

断面形状の異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状

Impact Resistant Behavior of Shear-Failure Type RC Beams with Various Cross-Section

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
三井建設(株)	フェロー	三上 浩	(Hiroshi Mikami)
防衛庁第4研究所	正 員	安藤 智啓	(Tomohiro Ando)
室蘭工業大学	○学生員	小坂 剛	(Tsuyoshi Kosaka)

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）の影響が、ある程度明らかとなった¹⁾。

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、さらに静的せん断耐力が同程度である場合の断面寸法の違いが耐衝撃性状に与える影響（以後、断面寸法の影響）等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 梁に関する断面寸法の影響に着目して、静的せん断耐力、静的曲げ耐力およびせん断余裕度が設計的にほぼ同様である2種類の RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施し、その影響について検討を試みた。

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、本実験に用いた複鉄筋矩形 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、220×300 mm（A 試験体）と 250×250 mm（B 試験体）である。純スパン長はいずれの梁も 2 m である。これら2種類の RC 梁は、静的せん断耐力、静

的曲げ耐力およびせん断余裕度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。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。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る。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 δ （以後、変位）の各応答波形である。また、実験終了後には梁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²⁾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型で破壊することが想定される。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 α' も合わせて示している。

表より、 P_{us} および α' は両試験体で大略同様であることが分かる。なお、衝突速度 V は、RC 梁の弾塑性域から終局状態に至るまでの耐衝撃性状を比較するため、

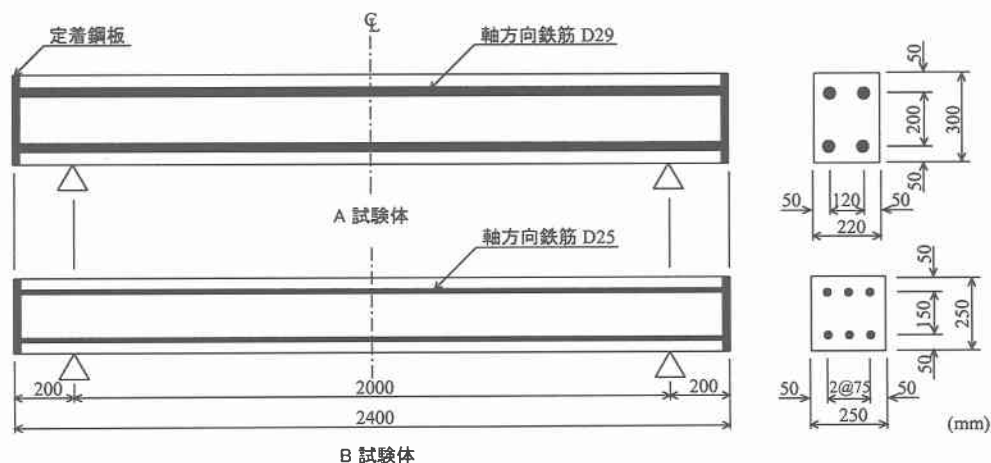


図-1 試験体概要図

表－１ 試験体の一覧

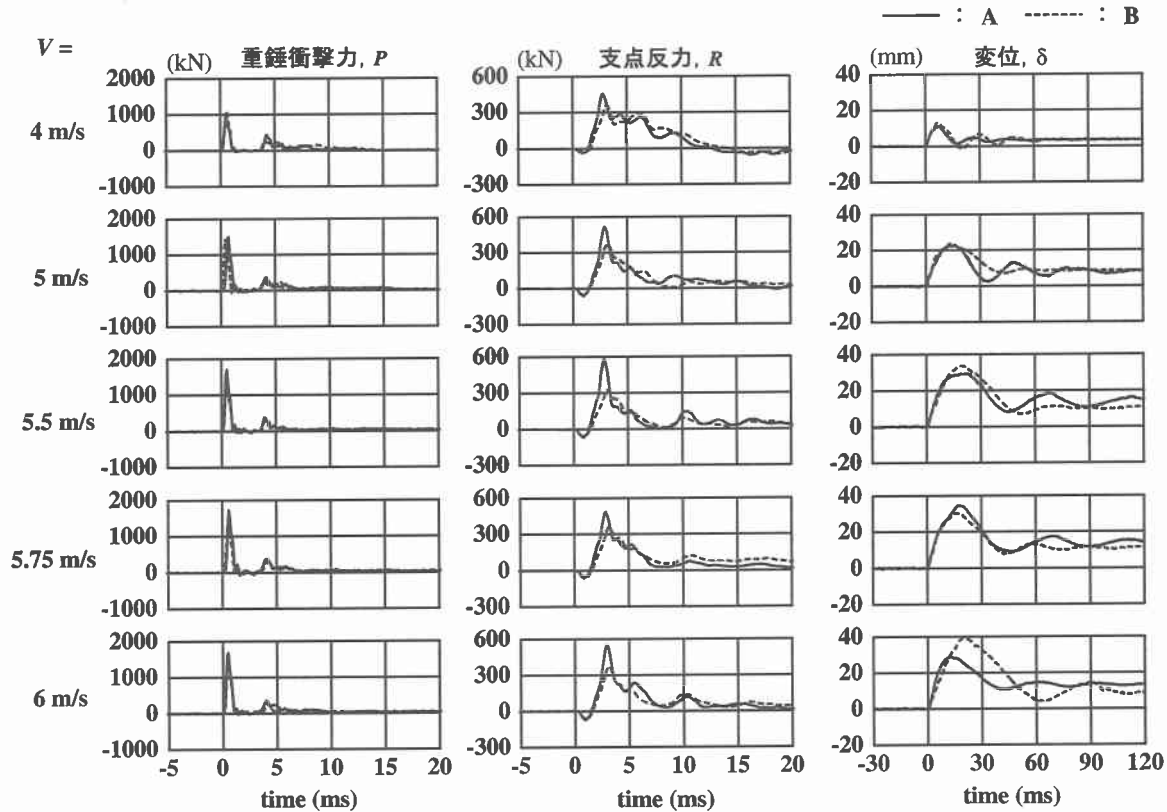
試験体名	主鉄筋比 P_t	せん断 スパン比 a/d	静的 せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的 曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断 余裕度 α	実測静的 せん断耐力 P_{us} (kN)	実せん断 余裕度 α'	衝突速度 V (m/s)
A	0.023	4.0	149.0	221.2	0.67	175.4	0.793	4, 5, 5.5, 5.75, 6
B	0.030	5.0	157.0	198.2	0.79	158.0	0.797	

表－２ コンクリートの力学的特性

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 ν_c
52	44.8	3.50	29.8	0.21

表－３ 鉄筋の力学的特性

鉄筋 名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D25	SD345	380	596	206	0.3
D29		383	604		



図－２ 各応答波形

$V = 4 \sim 6$ m/s の範囲で設定している。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 10 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 δ に関する各応答波形を衝突速度 V 毎に示している。図中、各波形は重錘衝突時を 0 ms 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、両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 1.5 ms 程度の正弦半波（第 1 波）と後続の継続時間の比較的最長い正弦半波（第 2 波）から構成されており、波動の立ち上がりから減衰に至るまで良く対応している。

次に、支点反力波形 R について見ると、両試験体の分布性状は、 V にかかわらず、波動の立ち上がり勾配および最大値には差異が見られるものの、最大値以降の波動の減少勾配や継続時間には大きな差異が見られないことが分かる。全体的には、継続時間が 8 ms 程度の正弦半波と継続時間が比較的最長く振幅の小さい波形成分が連なった分布を示しており、両者で類似している。初期勾配および最大応答値が異なるのは、後述のように曲げ剛性が大きく関与しているものと推察される。なお、重錘衝撃力で見られた第 1 波と第 2 波の分散は見られない。

変位波形 δ について見ると、衝突速度 $V = 6$ m/s の場合を除くと、両梁の振動は最大応答値まではほぼ類似の分布となっていることが分かる。しかしながら、最大応答値以降の減衰自由振動状態における波動分布には、両者で若干差異が見られる。すなわち、A 試験体の波動が B 試験体のそれより短い周期で振動している。これは、両試験体間の曲げ剛性の違いと劣化損傷の程度の差に起因

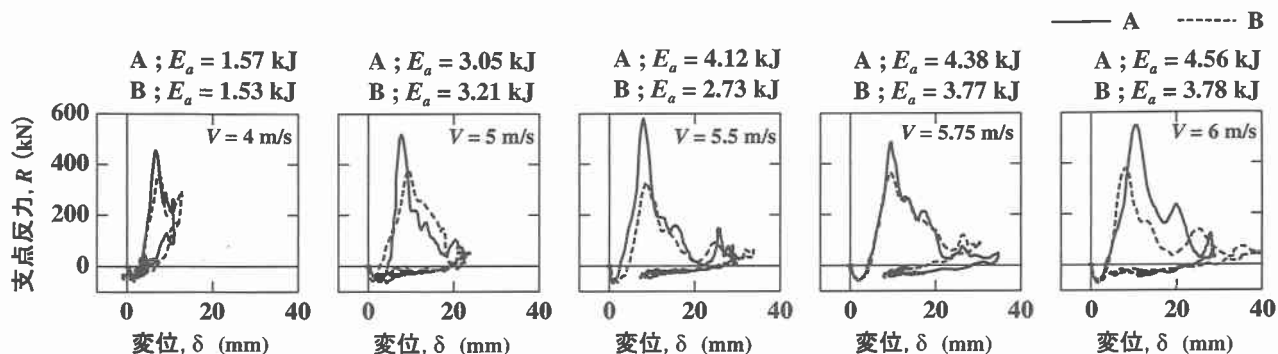


図-3 $R-\delta$ 履歴曲線

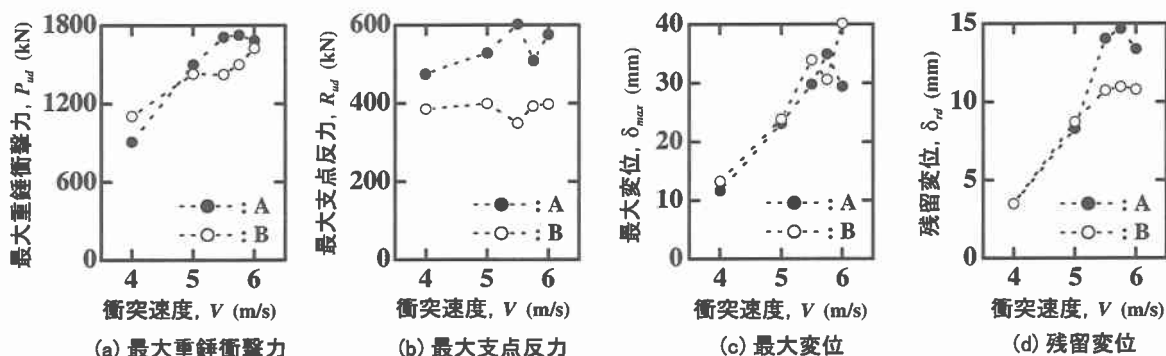


図-4 各種応答値

しているものと考えられる。なお、 $V=6$ m/s の場合には、両梁の最大応答値が大きく異なっている。これは、後述のひび割れ分布にも見られるように、B 試験体の場合には、梁下縁のコンクリートが著しく剥落する大きな損傷が生じたためと推察される。

3.2 支点反力-変位履歴曲線

図-3 には、A, B 試験体の支点反力-変位履歴曲線 ($R-\delta$ 曲線) を衝突速度 V 毎に示している。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量 E_a の値も合わせて示している。

図より、衝突速度 $V=4$ m/s の場合には、支点反力 R は変位 δ の増加に伴い最大値まで単調に増大し、その後最大変位値に達した後、初期剛性とほぼ同様の剛性で減少する両梁で大略類似の挙動を示していることが分かる。従って、両梁は、この衝突速度においては、弾性に近い状態で挙動しているものと推察される。一方、 $V=5$ m/s の場合には、 R は最大応答値に達した後減少に至るものの、 δ は増大しており、 $R-\delta$ 曲線は両梁とも類似の三角形形状の分布を示している。これは、せん断破壊特有の分布性状であり、この衝突速度で両梁ともせん断破壊に至ったことが分かる。なお、 $V=4$ m/s および $V=5$ m/s では、両梁の吸収エネルギー量はほぼ同様である。

$V \geq 5.5$ m/s の場合には、両梁の $R-\delta$ 曲線は衝撃初期には $V=5$ m/s と同様に三角形形状の分布を示すものの、再度載荷状態となり、対応して変位も増加していることが分かる。これは、せん断破壊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。なお、 $V \geq 5.5$ m/s では、 $R-\delta$ 曲線の分布特性は両梁で類似しているものの、吸収エネルギー E_a は A 梁が B 梁より大きい。これ

は、A 梁の曲げ耐力やせん断耐力が B 梁よりも大きいことが一因として挙げられるものの、後述のように両梁とも著しい損傷を受けていることから、損傷モードにも深く関連しているものと推察される。

3.3 各応答値の比較

図-4 には、A, B 試験体の最大重錘衝撃力 P_{ud} 、最大支点反力 R_{ud} 、最大変位 δ_{max} および残留変位 δ_{rd} を衝突速度 V 毎に示している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力 P_{ud} についてみると、 P_{ud} は $V=5.5$ m/s および $V=5.75$ m/s の場合を除くと、両梁で大略同様の値を示していることが分かる。 $V=5.5$ m/s および $V=5.75$ m/s の場合には、B 試験体の P_{ud} が A 試験体のそれより小さく示されている。これは、後述するひび割れ分布より、B 試験体の場合には載荷点部のコンクリートが剥落している様子が観察されることより、この剥落現象が衝撃力の低下に関与しているものと推察される。なお、 P_{ud} は全体的には V の増加に伴い線形的に増大する傾向がうかがえる。

(b) 図より、最大支点反力 R_{ud} について見ると、 R_{ud} は衝突速度 V の大きさにかかわらず両梁で差異のあることが分かる。すなわち A 試験体の R_{ud} が B 試験体のそれより大きく示されている。その程度を本実験の範囲内における絶対最大支点反力値で比較すると、A 梁が B 梁の 1.5 倍程度となっている。一方、実測静的せん断耐力や、鉄筋の剛性を無視した弾性的なせん断剛性、および (c) 図の最大変位が両梁で大差ないのに対して、弾性的な曲げ剛性は A 梁が B 梁の 1.5 倍程度大きい。また、図-2 からも明らかなように、最大支点反力は衝撃初期に発生している。このことは最大支点反力が重錘衝突による過渡応答状態で発生していることを意味している。これよ

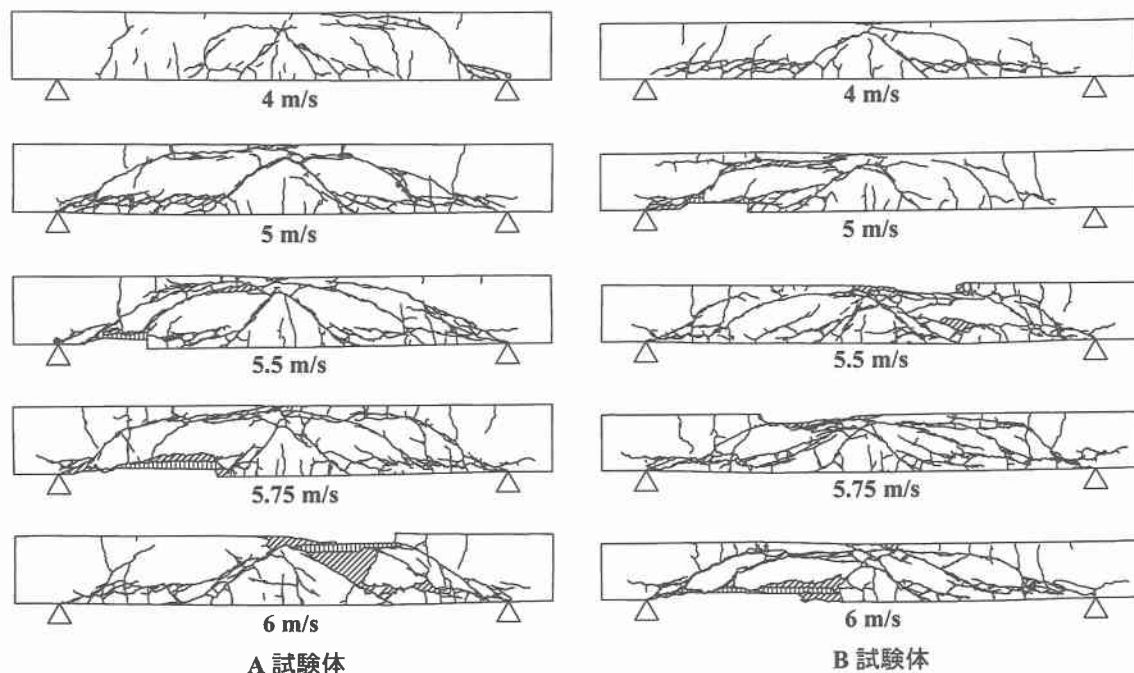


図-5 ひび割れ分布図

り、両梁の最大支点反力の差は重錘衝突初期の過渡応答にも大きく影響を与えると考えられる梁の曲げ剛性の大小に起因しているものと推察される。

(c), (d) 図より、最大変位 δ_{max} について見ると、両梁の値は $V=6\text{ m/s}$ の場合を除くと、 V の大きさにかかわらずほぼ同様であることが分かる。また、両梁とも δ_{max} は V の増加とともに線形的に増大している。一方、残留変位 δ_{rd} については、 $V=5\text{ m/s}$ までは両梁で良く対応した値となっていることが認められる。しかしながら、 $V \geq 5.5\text{ m/s}$ では、A 試験体の δ_{rd} が B 試験体のそれより大きくなっている。これは、A 試験体の場合には、斜めひび割れの発生後に衝撃力に抵抗する主鉄筋量が少ないためと考えられる。なお、 δ_{rd} は $V=5.5\text{ m/s}$ までは V の増加とともに線形的に増大しているが、それ以上の衝突速度では顕著な増加は見られない。

3.4 ひび割れ分布

図-5 には、A, B 試験体の衝撃実験終了後のひび割れ分布を衝突速度 V 毎に示している。

図より、 $V=4\text{ m/s}$ では、A 試験体の場合には荷点部から支点部に向けてアーチ状に進展する斜めひび割れや、荷点部から梁下縁に約 45° の角度で進展するひび割れが発生していることが分かる。また、後者のひび割れは主鉄筋に達すると主鉄筋に沿う形で進展している。一方、B 試験体の場合には、アーチ状の斜めひび割れは未だ明瞭に形成されていないものの、荷点部から梁下縁に向かう約 45° の角度で進展するひび割れや、主鉄筋に沿う形で進展する割裂ひび割れの形成されている様子が観察される。いずれの梁も、この衝突速度でせん断破壊型のひび割れ分布の性状を呈している。

$V=5\text{ m/s}$ では、両梁ともアーチ状の斜めひび割れ、約 45° の斜めひび割れや割裂ひび割れが明瞭に形成されており、梁がせん断破壊で終局に至っている様子がうかがえる。 $V \geq 5.5\text{ m/s}$ では、両梁ともせん断ひび割れがさらに顕在化し、荷点部上縁のかぶりコンクリートや支点

部近傍のかぶりコンクリートの剥落も見られる。

以上より、静的せん断耐力、静的曲げ耐力およびせん断余裕度が設計的にほぼ同様であるせん断破壊型 RC 梁の場合には、衝突速度の小さい段階からほぼ同様のひび割れ分布性状を示すことが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、断面寸法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。結果は以下の通りである。

- 1) 重錘衝撃力、支点反力、変位波形については、断面寸法が異なる場合においても類似の分布性状を示す。
- 2) しかしながら、最大支点反力は梁の曲げ剛性比と同程度の差異を示す。
- 3) ひび割れ分布は、衝突速度が小さい段階から終局に至るまでほぼ同様な性状を示す。
- 4) 最大支点反力値を用いて衝撃耐力を評価するものと仮定すれば、本試験体の場合には断面寸法によって耐力が異なる結果となる。

今後はパラメータを変え実験を行い、さらに検討を行う予定である。

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 梁の単一荷重衝撃実験, 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 (平成 8 年制定) 設計編, 土木学会, 1996.