

(9) 軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性に及ぼす PVA 短繊維混入率の影響

EFFECTS OF PVA SHORT-FIBER MIXING RATIO ON IMPACT RESISTANT CAPACITY OF RC BEAMS
MADE FROM LIGHTWEIGHT CONCRETE

三上 浩*, 岸 徳光**, 栗橋祐介***, 竹本伸一****

Hiroshi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Yusuke KURIHASHI, and Shin-ichi TAKEMOTO

*博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

**工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***博(工)(独) 土木研究所 寒地土木研究所研究員 寒地基礎技術研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

****博(工) ドーピー建設工業(株) 北海道支社 統括営業部長 (〒061-0001 札幌市中央区北 1 条西 6 丁目)

キーワード: 軽量 RC 梁, PVA 短繊維, 衝撃載荷実験, 耐衝撃性

(lightweight RC beam, PVA short-fiber, impact loading test, impact resistant capacity)

1. はじめに

近年, 道路橋等上部構造の軽量化に伴う下部構造のスリム化および建設コスト縮減をねらいとして, 軽量コンクリートの適用が盛んに検討され¹⁾, 一部で実用化されている。しかし, 軽量コンクリートは使用する軽量粗骨材の強度が小さいため, 引張強度やせん断強度が普通コンクリートに比べて小さく, 斜めひび割れや鉄筋に沿った付着割裂ひび割れが発生しやすいことが知られている²⁾。そのため, 軽量コンクリート製 RC 棒部材のせん断耐力は, 普通コンクリートを用いた場合の 70% に低減することが土木学会コンクリート標準示方書³⁾ (以後, 示方書) に規定されている。

一方, コンクリートの引張靱性を改善する対策として, 種々の短繊維を混入する方法が検討されている。最近では, 親水性がありセメントペーストとの付着性能に優れているポリビニルアルコール (PVA) 短繊維に着目した研究が盛んに行われている。著者らも PVA 短繊維を混入した普通コンクリート RC 梁に関する静的・衝撃載荷実験を行い, 短繊維の架橋効果によって梁のせん断耐力が飛躍的に向上することを明らかにしている⁴⁾。このような結果より, 軽量コンクリートを用いる場合においても PVA 短繊維の混入によって部材の靱性能やせん断耐力を向上させることが可能であるものと考えられる。

このような観点から, 本研究では, 軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性に及ぼす PVA 短繊維混入率 V_f の影響を検討することを目的に, V_f を変化させた軽量コンクリート製 RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施した。また, 普通コンクリート製 RC 梁についても同様の実験を行い, 軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性を普通コンクリート製 RC 梁と同程度に改善するために必要な短繊維混入

率について検討した。

2. 実験概要

図-1 には, RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた試験体は, 断面寸法 (幅 × 高さ) が 15×35 cm, 純スパン長が 3 m の複鉄筋矩形 RC 梁である。下端鉄筋には直径 23 mm の総ネジ PC 鋼棒を用い, スターラップは配置していない。用いた PC 鋼棒の降伏強度は, 1071 MPa であった。実験は, 梁のスパン中央部に質量 300 kg の鋼製重錘を所定の高さから 1 度だけ自由落下させる単一衝撃載荷法により行った。なお, 支点治具は RC 梁の跳ね上がりを防止し, かつ回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。

計測項目は, 重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力, 支点治具に内蔵された起歪柱型ロードセルによる合支点反力 (以後, 支点反力) と非接触式レーザ変位計による載荷点変位とした。実験終了後には, RC 梁側面のひび割れをトレースし, ひび割れ分布図を作成している。

表-1 には, 試験体の一覧を示している。また, コンクリートの圧縮強度と RC 梁の計算耐力も併せて示している。本実験に用いた RC 梁は, 普通コンクリート製の N 梁と PVA 短繊維混入率 V_f を 4 種類に変化させた軽量コンクリート製の LW 梁の合計 5 種類である。また, 軽量コンクリート製 RC 梁の場合には, PVA 短繊維の混入率 V_f を 0 から 0.5% まで最大 1.5% としている。

表中の計算せん断耐力および計算曲げ耐力は, 示方書³⁾ に準拠して算出した。ただし, LW 梁の耐力は, 短繊維の混入を無視して通常の軽量コンクリートとして算出している。なお, 示方書で規定されているように, 軽量コンクリート製 RC 梁の計算せん断耐力は, 普通コンク

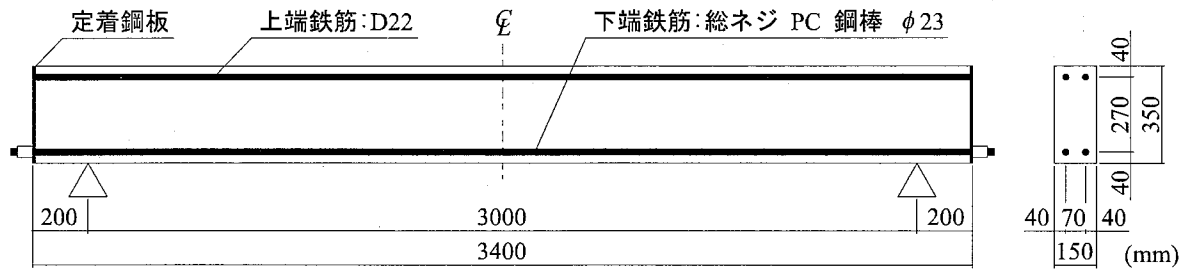


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

表-1 試験体の一覧

試験体名	コンクリートの種類	短繊維混入率 V_f (vol. %)	コンクリートの圧縮強度 (MPa)	計算せん断耐力 (kN)	計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断余裕度	荷荷方法	衝突速度 V (m/s)
N-0	普通	0	29.8	93.8	242.0	0.39	衝撃 (単一)	3, 3.5, 4, 4.5
LW-0	軽量	0	31.1	66.6	247.2	0.27		2, 2.5, 3, 3.5
LW-0.5		0.5	31.4	66.8	248.0	0.27		3.5, 4, 4.5, 5
LW-1.0		1.0	35.1	69.3	261.3	0.27		4.5, 5, 5.5, 6
LW-1.5		1.5	34.8	69.1	260.4	0.27		5, 5.5, 6, 6.5

表-2 各種コンクリートの配合

コンクリートの種類	短繊維混入率 V_f (vol. %)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)			スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	AE 剤	高性能減水剤	AE 助剤		
普通	0	50.0	44.8	171	342	808	994	0.075	0	0	12.5	3.4
軽量	0	55.0	46.0	152	276	869	529	0	1.10	0	9.0	3.7
	0.5	52.6	48.5	165	314	884	486	0	1.26	0	13.5	3.9
	1.0	43.3	48.7	170	393	848	463	0	1.97	0	15.5	4.5
	1.5	40.7	50.1	175	430	850	439	0	2.37	3.44	14.5	4.9

表-3 PVA 短繊維の寸法と材料特性値

密度 (g/cm ²)	長さ l (mm)	直径 d (mm)	アスペクト比 l/d	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
1.30	30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

リート製 RC 梁のせん断耐力の 70% として算出している。いずれの試験体においても計算せん断余裕度 (計算せん断耐力/計算曲げ耐力) が 1.0 を大きく下回っていることから、短繊維が混入されていない場合にはせん断破壊が先行することが予想される。

図-2 には、各コンクリートの配合を示している。また、表-3 には、PVA 短繊維の寸法および材料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、支点反力および応答変位波形

図-2 には、各梁の重錘衝撃力、支点反力および応答

変位の波形を示している。なお、時間軸は重錘衝撃力の立ち上がり時刻を 0 ms として整理している。図より、重錘衝撃力波形は、コンクリートの種類や混入率に関わらず各梁でほぼ同様であり、衝撃初期の振幅が大きく継続時間の短い第 1 波と振幅が小さく継続時間がより長い第 2 波から構成されている。なお、衝撃初期の最大振幅は、混入率や衝突速度の増加に対応して増大する傾向にある。

支点反力波形は、各梁ともに継続時間が 8 ~ 15 ms 程度の三角形波と周期が数 ms 程度の波形が合成された性状を示している。衝撃初期の立ち上がり勾配や振幅は、LW-0 試験体が最も小さく、次に N-0 試験体で小さい。また、短繊維混入率 V_f が高い LW 梁ほど衝撃初期の立ち上がり勾配は大きく、振幅が大きくなる傾向にあることがわかる。

一方、N-0 および LW-0 試験体は、衝突速度の増加によって波形の振幅や継続時間が大きく変動し、両梁ともに最終の衝突速度において、振幅が増大し継続時間がより短くなる性状を示している。これは、衝突速度の増加に対応して、斜めひび割れや割裂ひび割れが大きく開口してせん断破壊に至ったことによるものと考えられる。

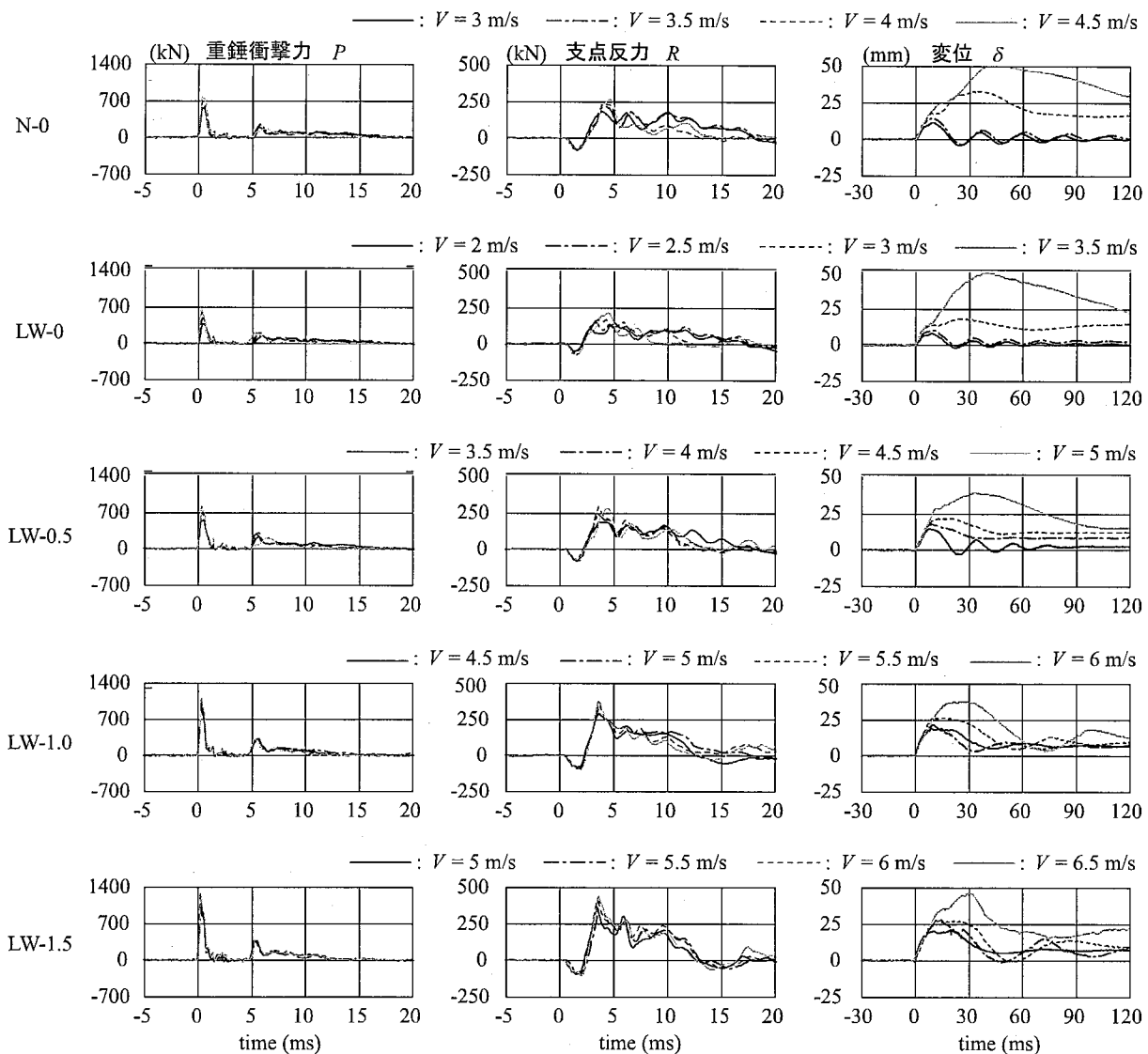


図-2 重錘衝撃力、支点反力および応答変位波形

なお、 $V_f = 0.5\%$ 程度以上の LW 梁では、衝突速度の増加による支点反力波形の変動は少なく、急激なせん断破壊が抑制されていることがわかる。すなわち、短繊維混入率 V_f をある程度以上に大きくすることにより、軽量コンクリート梁の耐衝撃性能を普通コンクリート梁と同程度以上に改善できるものと考えられる。

変位波形は、各梁ともに正弦波状の波形性状が卓越し、衝突速度が小さい場合は減衰自由振動を呈し、残留変位がほとんど生じていないことがわかる。衝突速度が大きくなると各梁ともに応答変位量は増大し、変位が大きくなる傾向にある。N-0 および LW-0 試験体において、残留変位が認められるのはそれぞれ $V = 4$ および 3 m/s であることから、軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて耐衝撃性能に劣ることがわかる。一方、LW-0.5 試験体において残留変位が認められるのは $V = 4$ m/s であり、その時の残留変位量は N-0 試験体の場合とほぼ同等である。このことより、軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性を普通コンクリート製 RC 梁の場合と同程度まで

向上させるためには、PVA 短繊維を $V_f = 0.5\%$ 程度混入する必要があるものと考えられる。

3.2 支点反力-変位履歴曲線

図-3 に各梁の支点反力-変位履歴曲線を衝突速度ごとに示した。いずれの梁も衝突速度が小さい場合は弾性的な挙動を示し、ほとんどエネルギーが吸収されていないことがわかる。一方、最終衝突速度近傍ではせん断破壊時特有の三角形の分布を示し、エネルギーをより大きく吸収していることがわかる。ただし、曲げ破壊時の支点反力-変位履歴曲線が平行四辺形状を示すとは異なるため、エネルギー吸収量は曲げ破壊時に比べて小さい。なお、各梁の最終衝突速度において、三角形の分布を示すものの再度載荷状態となり、変位が増加していることがわかる。これは、斜めひび割れや割裂ひび割れの開口などによってエネルギーが大きく吸収されたものの、未だ PC 鋼棒は弾性状態にあるため、コンクリート塊を伴った梁としての振動状態が励起されたためと推察される。

また、LW-0.5 試験体の吸収エネルギーは全般的に N-0

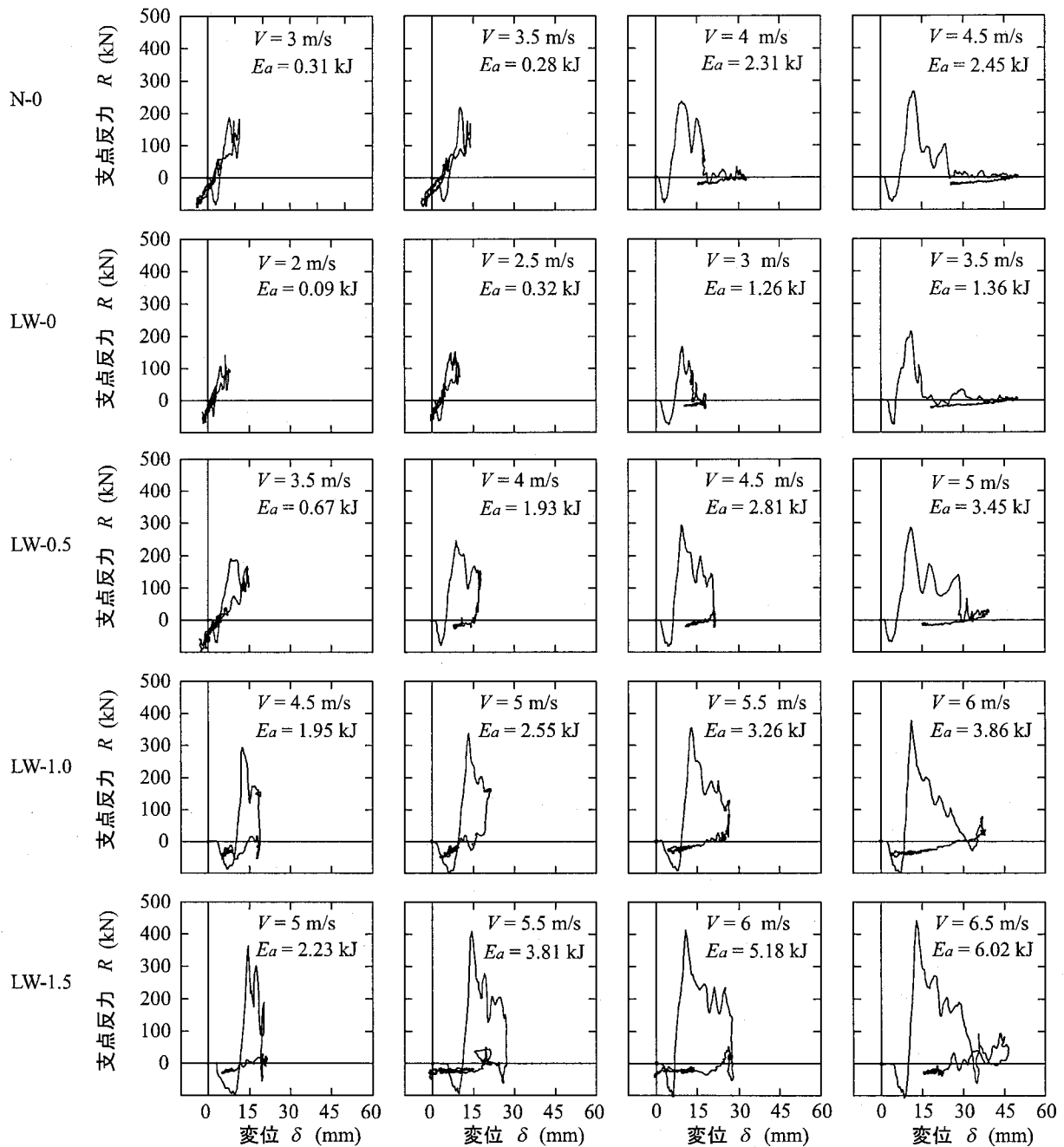


図-3 支点反力-変位履歴曲線

試験体と同程度であることより、短繊維を $V_f = 0.5\%$ 混入することで、軽量コンクリート梁の場合においても普通コンクリート梁と同程度のエネルギー吸収性能を発揮できることがわかる。

3.3 ひび割れ性状

図-4には、衝撃載荷実験終了後の各梁のひび割れ状況を示している。なお、ここでは最終衝突速度およびその直前の衝突速度におけるひび割れ状況を示している。N-0およびLW-0試験体のひび割れ状況は、衝突速度の差異はあるものの大略同様である。すなわち、最終直前の衝突速度では、上端、下端筋に沿った割裂ひび割れおよびアーチ状ひび割れの開口が顕在化し、一部で下縁か

ぶりコンクリートの脱落が見受けられる。また、最終衝突速度では、上端、下端筋に沿った割裂ひび割れの開口がさらに顕著となり、かぶりコンクリートの脱落が下縁および上縁においても認められる。

一方、短繊維を混入した軽量コンクリート梁の場合には、アーチ状のひび割れが明瞭に形成され、衝突速度の増加に伴って開口幅が拡大する傾向にあることがわかる。最終衝突速度ではN-0やLW-0試験体と異なり、上下端鉄筋に沿った割裂ひび割れの開口は顕著ではなく、かぶりコンクリートの脱落も認められない。このことから、短繊維の混入により急激なせん断破壊が抑制されるとともに、かぶりコンクリートの脱落等も抑制されているこ

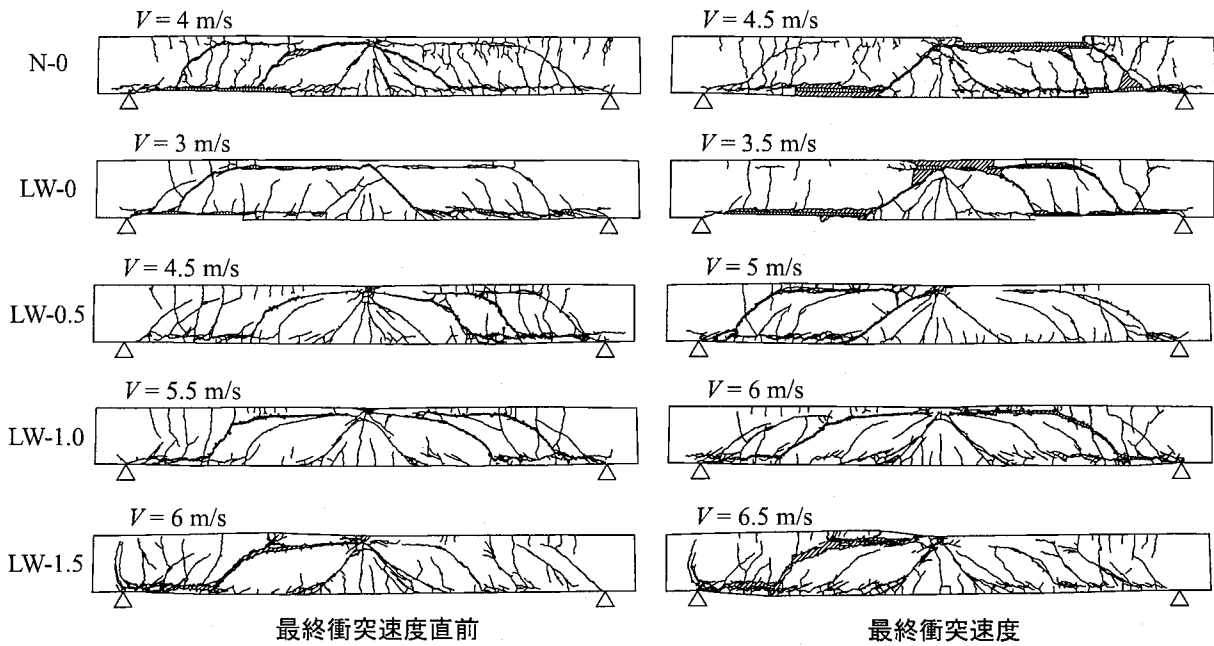


図-4 衝撃载荷実験終了後のひび割れ分布性状

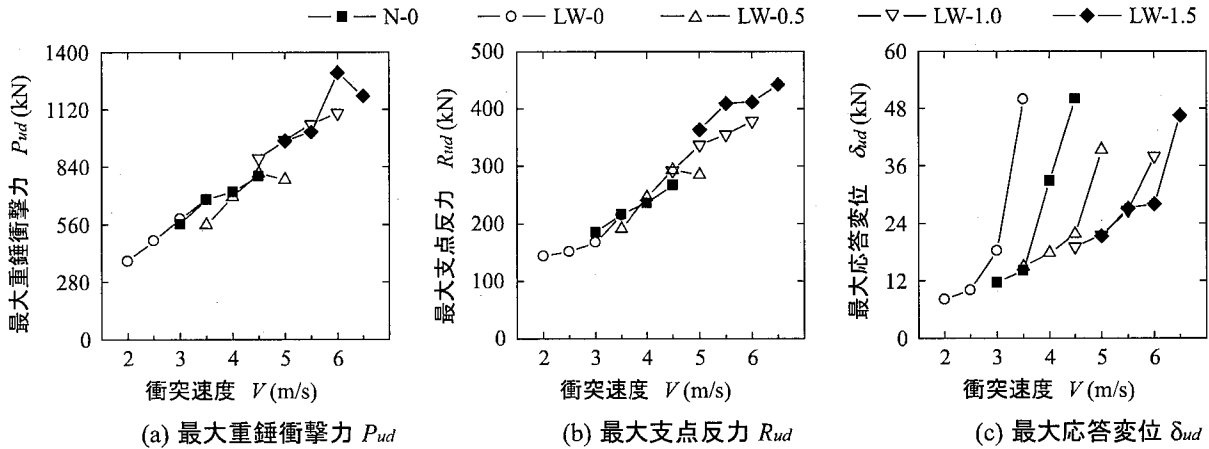


図-5 各応答値と衝突速度との関係

とがわかる。

3.4 各応答値と衝突速度との関係

図-5には、各試験体の最大重錘衝撃力 P_{ud} 、最大支点反力 R_{ud} および最大応答変位 δ_{ud} と衝突速度 V との関係を示している。最大重錘衝撃力 P_{ud} は、各試験体ともに衝突速度 V の増加に対応して増大し、多少のばらつきは見られるものの P_{ud} と V にはほぼ線形の関係が認められる。

最大支点反力 R_{ud} も全般的に衝突速度 V の増加に対応して増大する傾向を示しており、 R_{ud} と V の関係にも線形性が認められる。なお、衝突速度 V が同一の場合の N-0 および LW-0.5 試験体の最大重錘衝撃力 P_{ud} 、最大支点反力 R_{ud} はほぼ対応していることから、軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性を普通コンクリート製 RC 梁の場合と同程度まで改善するためには、軽量コンクリートに 0.5% 程度の PVA 短繊維を混入する必要があるものと考えられる。

最大応答変位 δ_{ud} は、各梁ともに衝突速度 V の増加に対

応して増大し、特に最終の衝突速度または最終直前の衝突速度で急増する傾向にあることがわかる。なお、最大応答変位が急増する以前の衝突速度における最大応答変位は、梁の種類に関わらず衝突速度の増加に対応してほぼ線形に増大している。変位の急増する衝突速度は、LW-0 試験体で最も小さく、次が N-0 試験体であった。また、LW-0.5 試験体は、N-0 試験体に比べて最大応答変位 δ_{ud} が急増する衝突速度 V が 1 m/s 大きく、 δ_{ud} から見た耐衝撃性は、LW-0.5 試験体の方が N-0 試験体よりも優れている。これは、ひび割れ図からわかるように、N-0 試験体では下縁かぶりコンクリートが脱落したのに対して、LW-0.5 試験体では短繊維の架橋効果によってかぶりコンクリートの脱落が抑制されていることと対応している。

3.5 動的せん断耐力比および動的応答倍率

図-6には、LW-0 試験体を基準とした各梁の動的せん断耐力比と短繊維混入率 V_f との関係を示している。ここ

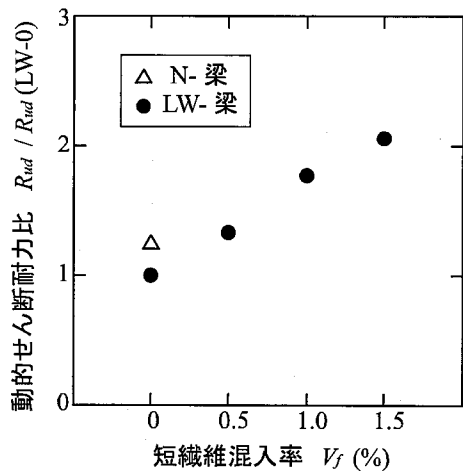


図-6 動的せん断耐力比と短繊維混入率との関係

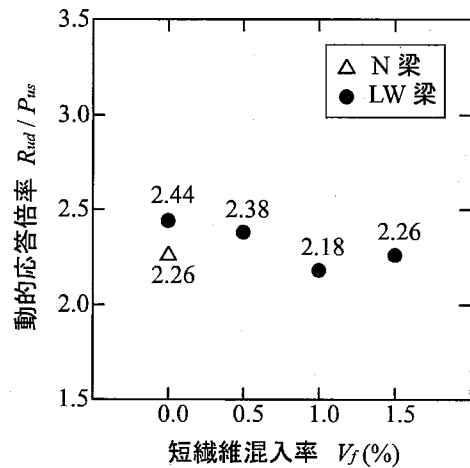


図-7 動的応答倍率と短繊維混入率との関係

で、最大支点反力は、衝撃力によって壊滅的な破壊に至る場合は低下することが知られており、衝撃力を受ける試験体の動的耐力と同義的な指標であると考えられる⁵⁾。従って、本節では、最大支点反力をRC梁の動的せん断耐力と考えて評価することとする。

図より、軽量コンクリートを用いた梁の動的せん断耐力比は、短繊維混入率 V_f に対応してほぼ線形に増大することがわかる。また、LW-0試験体の動的せん断耐力比はN-0試験体よりも小さいことから、軽量コンクリート梁の動的せん断耐力は普通コンクリート梁に比べて小さいと判断される。一方、LW-0.5試験体の動的せん断耐力比はN-0試験体のそれと同程度であることから、軽量コンクリート梁の動的せん断耐力を普通コンクリート梁と同程度にするためには、短繊維を0.5%程度混入する必要があることがわかる。

なお、LW-1.5試験体の動的せん断耐力は、LW-0試験体の2.1倍、N-0試験体の1.7倍程度であり、短繊維の混入率を1.5%とすることで、短繊維を混入していない軽量コンクリート梁の約2倍、普通コンクリート梁の1.7倍程度の動的せん断耐力が得られるものと考えられる。

図-7には、各梁の動的せん断耐力を実測の静的せん断耐力で除した動的応答倍率と短繊維混入率の関係を示している。図より、動的応答倍率は、コンクリートの種類や短繊維の混入率に関わらずほぼ一定であり、2.2~2.4程度を示すことがわかる。このことより、せん断破壊型の普通コンクリート梁および短繊維混入率の異なる軽量コンクリート梁の動的応答倍率を2.0程度と考えることで、耐衝撃性を安全側に評価できるものと判断される。

4. まとめ

本研究では、軽量コンクリート製RC部材の構造性能の改善と軽量コンクリートの適用範囲の拡大を目的として、普通コンクリート製RC梁とPVA短繊維の混入率を4種類に変化させた軽量コンクリート製RC梁の衝撃載

荷実験を実施した。本実験の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- 1) PVA短繊維を混入しない軽量コンクリート製RC梁の耐衝撃性は、普通コンクリート製RC梁のそれよりも低い。軽量コンクリート製RC梁の耐衝撃性能を普通コンクリート製RC梁と同程度まで向上させるためには、軽量コンクリートへの短繊維混入率 V_f を0.5%程度とする必要がある。
- 2) 軽量コンクリートに短繊維を混入することでRC梁の動的せん断耐力は向上し、 $V_f = 1.5\%$ とすることにより、動的せん断耐力が普通コンクリートの場合の1.7倍、軽量コンクリートを用いる場合の2.1倍程度となる。
- 3) 動的応答倍率は、コンクリートの種類や短繊維混入率に関わらずほぼ一定であり2.2~2.4程度を示す。従って、PVA短繊維を混入した軽量コンクリートRC梁の耐衝撃性は、動的応答倍率を2.0程度と考えることで安全に評価できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 二羽淳一郎, 岡本享久, 前堀伸平: 高品質軽量コンクリートの構造部材への適用, コンクリート工学, Vol.38, No.12, pp.3-9, 2000.12
- 2) 高性能軽量コンクリート研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 2000.8
- 3) 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.
- 4) 岸 徳光, 田口史雄, 三上 浩, 栗橋祐介: ピーロン短繊維を混入したRC梁の耐衝撃性に及ぼす短繊維混入率の影響, 構造工学論文集, Vol.50A, 2004.
- 5) 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, pp.177-190, 2000.4