

論文 PVA 短繊維を混入した軽量コンクリート製 RC 版の重錘落下衝撃実験

栗橋 祐介^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・竹本 伸一^{*4}

要旨： ポリビニルアルコール (PVA) 短繊維の混入による軽量コンクリート製 RC 版の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、短繊維混入率を 3 種類に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行った。その結果、PVA 短繊維を混入することにより軽量コンクリート製 RC 版の耐衝撃性が向上し、その効果は短繊維混入率が高い場合ほど大きいことや、軽量コンクリートに短繊維を 0.5 % 程度混入することにより、普通コンクリート製 RC 版と同程度の耐衝撃性能を期待できることが明らかになった。

キーワード： PVA 短繊維，軽量コンクリート，RC 版，重錘落下衝撃実験

1. はじめに

近年、道路橋や鉄道橋等の上部構造の軽量化を目的として、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。軽量コンクリートは、使用する粗骨材の強度が小さいことから、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なることが知られている。そのため、RC 棒部材のせん断耐力は、普通コンクリートを用いる場合に対して 70 % に低減することが土木学会コンクリート標準示方書 (以後、示方書)¹⁾ において規定されている。

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る PVA 短繊維に着目した研究が盛んに行われている²⁾。著者らも PVA 短繊維を混入した普通コンクリート製 RC 版 (以後、普通 RC 版) に関する重錘落下衝撃実験を行い、短繊維の架橋効果によって RC 版の耐衝撃性が向上することを明らかにしている³⁾。従って、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 RC 版の耐衝撃性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 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

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

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 研究員 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 ドーピー建設工業(株) 北海道本店 統括部長 博(工) (正会員)

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 (%)	単体量 (kg/m^3)				混和剤 (kg/m^3)		スラブ厚 (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

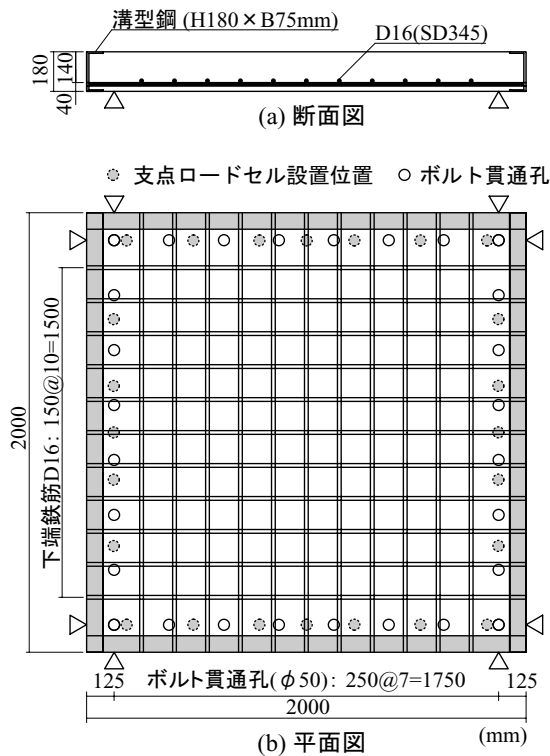


図 - 1 試験体の形状寸法および配筋状況

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 版の裏面に明瞭な円形状のひび割れが確認された時点、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。

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

表 - 3 PVA 短繊維の寸法および材料特性値

密度 (g/cm^3)	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

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 δ (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。これらの配合は、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うに調整している。なお、本実験に用いた軽量骨材は、比重 1.2 の焼成人工軽量骨材である⁵⁾。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。

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

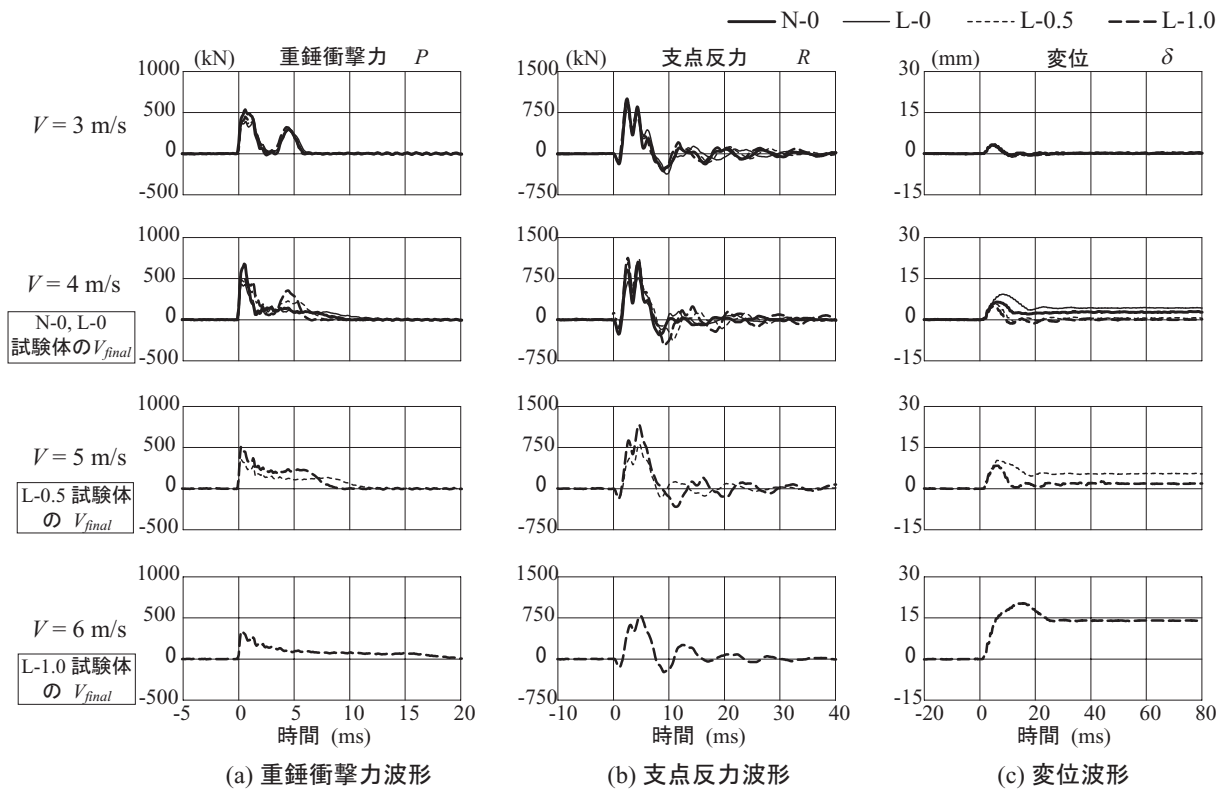


図 - 2 重錘衝撃力，支点反力および変位に関する応答波形

反力 R および変位 δ 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 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 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 δ 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。 $V = 4 \text{ m/s}$ 以降では、 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。

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 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} 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

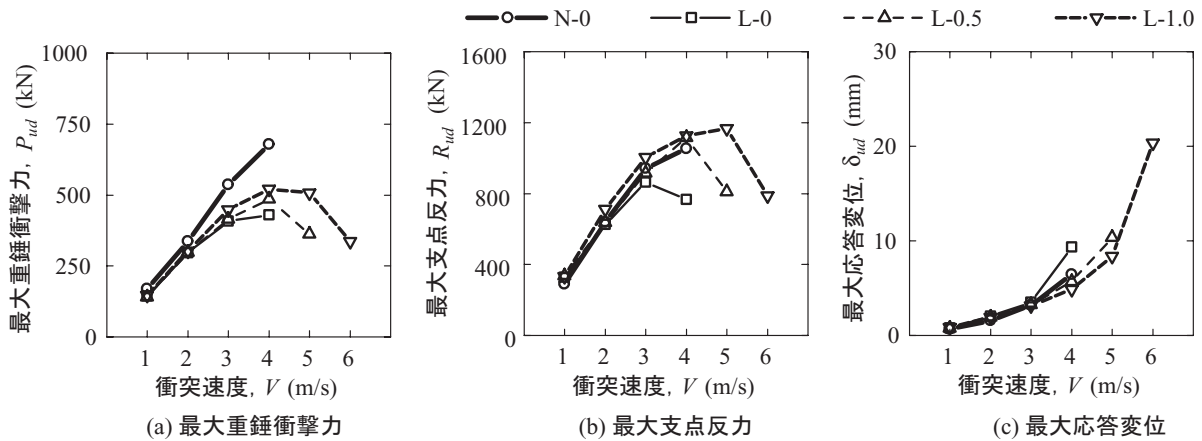


図 - 3 最大重錘衝撃力，最大支点反力および最大応答変位と衝突速度との関係

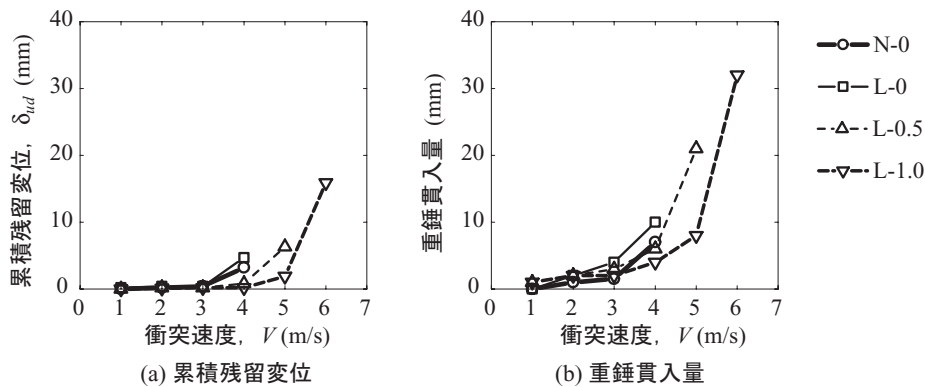


図 - 4 累積残留変位および重錘貫入量と衝突速度との関係

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、 $V = 3$ 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。 $V = 5$ 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 δ_{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 δ_{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 版の中央部切断面および裏面のひび割れ分布性状を示している。中央部切断

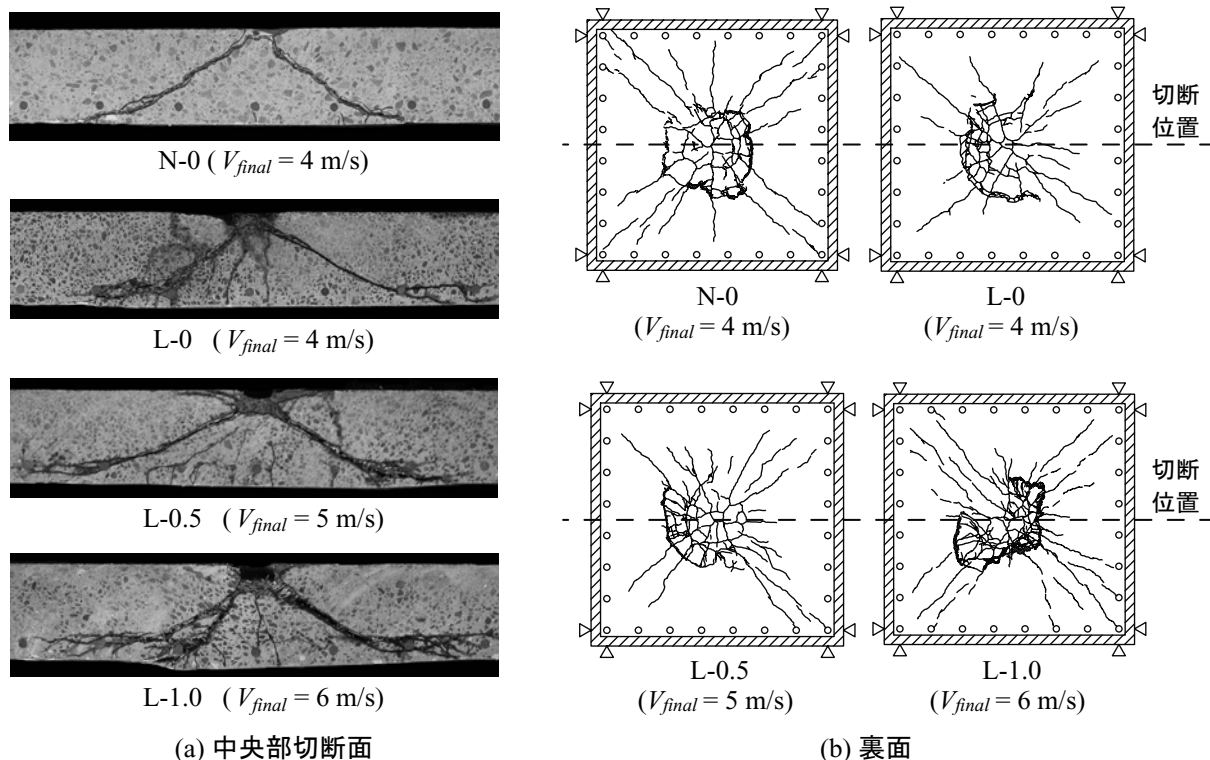


図 - 5 衝撃荷重実験終了後におけるひび割れ分布性状 (中央部切断面)

面のひび割れ分布性状より、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。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。

裏面のひび割れ分布性状より、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 - 6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⁴⁾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 - 6(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³⁾よりも大きいことが分かる。

図 - 6(b)より、軽量RC版の動的耐力比は、短

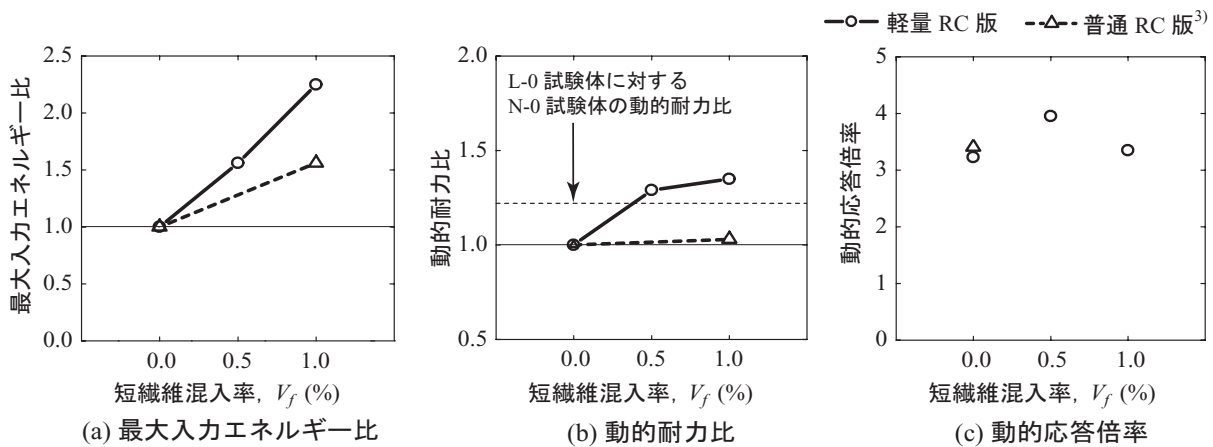


図 - 6 入力エネルギー比，動的耐力比および動的応答倍率と短繊維混入率との関係

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、 $V_f = 0.5\%$ 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³⁾ 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⁵⁾ と対応している。

また、図 - 6(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) コンクリート工学協会：高韌性セメント複合材料を知る・作る・使う，2002.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.