

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

Experimental study of upgrading effects on impact resistant capacity for simply supported
RC slabs due to mixing PVA short-fiber

栗橋祐介*, 岸 徳光**, 三上 浩***, 田口史雄****

Yusuke KURIHASHI, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Fumio TAGUCHI

*博(工) 北海道開発土木研究所研究員 材料研究室(〒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)

****北海道開発土木研究所室長 材料研究室(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

In order to investigate the upgrading effects on static and impact resistant capacity for RC slabs due to mixing PVA short-fiber, static and falling-weight impact tests were conducted taking mixing fiber volume ratio V_f as variable. Here, in case of impact test, iterative and single loading way were applied using 300 kg steel weight. The results obtained from this study are as follows; 1) mixing PVA short-fibers, static and impact load carrying capacity of RC slabs can be upgraded due to bridge effects of the short fiber; 2) when the fiber mixing volume ratio V_f was increased by 1, 2, and 3 %, both static and dynamic load carrying capacity of RC slab will be improved by 1.1, 1.3, and 1.5 times respectively, with reference to that of plain one; 3) exfoliation of lower concrete cover can be restrained due to mixing PVA short fiber, even though RC slab was severely damaged with punching shear failure; 4) dynamic response ratio is about 2.8 ~ 2.9, irrespective of the magnitude of fiber mixing volume ratio V_f .

Key Words : RC slab, PVA short fiber, impact loading test, impact resistance, dynamic response ratio

キーワード : RC 版, PVA 短繊維, 衝撃荷重載荷実験, 耐衝撃性, 動的応答倍率

1. はじめに

コンクリートは、引張力の作用によりひび割れを生じる脆性材料である。従って、種々の短繊維を混入することによってひび割れの開口・進展が抑制され、コンクリートの耐久性のみならずコンクリート構造物の静的、衝撃耐荷性能の向上も期待できる。そのため、短繊維混入によるコンクリートの引張靱性能の向上を目的とした検討が各研究機関で進められている。従来、短繊維材料としては、鋼繊維が最も多く採用されてきたが^{1),2)}、最近では耐食性に優れる合成繊維も用いられるようになった。特に、ポリビニルアルコール(PVA)短繊維は、親水性があることよりセメントマトリクスとの付着性能が高くなるため短繊維の架橋効果が効率的に発揮されることが知られており、PVA 短繊維を混入したモルタルやコンクリートに関する研究が盛んに行われている^{3),4)}。

著者らは、これまで PVA 短繊維の架橋効果による RC 部材の耐衝撃性能向上効果に着目し、PVA 短繊維を混入した RC 梁の重錘落下衝撃実験を実施している。

その結果、短繊維を混入することにより、ひび割れの開口が抑制され RC 梁の耐衝撃性能が向上することを明らかにしている^{5),6)}。特に、せん断破壊型 RC 梁を対象とした場合には、破壊モードがせん断破壊型から靱性に富む曲げ破壊型に移行し、エネルギー吸収能が飛躍的に向上することが明らかになっている。従って、RC 版等のように押し抜きせん断破壊が卓越する部材に適用することによっても、PVA 短繊維混入による耐衝撃性能の向上効果が十分に期待できるものと考えられる。これまで、PVA 短繊維を混入した RC 版の耐荷性状に着目した研究としては、著者ら^{7),8)}の他、伊藤ら⁹⁾の研究等がある。しかしながら、いずれも静載荷実験により検討されたものであり、耐衝撃性に着目した検討は行われていないのが現状である。

このような観点より、本研究では、PVA 短繊維混入による RC 版の耐衝撃性能向上効果について検討することを目的に、PVA 短繊維の体積混入割合(以後、短繊維混入率 V_f)を 0 % から 3 % まで変化させた 4 辺支持 RC 版の重錘落下衝撃実験を行った。また、RC 版の耐荷性能に及ぼす載荷方法の影響について検討する

表－１ 試験体一覧

試験体名	荷重方法	短繊維混入率 $V_f(\%)$	衝突速度 $V(\text{m/s})$
V0-S	静的	0	-
V1-S		1	-
V2-S		2	-
V3-S		3	-
V0-II	衝撃 (繰り返し)	0	1, 2, 3, 4
V1-II		1	1, 2, 3, 4, 5
V2-II		2	1, 2, 3, 4, 5, 6
V3-II		3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
V0-IS-4	衝撃 (単一)	0	4
V0-IS-5			5
V1-IS-6		1	6
V1-IS-7			7
V2-IS-7		2	7
V2-IS-8			8
V3-IS-8		3	8
V3-IS-9			9

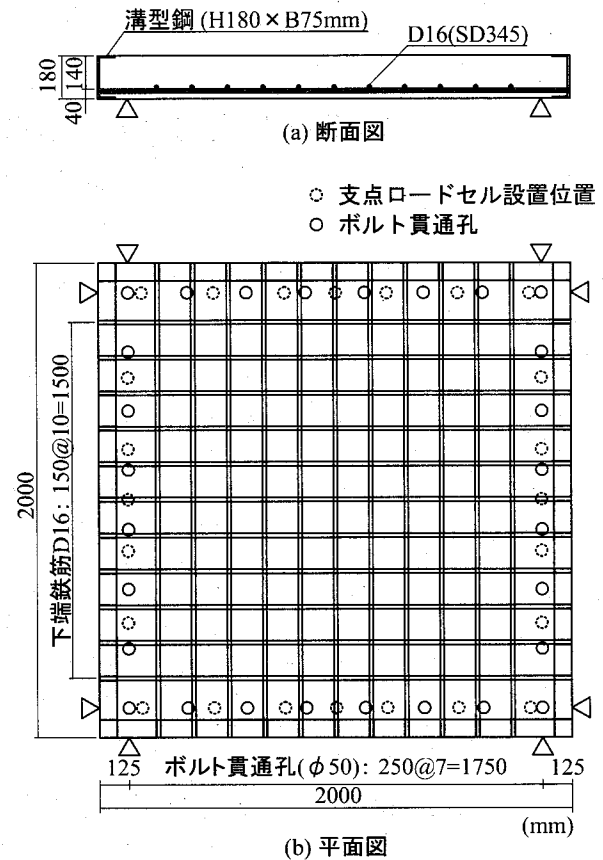
ため、静荷重実験も併せて実施した。検討は、重錘衝撃力、支点反力および荷重点変位に関する応答波形について各試験体の結果をそれぞれ比較検討するとともに、RC 版底面および中央部切断面のひび割れ分布性状を観察して破壊性状に関する検討を行った。最後に、静荷重載荷および衝撃荷重載荷実験に関する各 RC 版の耐荷性能を取りまとめ、耐衝撃設計のために重要な動的応答倍率に関する検討も併せて行った。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表－１には、本実験に用いた RC 版の一覧を示している。試験体数は、PVA 短繊維の体積混入率 V_f および荷重方法を変化させた全 16 体である。表中の試験体名のうち、第一項目の V に付随する数値は短繊維混入率 $V_f(\%)$ を示している。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り返し載荷および単一載荷により実験を行ったことを示している。なお、単一載荷の場合には、試験体名の末尾に衝突速度 $V(\text{m/s})$ 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 $2,000 \times 2,000 \times 180 \text{ mm}$ 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いる。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。



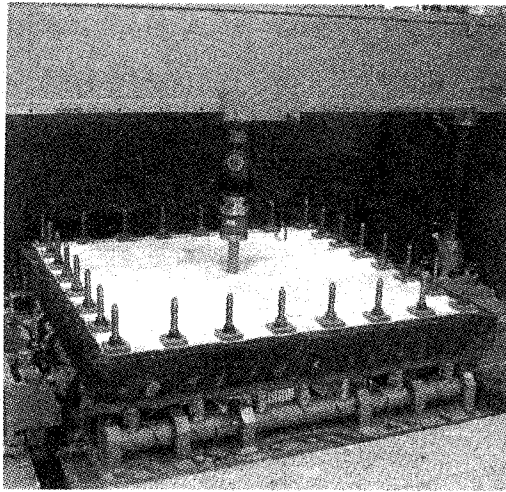
図－１ 試験体の形状寸法および配筋状況

2.2 実験方法

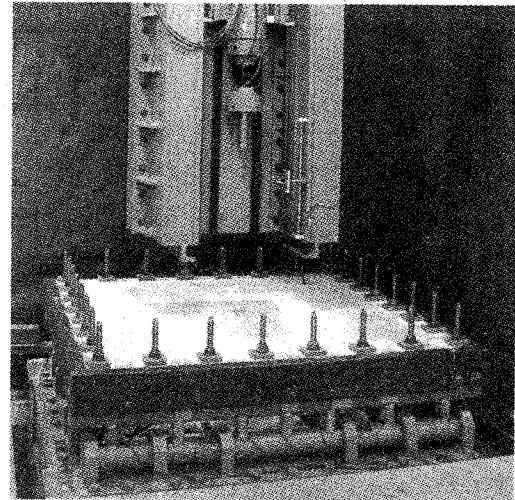
写真－１には、静荷重および衝撃荷重載荷実験の状況を示している。支持条件は、荷重方法にかかわらず純スパン長 1.75 m の 4 辺支持としている。なお、支点隅角部では RC 版の浮き上がりを拘束している。また、静荷重および衝撃荷重載荷実験ともに、荷重治具には直径 60 mm の鋼製円柱を用い、荷重点は RC 版の中央部とした。ここで、荷重治具の直径を 60 mm と比較的小さいものに設定したのは、押し抜きせん断コーンの範囲が支点部まで至る場合には、押し抜きせん断耐力を適切に評価することが困難になるためである。

静荷重載荷実験は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて実施した。荷重は、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た。

衝撃荷重載荷実験は、所定の高さから質量 300 kg の鋼製重錘を自由落下させることにより行っている。落下高さは、実験前に衝突速度の検定を行い、所定の衝突速度となるように決定している。衝撃荷重の荷重には、初速度および増分速度を 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法（以後、繰り返し載荷）および所定の衝突速度で一度だけ載荷する単一載荷法を採用した。なお、繰り返し載荷実験の場合には、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



静荷重実験



衝撃荷重実験

写真-1 静荷重および衝撃荷重実験の状況

表-2 コンクリートの配合および圧縮強度の一覧

V_f (vol. %)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤		スラ ンプ (cm)	圧縮 強度 (MPa)
		W	C	S	G	高性能減衰剤 (C × %)	増粘剤 (W × %)		
0	48	162	337	887	1015	-	-	15.3	46.0
1	49	170	338	1150	729	1.79	-	10.8	42.3
2	53	190	378	1134	657	1.07	0.15	13.0	43.2
3	52	210	426	1115	582	1.24	0.29	12.8	44.2

点を終局状態と定義し実験を終了している。

また、本実験では単一載荷実験を短繊維混入率 V_f 毎に2体ずつ実施しており、その衝突速度は繰り返し載荷実験における最終衝突速度 V_{final} よりも1および2 m/s 大きい速度として設定している。ただし、V0-IS 試験体の場合は衝突速度 V を $V_{final} + 1$ (m/s) として載荷した結果、裏面かぶりコンクリートの剥落が見られたため、2体目に関しては衝突速度を上げずに V_{final} で載荷することとした。

なお、上述のように衝撃荷重実験において2種類の載荷方法を採用したのは、1) まず繰り返し載荷実験を行うことにより衝突速度の増大に伴うRC版の破壊進展過程を逐次的に検討し、2) さらにその最終衝突速度 V_{final} を目安に V を設定して単一載荷実験を行うことで、各RC版固有の耐衝撃性能を効率的かつ適切に評価することを目的としたためである。特に、押し抜きせん断耐力は、繰り返し載荷の履歴の影響を大きく受けるため、本論文では単一載荷実験の結果によりRC版の耐衝撃性能を評価することとしている。各RC版の重錘衝突速度は前述の表-1に示す通りである。

2.3 測定項目

本実験の測定項目は、載荷荷重 P (以後、静載荷実

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 歪み (%)
1.30	30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

験の場合には静荷重、衝撃荷重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500 kN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1,470 kN、応答周波数がDC ~ 4.0 kHzのロードセルを用いて行った。また、支点反力の測定は、容量が980 kN、応答周波数がDC ~ 2.4 kHzのロードセルを24個用い、支点治具に内蔵する形で測定している(図-1参照)。変位は、容量200 mm、応答周波数915 Hz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。

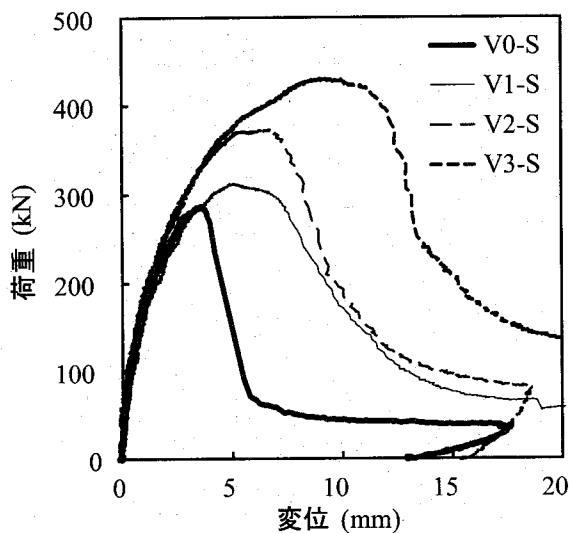


図-2 荷重-変位関係

なお、衝撃荷重実験の場合には、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 200 ms まで 0.1 ms/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。

2.4 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圧縮強度の一覧を示している。コンクリートの配合は、短繊維混入率 V_f が増加しても打設時における材料分離やファイバーボールの形成がなく十分なワーカビリティを有し、かつ硬化後の圧縮強度がほぼ同程度となるように調整した。なお、粗骨材の最大寸法は 20 mm である。表より、各コンクリートの圧縮強度は、 44 ± 2 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。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. 静荷重実験結果

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、PVA 短繊維を混入することによって各 RC 版の最大荷重が向上しており、その効果は短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど大きいことが分かる。また、短繊維を混入していない V0-S 試験体の場合には、最大荷重到達後、荷重が急激に低下している。こ

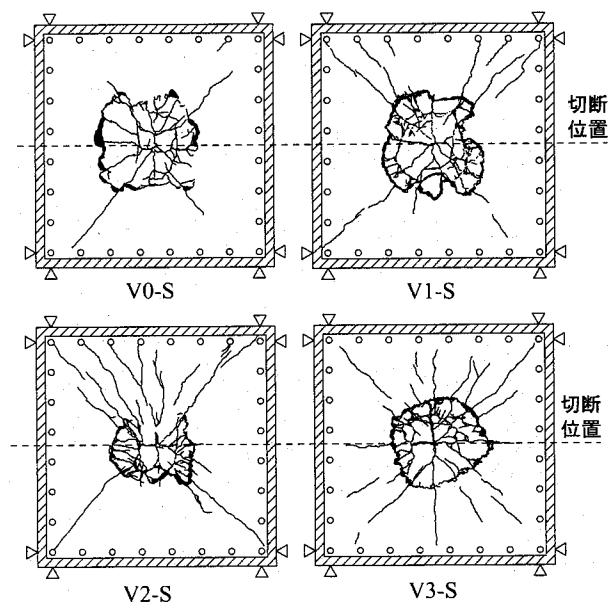


図-3 静荷重実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状

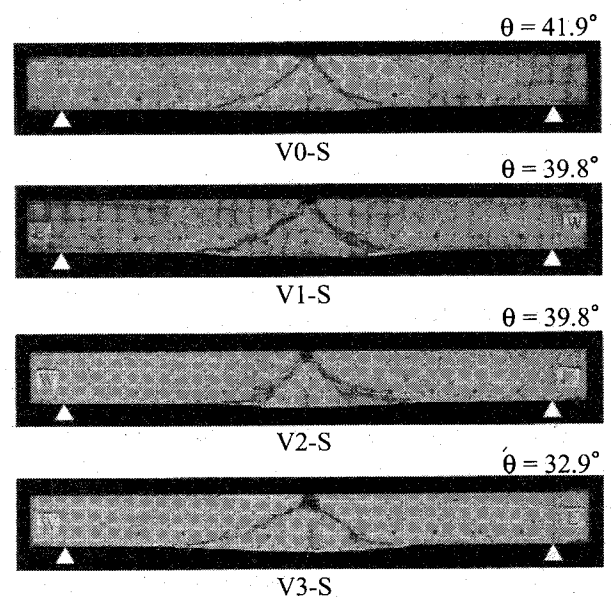


写真-2 静荷重実験終了後における中央部切断面のひび割れ分布性状

れに対し、短繊維を混入した場合には、最大荷重到達後、荷重が緩やかに低下していることが分かる。これは、後述のようにいずれの試験体も押し抜きせん断破壊していることを考慮すると、最大荷重到達後、押し抜きせん断面が形成されひび割れが大きく開口した後においても、PVA 短繊維の架橋効果により脆性的な破壊が抑制されていることによるものと考えられる。

3.2 ひび割れ分布性状

図-3 には、実験終了後における各 RC 版裏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

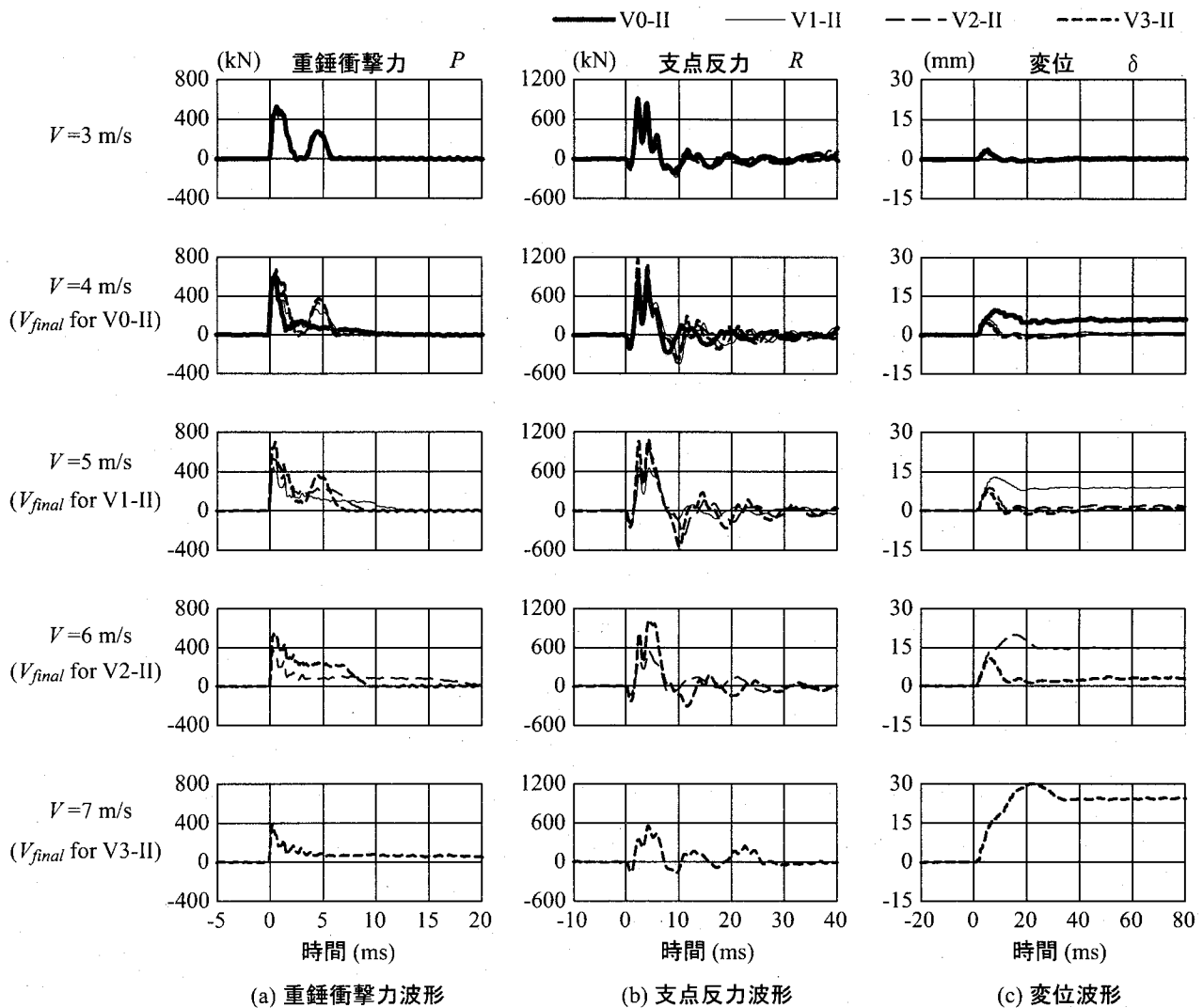


図-4 重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形（繰り返し載荷実験）

体も、版中央部の円形状のひび割れの他、対角線状のひび割れが発生していることが分かる。実験時には、載荷初期に対角線状のひび割れが発生し、その後円形状のひび割れが発生して押し抜きせん断破壊に至ったことを確認している。また、V0-S 試験体の場合には、円形状のひび割れが急激に発生してかぶりコンクリートの剥落が生じているのに対し、短繊維を混入した V1/2/3-S 試験体の場合には、円形状のひび割れが徐々に発生する性状を示し、かぶりコンクリートの剥落は生じていない。

なお、短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど版中央部のひび割れや対角線状のひび割れが多数発生する傾向にある。これは、 V_f が大きい場合ほど、PVA 短繊維の架橋効果が顕著に発揮され、それに伴って最大荷重や最大荷重時変位が大きくなるためと考えられる。このように、PVA 短繊維の架橋効果により、RC 版の耐荷性能が向上する一方、かぶりコンクリートの剥落も抑制されていることが明らかになった。

写真-2 には、実験終了後における各 RC 版の中央

部切断面のひび割れ状況を示している。なお、写真には、有効高さ部分の斜めひび割れと部材軸のなす角度を左右のスパンで平均した値 θ を併せて示している。

写真より、いずれの RC 版においても載荷点から支点側に向かって押し抜きせん断ひび割れが発生し、大きく開口していることが分かる。有効高さ部分のひび割れの発生角度 θ は、 V_f が大きい場合ほど緩やかになる傾向にあることが分かる。このような傾向は、既往の実験結果⁷⁾においても確認されており、短繊維の混入により押し抜きせん断耐力が向上する要因の一つであるものと考えられる。また、下縁かぶりコンクリートに発生しているひび割れの角度は、有効高さ部分に発生したひび割れの角度よりも緩やかになっている。

4. 衝撃荷重載荷実験結果

4.1 時刻歴応答波形

図-4 には、繰り返し載荷実験におけ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

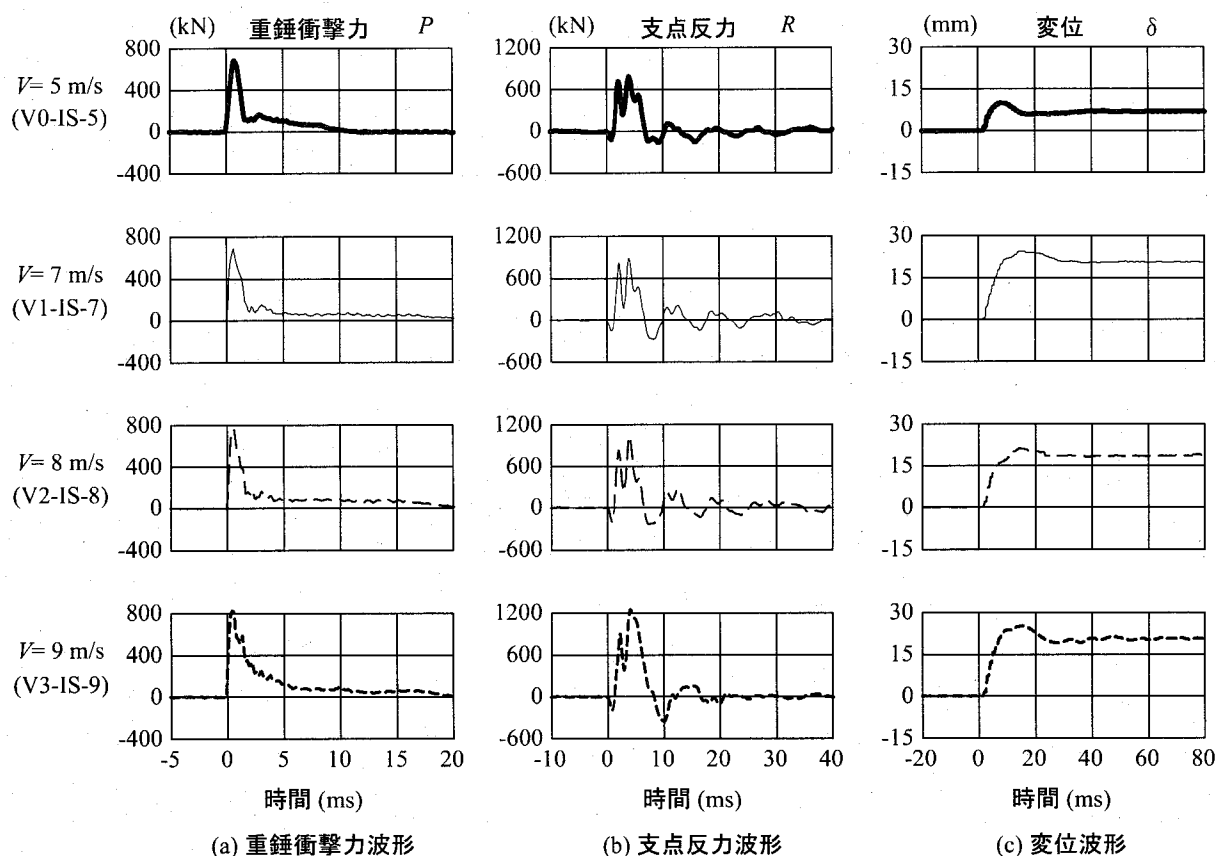


図-5 重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形（単一載荷実験）

波形を示している。なお、本実験において V0/1/2/3-II 試験体は、それぞれ衝突速度 $V = 4, 5, 6, 7$ m/s で押し抜きせん破壊により終局に至っている。ここでは、 $V = 3 \sim 7$ 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示している。

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、 $V = 4$ 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 においては、1) 周期が 7 ms 程度の三角波およびそれに付随する正弦減衰波と 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、この時点では前述の重錘衝撃力 P の場合と同様、いずれの試験体もほぼ類似した波形性状を示している。 $V = 4$ 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。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。 $V = 4$ 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-5 には、単一載荷実験における各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ の応答波形を示している。なお、単一載荷実験は、短繊維混入率 V_f 毎に衝突速度 V を2種類に変化させて実施しているが、ここでは V が大きい方の結果について示している。図より、重錘衝撃力 P の場合には、いずれの試験体においても、繰り返し載荷実験において出現した第1波目が励起した後の第2波目の波動が励起していないことより、RC 版内に押し抜きせん断面が形成されていることが伺われる。

支点反力 R は、繰り返し載荷実験の最終載荷時の結果に比べて、最大振幅が大きかつ高周波成分も明瞭に現れている。これは、単一載荷実験の場合には、繰り返し載荷の場合と異なり、損傷の累積がないことによるものと考えられる。

変位 δ は、いずれの場合も最大振幅を示した後、完全に復元せずに残留していることが分かる。なお、後述のように、短繊維を混入していない V0-IS-5 試験体の場合には、他の試験体よりも残留変位が小さいにもかかわらず、かぶりコンクリートが剥落している。一

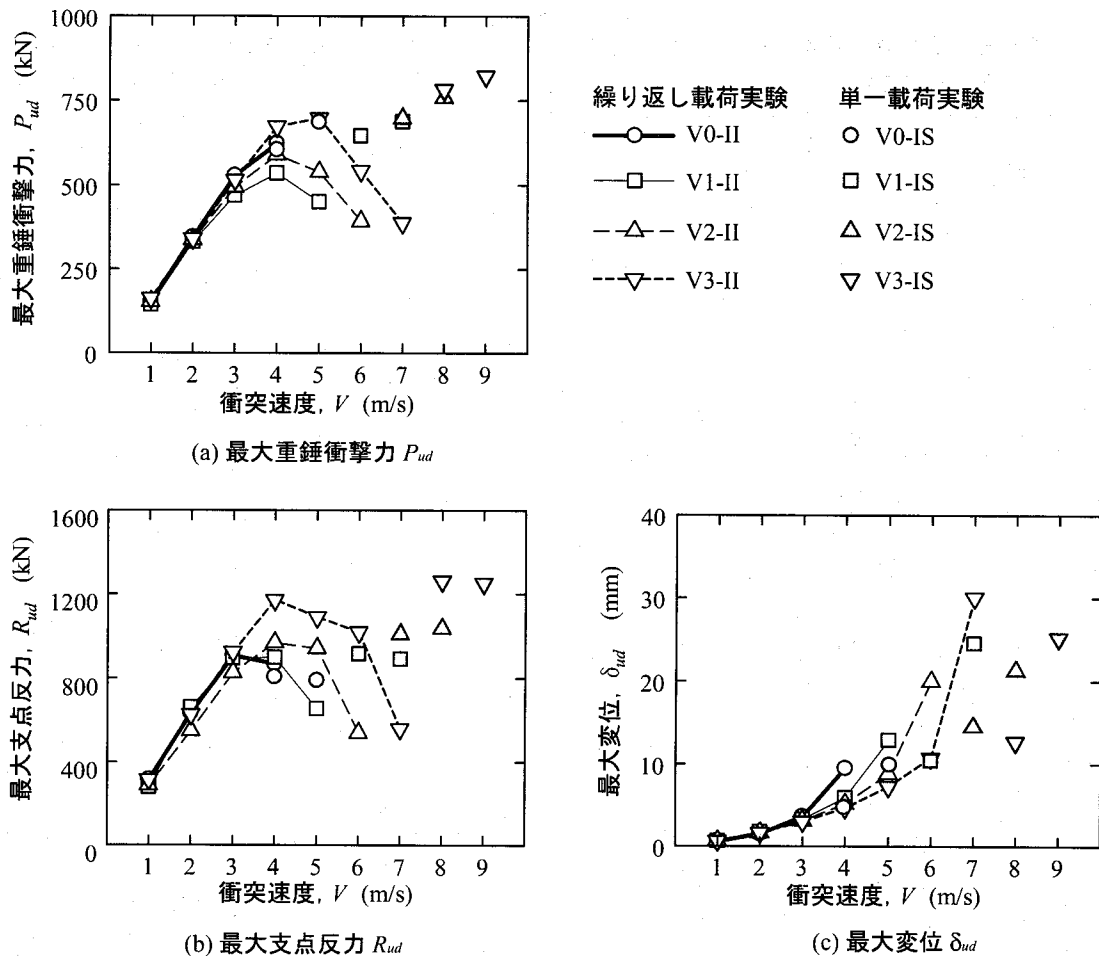


図-6 最大重錘衝撃力、最大支点反力および最大応答変位と衝突速度との関係

方、短繊維が混入されている場合には、各試験体の残留変位が V0-IS-5 試験体の結果よりも 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。

4.2 各種応答値と衝突速度との関係

図-6 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。繰返し载荷実験の結果より、最大重錘衝撃力 P_{ud} は、いずれの試験体も $V = 3$ m/s までは V の増加に伴ってほぼ線形に増大している。 $V = 4$ m/s では、各試験体の P_{ud} の増加割合が若干低下している。なお、V1-II 試験体は未だ終局に至っていないにもかかわらず、 P_{ud} が他の試験体よりも小さく示されている。これは、短繊維混入率 $V_f = 1\%$ のコンクリートの圧縮強度が最も小さいことより、RC 版の载荷部表面のコンクリートが局部的に損傷し塑性化したことが要因の一つであるものと推察される。

$V = 5$ m/s 以降では、いずれの試験体も衝突速度 V の増加とともに最大重錘衝撃力 P_{ud} が徐々に低下する傾向を示している。これは、载荷部表面のコンクリートが局所的に損傷したことや、RC 版に押し抜きせん断面

が形成されたことが影響しているものと推察される。

最大支点反力 R_{ud} は、いずれの試験体も $V = 3$ m/s までは、 P_{ud} の場合と同様に、衝突速度 V の増加とともに線形に増大している。一方、 $V = 4$ m/s では、最大重錘衝撃力 P_{ud} の場合とは異なり、短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど最大支点反力 R_{ud} は大きくなっている。なお、静荷重载荷実験においても、 V_f が大きい場合ほど静的耐力 P_{us} が大きくなる傾向にあることより、 R_{ud} に及ぼす V_f の影響は静的耐力 P_{us} の場合と同様であると言える。また、このような傾向は、 $V = 5$ m/s の場合にも同様に見られる。 $V = 5$ 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} が急激に低下していることが分かる。これは、各 RC 版が押し抜きせん断破壊に至ったためである。

最大応答変位 δ_{ud} は、いずれの試験体も $V = 3$ m/s までは、前述の最大重錘衝撃力 P_{ud} および最大支点反力 R_{ud} と同様、衝突速度 V の増大とともにほぼ線形に増大している。従って、短繊維混入率 V_f にかかわらず、 $V = 3$ m/s まではいずれの試験体も弾性的な挙動を示しているものと考えられる。 $V = 4$ m/s では、V0-II 試験体の最大変位 δ_{ud} が急激に増大しており、押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。また、 $V = 5$ m/s

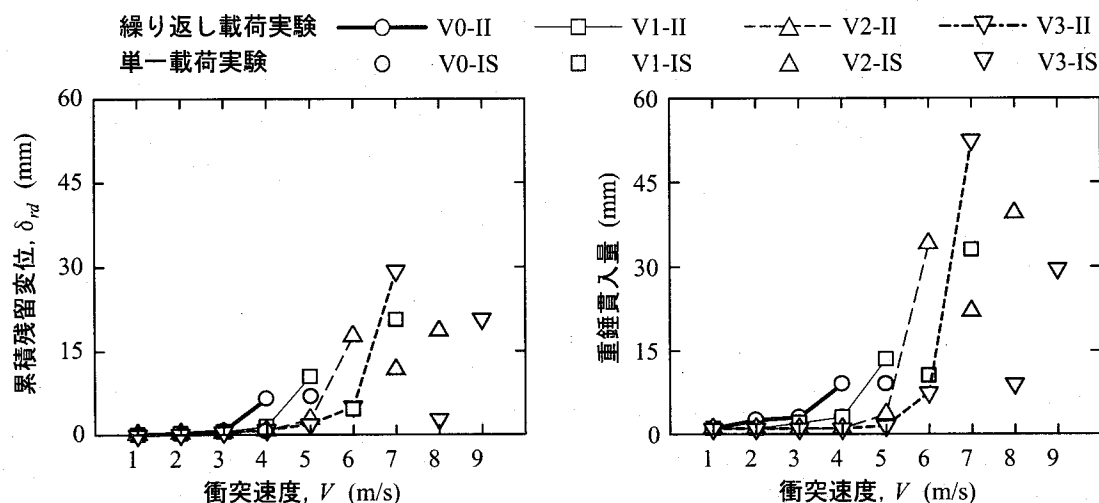


図-7 累積残留変位および重錘貫入量と衝突速度との関係

以降では、各試験体の最終衝突速度 V_{final} において δ_{ud} が急激に増大している。

単一載荷実験の結果を見ると、最大重錘衝撃力 P_{ud} は衝突速度 V が大きい場合ほど大きく示される傾向にあることが分かる。また、同一衝突速度の場合には、試験体によらずほぼ同様な値を示している。従って、 P_{ud} は、衝突速度 V の大きさに依存しているものと考えられる。一方、最大支点反力 R_{ud} の場合は、各 RC 版の短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど大きく示されていることが分かる。これは、前述の繰り返し載荷実験の結果と同様に、静的耐力 P_{us} に関する結果と同様の傾向を示している。最大変位 δ_{ud} は、 V_f が同じ場合には、衝突速度 V が大きい場合ほど大きい。また、同一衝突速度における δ_{ud} は、 V_f が大きい場合ほど小さくなる傾向を示している。

以上の結果より、最大重錘衝撃力 P_{ud} は、1) 繰り返し載荷実験の場合には、載荷点近傍におけるコンクリートの局所的な損傷の影響を受ける可能性があること、2) 単一載荷実験の場合には、衝突速度 V の大きさに依存すること、が明らかになった。一方、最大支点反力 R_{ud} の場合には、1) 載荷方法によらず、静的耐力 P_{us} に関する実験結果と同様に短繊維混入率 V_f の増加に伴って大きくなる傾向を示す、2) 繰り返し載荷実験の最終衝突速度 V_{final} における R_{ud} は、押し抜きせん断破壊が発生していることから、最大応答変位 δ_{ud} の場合と同様に、その値が大きく変動すること等が明らかになった。これより、RC 版の耐衝撃性を適切に評価するためには、最大重錘衝撃力 P_{ud} よりも最大支点反力 R_{ud} を用いるべきであるものと判断される。

図-7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 版の載荷点部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あるいはコンクリート塊の側方流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、大きな衝突速度 V で載荷されている場合ほど顕著である。しかしながら、後述のとおり短繊維を混入した場合には、版下面のかぶりコンクリートの剥落は生じていない。このように、PVA 短繊維を混入した場合には、重錘が版厚 (180 mm) の 1/3 程度まで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ことが明らかになった。

4.3 ひび割れ分布性状

図-8には、繰り返しおよび単一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。繰り返し載荷実験の結果より、版裏面のひび割れは短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど多数発生していることが分かる。これは、短繊維の架橋効果によりひび割れが分散して発生していることと、短繊維混入率 V_f が大きい場合ほど繰り返し載荷の回数および衝突速度 V が大きいこと、によるものと考えられる。

単一載荷実験の結果より、短繊維を混入していない V0-IS-5 試験体の場合には、かぶりコンクリートが大きく剥落していることが分かる。一方、短繊維を混入した場合は、いずれの試験体においても版中央部に明瞭な円形状のひび割れが発生しているもののコンクリートの剥落は見られない。また、繰り返し載荷実験の場合に比較すると、全般的に円形状のひび割れの半径が若干小さく示されている。

写真-3には、繰り返しおよび単一載荷実験終了後

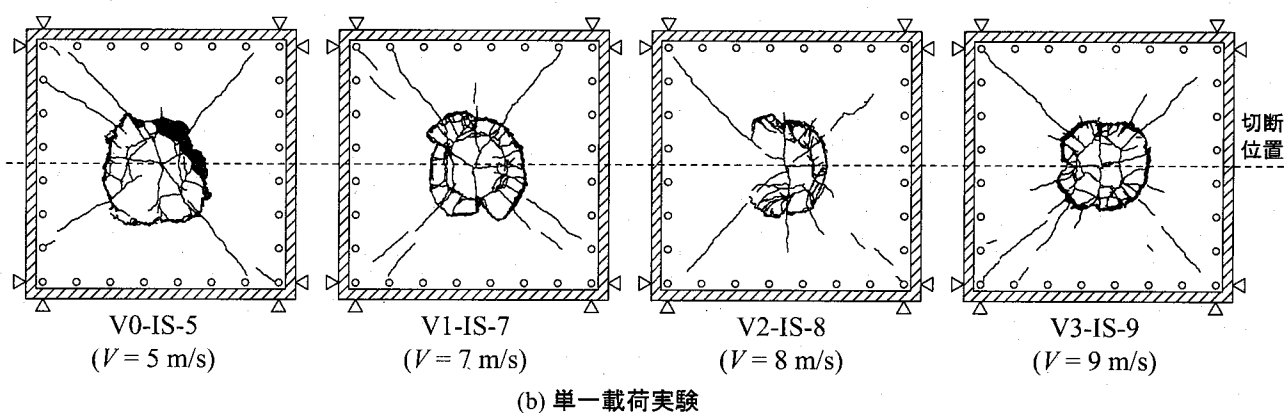
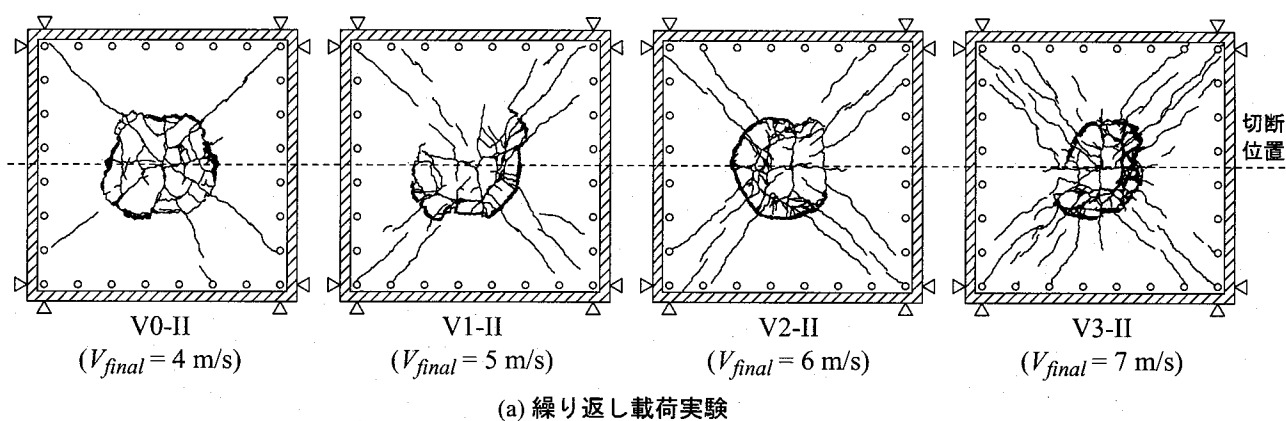


図-8 衝撃荷重載荷実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状

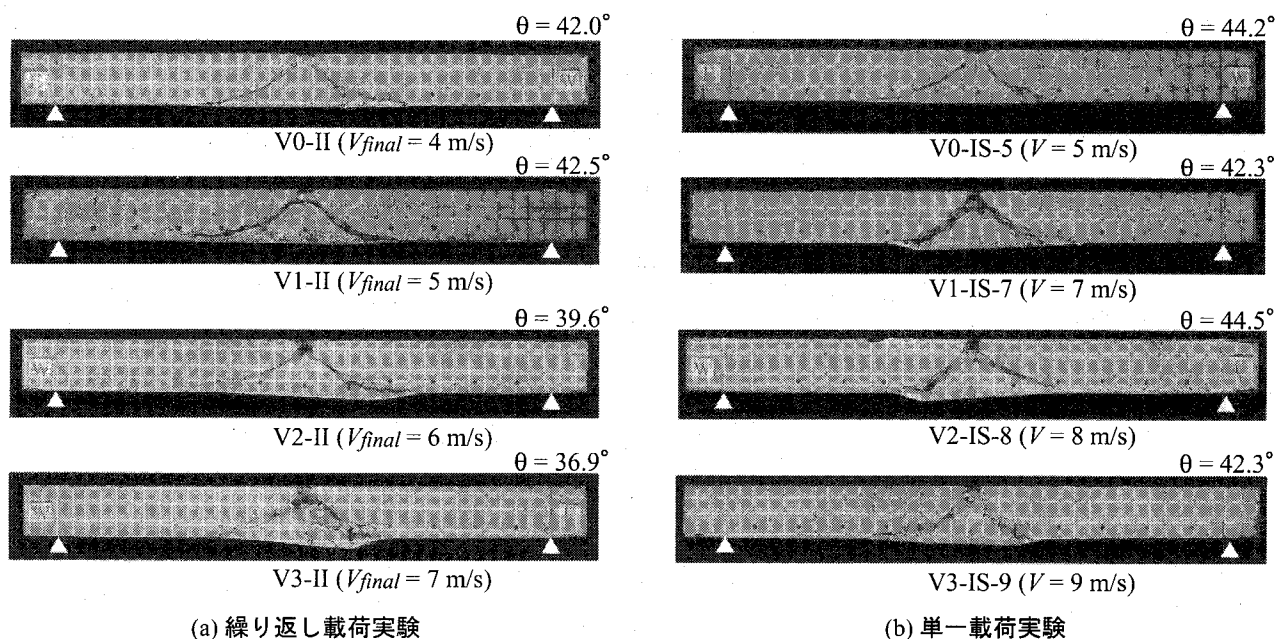


写真-3 衝撃荷重載荷実験終了後における中央部切断面のひび割れ分布性状

における RC 版の中央部切断面のひび割れ性状を示している。写真には、有効高さ部分の斜めひび割れと部材軸のなす角度に関する左右の平均値 θ を併せて示している。写真より、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。繰り返し載荷実験の場合には、 V_f が大きい場合ほど貫入が大きく、押し抜きせん断面が RC 版上面よりも低い位置から形成されていることが分かる。下縁かぶりコンクリートに発生したひび割れの角度は、有効高さ部分の角度よりも緩く、前述

表-4 静的および動的耐力に関する実験結果の一覧

試験体名	短繊維 混入率 V_f (vol. %)	最終 衝突速度 V_{final} (m/s)	入力 エネルギー E_k (kJ)	入力 エネルギー 比	静的耐力 P_{us} (kN)	動的耐力 R_{ud} (kN)	耐力比	動的 応答倍率 R_{ud}/P_{us}
V0-S	0	-	-	-	286.5	-	1.00	-
V1-S	1	-	-	-	312.3	-	1.09	-
V2-S	2	-	-	-	372.8	-	1.30	-
V3-S	3	-	-	-	430.3	-	1.50	-
V0-II	0	4	2.40	1.00	-	866.0	1.00	3.02
V1-II	1	5	3.75	1.56	-	894.9	1.03	2.87
V2-II	2	6	5.40	2.25	-	966.0	1.12	2.59
V3-II	3	7	7.35	3.06	-	1169.3	1.35	2.72
V0-IS-5	0	5	3.75	1.00	-	804.3	1.00	2.81
V1-IS-7	1	7	7.35	1.96	-	913.9	1.14	2.93
V2-IS-8	2	8	9.60	2.56	-	1034.1	1.29	2.77
V3-IS-9	3	9	12.15	3.24	-	1250.1	1.55	2.91

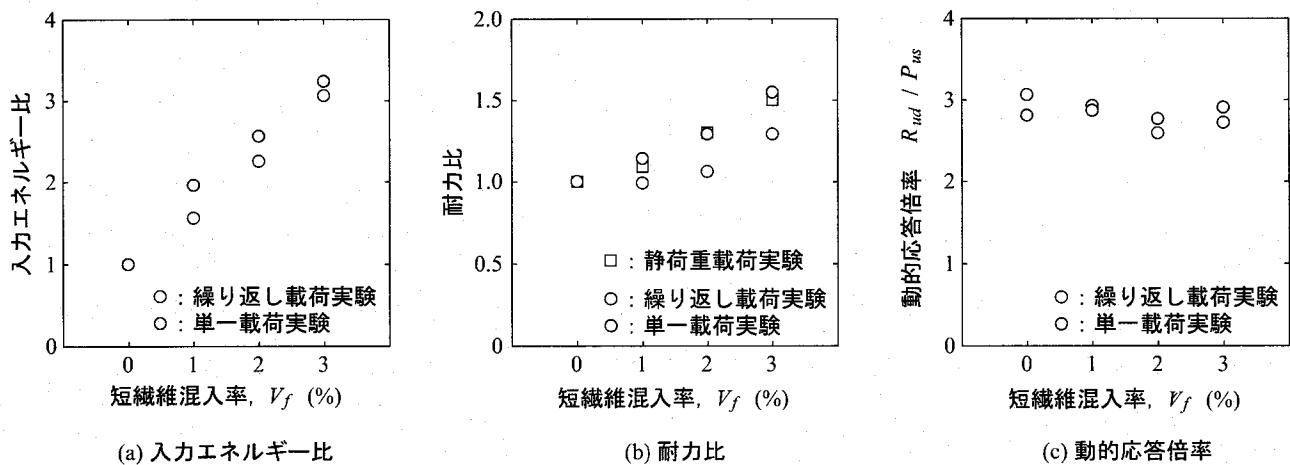


図-9 入力エネルギー比, 耐力比および動的応答倍率と短繊維混入率との関係

の静荷重載荷の場合と同様の傾向を示している。

単一載荷実験の場合においても、短繊維混入率 V_f の大きい場合ほど貫入量が多い。また、ひび割れ角度 θ は、全般的に繰り返し載荷実験の場合よりも大きいものとなっている。これは、単一載荷実験の場合には、繰り返し載荷実験の場合よりも衝突速度 V が大きいため、損傷が載荷部周辺に集中したことによるものと考えられる。

4.4 静的、動的耐力および動的応答倍率

表-4 には、各試験体の静荷重および衝撃荷重載荷実験の結果をまとめて示している。単一載荷実験については、衝突速度 V が大きい場合に関する実験結果を示している。なお、本論文では、動的耐力には各 RC

梁の最大支点反力 R_{ud} の結果を用いている。これは、4.2 節における考察に基づいている。すなわち、RC 版の耐衝撃性は、最大重錘衝撃力 P_{ud} よりも最大支点反力 R_{ud} を用いていることより、より合理的に評価可能である、と云う考察結果に基づいている。なお、この考え方は著者らによる RC 梁の耐衝撃性に関する研究成果¹⁰⁾とも対応している。また、動的応答倍率に関しても、同様の考察および研究成果を参考にして動的耐力 R_{ud} を静的耐力 P_{us} で除すことにより評価することとした。表中、入力エネルギー比および耐力比は、各 RC 版の入力エネルギーや静的、動的耐力を短繊維混入率 $V_f = 0\%$ の場合の結果で除したものである。

図-9 には、(a) 入力エネルギー比、(b) 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、図中の繰り返し載荷実験の結果は、載荷履歴を受けた条件下における結果であり、各 RC 版固有の耐衝撃性を評価し得るものではないものと考えられる。従って、ここでは参考値として示している。また、以後、RC 版の耐衝撃性に関する定量的な評価は、全て単一載荷実験の結果を用いて行うこととする。

図-9(a)より、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。また、単一載荷実験の結果を基に、RC 版の耐衝撃性を入力エネルギーの観点から評価すると、RC 版の耐衝撃性は短繊維混入率 V_f を 1, 2, 3 % とすることにより、それぞれ 2.0, 2.6, 3.2 倍程度向上していることが分かる。

図-9(b)より、耐力比は、載荷方法によらず V_f が大きい場合ほど大きいことが分かる。また、静荷重載荷実験および単一載荷実験の場合では、ほぼ同様の結果となっており、短繊維混入率 V_f を 1, 2, 3 % とすることにより静的および動的耐力が、それぞれ 1.1, 1.3, 1.5 倍程度向上していることが分かる。また、図-9(c)より、単一載荷実験の結果を見ると、動的応答倍率は 2.8 ~ 2.9 程度であり比較的ばらつきの小さいことが分かる。従って、動的応答倍率を 2.5 程度と考えることにより、PVA 短繊維を混入した 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。

5. まとめ

本研究では、PVA 短繊維混入による RC 版の耐衝撃性能向上効果について検討することを目的に、PVA 短繊維の混入率 V_f を 0 % から 3 % まで変化させた 4 辺支持 RC 版の重錘落下衝撃実験を行った。また、RC 版の耐荷性能に及ぼす載荷方法の影響について検討するため、静載荷実験も併せて実施した。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。

静載荷実験結果：

- 1) PVA 短繊維を混入することにより、RC 版に形成される押し抜きせん断ひび割れが架橋され、押し抜きせん断耐力は向上する。
- 2) RC 版の押し抜きせん断耐力(静的耐力)は、短繊維混入率 V_f を 1, 2, 3 % とすることにより、それぞれ 1.1, 1.3, 1.5 倍程度向上する。
- 3) 短繊維を混入することにより、押し抜きせん断破壊時の荷重低下は緩やかになる。

衝撃荷重載荷実験結果：

- 1) 静載荷実験の場合と同様、短繊維を混入することにより押し抜きせん断ひび割れが架橋され、耐衝撃性能は向上する。
- 2) 短繊維の混入により、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って RC 版裏面のかぶりコンクリートの剥落が抑制される。

- 3) 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、RC 版の耐衝撃性は短繊維混入率 V_f を 1, 2, 3 % とすることにより、それぞれ 2.0, 2.6, 3.2 倍程度向上する。
- 4) 動的耐力は、静的耐力と同様、短繊維混入率 V_f を 1, 2, 3 % とすることにより、それぞれ 1.1, 1.3, 1.5 倍程度向上する。
- 5) 各 RC 版の動的応答倍率は、短繊維混入率 V_f にかかわらず 2.8 ~ 2.9 程度であることより、動的応答倍率を 2.5 程度とすることによって、PVA 短繊維を混入した RC 版の耐衝撃性を安全側に評価することができる。

謝辞

本研究を行うに当たり、当時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宮川健太君(現飛島建設(株))および同研究室在籍の池田聡君をはじめとする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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動、構造工学論文集、Vol.51A, pp.1675-1686, 2005.
- 7) 田口史雄、岸 徳光、三上 浩、栗橋祐介：ビニロン短繊維を混入した RC 版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究、第 3 回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム、pp.113-118, 2003.
- 8) 三上 浩、岸 徳光、田口史雄、栗橋祐介：ビニロン短繊維を混入した四辺支持 RC 版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.2, pp.1555-1560, 2004.

- 9) 伊藤 始, 岩波光保, 横田 弘: 軽量コンクリート
スラブの押抜きせん断特性に及ぼす PVA 短繊維
の影響, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1321-1331,
2005.
- 10) 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.

(2005 年 9 月 10 日受付)