

PVA 短繊維を混入した軽量コンクリート製 RC 版の 耐衝撃性に関する実験的研究

Experimental study on impact resistant behavior of lightweight aggregate RC slab mixed with PVA short-fibre

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) 寒地土木研究所 耐寒材料チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

**工博 室蘭工業大学教授 工学部 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) (〒060-0001 札幌市中央区北 1 条西 6-2)

In order to investigate the impact resistant behavior of lightweight aggregate RC slab (LA RC slab) mixed with Poly-vinyl Alcohol (PVA) short-fibre, falling-weight impact tests were conducted taking fibre mixing volume ratio V_f as variable. In this paper, to evaluate the impact load carrying capacity of each LA RC slab, single impact loading tests were conducted, referring to the former experimental results of static and iterative impact loading test conducted by authors. The results obtained from this study are as follows; 1) static and impact resistant capacity of the LA RC slabs can be increased with an increment of fibre volume mixing ratio; 2) evaluating input impact energy in terms of impact resistant capacity, that of the LA RC slabs mixed with $V_f = 0.5$ and 1.0 % PVA short-fibre can be upgraded by 3 and 4 times than that of the RC slab without short-fibre, respectively; 3) maximum input impact energy of each RC slab increases linearly corresponding to the static load-carrying capacity, and the increment ratio of the RC slab mixed with PVA short-fibre is larger than that of the RC slab without PVA short-fibre.

Key Words : Lightweight concrete, RC slab, PVA short-fibre, impact resistance

キーワード : 軽量コンクリート, RC 版, PVA 短繊維, 耐衝撃性

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よる下部・基礎工の省力化や、それに伴う工期短縮およびコスト縮減を目的に、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^{1),2)}。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³⁾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(コンクリート分担分)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 1 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の^{4),5)}、近年では軽量でかつ耐食性に優れた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⁶⁾⁻⁸⁾。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。

著者らはこれまで、PVA 短繊維混入による軽量コンクリート製 RC 梁 (以後、軽量 RC 梁) 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) を変化させた軽量 RC 梁の衝撃荷重実験を行っている⁹⁾。その結果、PVA 短繊維の混入により軽量 RC 梁の耐衝撃性能が向上することや、その向上効果は普通コンクリート製 RC 梁 (以後、普通 RC 梁) に混入する場合¹⁰⁾ よりも大きいことなどを明らかにしている。また、軽量コンクリート製 RC 版 (以後、軽量 RC 版) を対象とした実験も実施しており、PVA 短繊維混入による耐荷性能および耐衝撃性向上効果を確認している^{11),12)}。しかしながら、短繊維を混入した軽量 RC 版の耐衝撃性については、重錘衝突速度を漸増させて繰り返し載荷する漸増繰り返し衝撃荷重実験 (以後、繰り返し衝撃載荷実験) によって

表-1 試験体一覧

試験体名	荷重方法	コンクリートの種類	短繊維混入率 V_f (%)	衝突速度 V (m/s)
N0-S	静的	普通	0	-
L0-S			0	-
L0.5-S		軽量	0.5	-
L1.0-S			1.0	-
N0-II	衝撃 (繰返)	普通	0	1, 2, 3, 4
L0-II			0	1, 2, 3, 4
L0.5-II		軽量	0.5	1, 2, 3, 4, 5
L1.0-II			1.0	1, 2, 3, 4, 5, 6
N0-IS-4	衝撃 (単一)	普通	0	4
N0-IS-4.5				4.5
N0-IS-5				5
L0-IS-4				4
L0-IS-4.5		4.5		
L0-IS-5		5		
L0.5-IS-6		軽量	0.5	6
L0.5-IS-7				7
L0.5-IS-8				8
L1.0-IS-7				7
L1.0-IS-8		1.0	1.0	8
L1.0-IS-9				9

検討を行っているため、各 RC 版固有の耐衝撃性を定量的に評価するに至っていないのが現状である。

このような背景より、本研究では、PVA 短繊維混入による軽量 RC 版の耐衝撃性向上効果を適切に評価検討することを目的に、短繊維混入率を変化させた軽量 RC 版の衝撃荷重実験を実施した。本論文では、既往の短繊維混入軽量 RC 版の静的および繰返し衝撃荷重実験結果^{7),8)}を再整理するとともに、これらの結果を踏まえて、所定の衝突速度で一度だけ荷重する単一衝撃荷重実験を実施し、PVA 短繊維混入による軽量 RC 版の耐衝撃性向上効果の定量的な評価を試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表-1には、試験体の一覧を示している。試験体数は、コンクリートの種類、PVA 短繊維の体積混入率(以後、短繊維混入率 V_f) および荷重方法を変化させた全 20 体である。本研究では、PVA 短繊維の混入によって軽量 RC 版の耐衝撃性を普通 RC 版の場合と同程度に向上させることを目的としているため、既往の RC 梁

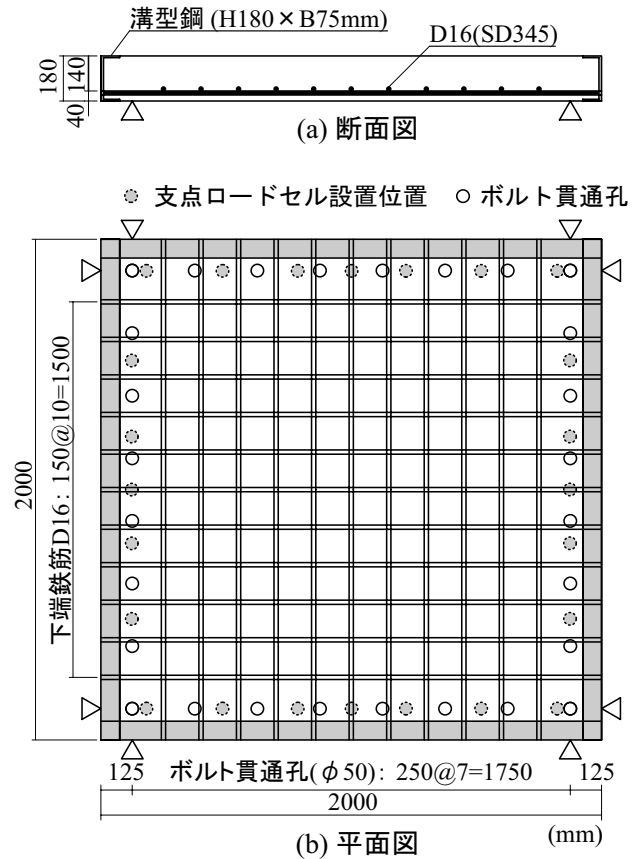


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

を対象とした研究成果⁹⁾を参考にして、短繊維混入率 V_f の上限値を 1% とした。

本実験では、既往の静荷重および繰返し衝撃荷重実験に加えて、12 体の RC 版を用いた単一衝撃荷重実験を実施し、短繊維混入軽量 RC 版の耐衝撃性能に関する検討を行っている。表中、試験体名の第一項目は、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 (%) の組み合わせにより示している。第二項目は荷重方法を示しており、S は静荷重, II および IS はそれぞれ衝撃荷重の漸増繰返し荷重および単一荷重により実験を行ったことを示している。なお、単一荷重の場合には、試験体名の末尾に衝突速度 V (m/s) を付している。

図-1には、試験体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 RC 版は、寸法が 2,000 × 2,000 × 180 mm の単鉄筋 RC 版である。鉄筋には D16 を用い、版中央部より 150 mm 間隔で格子状に配置しており、鉄筋比は 1.1% である。また、鉄筋の降伏強度は 380 MPa であった。これらの鉄筋は RC 版の 4 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。

2.2 実験方法

実験は、荷重方法にかかわらず純スパン長 1.75 m

表-2 コンクリートの配合および力学特性の一覧

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 ³)				混和剤 (kg/m ³)		スランプ (cm)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂引張強度 (MPa)
				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	3.33
軽量	0	55	46	152	276	869	529	0	1.10	6.0	35.7	19.7	2.80
	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	-

の4辺支持状態で実施した。なお、RC版の四辺四隅は、貫通ボルトを用いて浮き上がりを拘束している。また、載荷治具には直径60mmの鋼製円柱を用い、載荷点はRC版の中央点とした。

静載荷実験は、容量500kNの油圧ジャッキを用いて実施した。載荷は、RC版の耐力が十分に低下し、ほぼ一定の荷重レベルに収束するまで行っている。衝撃荷重載荷実験は、質量300kgの鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行っている。このうち、繰り返し衝撃載荷実験の場合は、初速度および増分速度を1m/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ことにより行った。なお、本研究では、RC版が損傷して支点反力が大きく低下し、明瞭な押し抜きせん断破壊が生じた時点を終局状態と定義し実験を終了している。

単一載荷実験は、上述の繰り返し載荷実験の結果を参考にして衝突速度 V を決定し、同一パラメータに対して3体のRC版を用意し、衝突速度を変化させた実験を行っている。すなわち、1) 繰り返し衝撃載荷実験における最終衝突速度 V_{final} よりも1m/s大きい衝突速度で実験を行い、2) その時点で終局に至った場合は衝突速度を0.5m/sずつ小さく設定して実験を行い、終局に至らない場合には衝突速度を1m/sずつ大きく設定して実験を行った。

2.3 コンクリートの配合および使用材料

表-2には、各コンクリートの配合および力学特性の一覧を示している。軽量骨材には、比重1.2の焼成人工軽量骨材を用いた⁹⁾。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。そのため、短繊維を混入する場合には単位セメント量が多くなる傾向にあり、結果として圧縮強度が一般的なコンクリートよりも高いものになっている。

表より、各コンクリートの圧縮強度は、 38 ± 2.5 MPaの範囲内にあり、ほぼ同程度となっていることが分かる。また、軽量コンクリートの割裂引張強度は、普通コンクリートの場合よりも小さいことが分かる。表-

表-3 PVA短繊維の寸法と材料特性値

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 (%)
1.30	30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

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。

2.4 測定項目

本実験の測定項目は、載荷荷重 P (以後、静載荷実験の場合には静荷重、衝撃荷重載荷実験の場合には重錘衝撃力と呼ぶ)、合支点反力 R (四辺の反力の合算値、以後、単に支点反力と呼ぶ)、載荷点変位 δ (以後、単に変位と呼ぶ)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、版中央部切断面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。

静荷重の測定は、容量500kNの静載荷用ロードセルを用いて行った。重錘衝撃力の測定は、容量が1,470kN、応答周波数がDC~4.0kHzのロードセルを用いて行った。また、支点反力の測定は、支点治具内に24個内蔵して設置した容量が980kN、応答周波数がDC~2.4kHzのロードセルを用いて測定している(図-1参照)。変位は、容量200mm、応答周波数915Hzの非接触式レーザ変位計を用いてRC版の下面より測定した。

なお、衝撃荷重載荷実験の場合には、各応答波形を広帯域用データレコーダで一括収録し、ウェーブメモリーを用いて最大200msまで0.1ms/wordでA/D変換処理を行っている。また、重錘衝撃力波形の場合には高周波成分が卓越するため原波形を用いることとした。支点反力波形および変位波形に関しては、低周波成分が卓越していることより、ノイズ処理のため矩形移動平均法により平滑化を施している。なお、移動平均の範囲は、原波形の性状をできる限り変化させずに

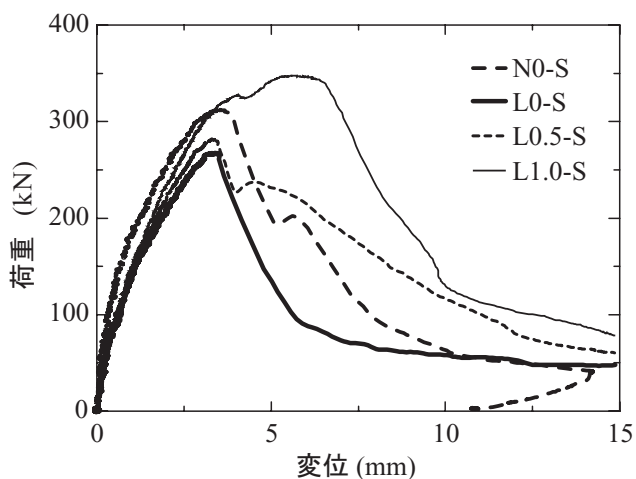


図-2 荷重-変位関係

効率よくノイズ処理をできるようにするため 0.5 ms (5 word) とした。

3. 静載荷実験の結果

3.1 荷重-変位関係

図-2には、各試験体の荷重-変位関係を比較して示している。図より、短繊維を混入していないN0-SおよびL0-S試験体の結果を比較すると、初期剛性および最大荷重ともにN0-S試験体の場合がL0-S試験体よりも大きいことが分かる。また、両試験体ともに、最大荷重到達後荷重が急激に低下しており、押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。

短繊維を混入したL0.5-S試験体の場合は、最大荷重がL0-S試験体の場合とほぼ同等であるものの、最大荷重に到達し一度除荷状態に至った後、再度載荷状態に移行し、その後徐々に荷重が低下する性状を示している。これは、最大荷重時において押し抜きせん断ひび割れが発生した後、PVA短繊維の架橋効果によりひび割れの開口が抑制されたことによるものと考えられる。L1.0-S試験体の場合には、N0-S試験体の最大荷重値近傍で剛性勾配が小さくなるものの、その後も変位の増加とともに荷重が徐々に増加し、変位 $\delta = 7$ mm程度で急激に荷重が低下して終局に至っている。

このように、短繊維を混入することにより、その架橋効果によって最大荷重が増加するとともに、急激な押し抜きせん断破壊が抑制され、靱性能が向上していることが分かる。また、短繊維混入率 V_f を1.0%とすることにより、軽量RC版の耐荷性能を普通RC版と同程度以上に向上可能であることが明らかになった。

3.2 ひび割れ分布性状

図-3には、静載荷実験終了後における各RC版中央部切断面のひび割れ分布性状を示している。図よ

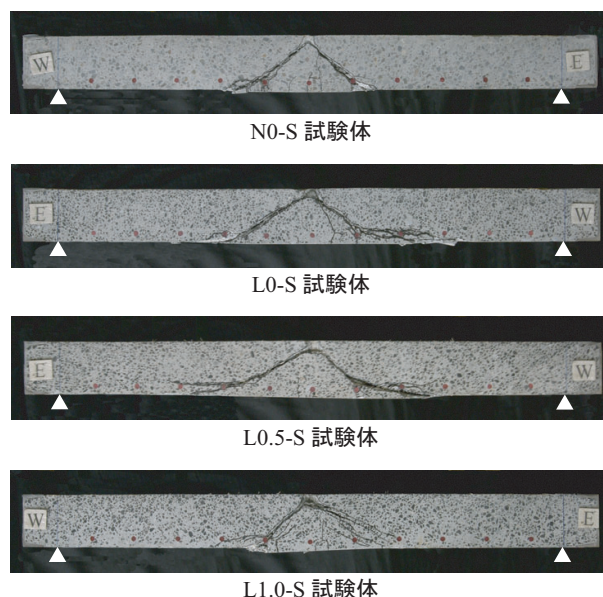


図-3 静載荷実験終了後におけるRC版切断面のひび割れ分布性状

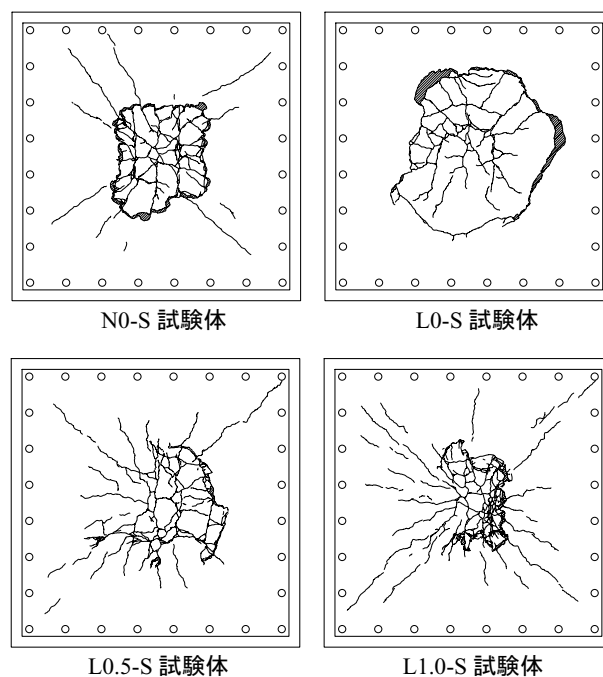


図-4 静載荷実験終了後におけるRC版裏面のひび割れ分布性状

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版の場合には押し抜きせん断ひび割れが主鉄筋に沿う割裂ひび割れ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

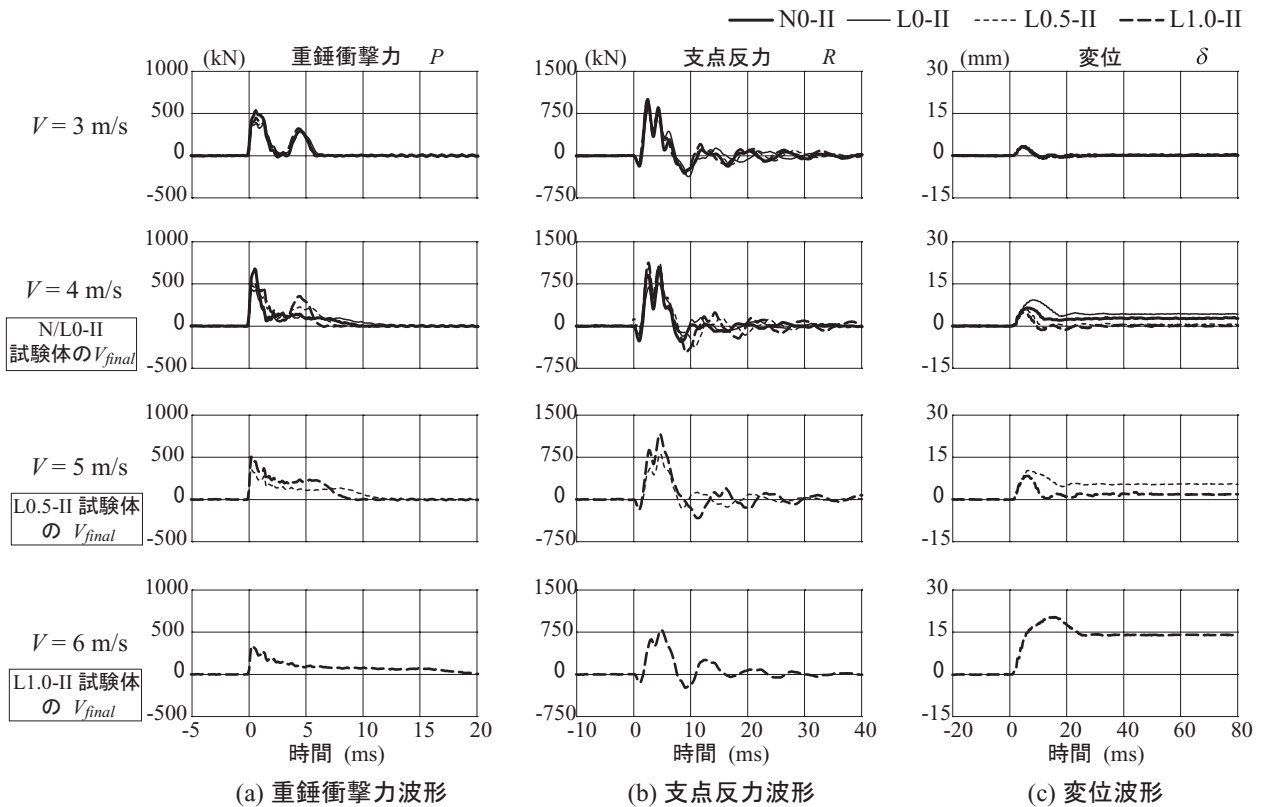


図-5 繰り返し衝撃载荷実験に関する重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形

れる。

図-4には、各RC版の裏面のひび割れ分布図を示している。図より、短繊維を混入していないN0-SおよびL0-S試験体の場合には、押し抜きせん断破壊に伴う円形状のひび割れが発生していることが分かる。また、その内側では、曲げひび割れと放射状のひび割れが混在し、亀甲状のひび割れ分布となっている。なお、円形状のひび割れの半径はL0-S試験体の方が大きい。これは、軽量RC版の場合には、コンクリートの引張強度が小さいため、载荷点部近傍に発生した押し抜きせん断ひび割れが主鉄筋に沿う割裂ひび割れに進展したことによるものと考えられる。

短繊維を混入したL0.5/1.0-S試験体の場合には、L0-S試験体に比較して、円形状のひび割れよりも放射状のひび割れが卓越して発生し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、ひび割れが密な間隔で多数発生している。これは、短繊維の混入によって急激な押し抜きせん断破壊が抑制されるとともに、短繊維の架橋効果によりひび割れが分散して発生したことによるものと考えられる。

4. 衝撃荷重実験の結果

4.1 時刻歴応答波形

図-5には、繰り返し衝撃载荷実験による各試験体

の重錘衝撃力 P 、支点反力 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 $V = 3 \sim 6$ 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、 $V = 3$ 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おり、 $V = 4$ 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、 $V = 3$ m/sではいずれの試験体も、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。 $V = 4$ 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、 $V = 3$ 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。 $V = 4$ 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。

図-6には、単一衝撃载荷実験による各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する応答波形を示している。各試験体において衝突速度 V が同等

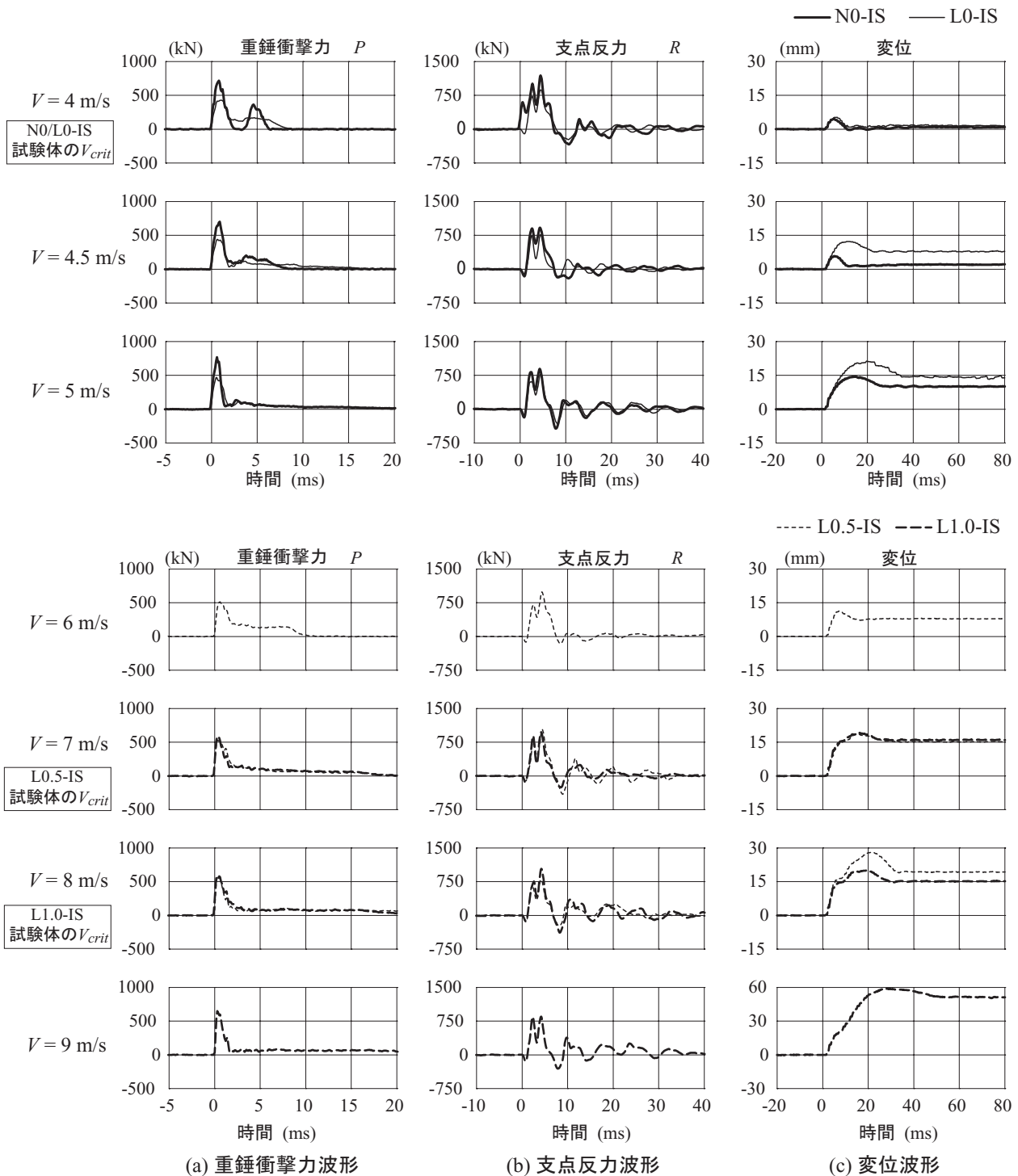
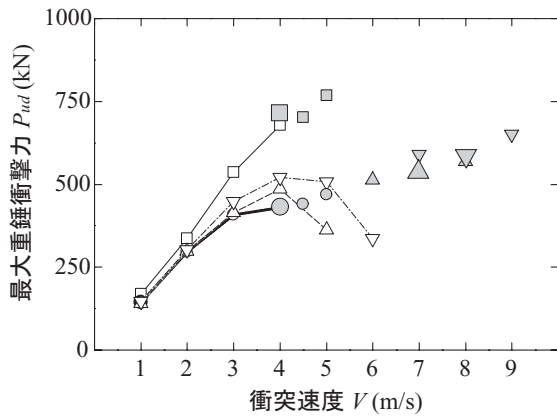


図-6 単一衝撃载荷実験に関する重錘衝撃力，支点反力および変位に関する応答波形

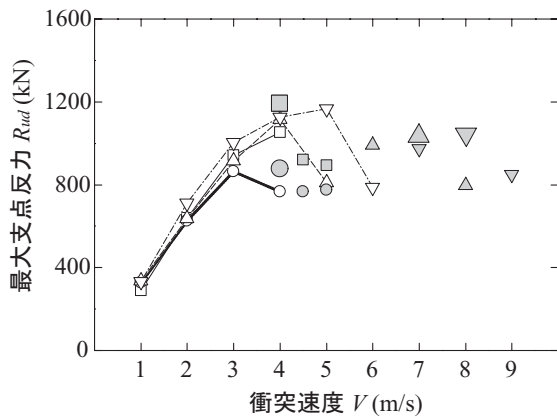
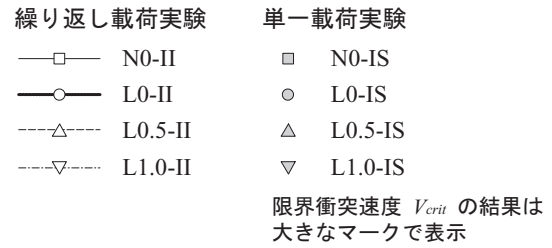
の場合には，応答波形を重ねて比較する形で示している。また，本論文では，支点反力波形の最大振幅（最大支点反力）が最も大きく示された時の衝突速度 V を，各 RC 版が抵抗しうる最大の衝突速度（以後，限界衝突速度 V_{crit} ）と定義し図中に記している。

図より，重錘衝撃力 P は，短繊維を混入していない N0/L0-IS 試験体の場合には，限界衝突速度 V_{crit} である $V = 4 \text{ m/s}$ において，大小 2 つの波形が卓越する性状を示していることが分かる。 $V = 4.5 \text{ m/s}$ 以降では，両試

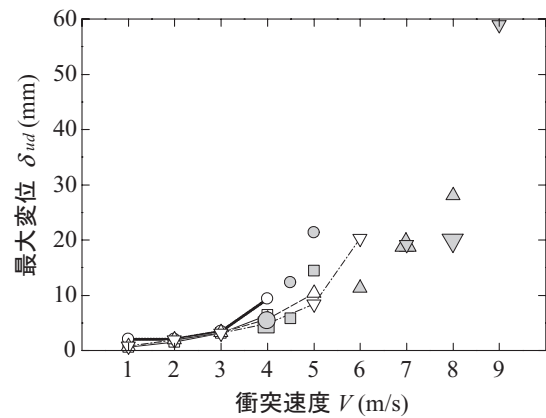
験体ともに 2 波目が消失しており，押し抜きせん断面が形成されていることが推察される。一方，短繊維を混入した L0.5/1.0-IS 試験体の場合には，いずれの衝突速度 V においても 2 波目が消失しており，すでに押し抜きせん断面が形成されているものと考えられる。しかしながら，このうち $V = 7, 8 \text{ m/s}$ はそれぞれ L0.5/1.0 試験体の限界衝突速度 V_{crit} であり，この時点で両試験体は未だ終局には至っていない。従って，これらの試験体の場合は，押し抜きせん断ひび割れ発生後にお



(a) 最大重錘衝撃力 P_{ud}



(b) 最大支点反力 R_{ud}



(c) 最大変位 δ_{ud}

図-7 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

いても PVA 短繊維の架橋効果によってひび割れの開口が抑制され、さらに大きな衝撃力に抵抗する機構になっているものと考えられる。

支点反力 R は、いずれの試験体も、前述の繰り返し衝撃载荷実験の場合と同様、三角形波と高周波成分が合成された波形性状を示している。また、限界衝突速度 V_{crit} よりも大きい衝突速度では、RC 版が押し抜きせん断破壊に至り支点反力波形の最大振幅が小さく示されている。

応答変位 δ は、N0/L0-IS 試験体の場合には、限界衝突速度 V_{crit} ($V = 4 \text{ m/s}$) において、正弦半波状の波形性状を示しており、残留変位は生じていない。 $V = 4.5 \text{ m/s}$ 以降では、 V の増加とともに残留変位量が増大し、押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。一方、短繊維を混入した L0.5/L1.0-IS 試験体の場合には、衝突速度 V の増加とともに残留変位が増大していることが分かる。また、両試験体ともに限界衝突速度 V_{crit} では、残留変位が 15 mm 程度となっている。このことから、L0.5/L1.0-IS 試験体は、押し抜きせん断ひび割れに起因する変形を許容しながらも、未だ終局に至っていないことが分かる。

4.2 各種応答値と衝突速度との関係

図-7 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。なお、単一衝撃载荷の場合において、限界衝突速度 V_{crit} 時の結果に関しては、他の結果の場合よりも大きなマークでプロットしている。

繰り返し衝撃载荷実験の結果より、最大重錘衝撃力 P_{ud} は、各試験体ともに $V = 3 \text{ m/s}$ まではほぼ線形に増大していることが分かる。また、各衝突速度 V において、N0-II 試験体の P_{ud} が最も大きく、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。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} が大きくなる傾向にある。

最大支点反力 R_{ud} は、 $V = 3 \text{ m/s}$ までは、いずれの試験体の場合も V の増加に伴って線形に増大している。また、各試験体ともにほぼ同様の値を示している。一方、 $V = 4 \text{ m/s}$ では、L0-II 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。L0.5/L1.0-II 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、N0-II 試験体よりも大きな値を示している。 V

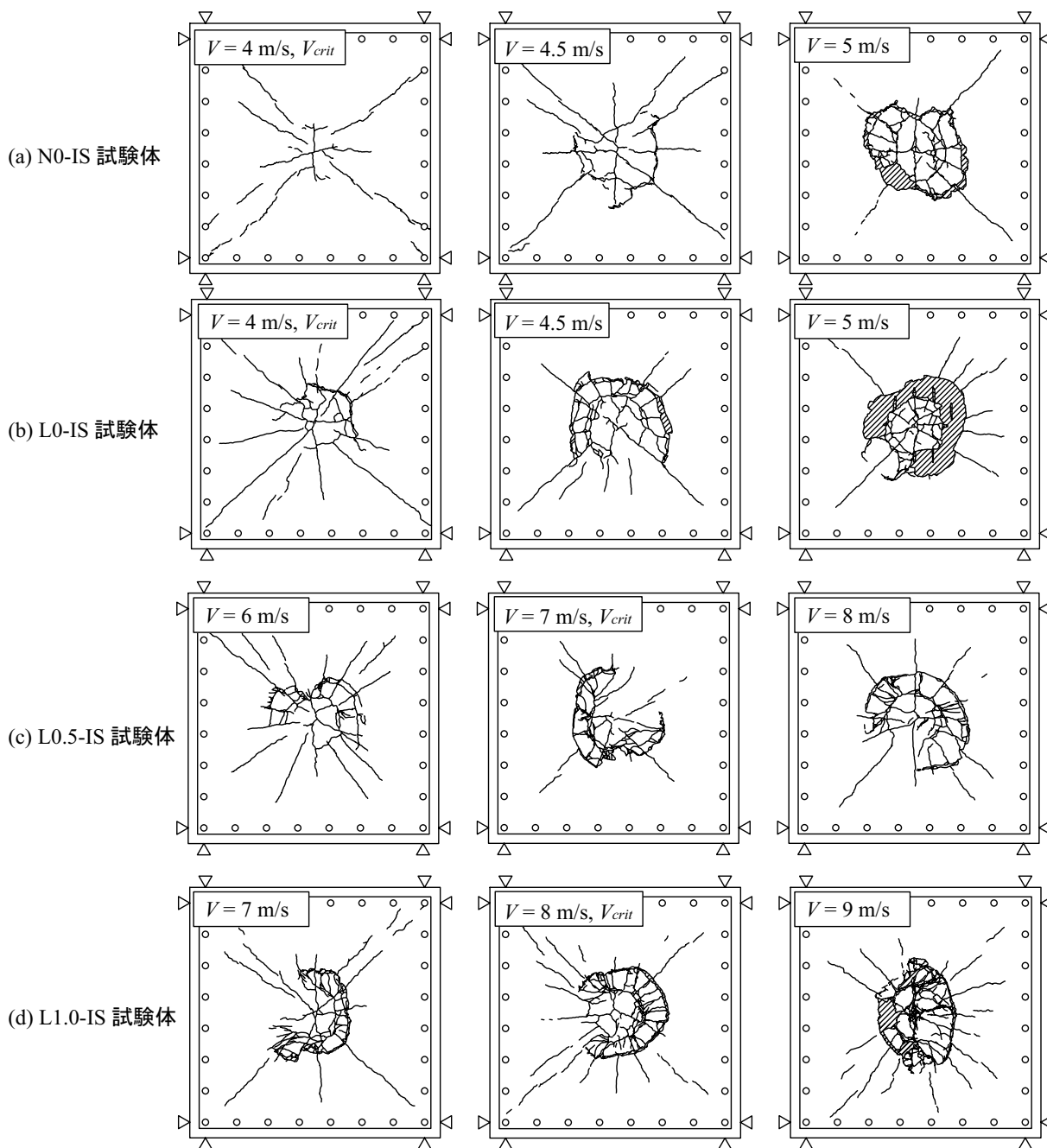


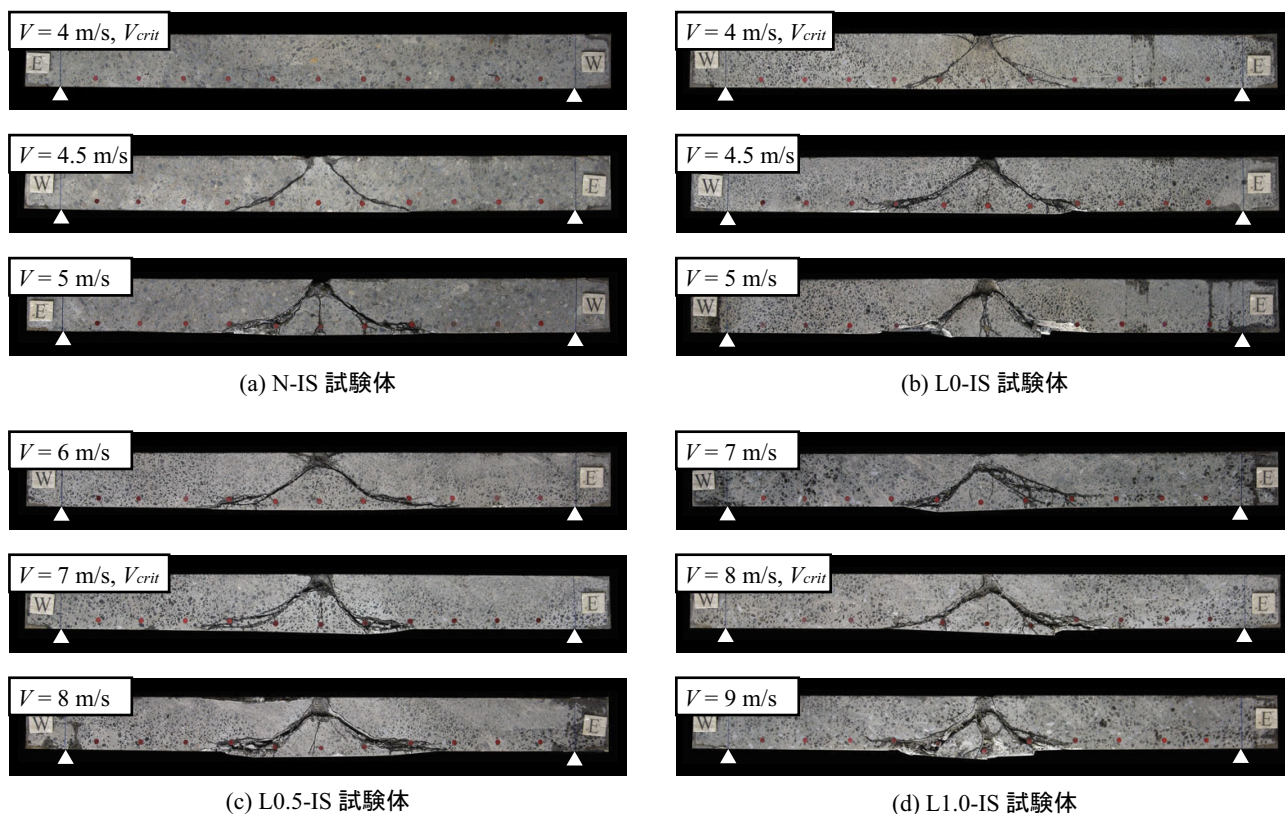
図-8 単一衝撃載荷実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状

= 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、 $V=4$ 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。

このように、いずれの RC 版においても、 $V=3$ m/s までは各応答値が衝突速度 V の増加とともにほぼ線形に増大していることから、RC 版は衝撃力に対して弾性的な応答性状を示しているものと考えられる。また、

$V=4$ m/s では、RC 版に押し抜きせん断ひび割れが生じ、短繊維が混入されていない場合は終局に至っている。一方、短繊維が混入されている場合には、その架橋効果によって押し抜きせん断破壊が抑制され、短繊維混入率 V_f に応じてさらに大きな衝撃力に抵抗するものと推察される。

単一衝撃載荷実験の結果より、最大重錘衝撃力 P_{ud} は、いずれの試験体においても、衝突速度 V の増加に伴って増大していることが分かる。限界衝突速度 V_{crit} 時の P_{ud} は、普通 RC 版である N0-IS 試験体の場合が最も大きく、軽量 RC 版の場合には短繊維混入率 V_f の



図－9 単一衝撃載荷実験終了後における RC 版中央部切断面のひび割れ分布性状

増加に伴って大きくなる性状を示している。このことより、単一衝撃載荷実験のように載荷履歴のない RC 版に衝撃荷重を作用させる場合には、最大重錘衝撃力 P_{ud} は衝撃荷重作用後の破壊状況によらず、衝突速度 V の増加に伴って増大する傾向にあることが分かる。

最大支点反力 R_{ud} は、N/L0-IS 試験体の場合には $V = 4.5$ m/s、L0.5/L1.0-IS 試験体の場合にはそれぞれ $V = 8, 9$ m/s において急激に低下している。これは、これらの衝突速度において支点部に伝達される衝撃力が低下したことを意味しており、RC 版が明瞭な押し抜きせん断破壊に至ったことを示すものである。また、このような性状は後述のひび割れ分布性状とも対応している。これらのことより、本論文では前述のとおり、各 RC 版において最大支点反力 R_{ud} が最も大きく示される時の衝突速度を限界衝突速度 V_{crit} を定義することとした。なお、限界衝突速度 V_{crit} における最大支点反力 R_{ud} は、N0-IS 試験体の場合が最大で、軽量 RC 版の場合には短繊維混入率 V_f の増加に伴って大きくなっている。

最大応答変位 δ_{ud} は、いずれの試験体においても衝突速度 V の増加に伴って δ_{ud} が増大していることが分かる。また、L0.5/L1.0-IS 試験体における限界衝突速度 V_{crit} 時の δ_{ud} は、N0/L0-IS 試験体のそれよりも 5 倍程度大きい。このことから、PVA 短繊維を混入した RC 版の場合には、大きな変形を伴って衝撃力を吸収して

おり、靱性能の高い耐衝撃性状を示していることが分かる。

4.3 ひび割れ分布性状

図－8 には、単一衝撃載荷実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状を示している。図より、N/L0-IS 試験体の結果を見ると、衝突速度 V の増加とともに放射状のひび割れおよび押し抜きせん断破壊による円形状のひび割れが顕在化する傾向を示していることが分かる。また、 $V = 5$ m/s では裏面のかぶりコンクリートが大きく剥落しており、N0-IS 試験体の場合よりも L0-IS 試験体の場合において損傷が著しい。これは、軽量コンクリートの方が普通コンクリートよりも引張強度が小さいことによるものと考えられる。

短繊維を混入した L0.5/L1.0-IS 試験体の場合は、衝突速度 V の増大とともに、押し抜きせん断断面の形成に伴う円形状のひび割れが顕在化する傾向にある。しかしながら、損傷度の進展状況は、上述の N/L0-IS 試験体の場合よりも顕著ではない。このことより、衝撃荷重作用下においても、PVA 短繊維の架橋効果によって、RC 版の押し抜きせん断破壊やかぶりコンクリートの損傷が抑制されていることが分かる。

なお、静載荷実験の結果と比較すると、RC 版の破壊性状に及ぼすコンクリートの種類や短繊維混入率 V_f の影響は小さい。これは、静載荷の場合には、載荷荷

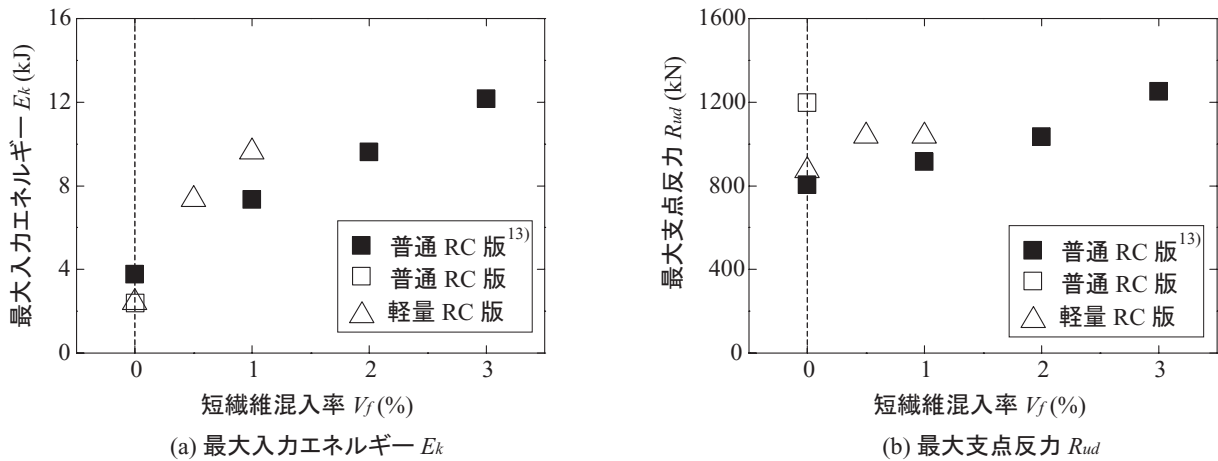


図-10 最大入力エネルギー E_k および最大支点反力 R_{ud} と短繊維混入率 V_f との関係

重の増加に伴ってひび割れが逐次的に進展して終局に至るのに対し、衝撃荷重載荷の場合には、急激に大きな荷重が作用するため、静載荷の場合に見られた割裂ひび割れの進展や、微細なひび割れの分散が顕著には現れず、押し抜きせん断ひび割れが顕在化する傾向が強くなるためと考えられる。

図-9には、単一衝撃載荷実験終了後におけるRC版中央部切断面のひび割れ分布性状を示している。図より、N0/L0-IS試験体の場合には、衝突速度 V の増加に伴って押し抜きせん断ひび割れが顕在化し、最終的にはかぶりコンクリートが剥落していることが分かる。なお、このような傾向は、L0-IS試験体の場合において顕著に見られる。L0.5/1.0-IS試験体の場合は、いずれのケースにおいても押し抜きせん断ひび割れが形成されている。最終的には、短繊維の架橋効果が消失して押し抜きせん断ひび割れが大きく開口し終局に至っていることが分かる。

5. PVA短繊維混入軽量RC版の耐衝撃設計法の検討

本章では、PVA短繊維混入軽量RC版の耐衝撃性を定量的に評価するため、過去に実施した普通RC版に関する実験結果¹³⁾も含めて、最大入力エネルギー E_k や最大支点反力 R_{ud} と短繊維混入率 V_f との関係を検討するとともに、耐衝撃設計法の確立に向けた検討を行う。なお、これらの検討は、単一衝撃載荷実験における限界衝突速度 V_{crit} 時の結果に基づいて行った。

5.1 耐衝撃性の評価

図-10には、(a)最大入力エネルギー E_k および(b)最大支点反力 R_{ud} と短繊維混入率 V_f との関係について示している。なお、最大入力エネルギー E_k は、各RC版の限界衝突速度 V_{crit} と重錘質量 ($m = 300$ kg) から運動エネルギーとして算出したものである。また、

最大支点反力 R_{ud} は、著者らによる既往の研究¹³⁾と同様、RC版の動的耐力に相当するものとして検討している。

図-10(a)より、最大入力エネルギー E_k は、コンクリートの種類によらず、短繊維混入率 V_f の増加に伴って大きくなっていることが分かる。また、その増加割合は普通RC版の場合よりも軽量RC版の場合の方が大きく、短繊維混入率 V_f を0.5、1.0%とすることにより、それぞれ無混入の場合の3および4倍程度に向上している。従って、軽量RC版の耐衝撃性は、短繊維混入率を $V_f = 0.5\%$ とすることにより、普通RC版の性能以上に十分に向上可能であるものと考えられる。

一方、図-10(b)の最大支点反力 R_{ud} は、短繊維混入率 V_f の増加に伴って大きくなる傾向にあるものの、最大入力エネルギー E_k の場合に比べて顕著ではない。また、本研究において実施した短繊維無混入の普通RC版の最大支点反力 R_{ud} は、過去に実施した短繊維混入率が $V_f = 0, 1, 2\%$ の普通RC版の結果¹³⁾よりも大きく示されている。これは、前述の通り、支点反力波形は、高周波成分が合成された波形性状を示すため、RC版毎の計測誤差が大きくなることが要因の1つであるものと推察される。従って、本研究の範囲内では、最大支点反力 R_{ud} により短繊維混入RC版の耐衝撃性を評価することは困難であり、最大入力エネルギー E_k により評価することが妥当であるものと判断される。

5.2 最大入力エネルギーと静的耐力との関係

前節では、最大入力エネルギー E_k により、PVA短繊維混入RC版の耐衝撃性を適切に評価できることを示した。従って、短繊維混入RC版の耐衝撃設計法を確立するためには、最大入力エネルギーとRC版の耐力との関係を明らかにすることが重要であるものと考えられる。

図-11には、各RC版の最大入力エネルギー E_k と

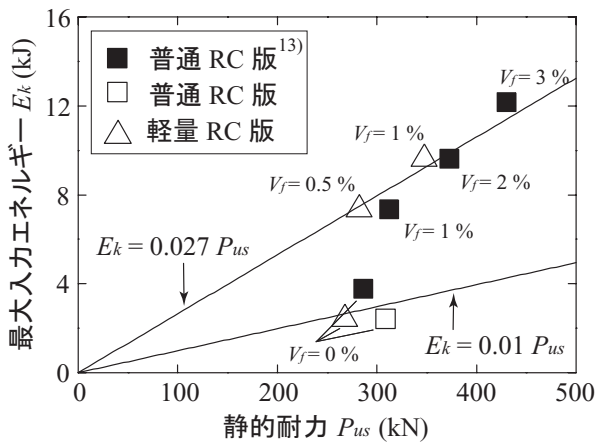


図-11 最大入力エネルギー E_k と静的耐力 P_{us} の関係

静的耐力 P_{us} との関係を示している。図より、静的耐力 P_{us} の増加に伴って最大入力エネルギー E_k が大きくなっていることが分かる。ただし、短繊維混入の有無によりその増加傾向は異なっている。そのため、図中には、短繊維を混入した RC 版と無混入の RC 版の実験結果に関する近似直線を示した。近似直線の傾きを見ると、短繊維を混入した RC 版の場合の勾配が無混入 RC 版のそれよりも 2.7 倍程度大きいことが分かる。

このことから、短繊維を混入する場合には、混入しない場合よりも静的耐力の増加に伴う入力エネルギーの増加割合が大きくなるものと判断される。これは、PVA 短繊維を混入した RC 版の場合には、短繊維の架橋効果により、押し抜きせん断ひび割れ発生におけるひび割れの開口やかぶりコンクリートの剥落が抑制され、靱性能の高い耐衝撃性状を示すためと考えられる。

6. まとめ

本研究では、PVA 短繊維混入による軽量 RC 版の耐衝撃性向上効果を検討することを目的に、短繊維混入率を変化させた軽量 RC 版および普通 RC 版の衝撃荷重実験を実施した。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) 静荷重実験の場合には、PVA 短繊維を混入することにより、その架橋効果によって最大荷重が増加するとともに、急激な押し抜きせん断破壊が抑制され、変形性能に優れる耐荷性状を示す。
- 2) 繰り返し衝撃荷重実験の場合には、各 RC 版に押し抜きせん断ひび割れが発生するまでは、いずれの RC 版も同様の弾性的な挙動を示す。それ以降の荷重では、短繊維が混入されていない場合には終局に至るのに対し、混入されている場合には短繊維の架橋効果によって押し抜きせん断破壊が抑制され、短繊維混入率 V_f に応じてさらに大きな衝

撃力に抵抗する。

- 3) 単一衝撃荷重実験の結果より、短繊維を混入した RC 版の場合には、限界衝突速度 V_{crit} 時の最大変位が無混入の場合に比較して 5 倍程度大きく、靱性能の高い耐衝撃性状を示していることが明らかになった。
- 4) 最大入力エネルギーの観点から軽量 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 3 および 4 倍程度向上する。また、短繊維混入率 V_f を 0.5 % 程度とすることにより軽量 RC 版の耐衝撃性を普通 RC 版以上に向上可能である。
- 5) 本実験の範囲内では、最大支点反力によって、PVA 短繊維を混入した普通および軽量 RC 版の耐衝撃性を適切に評価することは困難であった。
- 6) RC 版の最大入力エネルギーは、静的耐力の増加に伴って比例的に増大する傾向にあり、その増加割合は、短繊維を混入する場合において大きくなる傾向にある。これは、PVA 短繊維を混入した RC 版の場合には、短繊維の架橋効果により、押し抜きせん断ひび割れ発生におけるひび割れの開口やかぶりコンクリートの剥落が抑制され、靱性能の高い耐衝撃性状を示すためである。

謝辞

本研究を行うに当たり、室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻構造力学研究室の澤田純之博士研究員や同研究室の大学院生に多大なる御支援を戴いた。ここに記して感謝の意を表する。

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 [構造性能照査編] 2002.
- 4) 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.
- 5) 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)，コンクリートライブラリー 97，1999.
- 6) 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.
- 7) 古田昌弘，金久保利之，閑田徹志，永井 寛：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.
- 8) 伊藤始，岩波光保，横田弘：PVA 短繊維で補強した RC はりのせん断耐力評価に関する実験的研究，

- 土木学会論文集, No.774, V-65, pp.123-138, 2004.
- 9) 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.
- 10) 岸 徳光, 田口史雄, 三上 浩, 栗橋祐介:ビニ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, pp.1337-1348, 2004.
- 11) 岸 徳光, 三上 浩, 竹本伸一, 栗橋祐介:PVA 短繊維混入による軽量コンクリート製 RC 版の押し抜きせん断耐力向上効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, pp.1381-1386, 2006
- 12) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 竹本伸一: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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, pp.1387-1392, 2006
- 13) 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.52, 2006.

(2006 年 9 月 11 日受付)