

# 低速度衝撃を受ける四辺支持 RC 版の耐衝撃性に及ぼす コンクリート強度の影響

## Effects of Compressive Strength of Concrete on Impact Resistant Behavior of Simply Supported RC Slabs under Low-Velocity Impact Loading

三上 浩 HIROSHI MIKAMI

本研究は低速度衝撃を受ける四辺支持 RC 版の耐衝撃性に及ぼすコンクリート強度の影響を実験的に検討したものである。実験に用いた RC 版の有効高さおよび鉄筋比は同様とし、コンクリートの圧縮強度を 11 MPa～51 MPa に変化させた。載荷方法は、同一の直径を有する重錘を一度だけ RC 版中央に自由落下させる単一衝撃載荷方式とした。実験の結果、① RC 版のコンクリート強度を増加させることで RC 版の動的耐力は増大するもののその効果には上限があること、②コンクリート強度の影響は 動的耐力よりも静的押抜きせん断耐力に顕著に出現すること、などが明らかとなった。

キーワード：低速度衝撃，RC 版，コンクリート強度，押抜きせん断耐力

In this paper, the effects of concrete strength on impact load-carrying capacity of the RC slabs under low-velocity impact loading are experimentally investigated. Here, the single impact-loading tests for RC slabs are conducted under keeping effective depth and rebar ratio of the slab, and diameter of the ram constant, in which the concrete compressive strength is varied from 11 MPa to 51 MPa. From this study, following results are obtained: (1) even though impact resistant capacity is affected by the concrete strength, these effects may be limited; and (2) the influence of concrete strength appears more remarkably in static punching shear capacity than in impact resistant capacity.

**Key Words** : Low-Velocity Impact, RC Slab, Compressive Strength of Concrete, Punching Shear Capacity

### 1. はじめに

近年の異常気象に伴い集中豪雨や竜巻および大型台風が発生し、国民の生命や財産が脅かされている。このような現状に鑑み、安全・安心な国土を形成するためには、より一層、社会資本整備を充実させる必要がある。現在まで、ロックシェッド（落石覆工：写真-1 参照）や砂防ダムなどに代表される耐衝撃構造物<sup>1)</sup>が数多く建設され、安全・安心な国土形成に貢献してきた。しかし、昨今の異常気象による自然災害の頻発や施設の老朽化を考慮すると、自然災害によるリスクを軽減するためには施設の新設や経年劣化施設の維持管理、すなわち改築や補修・補強を含めた予防保全が極めて重要であると考えられる。

ロックシェッドの頂版などのような鉄筋コンクリート



写真-1 ロックシェッドの例

(RC) 製の面部材に小型・軽量の衝突体が高速で衝突すると、衝撃固有の破壊性状（貫入、貫通、裏面剥離など）を示すことが良く知られている。この現象は世界の多くの機関で検討され、すでに精度の高い設計式<sup>1)</sup>も提示され、併せて補強方法<sup>2),3)</sup>も提案されている。一方、

ロックシェッドで対象とする衝突体である落石は重量が重く、衝突速度は比較的低速である。そのため、破壊性状は小型・軽量の衝突体が高速で衝突する場合とは異なり、静的に局所荷重が面部材に作用した場合と同様の押抜きせん断型の破壊性状を示すことが明らかになっている。しかしながら、低速の衝撃を直接的に受ける面部材の耐衝撃設計法に関する検討例は著者らの例<sup>4),5)</sup>を除いて少なく、未だ十分には確立されていないのが現状である。

著者らは既往の研究<sup>5)</sup>で、比較的低速（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取りまとめ、耐衝撃性に及ぼす影響因子や影響度合い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。既往の研究での実験は、RC 版の有効高さ、下端鉄筋比および重錘の直径に着目して実施した。しかしながら、コンクリート強度は 20.2~37.4 MPa まで分布し、強度の影響が比較的顕著であることが明らかとなった。

本研究は、既往の研究でコンクリート強度の影響が比較的顕著であることが明らかとなったため、RC 版の有効高さや下端鉄筋比および重錘直径を同様とし、コンクリート強度の影響のみに着目して耐衝撃性を比較検討したものである。本実験でのコンクリート強度は、既往の実験での強度を下回る範囲および上回る範囲を包含するように 11.3 ~ 50.9 MPa までの 4 水準とした。衝撃実験は所定の高さから重錘を一度だけ落下させる単一衝撃載荷実験とし、各試験体で 4 種類の衝突速度を設定した。試験体数は、静的載荷実験用試験体 1 体を含めた 4 種類×5 体の全 20 体である。

## 2. 実験概要

### (1) 試験体の種類、形状寸法および実験方法

表-1 に試験体の一覧を示す。試験体はコンクリートの圧縮強度（以後、単に強度と呼ぶ）が異なる 4 種類であり、試験体名は英文字 C に概略の強度 (MPa) を付して示している。表にはコンクリート強度、衝突速度、計算押抜きせん断耐力および静載荷実験の結果（実測押抜きせん断耐力）を併せて示している。計算押抜きせん断耐力はコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に準拠し、材料試験の結果を用いて  $\gamma_b = 1.0$  として算出している。なお、鉄筋は SD345 であり、降伏強度は 390 MPa であった。ここで、C39 および C51 試験体の計算押抜きせん断耐力が同等になっているのは、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>ではコンクリート強度が  $36 \text{ N/mm}^2$  以上の場合に押抜きせん断耐力の算定値が同等になるためである。

各試験体には質量が 300 kg、重錘先端直径が 90 mm

表-1 試験体の一覧

試験体名	コンクリート強度 (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)
C11	11.3	3,3.5,4,4.5	174.6	212.9
C26	26.3	4,4.5,5,5.5	266.2	287.2
C39	39.0	5,5.5,7,6,6.3	311.7	415.1
C51	50.9	5,5.5,6,6.5	311.7	449.3

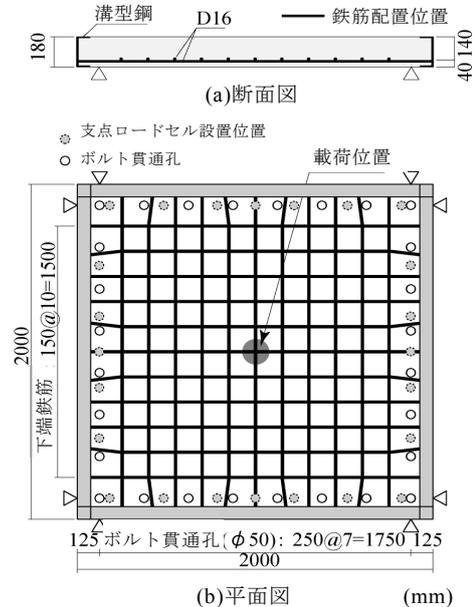


図-1 RC 版の形状寸法および配筋状況

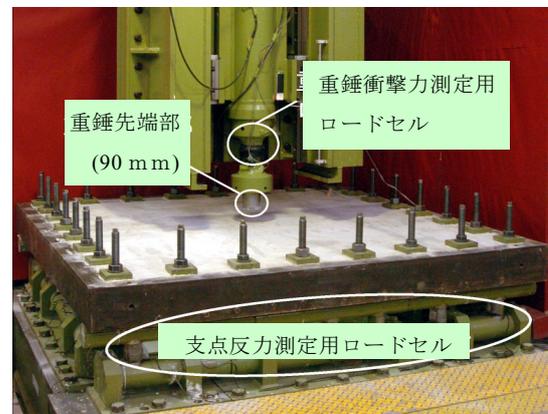


写真-2 実験状況

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>4),5)</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。なお、静載荷実験における載荷版の直径も 90mm とした。衝撃載荷実験における落下高さは、実験前に衝突速度の検定を行い、所定の衝突速度になるように設定している。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 4 種類×5 体の合計 20 体である。

図-1 に試験体の形状寸法および配筋状況を示す。試

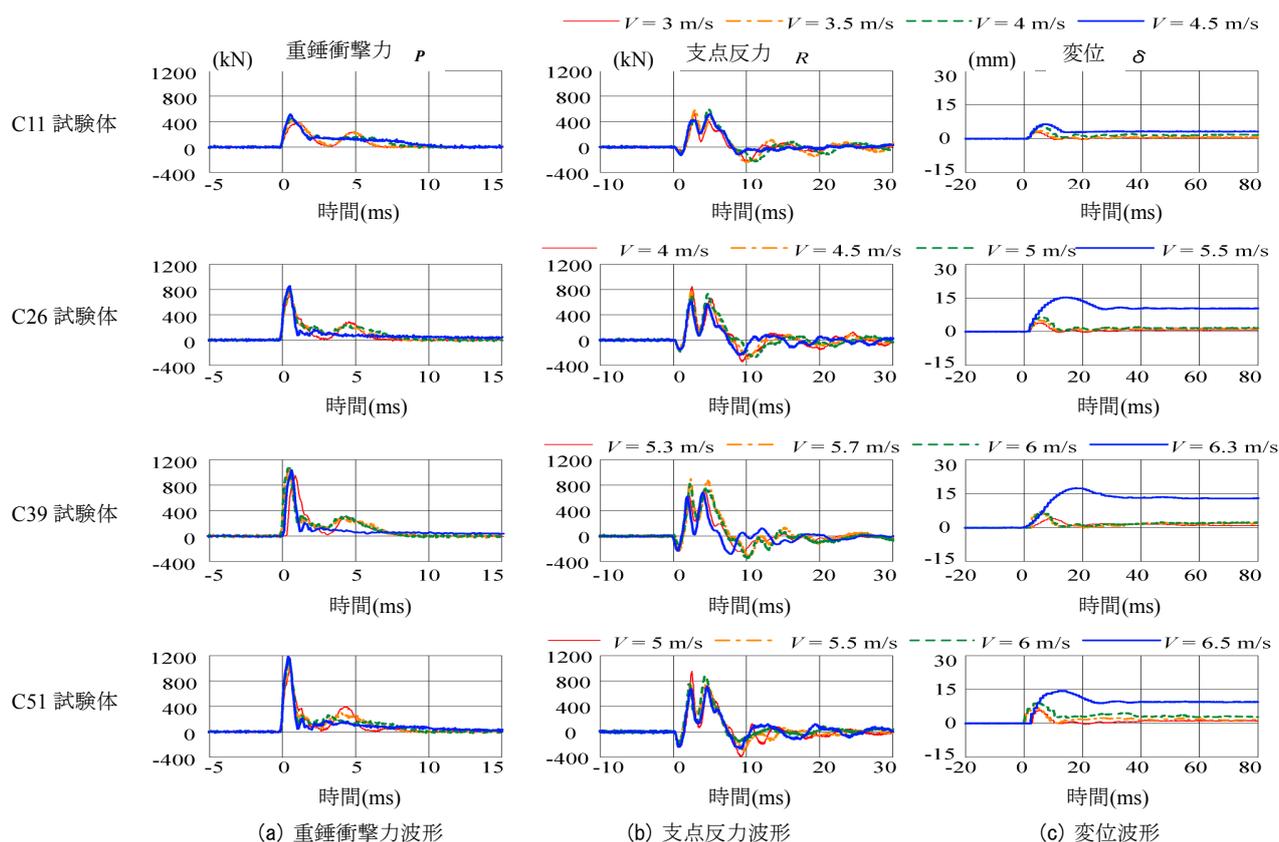


図-2 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

験体の寸法はすべて  $2,000 \times 2,000 \times 180 \text{ mm}$  であり、有効高さ  $140 \text{ mm}$ 、芯かぶり  $40 \text{ mm}$  の位置に下端鉄筋を配置している。下端鉄筋には  $D16$  を用い、版中央部から  $150 \text{ mm}$  間隔で格子状に配筋し、四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 に重錘落下衝撃実験の状況を示す。試験体の支持条件は荷重方法（静荷重、衝撃荷重）に関わらず純スパン長  $1,750 \text{ mm}$  の四辺支持としている。なお、支点となる四辺および隅角部で RC 版の浮き上がりをボルトで拘束しているが、支点治具全体は回転を許容する構造となっている。

## (2) 測定項目と測定機器

測定項目は荷重荷重  $P$ （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  $R$ （四辺の支点反力の合計、以後単に支点反力と呼ぶ）、荷重点変位  $\delta$ （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荷重点とロードセルの位置関係に依存するため必ずしも同様とはならないものの、荷重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。

静荷重の測定には容量  $500 \text{ kN}$  の静荷重測定用ロードセルを用い、重錘衝撃力の測定には容量が  $1,470 \text{ kN}$ 、応答周波数が  $\text{DC} \sim 4.0 \text{ kHz}$  のロードセルを用いた。支点反力の測定には容量が  $980 \text{ kN}$ 、応答周波数が  $\text{DC} \sim 2.4 \text{ kHz}$  のロードセルを 24 個用いている。なお、支点反力測定用のロードセルは、写真-2 に示すように支点治具に内蔵されている。変位は容量  $500 \text{ mm}$ 、応答周波数が  $915 \text{ Hz}$  の非接触型レーザ式変位計を用いて版下面中央点を測定した。本実験ではコンクリート片の剥落、飛散が主として 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、版中央点のみに限定して変位計測を行った。その結果、すべての試験体、衝突速度において変位は良好に計測された。

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  $200 \text{ ms}$  まで  $0.1 \text{ ms/word}$  で AD 変換している。実験終了後には RC 版裏面のひび割れをトレースし、ひび割れ図を作成した。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 各種応答波形

図-2 に各試験体の重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  および

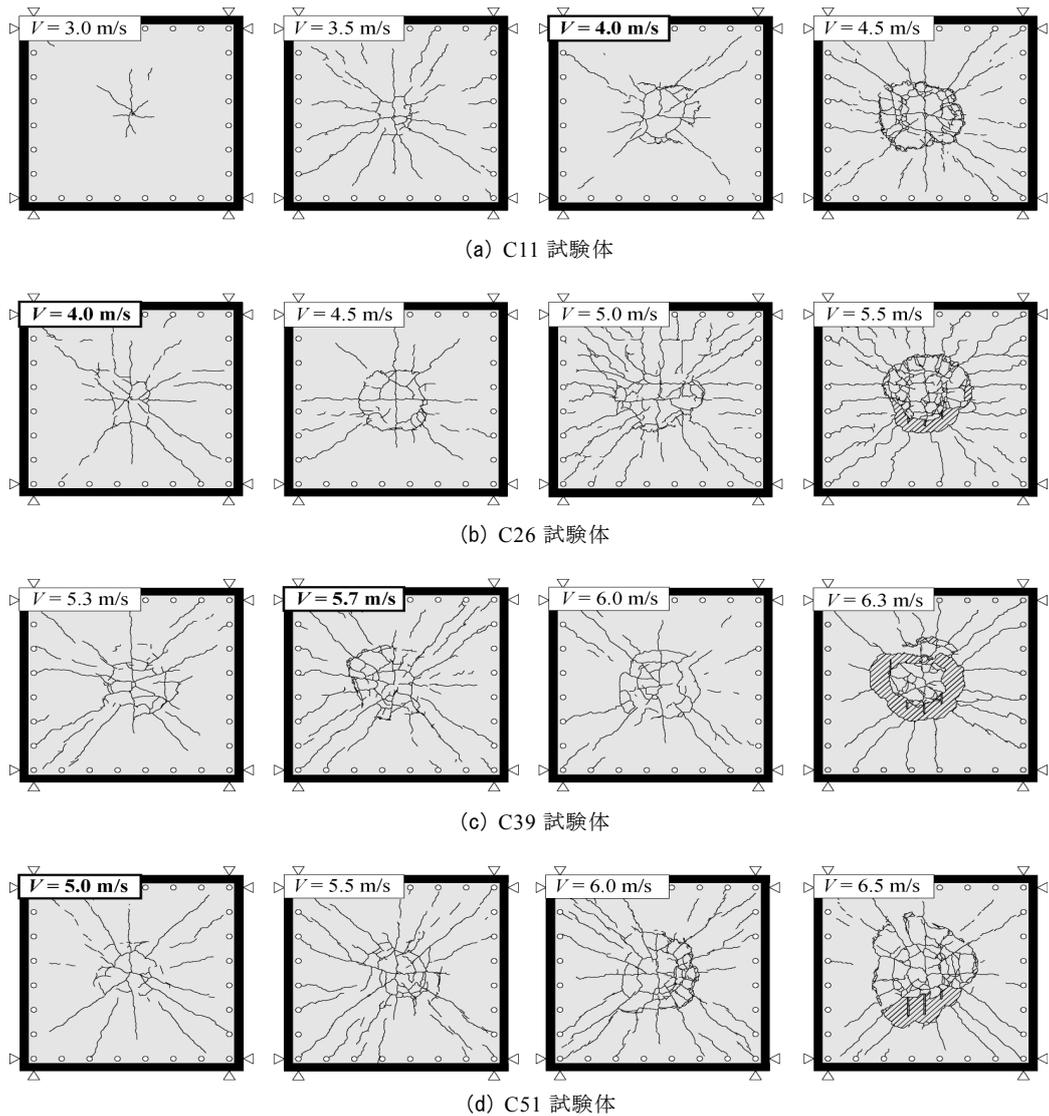


図-3 衝撃実験終了後におけるRC版裏面のひび割れ性状

変位  $\delta$  に関する応答波形を試験体ごとに示す。なお、時間軸は重錘衝撃力が励起した時刻を 0 ms として整理している。図-2(a)より、重錘衝撃力  $P$  の波形は、いずれの試験体も衝突初期に卓越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。また、いずれの試験体も衝突速度の増加に伴って第 2 波目が消失する傾向にある。これは、衝突速度の増加に伴い RC 版の塑性化が進行するためと考えられる。なお、重錘衝撃力はコンクリート強度の増加に対応して増大する傾向にあるものの C39 および C51 試験体の重錘衝撃力は同等程度である。

図-2(b)より、支点反力  $R$  の波形は、いずれの試験体および衝突速度においても衝突初期に卓越する周期が 10 ms 程度の正弦半波状の波形および後続する減衰波と周期が 3 ms 程度の高周波成分が合成された性状を示していることが分かる。支点反力はコンクリート強度の増加に対応して増大する傾向にあるものの、重錘衝撃力と

同様に C39 および C51 試験体の支点反力は同等程度である。

図-2(c)に変位の応答波形を示す。変位  $\delta$  の波形は各試験体ともに衝突速度が最大の場合を除いて正弦半波状を示し、残留変位は 0mm～数 mm 程度と小さいことが分かる。一方、最終の衝突速度では変位が大きく残留し、C11 試験体を除いて 10mm 程度以上を示している。特に、C39 試験体では最大応答変位がほぼ残留し、残留変位は 15 mm 程度と大きくなっている。

## (2) ひび割れ性状

図-3 に衝撃載荷実験終了後における RC 版裏面のひび割れ性状を示す。図より、いずれの試験体も衝突速度  $V$  の増加に伴って放射状のひび割れが増加するか、または、版中央部に押抜きせん断面の形成に起因する円形状のひび割れが明瞭に生じていることが分かる。最終衝突速度では、各試験体ともに著しい押抜きせん断破壊に至り、

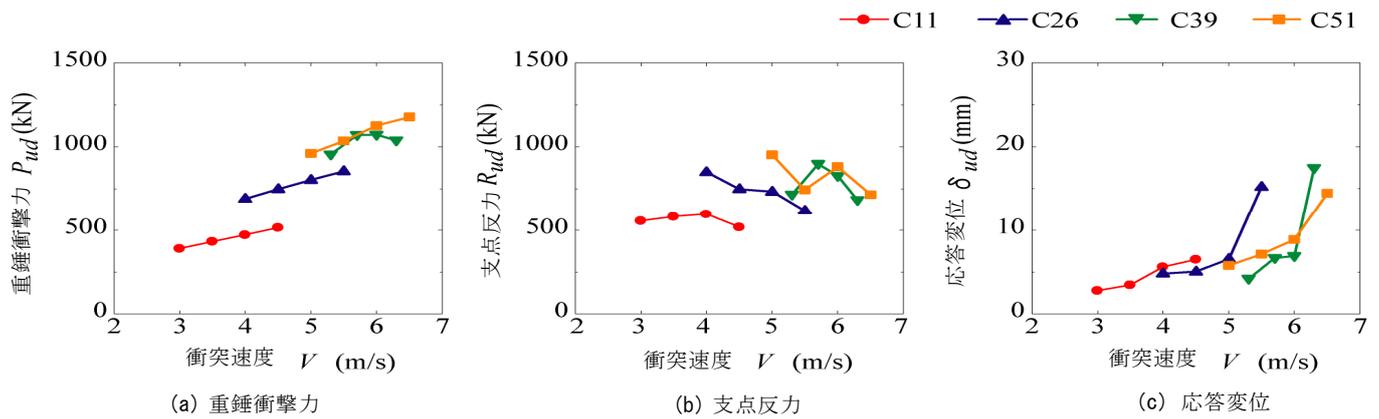


図-4 衝突速度と重錘衝撃力，支点反力および応答変位の関係

C11 試験体を除いた試験体の下縁かぶりコンクリートが円形状ひび割れに沿って大きく剥落していることが分かる。

各試験体において、衝突速度  $V$  が同程度の場合には、コンクリート強度が高い試験体ほど放射状や円形状のひび割れが軽微となり、より健全であることがうかがわれる。また、C39 および C51 試験体の衝突速度とひび割れ性状の関係には大きな差異は認められない。この傾向は、後述する各種応答値と衝突速度との関係に良く対応している。

一方、各試験体で最大支点反力を示した衝突速度を図中に太字で示した。最大支点反力を示した衝突速度における RC 版裏面のひび割れ性状は、いずれの試験体でも大略同様である。この傾向は、既往の研究<sup>5)</sup>での最大支点反力時におけるひび割れ性状が試験体によって大きく異なったことと対照的である。すなわち、版の有効高さや鉄筋比および重錘直径が RC 版の最大支点反力時におけるひび割れ性状に及ぼす影響はコンクリート強度の影響よりも顕著であるものと考えられる。

### (3) 各種応答値

図-4 に各試験体の衝突速度  $V$  とその衝突速度における各種最大応答値、(a) 重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、(b) 支点反力  $R_{ud}$  および (c) 応答変位  $\delta_{ud}$  の関係を示す。図-4(a) より、重錘衝撃力  $P_{ud}$  は C39 試験体の衝突速度が大きい場合を除いて、いずれの試験体も衝突速度  $V$  の増加に伴ってほぼ線形に増大していることが分かる。なお、重錘衝撃力  $P_{ud}$  はコンクリート強度が大きいほど大きくなる傾向にあるものの、C39 および C51 試験体の重錘衝撃力は最終の衝突速度を除いて大略同程度である。

図-4(b) より、各試験体の支点反力  $R_{ud}$  は既往の研究<sup>4),5)</sup>と同様に、ある衝突速度でピークを示した後、衝突速度（入力エネルギー）を増加させても同等か低下する傾向にあることが分かる。なお、支点反力  $R_{ud}$  もコンクリート強度の増加に対応して増大する傾向にあるものの、

衝突速度が小さい場合を除いて C39 および C51 試験体における支点反力の差異は顕著ではない。

このように、重錘衝撃力や支点反力の大きさにコンクリート強度は大きな影響を及ぼすものの、C39 および C51 試験体で  $P_{ud}$  や  $R_{ud}$  が同等程度を示していることから、コンクリート強度が重錘衝撃力や支点反力に及ぼす影響には上限があるものと考えられる。なお、重錘衝撃力と支点反力の大きさを比較すると、コンクリート強度が高い C39 および C51 試験体では全般的に重錘衝撃力のほうが支点反力よりも大きい傾向にあるものの、C11 および C26 試験体では大略同程度である。

図-4(c) より、各試験体の応答変位  $\delta_{ud}$  は衝突速度  $V$  の増加に対応して増大し、C11 試験体を除いて最終の衝突速度で急激に増大していることが分かる。これは、最終の衝突速度において RC 版に押抜きせん断面が明瞭に形成されるとともにひび割れが一気に開口したためと考えられる。なお、応答変位  $\delta_{ud}$  が急増する衝突速度は、コンクリート強度が高いほど大きくなる傾向にあるが、C39 と C51 試験体では大差がない。以上から、応答変位の性状にもコンクリート強度の影響が認められるものの、重錘衝撃力や支点反力と同様にコンクリート強度が応答変位に与える影響にも上限があるものと考えられる。

### (4) 耐力および最大応答値

表-2 に各試験体の動的耐力と静的押抜きせん断耐力を一覧にして示した。また、参考のため図-5 に静荷重実験における静荷重と版中央変位の関係を示した。表中の終局速度とは、各試験体が最大支点反力を示した衝突速度である。なお、本研究においても既往の研究<sup>4),5)</sup>と同様に最大支点反力を RC 版の動的耐力と定義した。

これは、図-3 のひび割れ性状からも明らかのように、最大支点反力が生じた衝突速度以上の場合には押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剥落して第三者被害を及ぼ

表-2 各試験体の動的，静的押抜きせん断耐力

試験体名	終局速度 $V$ (m/s)	動的せん断耐力 $R_{ud}$ (kN)	動的せん断耐力比	静的せん断耐力 $P_{ud}$ (kN)	静的せん断耐力比
C11	4.0	597.3	1.00	212.9	1.00
C26	4.0	849.7	1.42	287.2	1.35
C39	5.7	898.6	1.50	415.1	1.95
C51	5.0	952.6	1.59	449.3	2.11

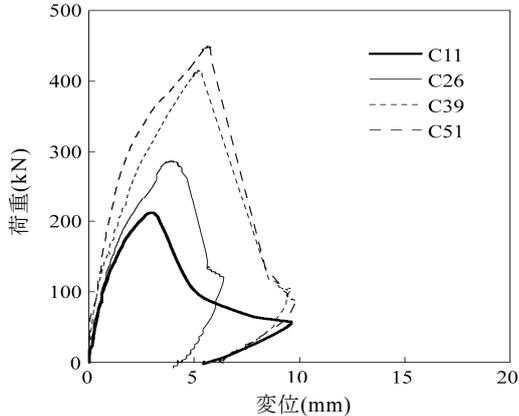


図-5 静载荷実験結果

す危険性があり，安全性の観点から最大支点反力発生時を RC 版部材の終局限界状態と定義したことによる。また，図-4 に示す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を示し，耐力を評価するための指標とすることは困難である。これに対して，支点反力はある衝突速度で最大値を示すことより，動的耐力を評価する指標として利用可能であると考えられるためである。なお，表中の動的せん断耐力比および静的せん断耐力比は，C11 試験体の結果を基準とした値である。

図-6 にコンクリート強度と動的，静的せん断耐力比の関係を示す。図より，静的せん断耐力比はコンクリート強度の増加に対応して大きく増大する一方，動的せん断耐力比の増加傾向は，静的せん断耐力比に比べて顕著ではないことが分かる。また，C51 試験体の C39 試験体からの増分はいずれの耐力比でも小さい。

以上より，コンクリート強度が RC 版のせん断耐力に及ぼす影響は，衝撃载荷よりも静载荷のほうで顕著であり，C39 と C51 試験体の両せん断耐力比の差異は小さく，コンクリート強度が動的，静的せん断耐力に及ぼす影響には上限があるものと考えられる。なお，コンクリート強度の影響が衝撃载荷で顕著でなかった理由として，衝撃载荷における動的せん断耐力（最大支点反力）が衝突速度の影響を受ける物理量であることが考えられる。すなわち，コンクリート強度が増加することで最大衝突速度も増加し，押抜きせん断破壊モードに加えて高速度衝突固有の破壊モードである貫入などの局所破壊モード

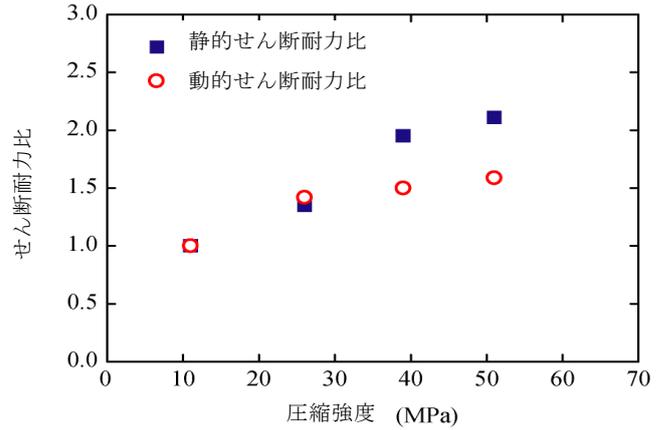


図-6 コンクリート強度とせん断耐力比の関係

が混在するようになったことが影響したものと推察される。

表-3 に各試験体の耐力および動的応答倍率の一覧を示す。終局速度とは表-2 と同様に，最大支点反力を示した衝突速度であり，最大重錘衝撃力は終局速度における重錘衝撃力とした。また，実測動的応答倍率は最大支点反力を実測の静的押抜きせん断耐力で除した値であり，計算動的応答倍率は最大支点反力を計算静的押抜きせん断耐力で除した値である。また，実測動的応答倍率は RC 版の曲げ剛性に影響される<sup>5)</sup>ことから，RC 版の曲げ剛性も併せて示した。

表-3 より，実測動的応答倍率は大略 2.0 ～ 3.0 程度であることが分かる。実測動的応答倍率はコンクリート強度の高い C39，C51 試験体で小さく，ほぼ 2 程度である。一方，C11，C26 試験体では 3 程度を示している。計算動的応答倍率は，実測動的応答倍率と異なり全般的に 3 程度以上と大きく，実測動的応答倍率が小さな C39，C51 試験体でも 3 程度を示している。これらの差異は，C39，C51 試験体の実測押抜きせん断耐力が計算押抜きせん断耐力を大幅に上回ったことに起因する。すなわち，計算押抜きせん断耐力は，コンクリート強度が  $36\text{N/mm}^2$  以上で一定値となるなど，実測のせん断耐力を過小に評価しているためである。

なお，既往の研究<sup>5)</sup>では動的応答倍率を 2 とした安全側の設計式を提案している。実測動的応答倍率はコンクリート強度が比較的高い場合でも 2 以上を示し，計算動的応答倍率は 3 程度を示していることから，既提案のように動的応答倍率を 2 と設定することで，コンクリート強度が比較的高い場合も適切な安全余裕度を保持した状態で動的耐力を算定評価可能であるものと判断される。

次に RC 版の単位幅 (1 m) 当たりの曲げ剛性と実測動的応答倍率の関係に着目する。曲げ剛性は鉄筋をコンクリートに換算して考慮した。換算は鉄筋とコンクリー

表-3 各試験体の耐力および動的応答倍率

試験体名	終局速度 $V$ (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)	実測動的応答倍率 (i)/(iii)	計算動的応答倍率 (i)/(ii)	曲げ剛性 (MNm)
C11	4.0	597.3	471.6	174.6	212.9	2.81	3.42	2.78
C26	4.0	849.7	690.6	266.2	287.2	2.96	3.19	3.16
C39	5.7	898.6	1070.5	311.7	415.1	2.16	2.88	3.92
C51	5.0	952.6	960.8	311.7	449.3	2.12	3.06	4.18

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。表-3 より、実測動的応答倍率と曲げ剛性の関係には相関が認められる。すなわち、RC 版の曲げ剛性が小さい場合には実測動的応答倍率が大きくなる傾向にある。これは、RC 版の曲げ剛性が小さいことで曲げ変形のモードが卓越するためと考えられ、コンクリート強度が大きい RC 版の場合には曲げ剛性が大きくなるため、実測動的応答倍率は小さくなるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、比較的低速度 (10m/s 程度以下) の重錘落下直接衝突を受ける RC 版のコンクリート強度が耐衝撃性に及ぼす影響を実験的に検討した。実験は RC 版の有効高さ、鉄筋比および重錘直径と質量 (300kg) を同一とし、コンクリートの圧縮強度を 11.3~50.9 MPa まで 4 段階に変化させた RC 版を用いて行った。各試験体の衝撃荷重載荷は 4 段階の衝突速度を設定して単一衝撃載荷方式で行った。用いた試験体は静載荷実験を含めて 4 種類、全 20 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とおりである。

- ① 同程度の衝突速度ではコンクリート強度の高い RC 版ほど版裏面の損傷が軽微となる。ただし、C39 (コンクリート強度が 39MPa) と C51 (同 51MPa) 試験体では大差がない。また、最大支点反力が生じた衝突速度における RC 版裏面のひび割れ性状は、コンクリート強度の影響をほとんど受けずほぼ同様である。
- ② コンクリート強度は重錘衝撃力や支点反力に大きな影響を与えるものの、C39 と C51 試験体の差異は顕著ではない。これより、コンクリート強度が重錘衝撃力や支点反力の大きさに及ぼす影響には上限があるものと考えられる。
- ③ コンクリート強度が C11 試験体を基準としたせん断耐力比に及ぼす影響は、衝撃載荷よりも静載荷のほうが顕著である。しかしながら、両載荷ともに C39 と C51 試験体の差異は小さく、コンクリート

強度が動的、静的せん断耐力に及ぼす影響には上限があるものと考えられる。

- ④ 実測動的応答倍率と曲げ剛性の関係には相関が認められる。すなわち、コンクリート強度が高い RC 版は曲げ剛性が大きく、動的応答倍率が小さくなる傾向にある。
- ⑤ コンクリート強度が比較的高い場合の実測動的応答倍率は 2 程度を示すものの、計算動的応答倍率は 3 程度であることから、既提案の動的応答倍率を 2 と設定することで、コンクリート強度が比較的高い場合においても適当な安全余裕度を有して動的耐力を算定評価可能である。

**謝辞：**本研究を行うに当たり、室蘭工業大学大学院の岸徳光教授および栗橋祐介講師ならびに構造力学研究室の皆様にご多大なるご支援をいただきました。記して感謝の意を表します。

#### 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、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
- 5) 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
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編、2007 年制定