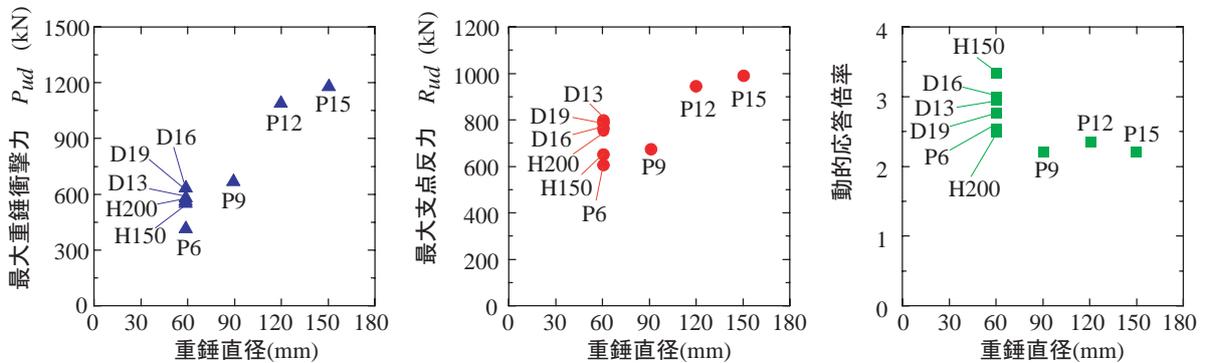
表-2 には，各試験体の最大応答値の一覧を示している。なお，実測値，計算値ともにコンクリート強度を 30 MPa として補正している。ここでは，最大支点反力が生じた衝突速度，最大支点反力，最大重錘衝撃力，計算押抜きせん断耐力，実測押抜きせん断耐力および実測と計算の動的応答倍率を示している。なお，最大支点反力に着目したのは，3.2 節で述べたように最大支点反力発生時を RC 版部材の安全性に関する限界状態と定義したことおよび著者らの既往の研究<sup>6)~7)</sup>において，最大支点反力を動的耐力として定義，評価してきたことによる。すなわち，図-4 に示したように，重錘衝撃力は衝突速度の増加に対応して増大する傾向にあり，耐力を評価するための指標とはな

表-2 各試験体の最大応答値

試験体名	衝突速度 $V$ (m/s)	最大支点反力 $R_{ud}$ (kN) (i)	最大重錘衝撃力 $P_{ud}$ (kN)	計算押抜きせん断耐力 $V_{pcd}$ (kN) (ii)	実測押抜きせん断耐力 $P_{us}$ (kN) (iii)	動的応答倍率 (i) / (iii)	計算動的応答倍率 (i) / (ii)
P6	3.0	612	420	260	241	2.54	2.36
P9	4.0	668	668	285	301	2.22	2.35
P12	6.0	954	1091	377	410	2.33	2.53
P15	6.5	993	1181	333	451	2.20	2.98
D13	4.5	801	596	224	269	2.98	3.58
D16 (H180)	5.5	764	645	260	255	3.00	2.94
D19	6.0	781	644	294	282	2.77	2.66
H150	6.0	648	563	183	194	3.34	3.54
H200	5.0	754	571	317	304	2.48	2.38



(a) 有効高さと同種応答値の関係



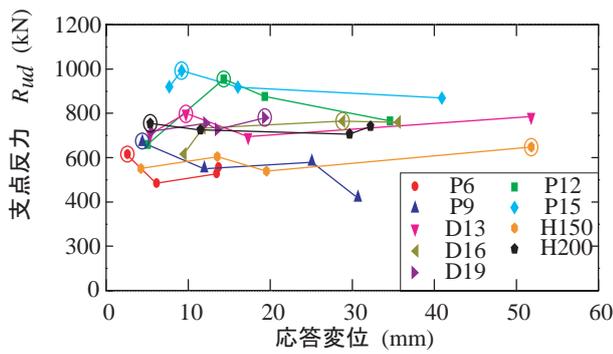
(b) 重錘直径と同種応答値の関係

図-5 有効高さおよび重錘直径と同種応答値の関係

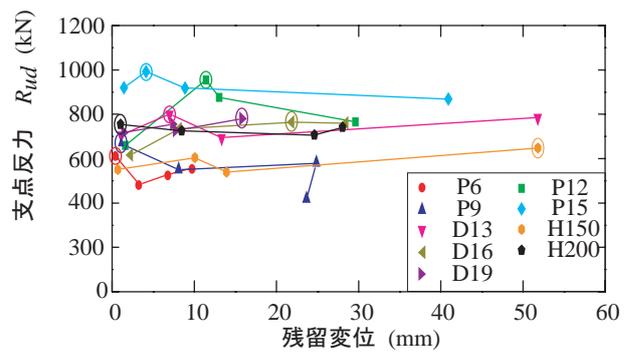
り得ないものと判断したことによる。一方、支点反力は、ある衝突速度で最大値を示し、それ以降、衝突速度を増加しても支点反力がその値以上に増大することはない、動的耐力を評価するための指標として利用可能であるものと考えられる。しかしながら、図-4からも明らかなように重錘衝撃力の大きさは、支点反力と大差のないことがわかる。なお、P15およびD13試験体の計算動的応答倍率は、実測の動的応答倍率よりもかなり大きい。これは、静的押抜きせん断耐力の計算値が実測値を大幅に下回ったためである。この要因

としては、重錘の直径が大きくせん断スパンが短くなる場合や鉄筋比が小さい場合には、コンクリート標準示方書式が実測値を安全側に評価する傾向にあることが上げられる。

図-5には、最大重錘衝撃力、最大支点反力および実測動的応答倍率を各種実験因子に着目して整理している。ここでは、前述したように衝撃耐荷挙動に比較的大きな影響を及ぼしている版の有効高さ((a)図)および重錘直径((b)図)に着目した。(a)図から、P6試験体の最大重錘衝撃力および最大支点反力が他に比べ



(a) 支点反力と応答変位の関係



(b) 支点反力と残留変位の関係

図-6 支点反力と応答変位および残留変位の関係

て小さく、また版の有効高さが最も小さい H150 試験体でも多少小さい傾向にあるものの、その他は大略同程度であることがわかる。一方、動的応答倍率は有効高さが大きいほど小さくなる傾向にあることが明瞭に認められる。(b) 図から、重錘直径の大きさは最大重錘衝撃力、最大支点反力および動的応答倍率に影響を及ぼし、重錘直径が大きくなるほど最大重錘衝撃力および最大支点反力が増加し、動的応答倍率は低下する傾向にあることがわかる。しかしながら、ばらつきも大きいことから、最大応答値は他の因子にも影響されていることがうかがわれる。また、図-5 (a), (b) から最大重錘衝撃力と最大支点反力の大きさは同等程度であることがわかる。

#### 4. 耐衝撃設計

##### 4.1 作用衝撃力

ここでは、本実験結果を基に、RC 版に重錘が直接衝突する際の RC 版の耐衝撃設計法を提案する。前述したように、4 辺支持 RC 版が比較的低速度の重錘衝突を受けると押抜きせん断型の破壊性状を示す。この性状は、RC 版に局所荷重が静的に作用した場合と同様である。コンクリート標準示方書における押抜きせん断に対する設計<sup>8)</sup>は、作用荷重に対して押抜きせん断耐力を照査することで行われる。前述したように最大重錘衝撃力は、最大支点反力値と大差のないことが明らかになっていることより、直接作用する衝撃力である重錘衝撃力を考慮して耐衝撃設計法の定式化を検討することとした。なお、コンクリート標準示方書の押抜きせん断に対する照査が、作用荷重と耐力で実施される理由として、押抜きせん断破壊が脆性的であり、かつ変位量が曲げ破壊型に比べて小さいことから、変位量による各種限界状態の規定が困難であることによるものと推察される。

著者らの既往の研究<sup>7)</sup>および本実験結果からも明らかのように、最大応答変位や残留変位は試験体間で大

きくばらつき、これらの物理量で種々の限界状態を規定することは困難であるものと判断される。参考のために、各試験体の支点反力と応答変位および残留変位の関係を 図-6 に示している。なお、残留変位はすべての試験体、衝突速度において版下面中央点における応答変位波形の最終値とした。図中、丸印を付した箇所は、最大支点反力発生時である。これより、最大支点反力発生時の応答変位や残留変位は試験体間で大きく変動し、最小で数 mm から最大で数 10 mm にまで分布していることがわかる。

本研究では作用衝撃力、すなわち重錘衝撃力は、ヘルツの理論式を用いて算定することとした。以下に振動便覧式の基となっているヘルツの式を示す。

$$n = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1}{k_1 + k_2} \left[ \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$P_{uc} = n^{\frac{2}{5}} \left[ \frac{5}{4} v_0^2 \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (2)$$

$$k_1 = (1 - \nu_1^2) / (\pi E_1) \quad (3)$$

$$k_2 = (1 - \nu_2^2) / (\pi E_2) \quad (4)$$

ここに、 $\nu_1$ ：重錘のポアソン比、 $\nu_2$ ：RC 版のポアソン比、 $E_1$ ：重錘の弾性係数、 $E_2$ ：RC 版の弾性係数、 $R_1$ ：重錘の曲率半径、 $R_2$ ：RC 版の曲率半径、 $v_0$ ：衝突速度、 $m_1$ ：重錘の質量、 $m_2$ ：RC 版の質量である。

なお、本研究では鋼製の重錘が RC 版に直接衝突することから、ヘルツの理論式にそのまま諸定数を代入して計算している。ここで、重錘の弾性係数およびポアソン比は、鋼製であることより  $2.0 \times 10^{11}$  (N/mm<sup>2</sup>) および 0.3 とし、RC 版の弾性係数およびポアソン比はコンクリート標準示方書に準拠して、コンクリートの圧縮強度を 30 MPa とした場合の  $3.0 \times 10^{10}$  (N/mm<sup>2</sup>) および 0.2 としている。なお、重錘の曲率半径は、重錘の直径にかかわらず底部に 2 mm のテーパ

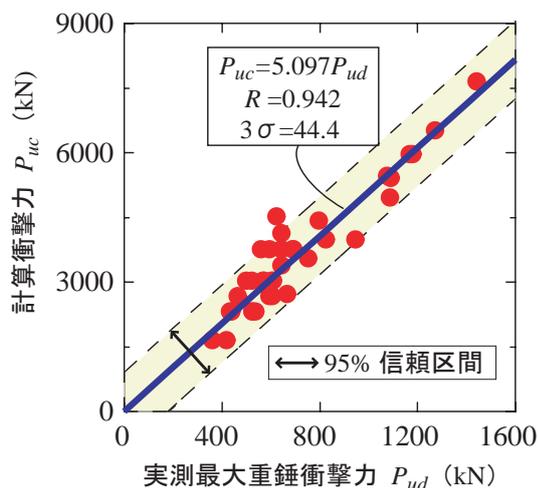


図-7 計算衝撃力と実測最大重錘衝撃力の関係

が施されていることより、直径 60 mm の場合で 0.226 m、以下直径が 90, 120, 150 mm の場合で各々 0.507, 0.901, 1.407 m となる。なお、RC 版の曲率半径は無限大とし、重錘の質量は直径にかかわらず 300 kg、RC 版の質量は RC 版が移動せず重錘を受け止めるのみであり、かつ 4 辺で RC 版の浮き上がりを拘束していることから無限大として評価した。なお、RC 版の版厚を考慮した実質量を用いて計算した衝撃力は、無限大とした場合に比べて数割程度小さくなることを確認している。

図-7 には、ヘルツ式による計算衝撃力  $P_{uc}$  と実測最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  の関係を示している。なお、実測最大重錘衝撃力はコンクリート強度を 30 MPa として補正している。両者の関係はほぼ線形であり、ヘルツ式による計算衝撃力  $P_{ud}$  は、実測最大重錘衝撃力の約 5 倍であり、両者の関係を近似した直線の相関係数は 0.94 程度と比較的高いことがわかる。また、図中には 95% の信頼上限と信頼下限および  $3\sigma$  ( $\sigma$ :標準偏差) を示している。上記の検討結果から、設計のための作用衝撃力は重錘の質量、弾性係数、ポアソン比および曲率半径と衝突速度（落下高さ）が与えられれば、一義的にヘルツ式の計算値の 1/5 として与えられる。なお、ヘルツ式による計算衝撃力が実測最大重錘衝撃力の 5 倍程度と大きいのは、ヘルツ式による計算衝撃力は弾性体間の接触・衝突により生じる静的な圧力を弾性限界内において求めた物理量であるのに対して、実測最大重錘衝撃力は動的応答（相互作用）の結果として出現する物理量であり、衝突後に重錘が RC 版内部に貫入する等、弾塑性挙動の影響を受ける物理量であるためと推察される。

なお、土木学会コンクリート標準示方書では、偶発荷重に対する荷重係数を 1.0 とすることとし、荷重の特性値を安全側に規定することになっている。ここでは、計算衝撃力と実測最大重錘衝撃力との関係におけ

るばらつきや本実験が限られた条件下で実施されていることおよび設計式の簡便性を考慮して、ヘルツ式の 1/5 に 1.25 倍の余裕を持たせた衝撃力（ヘルツ式の 1/4）を衝撃荷重の特性値として扱うこととした。

一般的にロックシェッドに衝突する落石は種々の形状、寸法および質量を有するが、衝突により細かく破砕されて接触面積が増加することや破砕によって入力エネルギーが消費されることが知られている。したがって、鋼製の重錘を用いた実験結果に基づいて衝撃力の特性値を定めることは安全側であるものと考えられる。なお、本実験での重錘質量は 300 kg であり、想定すべき落石の質量に比べてかなり小さい。この質量差が衝撃力に与える影響は今後の検討課題であるが、同一の入力エネルギーを想定すると、質量の大きい方が衝突速度はより小さくなり、静載荷状態に近づくことから、衝撃力に及ぼす影響が極めて顕著であるとは考えにくい。以上から、ヘルツ式の 1/4 を設計衝撃力とし、安全係数を 1.0 として設計式を構築することは適当な安全余裕度を有しているものと判断される。

#### 4.2 動的耐力

設計のための作用衝撃力と RC 版の動的耐力（本研究では最大支点反力）について考察する。RC 版の動的耐力は、動的応答倍率（最大支点反力を静的押抜きせん断耐力で除した値）が決定されれば、静的な押抜きせん断耐力を計算することで評価することが可能となる。

図-8 には、各試験体の実測動的応答倍率を示している。図より、動的応答倍率は大略 2~3.5 程度に分布していることがわかる。また、動的応答倍率は、鉄筋比が最も小さい D13 試験体、最も高強度のコンクリートを用いた D16（H180）試験体、有効高さの最も小さい H150 試験体で相対的に大きいことがわかる。ここで、鉄筋比や有効高さが小さい RC 版で動的応答倍率が大きいことから、鉄筋比や有効高さの影響を受ける RC 版の曲げ剛性に着目して動的応答倍率を整理した。

図-9 には、動的応答倍率と RC 版の単位幅 (1 m) あたりの曲げ剛性の関係を示している。ここでは、RC 版の曲げ剛性は鉄筋をコンクリートに換算して考慮した。なお、換算は鉄筋とコンクリートの弾性係数比を 7 として行い、引張側を無視して算定している。動的応答倍率は、図-5 および図-8 より、重錘直径の影響を受けることが明らかであるが、一方で図-9 より曲げ剛性が小さい試験体ほど大きくなる傾向にあることがわかる。このように、動的応答倍率は、版の曲げ剛性と密接に関連し、曲げ剛性が大きい場合は 2.5 程度、小さい場合は 3.5 程度になることがわかる。なお、動的応答倍率を曲げ剛性で規定するためにはさらに多くのデータを蓄積する必要があるが、曲げ剛性が

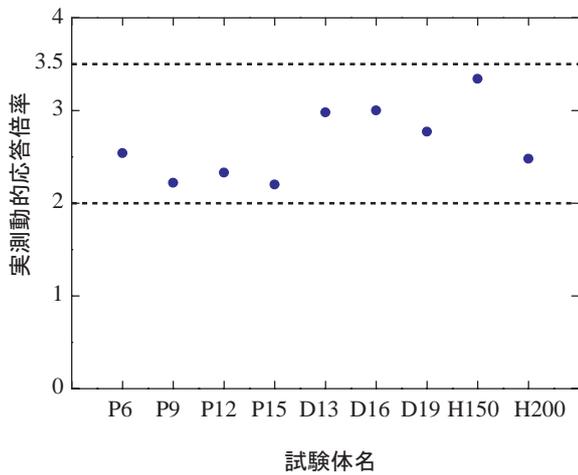


図-8 各試験体の実測動的応答倍率

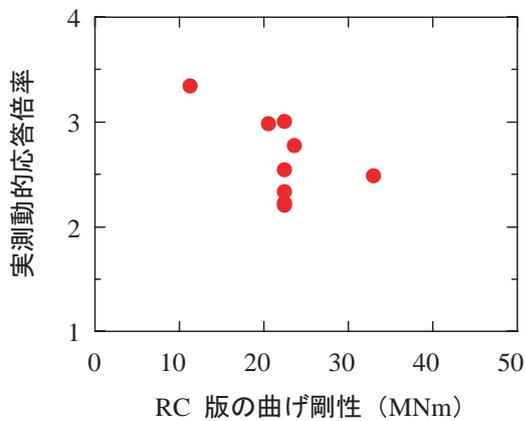


図-9 RC 版の曲げ剛性と動的応答倍率の関係

小さい試験体で応答倍率が大きくなるのは、曲げ剛性が小さい場合には曲げ破壊型のモードが卓越することに起因しているものと推察される。一方、動的応答倍率は、重錘の直径が大きい場合に小さくなる傾向にある。これは、重錘の直径が大きくなることで局所破壊型から全体破壊型に移行し、より静的な载荷状態に近づくためと推察される。なお、版の有効高さが小さく曲げ剛性が特に小さい H150 試験体の場合には、最大支点反力が生じた衝突速度 ( $V = 6.0 \text{ m/s}$ ) において写真-3 に示すように激しい損傷に至る傾向が認められる。このように、曲げ剛性が特に小さい場合には、損傷が激しい状況下で最大支点反力（動的応答倍率）が大きく出現する傾向にあることから、動的応答倍率を 3.5 よりも控えめに設定する必要があるものと考えられる。

#### 4.3 照査式

質量、半径、材質などが既知である衝突体が、所定の高さから自由落下して RC 版に直接衝突する場合の作用衝撃力は、前述のようにヘルツ式による計算値の 1/4 として評価できる。一方、RC 版の動的応答倍率

は、版の曲げ剛性や重錘の直径に依存するものの 2 ~ 3.5 程度である。すなわち、コンクリート標準示方書式によって算定される RC 版の押抜きせん断耐力の 2 ~ 3.5 倍が動的耐力であるとして評価が可能となる。

作用衝撃力としての最大重錘衝撃力は、1) 実験結果より評価される最大支点反力とこの時の最大重錘衝撃力の大きさには大差がないこと、2) 衝突速度の増加に対応して大きくなる傾向を有していることを考慮して、本研究では、安全側で設計を行うことを前提に、下式のように作用衝撃力が動的耐力を下回るような条件下で静的に設計することを提案するものである。すなわち、

$$\text{設計衝撃力 (ヘルツ式による計算値の } 1/4) \leq \text{動的耐力} \quad (5)$$

ここで、動的応答倍率を考慮すると、

$$\text{計算設計衝撃力} \leq \text{動的応答倍率} \times \text{静的押抜きせん断耐力} \quad (6)$$

ここに、動的応答倍率は 2 ~ 3.5 程度である。なお、安全側で設計を行うものとするれば動的応答倍率 2 と設定可能である。

#### 5. まとめ

本研究では、比較的低速度の重錘落下直接衝突を受ける RC 版を対象とした単一衝撃载荷実験結果を耐衝撃性に及ぼす因子として版の有効高さ (110 ~ 160 mm) や鉄筋比 (0.7 ~ 1.6 %)、重錘の直径 (60 ~ 150 mm) およびコンクリート強度 (20.2 ~ 37.4 MPa) の影響に着目して整理し、影響因子および影響度合を明らかにするとともに、その結果を踏まえて耐衝撃設計法を提案した。用いた試験体は静载荷実験を含めて 9 種類、全 45 体である。本研究の範囲内で明らかになった結果を整理すると以下の通りである。

- 1) 比較的低速度の衝撃を受ける RC 版の破壊形式は、静载荷実験と同様に押抜きせん断破壊型である。重錘衝撃力、支点反力や応答変位波形の性状および実験終了後の切断面の状況には、衝突速度の影響が大きく、版の有効高さや鉄筋比の影響は軽微である。
- 2) 最大重錘衝撃力や最大支点反力に及ぼすコンクリート強度の影響は顕著であるが、コンクリート標準示方書式に準拠して強度補正を行うことで正規化が可能である。
- 3) 版の有効高さや重錘直径は最大重錘衝撃力や最大支点反力および動的応答倍率に影響を及ぼすが、鉄筋比がこれらに及ぼす影響は鉄筋比が極めて小さい場合を除いて顕著ではない。
- 4) ヘルツ式で求めた計算作用衝撃力は、実測の最大

重錘衝撃力の 1/5 程度である。しかしながら、計算作用衝撃力と実測の最大重錘衝撃力の間には高い相関が認められ、設計上の安全余裕度を含む作用衝撃力は、ヘルツ式による計算値の 1/4 として評価可能である。

- 5) 最大支点反力と静的耐力を用いて評価した実測の動的応答倍率は、大略 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。鉄筋比や版の有効高さが小さい場合には曲げ剛性が小さいことより、曲げ破壊モードが卓越するため、応答倍率が大きくなる傾向にある。
- 6) 動的耐力は動的応答倍率を 2 ~ 3.5 として計算静的押抜きせん断耐力を 2 ~ 3.5 倍することで算定可能である。
- 7) 最大支点反力 (動的耐力) とその時の最大重錘衝撃力の大きさには大差がないことより、最大重錘衝撃力を作用衝撃力と仮定し作用衝撃力に対して動的耐力を照査する設計法の考え方を提案した。すなわち、作用衝撃力 (ヘルツ式による計算値の 1/4)  $\leq$  動的応答倍率の下限値 (2.0)  $\times$  計算静的押抜きせん断耐力、とすることで安全側の耐衝撃設計が可能である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ 6, 構造物の衝撃挙動と設計法, 1993
- 2) 大沼博志, 伊藤千浩, 白井孝治：飛来物の衝突に

対する鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃補強工法, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.1579-1584, 1999

- 3) 森川博司, 河西良幸, 坪田張二, 内田 孝, 大野友則, 木暮幹太：飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート版の耐衝撃性に関する実験と解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 477 号, pp.107-114, 1995
- 4) 岸 徳光, 中野 修, 松岡健一, 菅田紀之：RC 覆工の衝撃応答解析手法の適用性に関する実証的検討, 土木学会論文集, 第 483 号/I-26, pp.97-106, 1994.1
- 5) 佐藤昌志, 西 弘明, 岸 徳光, 松岡健一：三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錘落下衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol.42A, p.1347-1356, 1996.
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編, 2007 年制定

(2008 年 9 月 18 日受付)