

# PVA 短繊維混入コンクリートを部分使用した RC 版の耐衝撃性向上効果

Upgrading effects of partial use of PVA short-fiber mixed concrete on impact resistant capacity of RC slabs

(独)土木研究所寒地土木研究所耐寒材料チーム ○正会員 安達 優 (Yutaka Adachi)  
 (独)土木研究所寒地土木研究所耐寒材料チーム 正会員 田口史雄 (Fumio Taguchi)  
 室蘭工業大学工学部建設システム工学科 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)  
 三井住友建設(株)技術研究所土木研究開発部 フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)  
 室蘭工業大学工学部建設システム工学科 正会員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)

## 1. はじめに

落石覆工の頂版等に使用される RC 版部材は、過大な衝撃外力を受け、裏面剥離や押し抜きせん断破壊により下縁かぶりコンクリートが剥落することが懸念される。安全な社会基盤を構築し維持するためにも、このような破壊に対して安全性の高い RC 版部材の新設工法および補修補強工法の開発が望まれる。

また、種々のコンクリート構造物における破壊の多くは内部に生じる引張応力が原因であるため、内部ひび割れの対策として、軽量かつ耐腐食性に優れる合成繊維に関する研究が盛んに行われている。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>1)</sup>。

筆者らは、既往の研究において、PVA 短繊維を混入させることで、RC 版の押し抜きせん断耐力向上効果や耐衝撃性向上効果が得られることを静的載荷実験および重錘落下衝撃実験により確認してきた。しかし一方で、鋼繊維と比較して PVA 短繊維は高価であることから、少量で耐力向上効果を得るための効果的な使用方法の確立が求められている。このことから RC 版においては、押し抜きせん断破壊に対して短繊維の架橋効果が効果的に発揮される部位を明確にすることが重要と考えられる。

そこで本研究では、PVA 短繊維混入コンクリートを RC 版の下側半断面 (以下、下断面) に部分使用した場合において、重錘落下衝撃実験により、その耐衝撃性向上効果を検証した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

表-1 に試験体の一覧を示す。試験体数は、短繊維混入断

表-1 試験体一覧

試験体名	載荷方法	短繊維混入率 $V_f$ (%)		衝突速度 $V$ (m/s)
		上断面	下断面	
N	衝撃 (繰り返し)	0		1,2,3,4,5
F2-L		0	2	1,2,3,4,5,6
F2-A		2		1,2,3,4,5,6

面を変化させた 2 体 (全断面または下断面のみ) および短繊維を混入しない 1 体の合計 3 体である。なお、本研究では、短繊維の効果を確認するため、既往の研究成果<sup>2)</sup>を参考に、短繊維混入率  $V_f$  を 2% とした。

図-1 に、試験体の形状寸法および配筋状況を示す。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。鉄筋の降伏強度は 396 MPa である。これらの鉄筋は RC 版の 4 辺に配置した溝型鋼に溶接し、定着を確保した。また、F2-L 試験体は、コンクリートの一体化を図るため、下側の短繊維混入はコンクリートにほうき目を付け、硬化後にはサンドブラストによる研掃を行った。

表-2 に、短繊維混入の有無に対応したコンクリートの配合を示す。実験時の圧縮強度は短繊維混入の有無に関わらず 35 MPa 程度であった。

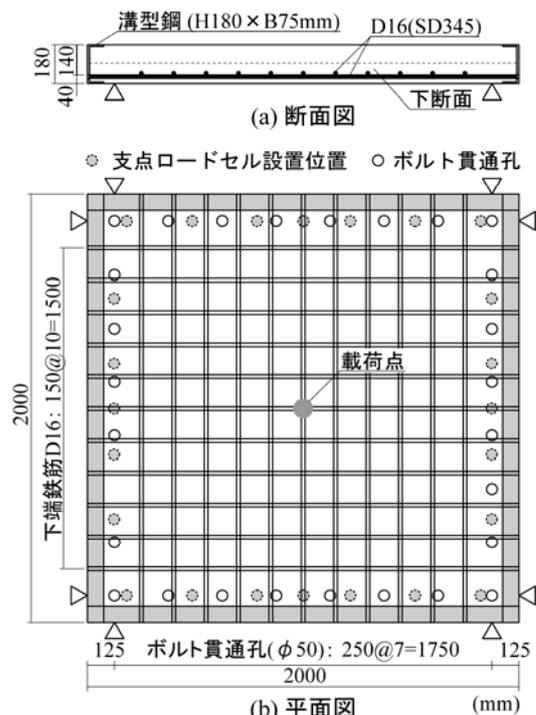


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

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 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤		スランブ (cm)	圧縮強度 (MPa)
			W	C	S	G	高性能減水剤 (C×%)	増粘剤 (W×%)		
0	42	41	153	364	740	1058	-	1.00	8.5	35.1
2	45	60	170	378	1050	701	0.75	-	14.5	36.0

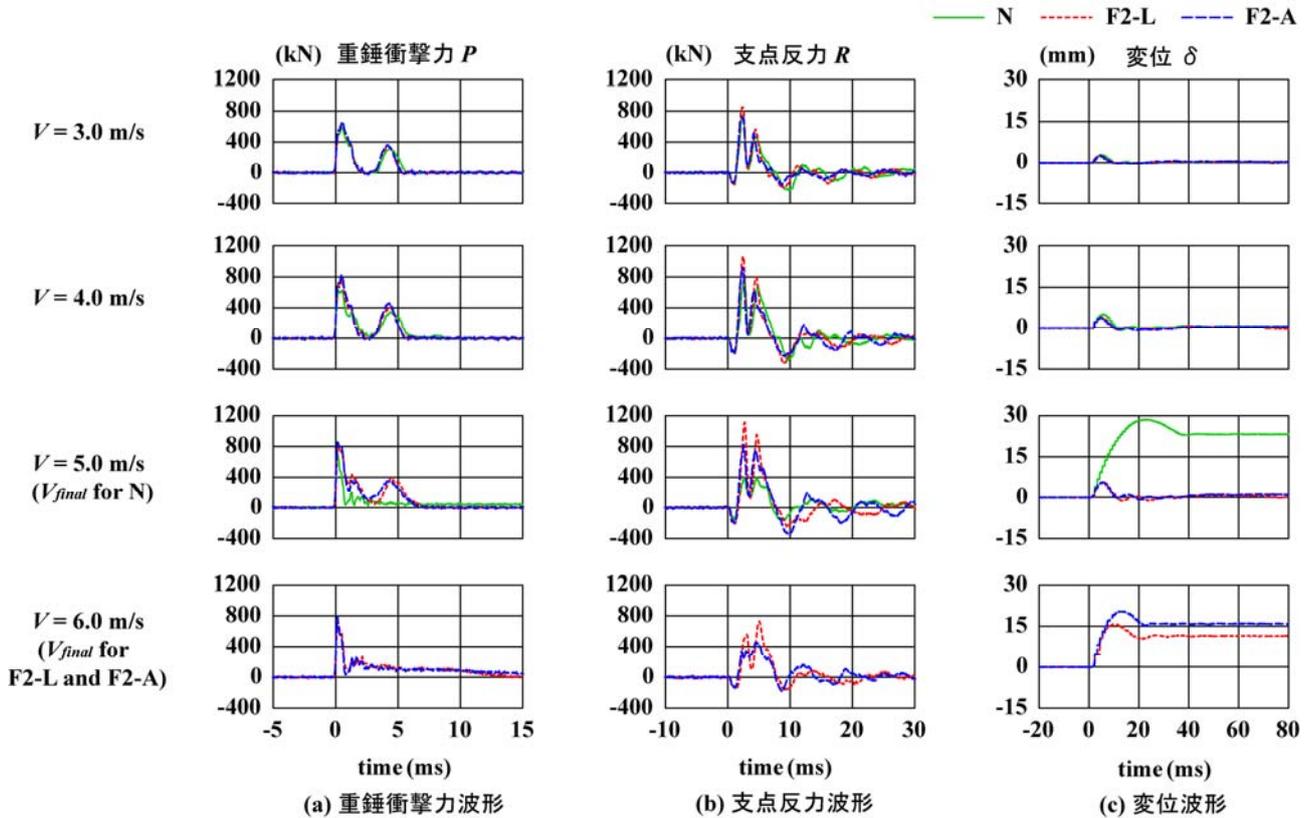


図-2 重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形

## 2.2 実験方法

実験は純スパン長 1.75 m 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た。また、荷点を RC 版の中央とし、荷点治具には直径 90 mm、質量 300 kg の鋼製円柱型の重錘を用い、所定の高さから自由落下させ荷点した。実験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た。

測定項目は、荷重  $P$  (以下、重錘衝撃力)、合支点反力(四辺の反力の合算値、以下、支点反力)、荷点変位  $\delta$  (以下、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た。また、RC 版を中央線に沿って切断し、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た。

## 3. 衝撃荷重実験結果

### 3.1 時刻歴応答波形

図-2に、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す。なお、本実験において N 試験体は衝突速度  $V=5\text{ m/s}$  で、F2-L、F2-A 試験体は衝突速

度  $V=6\text{ m/s}$  で押し抜きせん断破壊により終局に至った。ここでは、 $V=3\sim6\text{ m/s}$  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示す。

重錘衝撃力波形  $P$  は、 $V=4\text{ m/s}$  では、いずれの試験体においても大小 2 つの卓越した波から構成される波形性状を示した。また、 $V=5\text{ m/s}$  以降では 2 波目の振幅が減少し、各 RC 版の最終衝突速度  $V_{final}$  において 2 波目はほとんど消失している。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。

支点反力波形  $R$  は、 $V=4\text{ m/s}$  においては、1) 周期が 9 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 3 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。この時点まではいずれの試験体もほぼ類似した波形性状を示した。 $V=5\text{ m/s}$  以降では、N 試験体が  $V=5\text{ m/s}$  で、短繊維を混入した試験体では  $V=6\text{ m/s}$  の最終衝突速度  $V_{final}$  において振幅が大幅に低下し、同時に高周波成分も消失する傾向にある。

変位波形  $\delta$  は、 $V=4\text{ m/s}$  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た。最大応答後、変位  $\delta$  はほぼ零に復元していることより、いずれの試験体も未だ弾性状態であると推察される。また、F2-L 試験体の  $V=5\text{ m/s}$  においては、変位  $\delta$  が零以下を示している。さらに、RC 版上面には

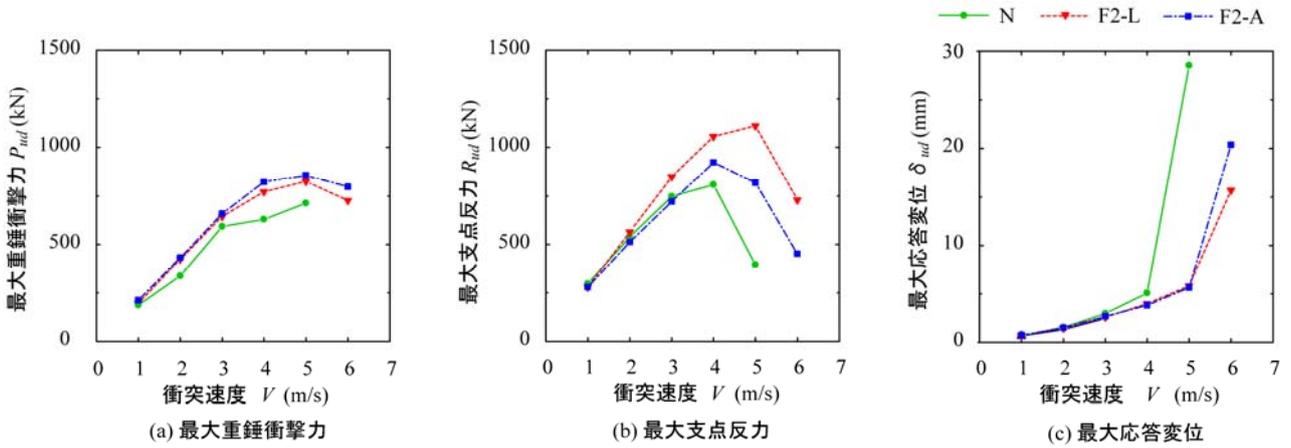


図-3 最大重錘衝撃力，最大支点反力および最大応答変位と衝突速度との関係

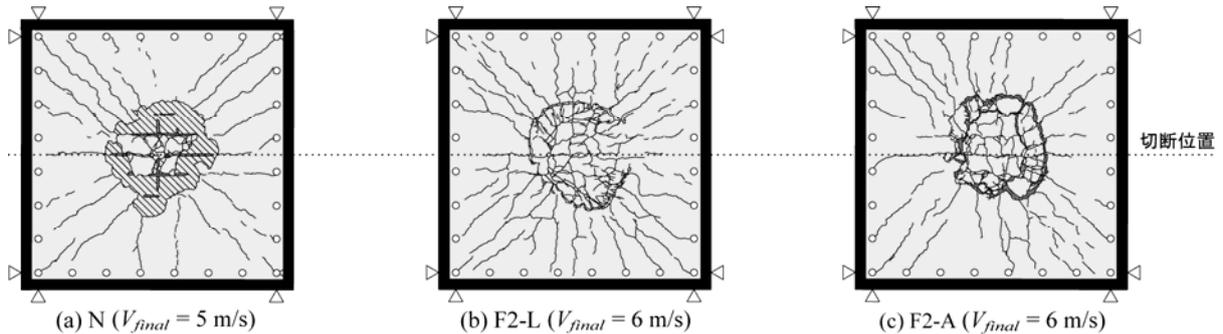


図-4 実験終了後におけるRC版下面のひび割れ分布性状

載荷点から四隅に進展するひび割れが認められたことから、下断面のみに短繊維混入コンクリート用いた場合には、版中央が上方に浮き上がるモードを示し、他の試験体に比べてより健全であることがうかがわれる。V=5 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。

### 3.2 各種応答値と衝突速度との関係

図-3に、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) 最大変位  $\delta_{ud}$  と衝突速度  $V$  との関係を示す。

最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  は、各試験体ともに  $V=4\sim 5$  m/s までは、 $V$  の増加に伴って増大している。F2-L, F2-A 試験体は  $V=6$  m/s で最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  が低下し終局に至った。一方で、N 試験体は、 $V=5$  m/s において  $P_{ud}$  が増加し終局に至った。これは、既往の研究<sup>2)</sup>における短繊維無混入試験体の結果と同様であり、RC版が脆性的に破壊した場合の特徴と考えられる。

最大支点反力  $R_{ud}$  は、いずれの試験体も  $V=4$  m/s までは、衝突速度  $V$  の増加とともに増大した。F2-L, F2-A 試験体では最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  はほぼ同様の値を示したが、 $R_{ud}$  は  $V=2$  m/s 以降に両者の差異が拡大し始め、 $V=5$  m/s においてF2-L 試験体は増加したのに対して、F2-A 試験体では低下している。このことから、F2-A 試験体よりも F2-L 試験体の方が動的耐力が大きく、同一衝突速度ではより健全であることが分かる。

最大応答変位  $\delta_{ud}$  は、衝突速度  $V=4$  m/s までは、いずれの試験体も衝突速度  $V$  の増加とともにほぼ線形に増大している。従って、短繊維混入および混入断面の相違に関わらず、 $V=4$  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

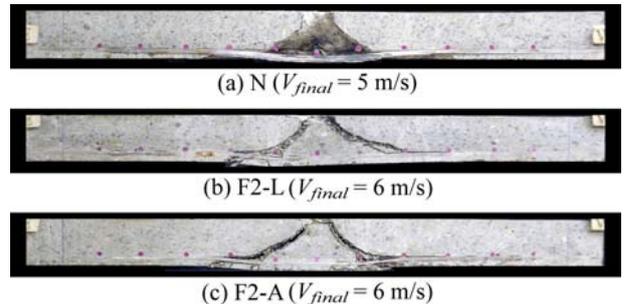


図-5 実験終了後における中央部切断面のひび割れ分布性状

と考えられる。V=5 m/s において、N 試験体は最大応答変位  $\delta_{ud}$  が急激に増大し、終局に至った。F2-L, F2-A 試験体では  $V=5$  m/s までほぼ同様の挙動を示し、 $V=6$  m/s において終局に至ったが、最大応答変位  $\delta_{ud}$  は F2-L 試験体の方が F2-A 試験体よりもいくぶん小さくなっている。

以上より、短繊維をRC版の下断面のみに混入させた場合の耐衝撃性向上効果は、全断面に混入させた場合と同程度か、それ以上に期待できるものと考えられる。

### 3.3 ひび割れ分布性状

図-4に、実験終了後におけるRC版裏面のひび割れ分布性状を示す。ひび割れは短繊維を混入した F2-L, F2-A 試験体の方が N 試験体よりも多数発生した。また、N 試験体は多くのコンクリート片が剥落したのに対し、F2-L, F2-A 試験体ではコンクリートの大きな剥落は見られない。これは、短繊維の架橋効果によりひび割れが分散したことおよび剥落が抑制されたことに加え、繰り返し载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。なお、F2-L 試

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	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 $R_{ud}/P_{us}$
N	5	3.75	1.00	415.2	808	1.00	1.95
F2-L	6	5.40	1.44	380.6	1112	1.38	2.92
F2-A	6	5.40	1.44	489.7	923	1.14	1.89

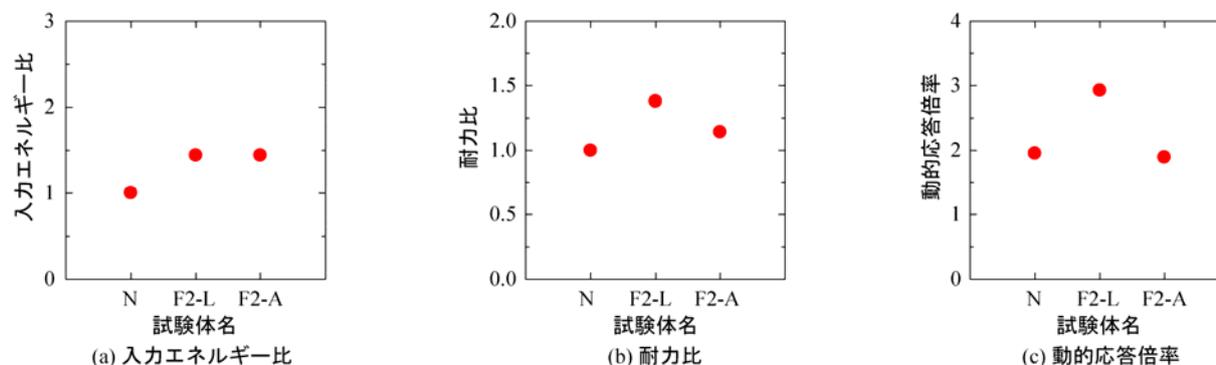


図-6 入力エネルギー比, 耐力比および動的応答倍率と短繊維混入率との関係

験体と F2-A 試験体を比較すると、ひび割れの分散性は F2-L 試験体の方が良好であり、また、円形状ひび割れ周辺の損傷程度も軽微になっていることが分かる。以上から、ひび割れ性状からも F2-L 試験体が F2-A 試験体よりも健全であることがうかがわれる。

図-5に、実験終了後における RC 版の中央部切断面のひび割れ性状を示す。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。その他に、かぶり部分および主鉄筋に沿ったひび割れが顕著に認められるが、かぶり部分のひび割れは短繊維を混入した試験体でより顕著であり、主鉄筋に沿ったひび割れは N 試験体でより顕著である。重錘の貫入量は短繊維を用いた試験体で小さく、押し抜きせん断面が RC 版上面のより高い位置から形成されている。下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れの角度は、有効高さ部分の角度よりも緩く、その傾向は短繊維を混入した試験体でより顕著であるが、短繊維混入断面の違いによる差は明確でない。また、F2-L 試験体では載荷位置のコンクリートが圧壊しており、エネルギーを吸収した可能性がある。

### 3.4 静的、動的耐力および動的応答倍率

表-4に各試験体の衝撃載荷実験および別途実施した静載荷実験の結果を一覧にして示す。なお、動的耐力には、3.2節の考察および既往の研究<sup>2),3)</sup>に基づき各 RC 版の最大支点反力  $R_{ud}$  の結果を用いた。動的応答倍率は動的耐力  $R_{ud}$  を静載荷実験から得られた静的耐力  $P_{us}$  で除すことで評価した。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動的耐力を N 試験体の結果で除したものである。

図-6に、各試験体の (a) 入力エネルギー比、(b) 耐力比および(c) 動的応答倍率を示す。図(a)より、RC 版の入力エネルギーは短繊維を下断面または全断面に混入させることで 1.4 倍程度向上することが分かる。図(b)より、耐力比は F2-L, F2-A 試験体においてそれぞれ 1.4, 1.1 倍程度向上し、下断面のみに短繊維を混入させた方が大きい。図(c)より、動的応答倍率は N, F2-L, F2-A 試験体においてそれぞれ 2.0, 2.9, 1.9 程度であり、短繊維を全断面に混入させた場合より、下断面のみに混入させた方が大きくなり、耐力比と同様の傾

向を示した。このように、F2-L 試験体の方が F2-A 試験体よりも耐力比や動的応答倍率が大きいのは、載荷点周辺での局部損傷が F2-L 試験体の方で顕著であることから、入力エネルギーが吸収され、版への入力エネルギーが小さくなったことが一要因だと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、経済的合理性を追求するため、PVA 短繊維混入コンクリートを RC 版の下断面のみに使用した RC 版の耐衝撃性状を 4 辺支持条件の下、重錘落下衝撃実験により検討した。なお、短繊維混入率は 2% とした。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- 1) PVA 短繊維が下断面に混入されている試験体では、RC 版裏面かぶりコンクリートの剥落が抑制される。
- 2) 入力エネルギーの観点から RC 版の耐衝撃性能を評価すると、短繊維を下断面または全断面に混入させることで無混入の 1.4 倍程度まで耐衝撃性は向上する。
- 3) 動的耐力は、短繊維を下断面または全断面に混入させることにより、無混入と比べてそれぞれ 1.4, 1.1 倍程度向上した。
- 4) 動的応答倍率は、短繊維を下断面または全断面に混入させることで、それぞれ 2.9, 1.9 程度となった。
- 5) 下断面のみに短繊維を混入することは、効率的な入力エネルギーの吸収につながり、全断面に混入するよりも耐衝撃性に対して合理的となる可能性がある。

### 参考文献

- 1) 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。
- 2) 栗橋祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 田口史雄：PVA 短繊維混入による 4 片支持 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, 2006。
- 3) 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.674/I-51, pp.177-190, 2000。