

静的耐力の異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状

Effects of static load carrying capacity on impact resistant behavior of shear-failure type RC beams

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)
防衛庁第4研究所	正会員	安藤 智啓	(Tomohiro Ando)
室蘭工業大学	○ 学生員	宮川 健太	(Kenta Miyakawa)

1. はじめに

著者らは、せん断破壊に対する合理的な耐衝撃設計手法を確立することを目的として、静载荷時にせん断破壊が卓越する（以後、せん断破壊型）RC 梁の耐衝撃性状に関する実験的・解析的研究を継続して行っている。その結果、せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状に与える主鉄筋比、せん断スパン比、コンクリート強度および载荷方法（単一载荷と繰り返し载荷）の影響等が明らかとなりつつある<sup>1)</sup>。

しかしながら、曲げ破壊型 RC 梁の場合と同様に、耐力やエネルギー収支関係に基づいた耐衝撃設計手法を確立するためには、せん断スパン比やせん断余裕度および主鉄筋比がほぼ同程度のものとした静的せん断耐力（以後、静的耐力）の違いが耐衝撃性状に与える影響を明らかにする必要がある。

このような観点より、本研究ではせん断破壊型 RC 梁の静的耐力の違いが耐衝撃性状に与える影響に着目し、静的耐力の異なる3種類の RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施して、その影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 RC 梁の形状寸法および実験方法

図-1には、本実験に用いた RC 梁の断面寸法および配筋状況を示している。RC 梁の断面寸法（梁幅×梁高）は、130×200 mm（A 試験体）、180×260 mm（B 試験体）および 240×300 mm（C 試験体）である。軸方向鉄筋には、A 試験体の場合では D19、B 試験体の場合では D25、をそれぞれ上下端に2本ずつ、C 試験体の場合では、上

下端に D25 の鉄筋を3本ずつ配置している。純スパン長は、A、B、C 試験体でそれぞれ 1.6 m、2.0 m、2.4 m である。これら3種類の RC 梁は、せん断スパン比、せん断余裕度および主鉄筋比が大略等しくなるように断面設計されている（表-1 参照）。

RC 梁は、リバウンド防止用治具付の支点治具上に設置した。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。本実験は、重錘を RC 梁のスパン中央部に所定の高さから一度だけ自由落下させる単一载荷により行っている。なお、用いた重錘は、質量が 300 kg、载荷点部の直径が 150 mm の円柱状鋼製重錘であり、重錘底部は、衝突時の片当たりを防止するために、曲率半径が 1,407 mm で高さが 2 mm の球面状となっている。測定項目は、重錘衝撃力  $P$ 、合支点反力  $R$ （以後、支点反力）および载荷点変位  $\delta$ （以後、変位）の各応答波形である。また、実験終了後には試験体側面に生じたひび割れを記録している。

2.2 RC 梁の静的設計値

表-1には、各試験体の静的設計値および実験時の重錘の衝突速度を一覧にして示している。

表中、静的せん断耐力  $V_{usc}$  および静的曲げ耐力  $P_{usc}$  は、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に基づき算定している。各試験体は、せん断余裕度  $\alpha (= V_{usc} / P_{usc}) < 1.0$  であることより、静载荷時に設計的にはせん断で破壊することが予想される。また、表中には別途実施した静载荷実験より得られた実測静的耐力  $P_{us}$ 、および  $P_{us}$  を  $P_{usc}$  で除して算定した実せん断余裕度  $\alpha'$  も合わせて示している。なお、衝突速度  $V$  は、RC 梁の弾塑性域から終局状態に至

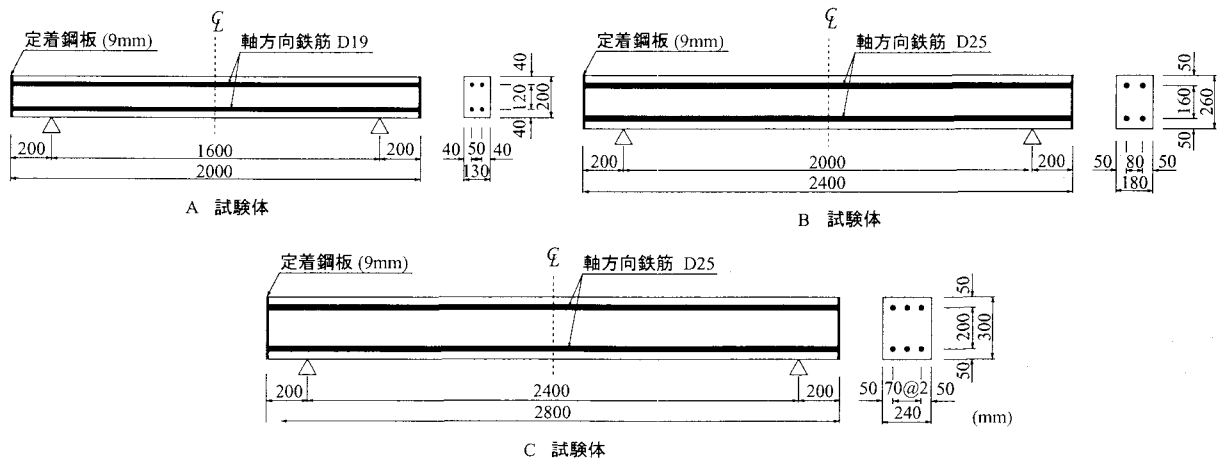


図-1 試験体概要図

表-1 試験体の一覧

試験体名	主鉄筋比 $P_t$	せん断 スパン比 $a/d$	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 静的耐力 $P_{us}$ (kN)	実せん断 余裕度 $\alpha'$	衝突速度 $V$ (m/s)
A	0.028	5	56.8	77.5	0.73	55.1	0.71	2, 2.25, 2.375, 2.5
B	0.026	4.76	100.8	137.9	0.73	97.4	0.71	3, 3.25, 3.5, 3.75
C	0.025	4.80	150.3	209.2	0.72	160.5	0.77	4.125, 4.25, 4.375, 4.5

表-2 コンクリートの力学的特性値

材令 (日)	圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	引張強度 $f_t$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
21	34.2	2.52	24.4	0.22

表-3 鉄筋の力学的特性値

鉄筋 名称	材質	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_s$
D19	SD345	405	587	206	0.3
D25		382	545		

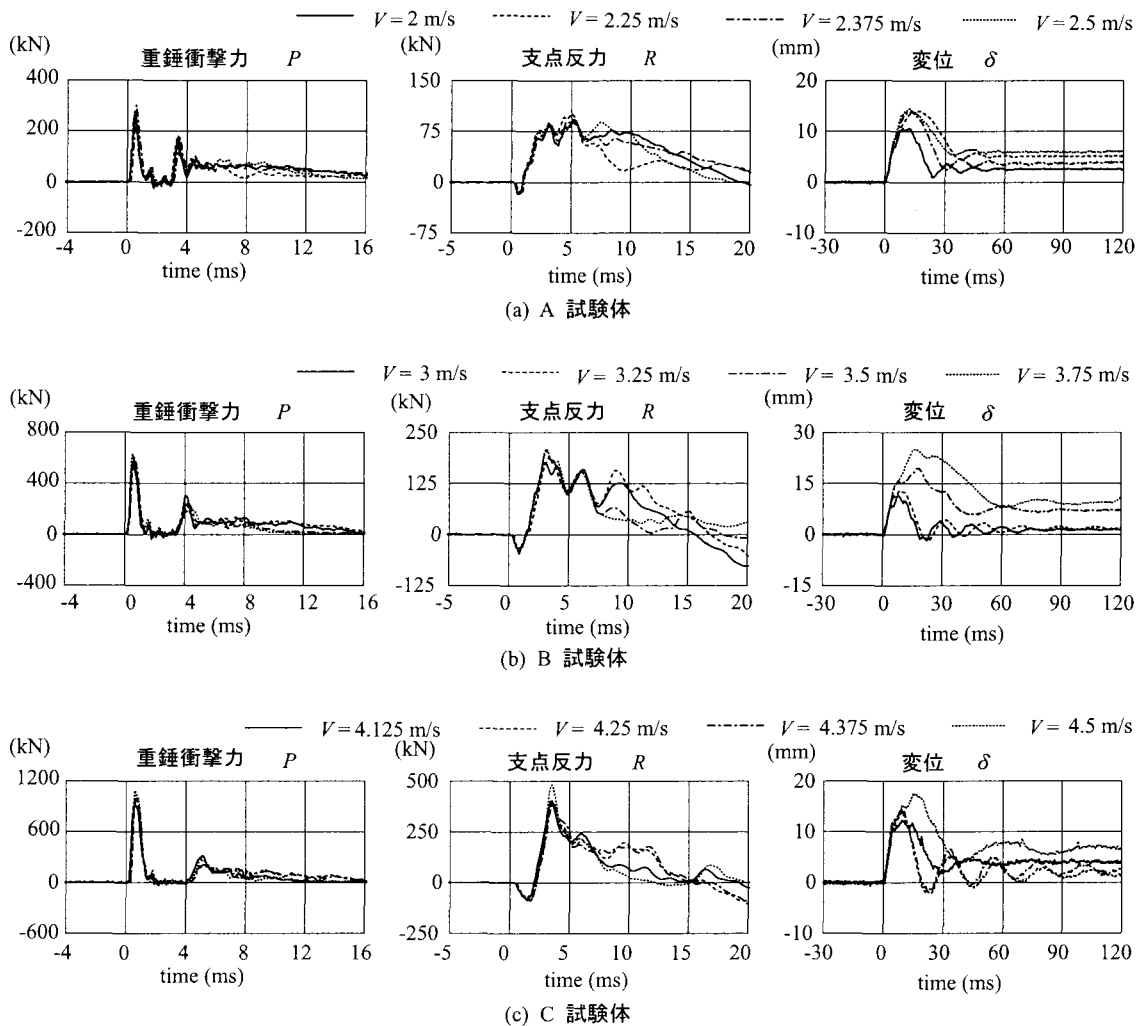


図-2 各応答波形

るまでの耐衝撃性状を比較するため、各試験体で異なっている。本実験に用いたRC梁は、衝突速度欄に示した衝突速度に対応した全12体である。また、表-2、表-3には、実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

### 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RC梁の重錘衝撃力 $P$ 、支点反力 $R$ および変位 $\delta$ に関する各応答波形を試験体ごとに示してい

る。図中、各波形は重錘衝突時を0msとして整理している。

まず、重錘衝撃力波形 $P$ について見ると、各試験体の分布性状は衝突速度 $V$ にかかわらず良く一致していることが分かる。すなわち、衝撃初期に継続時間が2ms程度の正弦半波(第1波)と後続の継続時間の比較的長い正弦半波(第2波)から構成されている。また、各試験体ごとに見ると、最大振幅および波形全体の継続時間は衝突速度 $V$ が増大するにつれて大きくなっている。

次に、支点反力波形 $R$ について見ると、各試験体ごと

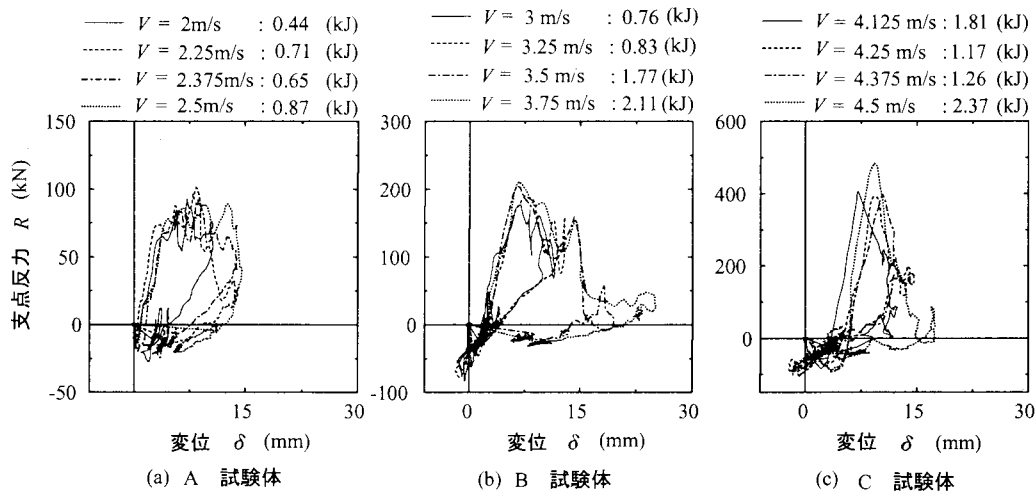


図-3 R- $\delta$ 履歴曲線

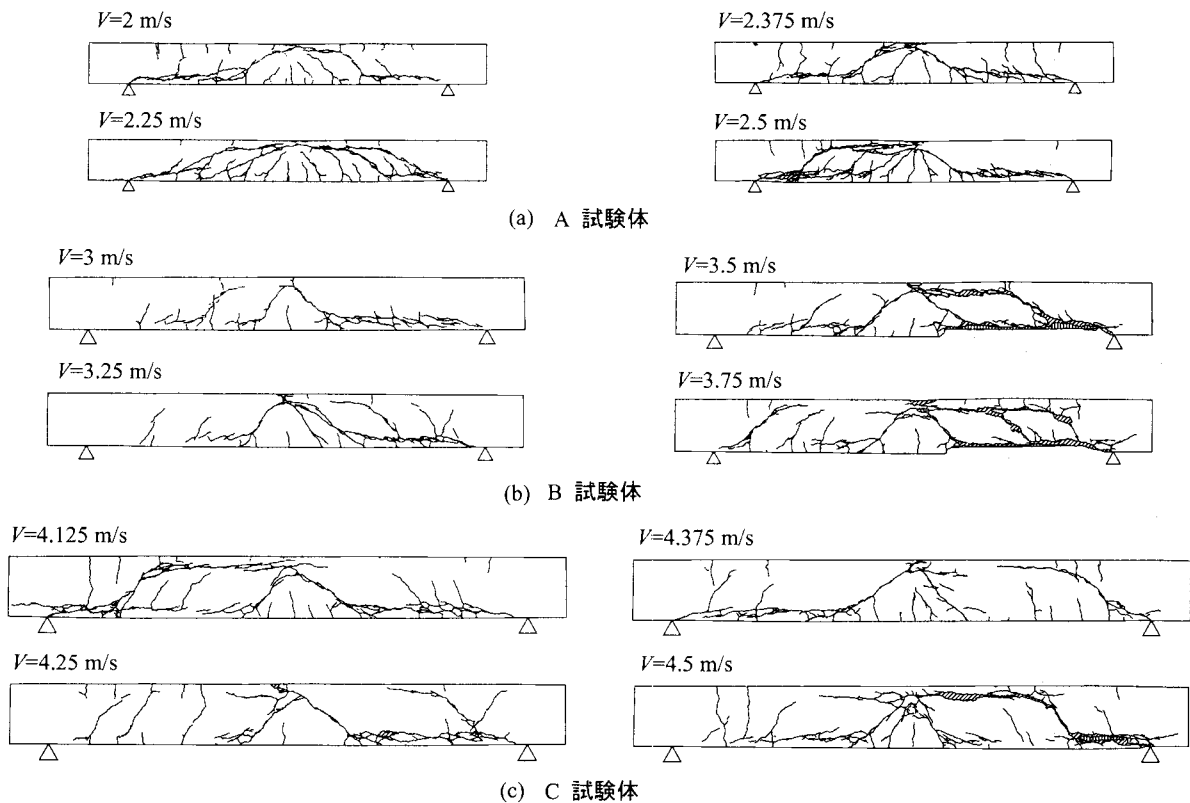


図-4 ひび割れ分布性状

で波形性状が異なっていることが分かる。A試験体の場合には、衝撃初期の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波形性状を示していることが分かる。B試験体の場合には、衝撃初期の正弦半波に高周波成分が含まれた波形性状を示している。C試験体の場合には、衝撃初期に継続時間が12~15ms程度の三角形波と周期が数ms程度の波形が合成された波形性状を示している。これらから、衝突速度 $V$ が小さい場合には曲げ破壊型の波形性状を示し、大きくなると、せん断破壊型の波形性状を示すことが分かる。

変位波形 $\delta$ について見ると、各試験体とも正弦波状の分布性状を示しており、大略類似している。詳細に見ると、B試験体の場合には、 $V \geq 3.5$  m/sになると急激に最大変位、残留変位が大きくなり、固有振動周期も長くなっていることから、試験体の塑性化が著しく進行した

と考えられる。また、C試験体の $V=4.25, 4.375$  m/sでは、残留変位が小さく減衰自由振動をしていることが分かる。 $V=4.5$  m/sになると、最大変位、残留変位が急激に増大していることから、塑性化が進行したものと推察される。

### 3.2 支点反力-変位履歴曲線

図-3には、各試験体の支点反力-変位履歴曲線( $R-\delta$ 曲線)を衝突速度 $V$ ごとに示している。なお、図には $R-\delta$ 曲線のループで囲まれる面積で評価される吸収エネルギー $E_a$ の値も合わせて示している。

図より、A試験体の場合には、平行四辺形に近い分布性状を示しており曲げ破壊型RC梁に類似した性状を示している。また、最大支点反力は、衝突速度に関わらずほぼ漸近している。しかしながら、衝突速度 $V$ の増加とともに、最大変位は増加していることから、試験体の損

表-4 終局時における各種応答値一覧

試験体名	実測静的 せん断耐力 $P_{us}$ (kN)	入力 エネルギー $E_k$ (kJ)	吸収 エネルギー $E_a$ (kJ)	最大 重錘衝撃力 $P_{ud}$ (kN)	最大 支点反力 $R_{ud}$ (kN)	最大変位 $\delta_{max}$ (mm)	残留変位 $\delta_{rd}$ (mm)	耐力比 $R_{ud}/P_{us}$	エネルギー比 $E_a/E_k$
① A-2.5	55.1	0.94	0.87	281.1	91.3	14.7	7.6	1.66	0.93
② B-3.5	97.4	1.84	1.77	609.3	216.2	19.7	7.2	2.22	0.96
③ C-4.5	160.5	3.04	2.37	1091.1	528.6	18.0	6.6	3.29	0.78
応答比②/①	1.77	1.96	2.03	2.17	2.37	1.34	0.95	1.34	1.03
応答比③/①	2.91	3.23	2.72	3.88	5.79	1.22	0.87	1.98	0.84

傷が進行していることが分かる。B試験体の場合には、 $V=3, 3.25$  m/sにおいて支点反力は変位の増加とともに最大値まで単調に増大し、その後反力の低下とともに最大変位に達した後、変位はゼロ近傍まで復元している。 $V \geq 3.5$  m/sにおいて、 $R-\delta$  曲線は三角形の分布を示している。これは、せん断破壊型特有の分布性状である。また、除荷とともに変位が急増していることから試験体が脆性的な破壊性状を呈していることが分かる。C試験体の場合には、 $V \leq 4.375$  m/sにおいて、最大変位に達した後、初期剛性とほぼ同様な経路で除荷されている。 $V=4.5$  m/sにおいては、衝撃初期にはB試験体と同様に三角形の分布を示すものの、再度載荷状態となり対応して変位が増加している。これは、せん断破壊型によってエネルギーが吸収された後も、余剰エネルギーによって主鉄筋を介した振動が励起されたためと考えられる。これにより、試験体の塑性化が著しく進行しているものと推察される。以上より、せん断スパン比やせん断余裕度がほぼ同程度の条件下においては、試験体の断面寸法が大きい場合ほど、せん断型の性状がより顕著に現れることが明らかとなった。

### 3.3 ひび割れ分布性状

図-4には、各試験体の衝撃実験終了後のひび割れ分布性状を示している。各試験体において、載荷点部から支点部に向けてアーチ状に進展するひび割れや載荷点部から梁下縁に向けて約 $45^\circ$ で進展する斜めひび割れ、主鉄筋に沿う形で進展する割裂ひび割れなどが発生している。さらに、衝突速度の増加に伴い、各種のひび割れが顕在化していることが分かる。なお、A試験体の $V=2.5$  m/s、C試験体の $V=4.5$  m/sでは、アーチ状のひび割れが大きく開口している様子がうかがえる。また、B試験体の $V=3.5$  m/sでは、梁下部かぶりコンクリートの剥落が見られる。以上から、これらの時点において各試験体ともに終局に至っているものと推察される。これより本研究では、A、B、C試験体の終局の衝突速度をそれぞれ $V=2.5, 3.5, 4.5$  m/sとし議論を進めることとする。

### 3.4 終局時における各種応答値

ここでは、上述の議論より、A、B、C試験体の終局の衝突速度をそれぞれ $V=2.5, 3.5, 4.5$  m/s時点とし、A試験体の耐衝撃性状をB、C試験体と比較して検討を行うこととする。なお、ここでは終局時の最大支点反力 $R_{ud}$ を動的耐力として評価することとする。表-4には、各試験体の終局時における各種応答値を示している。表中、応答比は、A-2.5試験体に関する応答値のB-3.5、C-4.5試験体に対する比率である。また、耐力比は最大支点反力

$R_{ud}$ を実測静的せん断耐力 $P_{us}$ で除した値であり、エネルギー比は試験体が吸収したエネルギー $E_a$ （以後、吸収エネルギー）を入力エネルギー $E_k (=MV^2/2, M$ :重錘質量)で除した値である。なお、吸収エネルギー $E_a$ は、支点反力-変位曲線の第1象限を用いて評価している。表より、残留変位 $\delta_{rd}$ は、せん断スパン比、せん断余裕度および主鉄筋比を同等にした場合には、静的耐力によらず同程度の値を示していることが分かる。また、静載荷時の静的耐力がそれぞれ2,3倍程度に増加すると、入力エネルギー $E_k$ 、吸収エネルギー $E_a$ も2,3倍程度に増加する。しかしながら、最大支点反力 $R_{ud}$ はそれらの増加割合とは異なり、2.5,6倍程度に増加している。本研究では、各試験体の各々の設計パラメータをほぼ同等に設計していることより、上述の仮定の要因の1つとしては、試験体の断面の寸法の違いが考えられる。従って、今後試験体の断面寸法の違いに着目した実験を行う必要があるものと考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、静的耐力の違いがせん断破壊型RC梁の耐衝撃性状に与える影響について検討した。本研究の範囲内で得られた結果は以下の通りである。

- 1) 重錘衝撃力、変位波形については、静的耐力が異なる場合においても類似の波形性状を示す。しかし、支点反力波形については、各試験体で異なる。
- 2) 終局時のひび割れ分布性状は、静的耐力が異なる場合においても、ほぼ同様であることが分かった。
- 3) 終局時の残留変位は、各試験体で同様の値を示した。
- 4) 入力エネルギー、吸収エネルギーは実測静的せん断耐力とほぼ同様にそれぞれ2,3倍と増加した。しかしながら、最大支点反力はその値とは異なっている。

## 参考文献

- 1) 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, pp.1809-1818, 2000.
- 2) コンクリート標準示方書(2002年制定) 構造性能照査編, 土木学会, 2002.