

論文 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

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、静的せん断耐力がほぼ等しい3種類のせん断補強筋を有しないせん断破壊型 RC 梁を製作し、断面寸法の違い等が RC 梁の耐衝撃性状に与える影響に関して実験的に検討を行った。その結果、上端鉄筋を配筋しない場合には、上縁かぶりコンクリートが剥落することにより、上端鉄筋配筋時より小さい衝突速度で終局に至ることや、静的せん断耐力が同様である RC 梁でも、断面寸法の違いによりせん断余裕度が 1.0 程度および 0.5 程度と異なってくる場合には、破壊の進行過程や動的耐力に差異が生じてくること、等が明らかになった。

キーワード：RC 梁, せん断破壊, 耐衝撃, せん断余裕度

1. はじめに

著者らは、これまで RC 梁の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 梁の耐衝撃性状に関する実験的・解析的研究を継続して行ってきた。その結果、せん断補強筋を有しないせん断破壊型 RC 梁に関しては、主鉄筋比、せん断スパン比、コンクリート強度および載荷方法（単一載荷および繰り返し載荷）の影響を含め、その耐衝撃性状がかなり明らかになってきた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 1) 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）や、2) 入力エネルギー ($MV^2/2 : M$; 重錘質量, V ; 衝突速度) が一定である場合の M , V 値の違いが耐衝撃性状に与える影響等を明らかにする必要がある。

このような観点より、本研究では上述の断面寸法の影響に着目して、静的せん断耐力がほぼ同様である3種類のせん断補強筋を有しないせん断破壊型 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 RC 梁の断面寸法および配筋状況を示している。複鉄筋配筋とした RC 梁の断面寸法（梁幅×梁高）は、200×300 mm（後述の SD-4 梁）と 250×250 mm（SD-5 梁）である。前者と同様の断面寸法で上端鉄筋を配筋しない単鉄筋配筋とした梁（SS-4 梁）も製作している。純スパン長はいずれの梁も 2 m である。これら3種類の RC 梁は、静的せん断耐力が設計的にはほぼ同様となっている（表-1 参照）。

RC 梁はリバウンド防止用治具付支点上に設置している。支点治具全体は、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載荷により行っている。用いた重錘は、質量が 300 kg、載荷点部の直径が 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）および載荷点変位 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。

*1 防衛庁第4研究所研究員 施設構造研究室 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 三井建設(株) 主席研究員 技術研究所 博(工) (正会員)

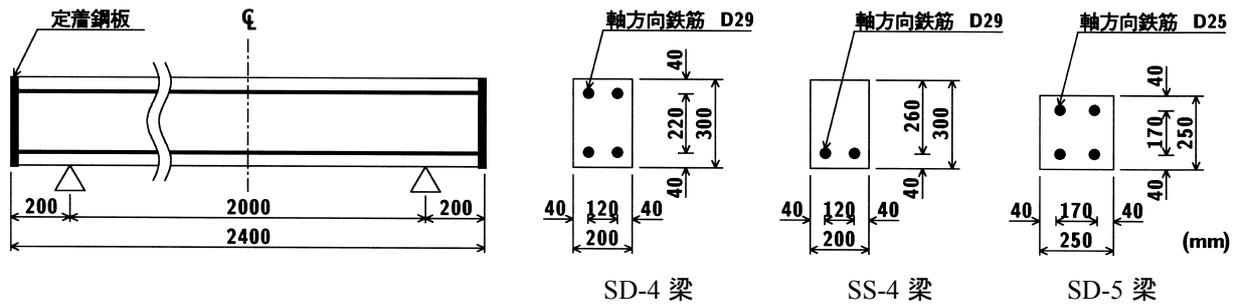


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

表-1 試験体の静的設計値および実験時の重錘衝突速度の一覧

試験体名	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 $\alpha (= V_{usc} / P_{usc})$	実測静的耐力 P_{us} (kN)	実せん断余裕度 $\alpha' (= P_{us} / P_{usc})$	衝突速度 V (m/s)
SD-4	3.9	128	243	0.53	136	0.56	1, 3, 3.5, 4, 4.5, 5
SS-4	3.9	128	231	0.55	164	0.71	1, 3, 3.5, 4
SD-5	4.8	125	146	0.86	145	0.99	1, 3, 4, 4.5, 5

表-2 コンクリートの力学的特性

実験時材令 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
55	39.1	24.3	0.19

表-3 鉄筋の力学的特性

鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D25/D29	SD345	383/409	206	0.3

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。試験体名は、せん断破壊型 (Shear-failure-type) を表す“S”，軸方向鉄筋の配筋方法 (Double or Single) を表す“D” or “S” および表中のせん断スパン比 a/d を丸めた整数値“4” or “5”を組み合わせ示している。静的せん断耐力 V_{usc} および静的曲げ耐力 P_{usc} は、コンクリート標準示方書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、静載荷時には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載荷実験より得られた実測静的耐力 P_{us} 、および P_{us} と P_{usc} を用いて算定した実せん断余裕度 α' も合わせて示している。さらに、各試験体の実験時における重錘の衝突速度 V も示している。衝突速度 V は、RC 梁の弾性域から終局状態に至るまでの耐衝撃性状を把握するため、表に示すとおり設定している。ここで、終局状態は、RC 梁に載荷点部から支点部に貫通する明瞭な斜めひび割れが発生し、支点反力-変位曲線にお

る初期剛性と最大支点反力が一段低い衝突速度時よりも小さくなる時点とした。なお、本実験に用いた RC 梁は全 15 体である。

実せん断余裕度 α' に着目すると、表より SD-4 梁の α' は設計せん断余裕度 α と同程度であるが、SS-4 梁では若干大きくなっていることが分かる。一方、SD-5 梁の α' は、1.0 程度で静的な曲げ耐力とせん断耐力が同程度の場合における実験となっている。そのため、考察は断面寸法とせん断余裕度の影響を含めた形で行うこととする。なお、静載荷実験結果のひび割れ分布は、SD-4, SS-4 梁で類似しており、半スパンにアーチ状のひび割れとそれに続く主鉄筋に沿う支点まで進展する割裂ひび割れから成り立っている。両梁で実耐力の異なるのは、上端鉄筋による影響であるものと推察される。一方、SD-5 梁の場合には、上記アーチ状ひび割れが直線的な斜めひび割れとなっている。両者の差はせん断余裕度の違いによるものと推察される。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。

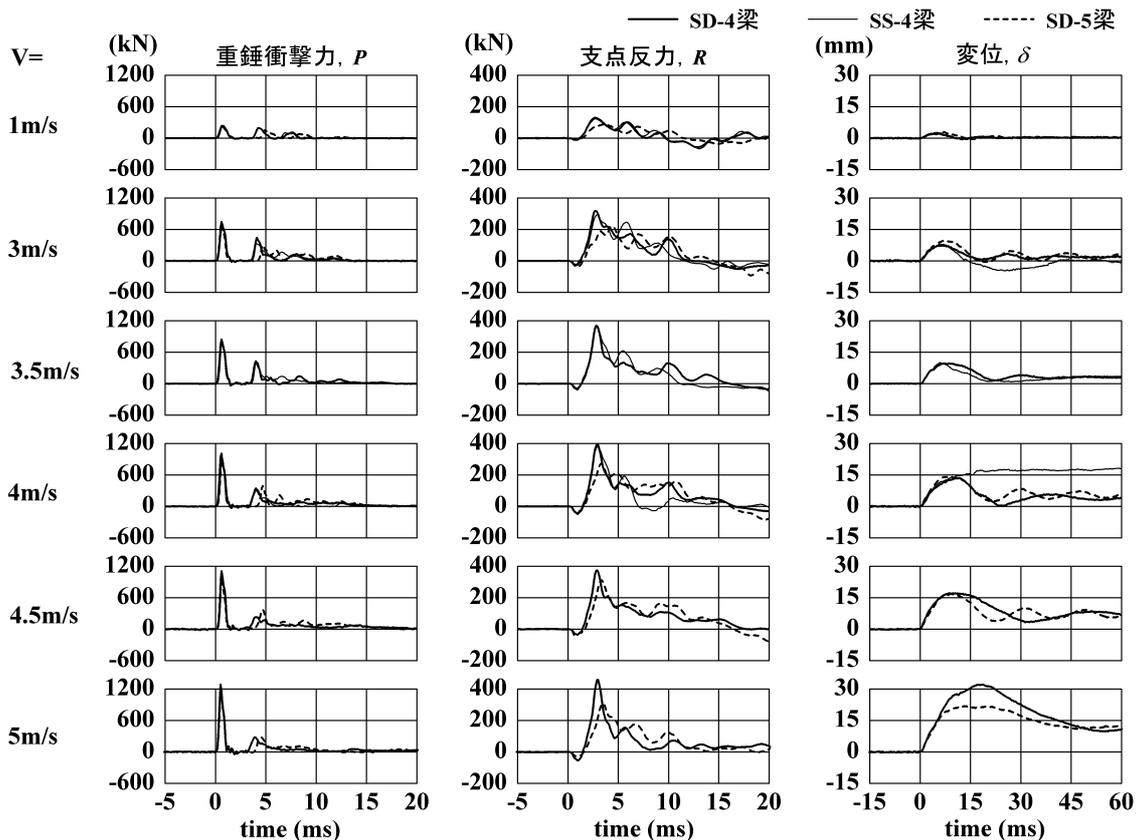


図-2 重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形

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。以下、SD-4、SS-4梁に着目した上端鉄筋の有無の影響やSD-4、SD-5梁に着目した断面寸法とせん断余裕度の影響を項目毎に考察する。

(1) 上端鉄筋の有無の影響(SD-4, SS-4梁)

まず、重錘衝撃力波形 P について見ると、両梁の分布性状は衝突速度 V に拘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）と後続の周期が数 ms の波形成分を含んだ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、最大振幅および波形全体の継続時間は、 V の増加に伴い増大している。これは、後述の支点反力波形や変位波形の場合にも同様に見られる。

次に、支点反力波形 R について見ると、 $V=1\text{ m/s}$ の場合には、両梁の分布性状が良く対応していることが分かる。これらの波形は、周期が 15 ms 程度の低周波成分と周期が数 ms の高周波成分から構成されている。なお、重錘衝撃力波形 P の場合に見られた第1波と第2波の分散ここでは見られない。一方、 $V \geq 3\text{ m/s}$ では、衝撃初期の半波は両梁で大略類似の分布を示しているものの、後続の波形にはその振幅や継続時間に差異が見られる。特に、 $V=4\text{ m/s}$ ではSS-4梁の支点反力が最大値到達後に一旦零レベルまで急激に減少している。

変位波形 δ に関しては、 $V=1\text{ m/s}$ の場合には両梁とも変位振幅の非常に小さい正弦波状の分布を示し、両者で類似の性状を呈していることが伺える。しかしながら、 $V \geq 3\text{ m/s}$ では、最大値までの波形が両梁でほぼ類似の分布となっているものの、それ以降の分布性状には差異が見られる。すなわち、SD-4梁の場合には波形が正載荷状態で振動状態を呈している。一方、SS-4

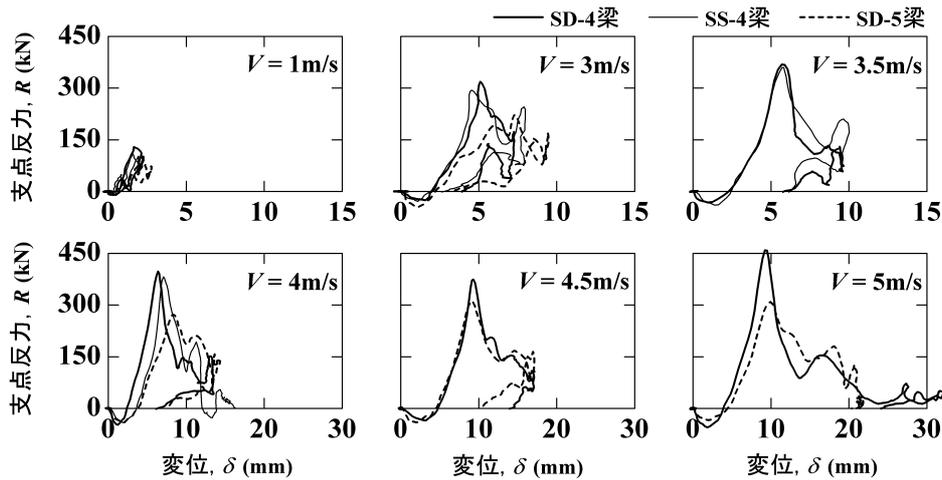


図-3 支点反力-変位履歴曲線

梁の場合には衝撃初期の正弦半波後に $V = 3 \text{ m/s}$ では負荷荷状態を示し、 $V \geq 3.5 \text{ m/s}$ では過減衰状態となっている。特に、 $V = 4 \text{ m/s}$ では両者に著しい差異が生じている。これは、SS-4 梁の場合にはSD-4 梁と比較して、梁の塑性化が著しく、耐衝撃性に劣ることを示唆している。この結果は、上端鉄筋の配筋によって耐力が減少した静載荷時の特性と異なる。

以上より、せん断破壊型 RC 梁の場合において、所定の耐衝撃性を確保するためには、上端鉄筋の配筋が重要であることが明らかになった。

(2) 断面寸法とせん断余裕度の影響(SD-4, SD-5 梁)

重錘衝撃力波形 P に関しては、前述(1)の考察同様、両梁の波形は衝突速度 V に拘わらず比較的良く対応した分布性状を示していることが分かる。一方、支点反力波形 R に関しては、波形全体の分布性状が衝突速度に拘わらず両者で類似しているものの、波形の立ち上がり勾配や最大応答値はSD-5 梁で小さく示されている。これは、表-1からも明らかのようにSD-5 梁の曲げ耐力が小さく、かつ実せん断余裕度が1.0程度であることに起因し、曲げひび割れが卓越していることによるものと推察される。

変位波形 δ の場合には、 $V = 1, 3 \text{ m/s}$ では両梁で最大値や振動周期等の特性が良く対応している。しかしながら、 $V = 4, 4.5 \text{ m/s}$ では衝撃荷重除荷後、SD-4 梁が30 ms程度の周期で緩やかに振動しているのに対して、SD-5 梁はSD-4 梁の1/2

程度の周期で振動している。これは、破壊の進行過程に対応して振動モードが異なることに起因しているものと考えられる。すなわち、SD-4 梁の場合には、せん断破壊型を呈して著しい減衰振動の性状を示しているのに対して、SD-5 梁の場合には未だ曲げの損傷が卓越し、かつ十分な耐力を有しているためと推察される。さらに、 $V = 5 \text{ m/s}$ では、振幅は異なるものの、振動性状は両者で類似している。これは、終局時には断面寸法に依存せず、同様の破壊モードを示すことを示唆している。

3.2 支点反力-変位履歴曲線

図-3には、各RC梁の支点反力-変位($R-\delta$)履歴曲線を衝突速度 V 毎に示している。

(1) 上端鉄筋の有無の影響(SD-4, SS-4 梁)

図より、衝突速度 $V = 1 \text{ m/s}$ の場合には、支点反力 R は変位の増加に伴い単調に増大し、初期剛性と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、両梁は弾性的に挙動しているものと判断される。その後 V の増加とともに、衝撃初期の分布が両梁とも三角形に推移していく様子が伺える。このような分布は、 $V = 3, 3.5 \text{ m/s}$ では両者でほぼ同様であるが、 $V = 4 \text{ m/s}$ では荷重除荷時に差異が見られる。すなわち、SD-4 梁の場合には変位は減少する傾向を示すのに対して、SS-4 梁の場合には増大する傾向を示している。これは、SS-4 梁の場合には上端鉄筋が配筋されていないこと

により、この時点で梁の塑性化が一気に進行し、梁が終局状態に至るためと推察される。

(2) 断面寸法とせん断余裕度の影響(SD-4, SD-5 梁)

図より、衝突速度 $V \leq 4 \text{ m/s}$ では、 $R-\delta$ 曲線の初期剛性はSD-4 梁の場合が大きいことが分かる。これは、SD-4 梁がよりせん断破壊型の傾向を示していることを示唆している。また、これは、SD-4 梁の場合には $V=3.5 \text{ m/s}$ 時より $R-\delta$ 曲線の衝撃初期にせん断破壊特有の三角形形状の分布が出現しているのに対して、SD-5 梁の場合には $V=4 \text{ m/s}$ 時においても未だ明瞭な三角形形状の分布が現れていないことに対応している。

$V=4.5 \text{ m/s}$ では、SD-4 梁の初期剛性と最大支点反力が $V=4 \text{ m/s}$ 時より減少している。これは、この時点でSD-4 梁が終局状態に至っていることを示唆している。また、この衝突速度でSD-5 梁の $R-\delta$ 曲線にも三角形形状の分布が出現してきており、SD-5 梁が V の増大とともにせん断破壊の卓越した性状に推移して来ることが伺える。さらに、 $V=5 \text{ m/s}$ 時には、SD-5 梁の場合にも初期剛性および最大支点反力が減少に転じており、SD-5 梁の場合もこの時点で終局に至るものと推察される。なお、SD-4 梁の場合には最大支点反力が $V=4.5 \text{ m/s}$ 時よりも大きく示されている。しかしながら、後述のひび割れ分布からも明らかのように、RC 梁は梁下縁のコンクリートが広範囲で剥落するような著しい損傷を受けており、明らかに終局に至っているものと判断される。

以上より、せん断余裕度が 1.0 に近い RC 梁は、入力エネルギーの小さい段階で曲げ破壊が卓越することより、せん断余裕度が 0.5 程度と小さくせん断破壊が卓越する RC 梁とは破壊の進行過程に差が生じてくることが明らかになった。しかしながら、終局時には耐力は異なるものの $R-\delta$ 履歴曲線が三角形形状の同様な分布となる。

3.3 最大重錘衝撃力と最大支点反力の比較

図-4 には、各 RC 梁の最大重錘衝撃力 P_{ud} と最大支点反力 R_{ud} を衝突速度 V 毎に示している。図より、最大重錘衝撃力 P_{ud} は、衝突速度 V に拘わらず各梁でほぼ同様の値を示していること

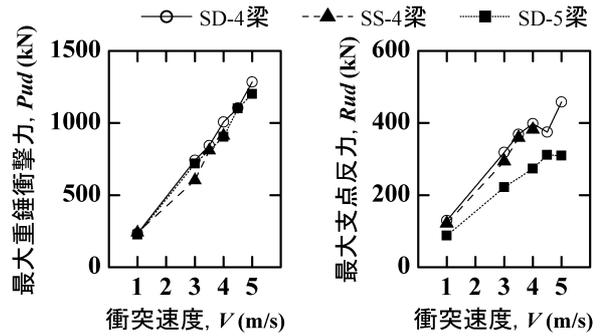


図-4 最大重錘衝撃力と最大支点反力の比較

が分かる。また、 P_{ud} 値は V の増加とともに線形的に増大している。一方、最大支点反力 R_{ud} に関しては、SD-4 梁と SS-4 梁の場合における R_{ud} 値が V に拘わらず両者でほぼ同様となっているのに対して、SD-5 梁の場合における R_{ud} 値は前者に比べて小さいことが分かる。これは、前述したように、SD-5 梁の場合には、曲げ耐力が小さく、かつ実せん断余裕度が 1.0 程度であることに起因しているものと考えられる。なお、 R_{ud} 値の分布は、終局に至るまでは P_{ud} と同様に V の増加に対応して線形的に増大している。

3.4 ひび割れ分布

図-5 には、各 RC 梁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。

(1) 上端鉄筋の有無の影響(SD-4, SS-4 梁)

図より、衝突速度 $V=3 \text{ m/s}$ では両梁のひび割れ分布性状はほぼ類似していることが分かる。すなわち、荷重点部から支点部に至るアーチ状のひび割れや、荷重点部から約 45° の角度で梁下縁に向かうひび割れおよびスパン全域に渡る曲げひび割れが発生している。しかしながら、 $V=4 \text{ m/s}$ では両梁の損傷度合いに差異が生じている。すなわち、SD-4 梁の場合には軸方向鉄筋に沿う割裂ひび割れの出現を除くと、 $V=3 \text{ m/s}$ の場合とほぼ同様である。SS-4 梁の場合にも SD-4 梁と同様のひび割れを確認できるものの、上端鉄筋が配筋されていないことにより、上縁コンクリートの剥離や下縁コンクリートの剥落が生じ、梁が壊滅的な損傷状態となっている。このことから、せん断破壊型 RC 梁の所定の耐衝撃性を確保するためには、上端鉄筋を配筋するこ

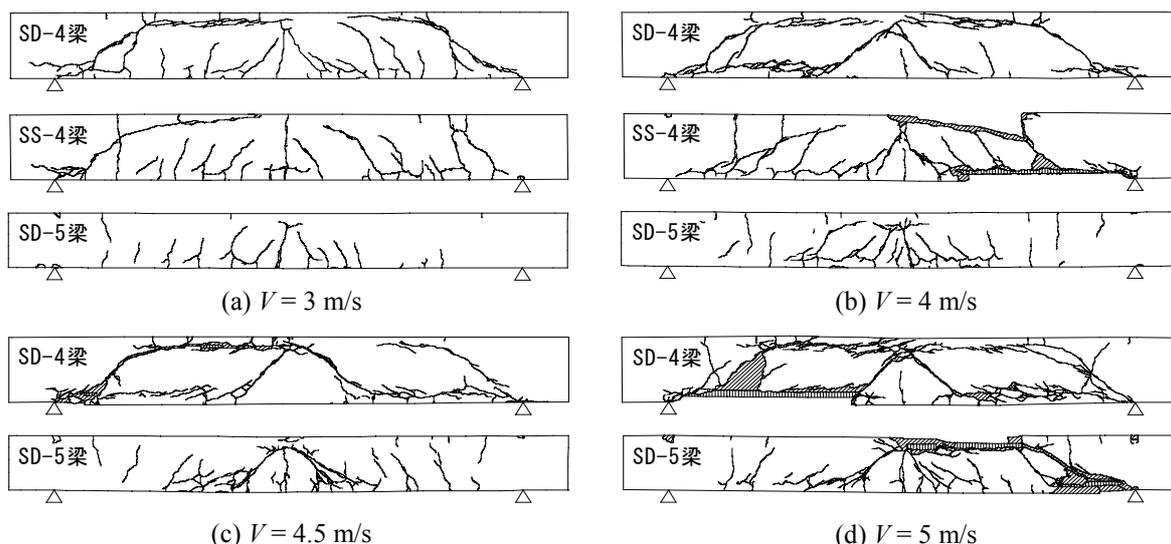


図-5 実験終了後のひび割れ分布

とが必要であるものと判断される。

(2) 断面寸法とせん断余裕度の影響(SD-4, SD-5 梁)

図より、衝突速度 $V=3 \text{ m/s}$ では、SD-5 梁の場合には、前述した SD-4 梁の場合に見られるアーチ状の斜めひび割れや荷重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ないことが分かる。この衝突速度では、SD-5 梁はせん断破壊の傾向を示している SD-4 梁と異なり、曲げひび割れの顕在化する曲げ破壊型のひび割れ分布性状を呈している。

$V=4, 4.5 \text{ m/s}$ では、SD-4 梁の場合には基本的に $V=3 \text{ m/s}$ の場合と同様のせん断破壊型のひび割れ分布となっている。SD-5 梁の場合には、 $V=4 \text{ m/s}$ では荷重点部から梁下縁に約 45° の角度で進展する斜めひび割れが顕在化してきているものの、未だ曲げ破壊が卓越した分布となっている。 $V=4.5 \text{ m/s}$ 時では、その斜めひび割れがより明瞭に現れてきているものの、SD-4 梁の場合に見られる荷重点部から支点部に貫通するアーチ状の斜めひび割れは発生していない。さらに、 $V=5 \text{ m/s}$ では、SD-4 梁の場合には、梁下縁かぶりコンクリートが著しく剥落していることを除くと、全体的なせん断ひび割れ分布は、 $V=4, 4.5 \text{ m/s}$ の場合とほぼ同様である。一方、SD-5 梁の場合には、荷重点部近傍に形成される斜めひび割れその他、SD-4 梁の場合と同様に上述のアーチ状の斜めひび割れが発生していることが確認できる。

以上より、せん断余裕度が 1.0 に近いせん断破壊型 RC 梁では、梁の損傷モードが衝突速度の増大に伴い曲げ破壊型からせん断破壊型へ推移していくことが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、静的せん断耐力がほぼ同様である 3 種類のせん断補強筋を有しないせん断破壊型 RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行い、断面寸法の違い等が RC 梁の耐衝撃性状に与える影響について検討した。検討結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 上端鉄筋を配筋しない RC 梁は、上縁かぶりコンクリートが剥落する傾向にあり、上端鉄筋を配筋する場合に比べて、より小さい衝突速度で終局に至る。
- (2) 静的せん断耐力が同様である RC 梁でも、断面寸法の違いによりせん断余裕度が 1.0 程度および 0.5 程度と異なってくる場合には、破壊の進行過程や動的耐力に差異が生じてくる。

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.