

# (10) 軽量コンクリート製 RC 版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 SLABS MADE FROM LIGHTWEIGHT CONCRETE

栗橋祐介\*, 岸 徳光\*\*, 三上 浩\*\*\*, 竹本伸一\*\*\*\*

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

\*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)

\*\*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) 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)

\*\*\*\*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 版, PVA 短繊維, 衝撃载荷実験, 耐衝撃性  
(lightweight RC slab, PVA short-fiber, impact loading test, impact resistant capacity)

### 1. はじめに

近年, 鉄筋コンクリート (RC) やプレストレストコンクリート (PC) 製の橋梁上部工等の軽量化に伴う下部および基礎工の省力化や, それに伴う工期短縮およびコスト削減を目的に, 軽量コンクリートの適用が検討され一部で実用化されている。しかしながら, 軽量コンクリートは, 使用する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の場合に比較して小さいことが知られている。土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では, 軽量コンクリートを RC 棒部材に用いる場合には, そのせん断耐力を普通コンクリートを用いる場合の 70% に低減することを規定している。

一方で, コンクリートの引張性能を改善する方法の一つとして, 種々の短繊維を混入する方法が検討されている。従来は, 鋼繊維の適用事例が多かったもの<sup>2),3)</sup>, 近年では軽量でかつ耐食性に優れる有機系材料を原料とする短繊維も適用されるようになってきている。特に, ポリビニルアルコール (PVA) 短繊維は, 親水性があるためセメントペーストとの付着が良好であり, 架橋効果によるひび割れ進展の抑制効果が高いことなどが報告されている<sup>4),5)</sup>。

著者らはこれまで, PVA 短繊維混入による普通コンクリート製 RC 版 (以後, 普通 RC 版) の耐衝撃性向上効果の検討を目的に, PVA 短繊維の体積混入率 (以後, 短繊維混入率  $V_f$ ) を変化させた普通 RC 版の衝撃荷重载荷実験を行っている<sup>6)</sup>。その結果, 短繊維の混入により普通 RC 版の耐衝撃性が向上することや, 衝突部が大きく陥没するほどの損傷を受ける場合においても下縁かぶりコンクリートの剥落は生じないことなどが明らかになっている。また, このような PVA 短繊維の混入による耐衝撃性能向上効果は, 軽量コンクリート製の RC 版においても

有効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 版 (以後, 軽量 RC 版) 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 RC 版の重錘落下衝撃実験を実施した。また, 普通 RC 版についても同様の実験を行い, 軽量 RC 版の耐衝撃性を普通 RC 版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

表-1 には, 本実験に用いた全 4 体の RC 版の一覧を示している。試験体名は, コンクリートの種類 (N: 普通コンクリート, L: 軽量コンクリート) と短繊維混入率  $V_f$  (%) の組み合わせによって示している。実験は, 1 回目の重錘衝突速度およびその増分速度を 1 m/s と設定して, 終局に至るまで繰り返し重錘を落下させる漸増繰り返し載荷 (以後, 繰り返し載荷) により行った。なお, 衝撃荷重は, 直径 60 mm, 高さ 180 mm の鋼製円柱を先端に取り付けた鋼製重錘 (質量 300 kg) を所定の高さから自由落下させることにより与えている。本実験では, RC 版

表-1 試験体一覧

試験体名	コンクリートの種類	短繊維混入率 $V_f$ (%)	衝突速度 $V$ (m/s)
N-0	普通	0	1, 2, 3, 4
L-0	軽量	0	1, 2, 3, 4
L-0.5		0.5	1, 2, 3, 4, 5
L-1.0		1.0	1, 2, 3, 4, 5, 6

表-2 コンクリートの配合および圧縮強度の一覧

コンクリートの種類	短繊維混入率 $V_f$ (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )		スランプ (cm)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
				W	C	S	G	AE 剤	高性能減水剤			
普通	0	50	45	171	342	808	994	0.075	0	19.0	40.1	23.7
軽量	0	55	46	152	276	869	529	0	1.10	6.0	35.7	19.7
	0.5	53	49	165	314	884	486	0	1.26	6.5	38.9	20.1
	1.0	43	49	170	393	848	463	0	1.97	7.0	38.9	20.4

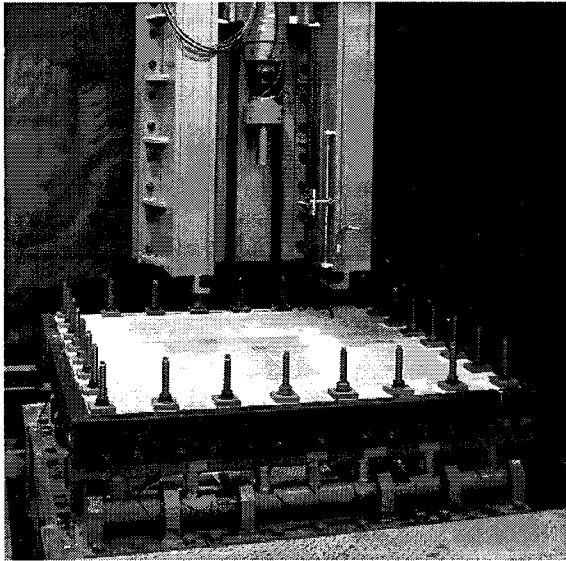


写真-1 衝撃荷重載荷実験状況

の裏面に明瞭な円形状のひび割れが確認された時点をも、押し抜きせん断破壊による終局状態と定義して実験を終了することとした。写真-1には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。

図-1には、試験体の概要を示している。用いた試験体は、寸法が2,000 × 2,000 × 180 mmの単鉄筋RC版である。鉄筋にはSD345-D16を用い、版中央部より150 mm間隔で格子状に配置している。これらの鉄筋はRC版の四辺に配置した溝型鋼に溶接し、定着を確保することとしている。RC版の支持条件は、純スパン長1.75 mの四辺支持としている。なお、支点部では、四辺、四隅においてRC版の跳ね上がりを拘束している。鉄筋の降伏強度は380 MPaであった。

本実験の測定項目は、重錘衝撃力  $P$ 、合支点反力  $R$  (以後、支点反力)、載荷点変位  $\delta$  (以後、変位) の各応答波形である。実験終了後には、RC版の裏面に発生したひび割れをトレースしてひび割れ分布図を作成している。また、RC版を中心線に沿って切断し、版中央部における押し抜きせん断ひび割れの発生状況を観察している。

表-2には、各コンクリートの配合および圧縮強度の一覧を示している。軽量コンクリートの配合では、短繊維を混入する場合においても、材料分離が無く適切なコンシステンシーを有し、かつ圧縮強度が同程度となるよ

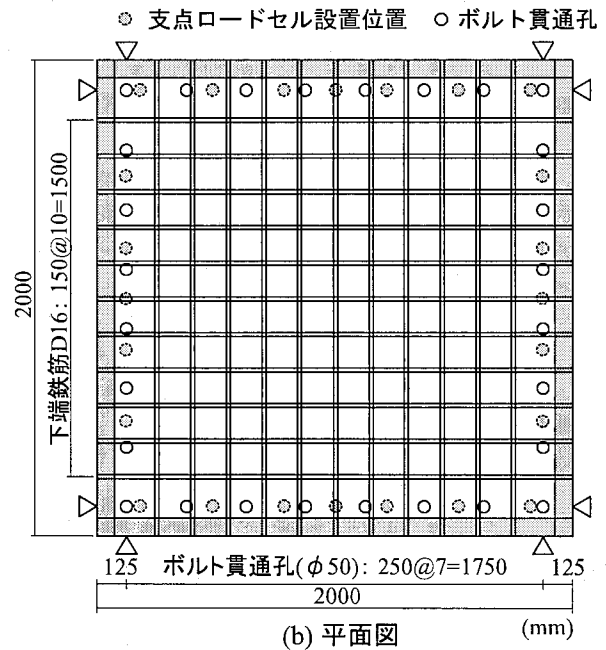
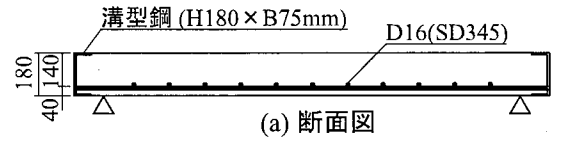


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

表-3 PVA短繊維の寸法および材料特性値

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	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)	破断歪み (%)
1.30	30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

うに調整している。

なお、用いた軽量骨材は、焼成人工軽量骨材であり、24時間吸水率は9 ~ 11%と小さく、圧壊荷重は1 kN以上である。また、有害科学物質や塩分を含まず、アルカリ骨材反応が生じない等、従来の人工軽量骨材に比べて優れた品質を有している。

表-3には、PVA短繊維の寸法および材料特性値の一覧を示している。

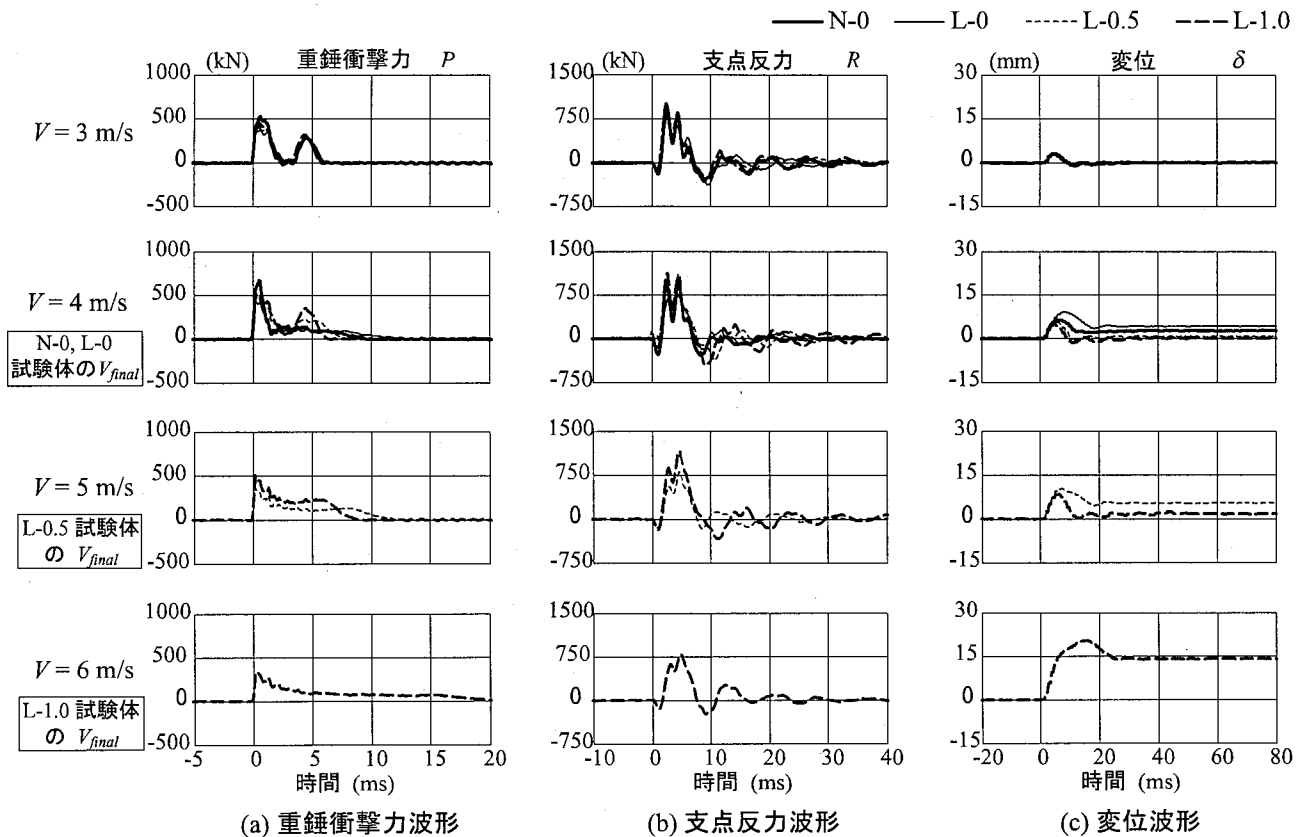


図-2 重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形

### 3. 実験結果

#### 3.1 時刻歴応答波形

図-2には、各試験体の重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  および変位  $\delta$  に関する応答波形を示している。ここでは、重錘衝突速度  $V = 3 \sim 6 \text{ m/s}$  までの結果について、衝突速度毎に各試験体の結果を比較する形で整理している。

重錘衝撃力  $P$  は、 $V = 3 \text{ m/s}$  では、いずれの試験体の場合においても連続する大小2つの卓越した波から構成される波形性状を示していることが分かる。また、 $V = 4 \text{ m/s}$  以降では、各RC版の最終衝突速度  $V_{final}$  において、2波目が消失していることが分かる。これは、RC版に押し抜きせん断面が形成され、塑性化が進行したことによるものと考えられる。

支点反力  $R$  は、 $V = 3 \text{ m/s}$  においては、1) 周期が  $7 \text{ ms}$  程度の三角波およびそれに後続する減衰波と2) 周期が  $2 \text{ ms}$  程度の高周波成分が合成された波形性状を示している。また、この衝突速度では、いずれの試験体もほぼ類似した波形性状を示している。 $V = 4 \text{ m/s}$  以降では、各試験体の最終衝突速度  $V_{final}$  において、最大振幅が急激に小さくなっている。また、同時に高周波成分も消失する傾向にある。

変位波形  $\delta$  は、 $V = 3 \text{ m/s}$  では、いずれの試験体においても正弦半波状の波形を示していることが分かる。その後、変位はほぼ零に復元していることより、いずれの版も未だ弾性状態にあることが分かる。 $V = 4 \text{ m/s}$  以降

は、 $V$  の増加とともに最大振幅が大きくなり、各RC版の最終衝突速度  $V_{final}$  では変位が復元せずに大きく残留していることが分かる。なお、後述のように、短繊維を混入したL-0.5/1.0試験体の場合には、短繊維を混入していないN-0やL-0試験体の場合よりも  $V_{final}$  における残留変位が2~3倍程度大きいにもかかわらず、かぶりコンクリートの剥落は生じていないことを確認している。

#### 3.2 各種応答値と衝突速度との関係

図-3には、各試験体の(a)最大重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、(b)最大支点反力  $R_{ud}$  および(c)最大応答変位  $\delta_{ud}$  と衝突速度  $V$  との関係を示している。

最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  に関するN-0およびL-0試験体の結果を比較すると、 $P_{ud}$  は全般的にN-0試験体の場合が大きい。この傾向は衝突速度  $V$  が大きい場合ほど顕著に現れている。また、軽量RC版の場合には、短繊維混入率  $V_f$  が大きい場合ほど同一衝突速度における  $P_{ud}$  が大きいことが分かる。

最大支点反力  $R_{ud}$  は、 $V = 3 \text{ m/s}$  においては、L-0試験体の場合が最小であり、L-1.0試験体の場合が最大となっているものの、その差異は大きくない。一方、 $V = 4 \text{ m/s}$  では、L-0試験体の  $R_{ud}$  が押し抜きせん断破壊により大きく低下している。L-0.5/1.0試験体の場合には、 $V = 3 \text{ m/s}$  時よりも最大支点反力  $R_{ud}$  が増加し、N-0試験体よりも大きな値を示している。 $V = 5 \text{ m/s}$  以降では、各試験体の最終衝突速度  $V_{final}$  において、最大支点反力  $R_{ud}$  が

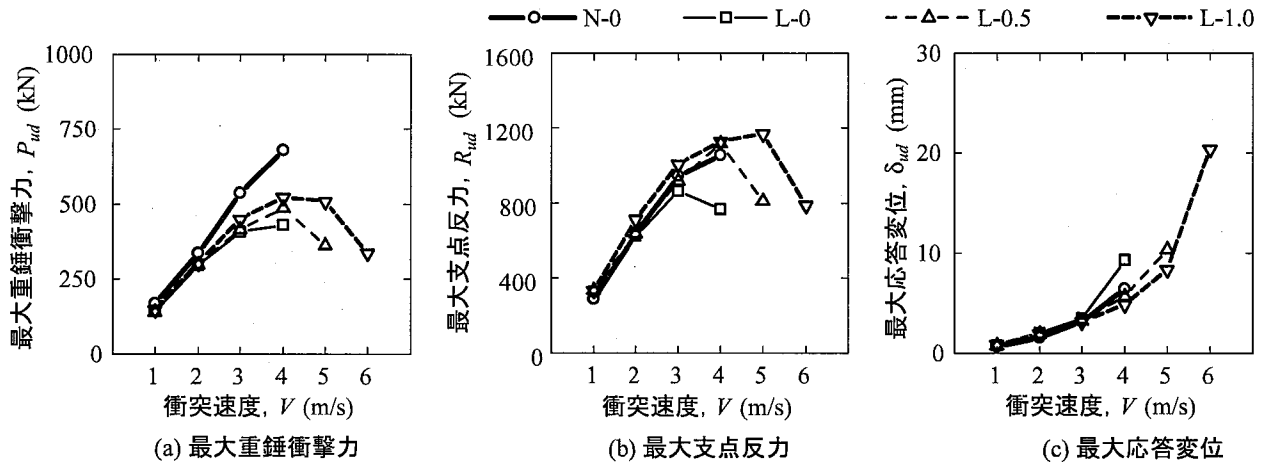


図-3 最大重錘衝撃力、最大支点反力および最大応答変位と衝突速度との関係

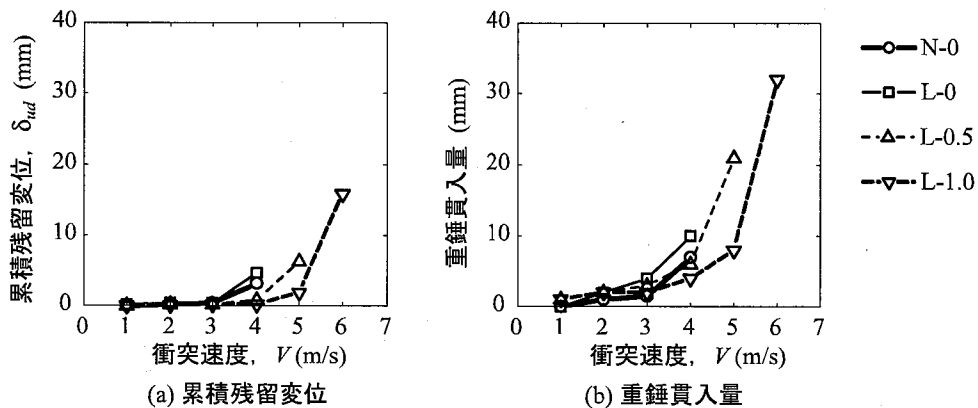


図-4 累積残留変位および重錘貫入量と衝突速度との関係

大きく低下しており、押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。

最大応答変位  $\delta_{ud}$  は、いずれの試験体も  $V = 3$  m/s までは、衝突速度  $V$  の増加とともにほぼ線形に増大しており、この時点まではほぼ弾性的な挙動を示しているものと考えられる。  $V = 4$  m/s 以降では、各試験体の最終衝突速度  $V_{final}$  において最大変位  $\delta_{ud}$  が急激に増大する傾向にあることが分かる。

図-4 には、各試験体の (a) 累積残留変位および (b) 重錘貫入量と衝突速度  $V$  との関係を示している。なお、重錘貫入量は、実験終了後 RC 版の重錘衝突部表面の陥没量を実測したものである。図より、累積残留変位と重錘貫入量を比較すると、全般的に重錘貫入量の方が累積残留変位よりも大きいことが分かる。このことは、版下面の鉛直変位よりも版上面の陥没量の方が大きいことを意味しており、その差分は載荷点直下部コンクリートの圧壊による体積減少やコンクリート塊の側方移動によるものと推察される。また、この傾向は短繊維混入率  $V_f$  が大きく、かつ衝突速度  $V$  が大きい場合ほど顕著である。しかしながら、後述のひび割れ分布性状に示しているように、版下面のかぶりコンクリートの剥落は生じていない。

このことより、PVA 短繊維を混入した RC 版は、重錘

が貫入するほどの大きな損傷を受ける場合においても、短繊維の架橋効果によりかぶりコンクリートの剥落が抑制されるものと考えられる。

### 3.3 ひび割れ分布性状

図-5 には、RC 版の中央部切断面のひび割れ分布性状を示している。図より、いずれの試験体も載荷点から支点側に向かって斜め下方に押し抜きせん断面が形成されていることが分かる。また、短繊維混入率  $V_f$  が大きい場合ほど重錘の貫入量大きい。下縁かぶり部近傍のひび割れ性状を見ると、軽量 RC 版の場合には N-0 試験体よりも割裂ひび割れが支点方向に進展する傾向にあることが分かる。ただし、短繊維混入率  $V_f$  が大きい場合には、複数の割裂ひび割れが分散して発生している。これは、短繊維の架橋効果が発揮されたことによるものと考えられる。このことから、押し抜きせん断ひび割れ部のみならず、割裂ひび割れ部においても短繊維の架橋効果が発揮され大きな衝撃荷重に抵抗しているものと推察される。

図-6 には、RC 版の中央部切断面のひび割れ分布性状を示している。図より、N-0 と L-0 試験体の結果を比較すると、両試験体ともに押し抜きせん断破壊による円形状のひび割れが確認できる。また、曲げ変形に起因する放射状のひび割れは、L-0 試験体の場合において少ないこ

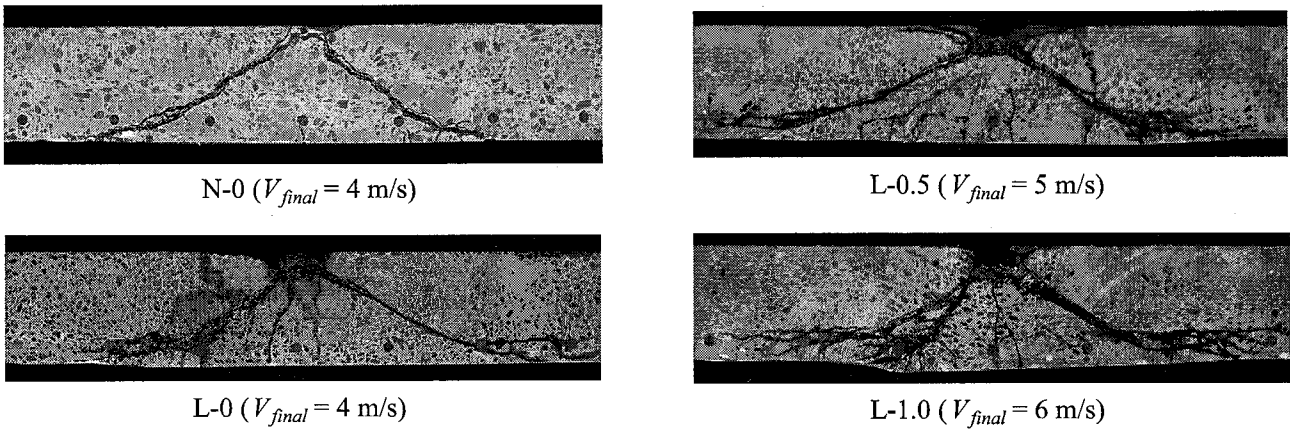


図-5 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布性状 (中央部切断面)

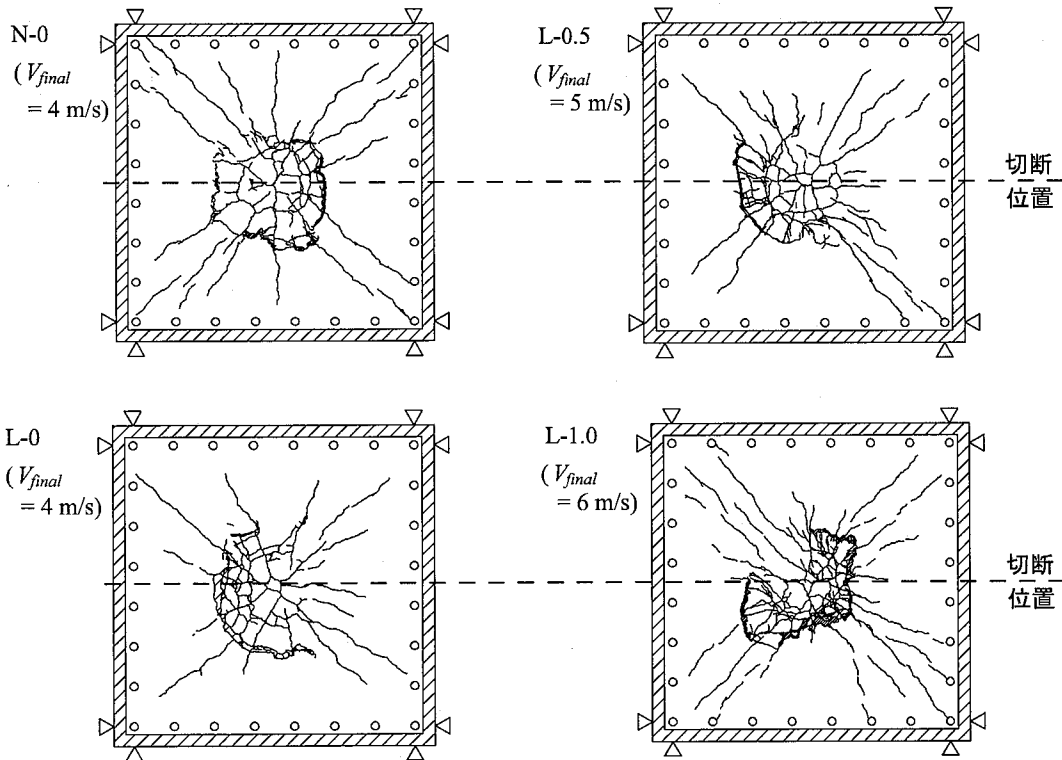


図-6 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布性状 (中央部切断面)

とが分かる。これは、L-0 試験体の方が N-0 試験体よりも、押し抜きせん断破壊の傾向が強く現れているためと考えられる。一方、短繊維を混入した L-0.5/1.0 試験体の結果を見ると、短繊維混入率  $V_f$  が大きい場合ほど、ひび割れが分散して多く発生し、放射状のひび割れも顕著に現れる傾向にあることが分かる。

### 3.4 静的、動的耐力および動的応答倍率

図-7には、(a) 入力エネルギー比、(b) 動的耐力比および (c) 動的応答倍率と短繊維混入率  $V_f$  との関係を示している。なお、本論文では、著者等による RC 梁の耐衝撃性に関する研究成果<sup>7)</sup>を参考にし、最大支点反力  $R_{ud}$  を動的耐力として評価することとした。また、最大入力エネルギー比および動的耐力比は、各 RC 版の最大入力エネル

ギーや動的耐力を L-0 試験体の結果で除したものである。動的応答倍率は、動的耐力  $R_{ud}$  を別途確認した同一試験体の静的押し抜きせん断耐力  $P_{us}$  で除して算出している。

図-7(a)より、最大入力エネルギー比は、短繊維混入率  $V_f$  が大きい場合ほど大きくなっていることが分かる。RC 版の耐衝撃性を最大入力エネルギーの観点から評価すると、軽量 RC 版の耐衝撃性は短繊維混入率  $V_f$  を 0.5, 1.0% とすることにより、それぞれ無混入の 1.5, 2.2 倍程度に向上していることが分かる。また、これらの向上効果は、普通 RC 版に短繊維を混入する場合<sup>6)</sup>よりも大きいことが分かる。

図-7(b)より、軽量 RC 版の動的耐力比は、短繊維混入率  $V_f$  が大きい場合ほど大きいことが分かる。また、 $V_f$

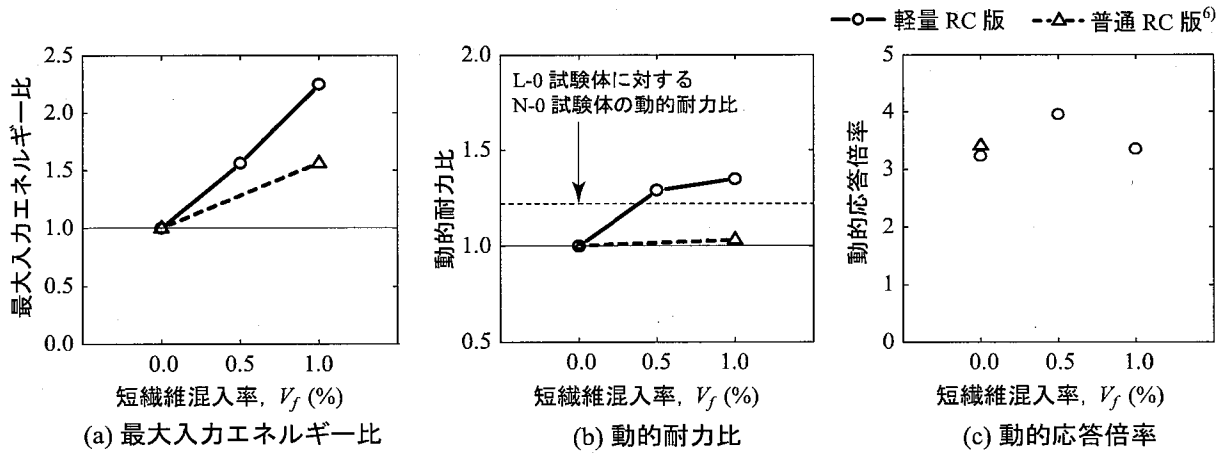


図-7 入力エネルギー比、動的耐力比および動的応答倍率と短繊維混入率との関係

=0.5%以上とすることにより、軽量RC版の動的耐力比は普通コンクリートを用いたN-0試験体のそれを上回っていることが分かる。このことより、本実験においては、 $V_f=0.5\%$ とすることによって軽量RC版の耐衝撃性を普通RC版のレベル以上に改善可能であるものと考えられる。なお、短繊維混入による軽量RC版の動的耐力の向上効果は、普通RC版の場合<sup>6)</sup>よりも大きく、既往の軽量RC梁を対象とした衝撃実験の結果<sup>8)</sup>と対応している。

また、図-7(c)より、動的応答倍率はコンクリートの種類や $V_f$ の大きさに関わらず3.2~4.0程度であり、動的応答倍率を3.0程度と考えることにより、PVA短繊維を混入した軽量RC版の耐衝撃性を安全側に評価できるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、軽量コンクリート製RC版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版の重錘落下衝撃実験を実施した。本実験により得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) PVA短繊維を混入することにより軽量RC版の押し抜きせん断ひび割れおよび割裂ひび割れが架橋され、耐衝撃性能が向上する。
- 2) 短繊維混入率を0.5%とすることにより、軽量RC版の耐衝撃性を普通RC版以上に改善可能である。
- 3) 最大入力エネルギーの観点からRC版の耐衝撃性を

評価すると、軽量RC版の耐衝撃性は短繊維混入率 $V_f$ を0.5、1.0%とすることにより、それぞれ無混入の1.5、2.2倍程度に向上する。また、動的応答倍率は、コンクリートの種類や $V_f$ にかかわらず3.2~4.0程度である。

#### 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕2002.
- 2) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー50、1983.
- 3) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）、1999.
- 4) コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、2002.
- 5) 古田昌弘、金久保利之、閑田徹志、永井 覚：高靱性セメント系複合材料の一軸引張モデル評価法、建築学会構造系論文集、第568号、pp.115-121、2003.
- 6) 栗橋祐介、岸 徳光、三上 浩、田口史雄：PVA短繊維混入による4辺支持RC版の耐衝撃性向上効果に関する実験的研究、構造工学論文集 Vol.52A、pp.1249-1260、2006.
- 7) 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.
- 8) 三上 浩、岸 徳光、栗橋祐介、竹本伸一：せん断破壊型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、構造工学論文集 Vol.52A、pp.1237-1248、2006.