

## 論文 衝撃荷重を受けるせん断破壊型 RC 梁の耐荷性状に関する一考案

安藤智啓\*1・岸 徳光\*2・三上 浩\*3・松岡健一\*2

要旨：本研究では、静載荷時にせん断破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃性状を明らかにするため、せん断補強筋量の異なる 3 種類の RC 梁に関する単一載荷による重錘落下衝撃実験を行った。本実験結果より、1) RC 梁がせん断破壊に至る場合の支点反力-変位曲線は、せん断補強筋量に拘わらず衝撃初期に二等辺三角形の分布性状を示し、かつこの時点でほぼ絶対最大支点反力値を示すこと、2) 最大支点反力と静的せん断耐力の関係をを用いることにより、静的せん断耐力に基づく簡易なせん断破壊に対する耐衝撃設計が可能になること、等が明らかとなった。

キーワード：せん断破壊型 RC 梁、衝撃荷重、耐衝撃性状、支点反力、耐衝撃設計

## 1. はじめに

耐衝撃安全性が要求される土木・建築構造物には、道路落石防護施設や土石流対策施設、原子力発電所関連施設等がある。近年、これら構造物の合理的な耐衝撃設計手法を確立するために、構成要素である鉄筋コンクリート (RC) およびプレストレストコンクリート (PC) 製梁・柱・版の耐衝撃性状に関する研究が各機関で盛んに行われている。その結果、静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁に関しては、その耐衝撃性状が徐々に明らかにされ、合理的な耐衝撃設計手法も提案されるに至っている<sup>1)</sup>。

しかしながら、RC/PC 構造部材の耐衝撃設計をより合理的に行うためには、曲げ破壊のみならずせん断破壊に対しても合理的な耐衝撃設計手法を確立する必要があるものと判断される。

このような観点より、本研究では構造部材の基本である RC 梁に着目し、静載荷時にせん断破壊が卓越する (以後、せん断破壊型) RC 梁の耐衝撃性状を明らかにすることを目的として、せん断補強筋量の異なる 3 種類の RC 梁全 19 体に関する単一載荷による重錘落下衝撃実験を行った。

## 2. 実験概要

図-1 には、本実験に用いた RC 梁の形状寸法と配筋状況の一例を示している。RC 梁の形状寸法 (梁幅 × 梁高 × 全長) は、全て 200 × 400 × 2,400 mm である。軸方向鉄筋 (D35) は梁の上下端に 2 本ずつ配筋し、これを両端面に設置した厚さ 22 mm の定着鋼板に溶接している。せん断補強筋 (D6) に関しては、補強筋を配筋しない場合と 150, 75 mm 間隔で配筋する場合を設定している。

実験は、RC 梁のスパン中央部に重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一載荷により行っている。用いた重錘は、質量が 400 kg、載荷点部の直径が 150 mm の円柱状鋼製重錘であり、底部には衝突時の片当たりを防止するために、高さ 2 mm のテーパが施されている。RC 梁はリバウンド防止用治具付の支点治具上に設置している。支点治具全体は RC 梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。測定項目は、重錘衝撃力  $P$ 、合支点反力  $R$  (以後、支点反力) および載荷点変位  $\delta$  (以後、変位) の応答波形である。また、実験終了後には、RC 梁側面に生じたひび割れをスケッチしている。

表-1 には、試験体名、本実験に用いた RC 梁

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 工修 (正会員)

\*2 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

\*3 三井建設 (株) 技術研究所 主席研究員 工博 (正会員)

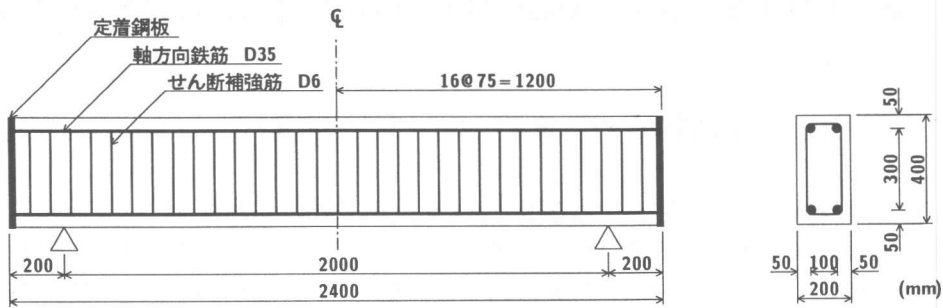


図-1 RC梁の形状寸法と配筋状況の一例 (S4梁)

表-1 RC梁の静的設計値と実測静的せん断耐力および衝突速度の一覧

試験体名	主鉄筋比 $p_t$	せん断補強筋比 $p_s$	静的せん断耐力 $V_{usc}$ (kN)	静的曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN)	せん断余裕度 $\alpha$	実測静的せん断耐力 $V_{us}$ (kN)	衝突速度 $V$ (m/s)
S0梁		0.0	164.6	448.8	0.37	196.2	0.9, 3.7, 4.2, 4.6
S2梁	0.0273	0.00211	253.8		0.57	408.5	0.9, 3.7, 4.6, 5.6, 6.5, 7.4, 8.4
S4梁		0.00422	343.0		0.76	463.5	0.9, 3.7, 4.6, 6.5, 7.4, 8.4, 9.3, 10.2

表-2 コンクリートの力学的特性

実験時材齢 (日)	圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
37	41.2	25.7	0.19

表-3 鉄筋の力学的特性

鉄筋名称	材質	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_s$
D35	SD345	373	206	0.3
D6	SD295A	373		

の静的設計値と実測静的せん断耐力および実験時の衝突速度を一覧に示している。試験体名はせん断補強筋比  $p_s$  のみが異なる故、S の後に  $p_s$  を 1,000 倍して整数に丸めた値を付記して示している。静的せん断耐力  $V_{usc}$  および静的曲げ耐力  $P_{usc}$  は、土木学会コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に基づいて算定している。 $V_{usc}$ 、 $P_{usc}$  算定時の部材係数には、 $\gamma_b = 1.0$  を用いている。設計せん断余裕度  $\alpha$  はこの  $V_{usc}$  を  $P_{usc}$  で除した値である。従って、 $\alpha < 1.0$  の場合には、RC 梁は設計的に静載荷時にせん断破壊することを意味している。衝突速度  $V$  は、S0, S2 梁の場合には  $V = 0.9$  m/s から梁の損傷が著しく、終局に至った表中の最終衝突速度までとした。また、S4 梁の場合には、本装置の使用限界である  $V = 10.2$  m/s までとした。また、本研究では、特に RC 梁が真にせん断破壊に至る (3.3 節参照) 場合の耐荷性状を把握することを目的として衝突速度を設定して

いるため、表に示すとおり各梁で必ずしも同一の衝突速度で実験を実施していない。なお、表-2 および表-3 には、コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果に基づく力学的特性を示している。

### 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-2 には、各衝突速度における重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  および変位  $\delta$  の応答波形を各梁と比較して示している。ここでは、時間軸を重錘衝撃力の立ち上がりより 5 ms 前に設定して波形を整理している。なお、紙面の都合により、衝突速度  $V = 4.2, 9.3, 10.2$  m/s の結果は省略している。

最初に、重錘衝撃力波形  $P$  について見ると、 $V = 0.9$  m/s では、いずれの梁の場合も周期が 2.5 ms 程度の 2 波から成る分布性状を示していることが分かる。しかしながら、 $V \geq 3.7$  m/s では、

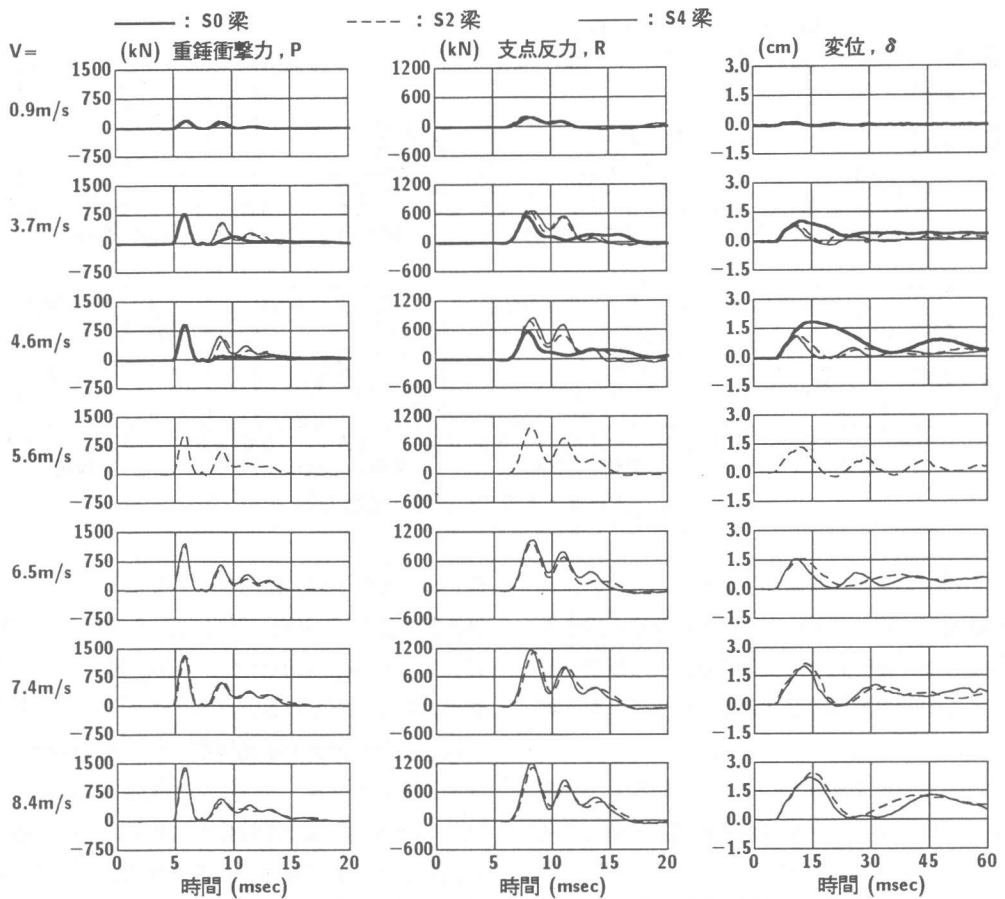


図-2 重錘衝撃力、支点反力および変位の応答波形

衝撃初期には各梁でほぼ同様の継続時間の短い正弦半波状の分布性状を示すものの、その後の継続時間の比較的長い波形成分は S0 梁と S2, S4 梁で異なる分布性状を示している。すなわち、S0 梁の振幅が S2, S4 梁に比べて著しく小さい。これは、S0 梁にはせん断補強筋が配筋されていないことより、ひび割れ間隔の大きい斜めひび割れの発生に伴い(図-3 a)、梁の復元力が低下したためと考えられる。また、S2, S4 梁には斜めひび割れが発生し(図-3 b, c)、除荷状態に至るものの、ひび割れの発生と同時にせん断補強筋が衝撃力に抵抗するため、再度振幅の大きな波動が励起されたものと考えられる。なお、各梁の第1波の振幅および後続の波動成分の継続時間は、V の増加とともに増大している。

また、S2, S4 梁の場合における波形を詳細に比

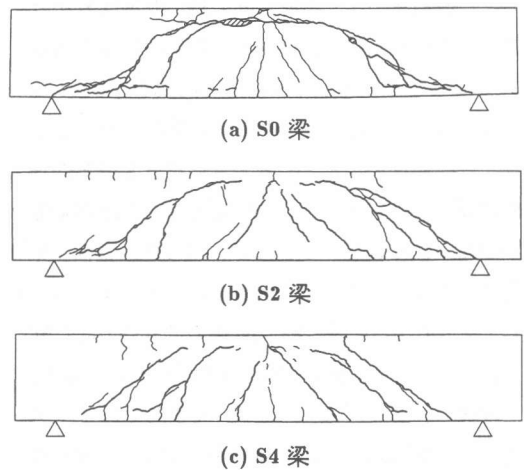


図-3 ひび割れ状況 ( $V = 3.7 \text{ m/s}$ )

較すると、両梁の分布性状は  $V = 8.4 \text{ m/s}$  と衝突速度の比較的大きいレベルまでよく一致してい

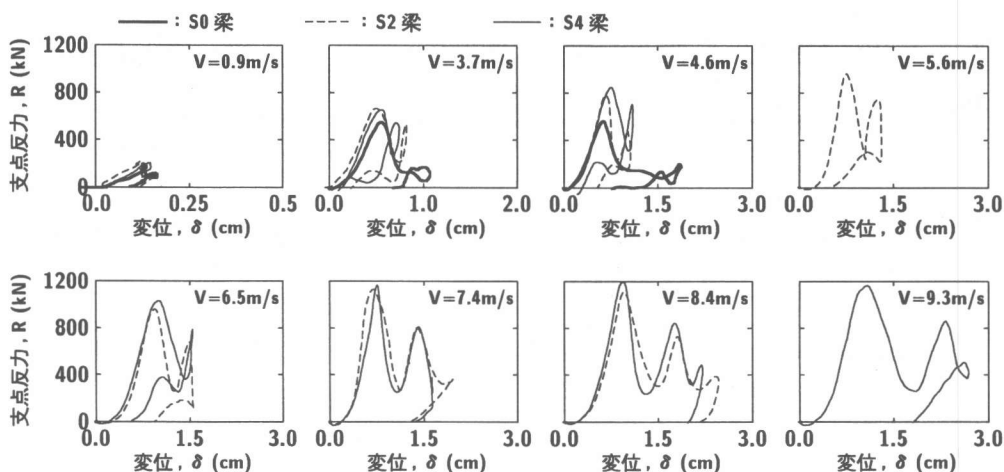


図-4 支点反力と変位に関する履歴曲線

る。これは、斜めひび割れが発生するものの、せん断補強筋の著しい塑性化に伴う梁全体の損傷が顕在化しない衝突速度においては、せん断補強筋量によらず同程度の剛性が確保されることを示唆している。

次に、支点反力波形  $R$  について見ると、衝撃初期の波動の立ち上がりは重錘衝撃力波形より遅い。ここでも  $V \geq 3.7$  m/s において S0 梁と S2, S4 梁の分布性状に差異が見られる。すなわち、S0 梁の場合には衝撃初期に励起される正弦半波とその後の振幅が小さく継続時間の長い波形成分が合成された分布性状を、S2, S4 梁の場合には半周期が 10 ms 程度の正弦半波波形と周期が 2.5 ms 程度の比較的振幅の大きい数波の波形成分が合成された分布性状を示している。このような分布性状の差異は、前述のように S0 梁ではせん断補強筋が配筋されていないことより、斜めひび割れ発生後に梁の復元力が著しく低下したことによるものと推察される。一方、S2, S4 梁の波動の分布性状は、ここでも衝突速度に拘わらずほぼ同様である。

最後に、変位波形  $\delta$  について検討を行う。図より、変位波形  $\delta$  は、重錘衝撃力波形や支点反力波形において励起されている周期の短い波形成分が消失し、これらの全継続時間を半周期とする正弦減衰波的な性状を示していることが分かる。従って、衝撃初期の波動の立ち上がりは支点反力

波形よりも若干遅い傾向を示している。また、重錘衝撃力波形  $P$  や支点反力波形  $R$  の場合と同様に、 $V \geq 3.7$  m/s において S0 梁と S2, S4 梁で差異のあることが分かる。すなわち、S0 梁の場合には、波動の振幅や振動周期が他の梁に比べて大きく示されている。このことから、 $V = 3.7$  m/s 時より S0 梁の塑性化が他の梁に比べて著しく進行したことがうかがえる。一方、S2, S4 梁の場合には  $V \geq 6.5$  m/s で初期の正弦半波の継続時間が S2 梁の場合で若干長くなっているものの、両者ではほぼ類似した分布性状を示している。なお、図-3 のひび割れ分布図において、S4 梁の斜めひび割れ本数が S0, S2 梁の場合よりも多く示されていることが分かる。これは、静載荷時の場合と同様に S4 梁のせん断補強筋量が多いことによるものと推察される。

### 3.2 支点反力と変位に関する履歴曲線

前節の考察より、重錘衝撃力波形は、第1波の最大振幅や継続時間が、せん断補強筋比の違いによる差異がほとんどないことが明らかとなっている。また、載荷点変位が励起されていない衝撃初期に最大衝撃力値を示している。一方、支点反力波形の場合には、衝撃初期の立ち上がりが変位波形よりも若干早いものの、周期の長い正弦半波波形は変位波形の波形性状に類似している。このことは、入力荷重として支点反力波形を用いること

により、静力学と同様の考え方で挙動解析が可能であることを示唆している。これより、以降の考察では、衝撃力評価として支点反力のみを用いて検討することとする。

図-4には、各RC梁の支点反力と変位に関する  $R-\delta$  履歴曲線を衝突速度毎に比較して示している。図より、衝突速度  $V = 0.9 \text{ m/s}$  の場合には、各RC梁の支点反力  $R$  は、変位  $\delta$  の増加とともに単調に増大し、最大支点反力値到達後に初期剛性と同程度の剛性で除荷される大略類似した弾性的な分布性状を示していることが分かる。しかしながら、 $V = 3.7 \text{ m/s}$  では、せん断補強筋を配筋していない S0 梁の場合には最大支点反力値に到達後も変位が増大する傾向を示し、 $R-\delta$  曲線は二等辺三角形形状の分布性状を示している。一方、せん断補強筋を配筋している S2, S4 梁の場合には、支点反力は最大値到達後に一旦除荷するものの再度最大値近傍まで励起され、初期剛性と同程度で零近傍まで除荷される。その後、変位は零程度まで回復していることが分かる。前者の S0 梁の挙動は、コンクリートと主鉄筋が相互に衝撃荷重に抵抗して最大支点反力値まで達するものの、せん断補強筋が配筋されていないために、図-3に示されるようなひび割れ間隔の大きい斜めひび割れの発生と共に急激に抵抗力を失い、変位の増大とともに除荷に至るためと推察される。一方、後者の S2, S4 梁の場合には、最大支点反力が励起されて斜めひび割れが発生し除荷状態に至るものの、これらのひび割れ発生と同時にせん断補強筋が衝撃力に抵抗するように作用することより、再度最大値と同程度の支点反力が励起されるためと考えられる。また、残留変位がほとんど発生しないのは、入力エネルギーが小さいためひび割れ幅が小さく、せん断補強筋が十分健全であることを暗示している。

さらに衝突速度を増大させると、S0 梁の場合には衝撃初期の二等辺三角形分布後に、最大支点反力の  $1/3$  程度の反力が励起した状態で、変位が増大するループ（第2ループ）が顕著に出現してくることが分かる。これは、ひび割れ間隔の大

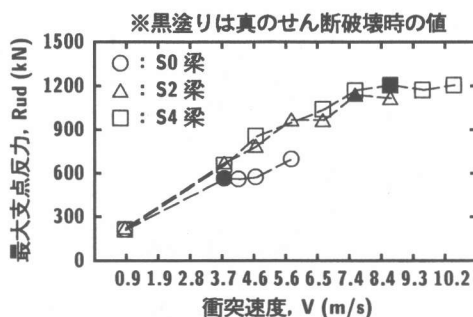


図-5 最大支点反力と衝突速度の関係

きい斜めひび割れの発生によりコンクリートと主鉄筋によって抵抗するせん断耐力が著しく減少するものの、未だ消費されていないエネルギーに対して斜めひび割れ発生部の主鉄筋が抵抗するためと考えられる。一方、S2, S4 梁の場合には、衝突速度  $V$  の増加に伴い残留変位が増大し、 $R-\delta$  曲線の分布も  $V = 7.4 \text{ m/s}$  以降衝撃初期と後続の反力分布が二等辺三角形形状に推移していることが分かる。また、この二等辺三角形形状を示す衝突速度以上での最大支点反力値は、衝突速度に拘わらず大略同程度の値となっている。これは、せん断補強筋を配筋している場合においても、入力エネルギーの増加に伴い梁が著しく塑性化しせん断破壊に至る場合には、ひび割れが大きく開口するため、せん断補強筋が配筋されていない場合と同様に衝撃初期に二等辺三角形形状の分布を示し、かつほぼ絶対最大支点反力値を示すことを暗示している。なお、S2, S4 梁の  $R-\delta$  曲線の分布性状は、S2 梁の残留変位が S4 梁に比べて若干大きい傾向にあることを除き、両者でほぼ同様である。

### 3.3 最大支点反力と衝突速度の関係

図-5には、各RC梁の最大支点反力  $R_{ud}$  と衝突速度  $V$  の関係を示している。図中の黒塗り印は、RC梁が真にせん断破壊する時点の  $R_{ud}$  値を示している。すなわち、S0 梁の場合には著者らの過去の実験結果<sup>3)</sup>より、ひび割れ間隔の大きい斜めひび割れの発生に対応して、 $R-\delta$  曲線に第2ループがまさに出現する衝突速度での値を示している。また、S2, S4 梁の場合には、 $R-\delta$  曲線が衝撃初期に二等辺三角形形状を示し、かつ  $R_{ud}$

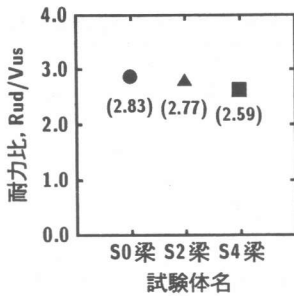


図-6 最大支点反力と静的せん断耐力の耐力比

が絶対最大支点反力値を示す場合を真のせん断破壊時とみなして、その時の衝突速度を示している。

図より、各梁の  $R_{ud}$  は、梁が真にせん断破壊する（黒塗り印）衝突速度時までほぼ線形に増大していることが分かる。また、真のせん断破壊発生時より小さい衝突速度に着目すると、S0 梁の  $V = 0.9 \text{ m/s}$  時の  $R_{ud}$  値は S2, S4 梁の支点反力値と、S2 梁の  $V < 7.4 \text{ m/s}$  時の  $R_{ud}$  値は S4 梁の支点反力値とほぼ同様である。これは、RC 梁がせん断破壊に至らない衝突速度レベルでは、各梁の最大支点反力値はせん断補強筋量に拘わらずほぼ同様であることを示唆している。

### 3.4 最大支点反力と静的せん断耐力の耐力比

図-6には、各 RC 梁の最大支点反力と別途実施した静載荷実験より得られた実測静的せん断耐力（表-1 参照）の耐力比  $R_{ud} / V_{us}$  を示している。ここで、最大支点反力  $R_{ud}$  値には、各 RC 梁が真にせん断破壊する時点とみなした図-5における黒塗り印の値を採用している。

図より、各 RC 梁の耐力比  $R_{ud} / V_{us}$  はせん断補強筋量に拘わらず、同程度の値となっていることが分かる。これは、最大支点反力と静的せん断耐力の耐力比  $R_{ud} / V_{us}$  を用いることにより、静的せん断耐力に基づく簡易な耐衝撃設計が可能であることを示唆している。本実験の範囲では、この耐力比  $R_{ud} / V_{us}$  は 2.5 ~ 3.0 であった。今後、この耐力比に関する実験データをさらに蓄積して、より詳細に耐力比の定量的な評価を実施して行きたいと考えている。

## 4. まとめ

本研究では、せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性を明らかにすることを目的として、せん断補強筋量の異なる 3 種類の RC 梁に関する単一載荷による重錘落下衝撃実験を行った。本実験より得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 重錘衝撃力波形は、衝撃初期の継続時間の短い波形成分と後続の継続時間の比較的長い波形成分から成る。また、せん断補強筋を配筋しない RC 梁では、ひび割れ間隔の大きい斜めひび割れの発生に伴い梁の復元力が低下するため、後続の波形成分の振幅が小さくなる。
- (2) 変位波形は、せん断補強筋を配筋しない場合にはひび割れ間隔の大きい斜めひび割れ発生後、振幅および周期が著しく増大する。せん断補強筋を配筋することにより、せん断補強筋が衝撃力に抵抗し、梁の塑性化の進行が抑制される。
- (3) RC 梁が真にせん断破壊する場合の支点反力-変位曲線は、せん断補強筋量に拘わらず衝撃初期に二等辺三角形形状の分布性状を示し、かつこの時点でほぼ絶対最大支点反力値を示す。
- (4) せん断補強筋を配筋する場合には、梁が著しく塑性化しない衝突速度の範囲では、重錘衝撃力、支点反力、変位波形や支点反力-変位曲線はせん断補強筋量に拘わらず類似である。
- (5) 最大支点反力と静的せん断耐力の関係を用いることにより、静的せん断耐力に基づく簡易なせん断破壊に対する耐衝撃設計が可能となる。

## 参考文献

- 1) 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, 2000.4
- 2) コンクリート標準示方書 (平成 8 年制定) 設計編, 土木学会, 1996
- 3) 安藤智啓, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 蟹江俊仁: スターラップを有しないせん断破壊型 RC 梁の単一載荷衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.46A, 2000.3