

# 論文 PVA 短繊維混入コンクリートを下側半断面に使用した RC 版の耐衝撃性向上効果

安達 優<sup>\*1</sup>・三上 浩<sup>\*2</sup>・栗橋 祐介<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 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 版の静的耐荷性状および耐衝撃性状を 4 辺支持条件の下、静載荷実験および重錘落下衝撃実験により検討した。その結果、静的荷重に対しては全断面に PVA 短繊維を混入した場合と同程度のエネルギー吸収性能を有し、衝撃荷重に対しては全断面に混入するよりも耐衝撃性が改善されること、などが明らかとなった。

**キーワード:** PVA 短繊維, RC 版, 押し抜きせん断破壊, 耐衝撃性

## 1. はじめに

橋梁の床版や落石覆工の頂版等に代表される鉄筋コンクリート（以下、RC）製の版部材は、局所荷重の作用により押し抜きせん断破壊によって終局に至る。押し抜きせん断破壊は時にコンクリート片が落下することから、第三者に被害を及ぼす可能性のある危険な破壊形態である。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。

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。そのため、内部ひび割れの対策として、鋼繊維をコンクリート内部に混入させる研究が行われ実用化されてきた<sup>1),2)</sup>。最近では、鋼繊維に代わる材料として、軽量かつ耐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。積雪寒冷地における構造物は、飛来塩分に加え凍結防止剤の散布により塩害を受けやすい環境にあるため、このように耐食性を有する材料を補強材として使用するの是有用と考えられる。中でも、ポリビニルアルコール（PVA）短繊維は、親水性を有しセメンペーストとの付着が良好であるため、架橋効果によるひび割れ進展の高い抑制効果が期待できることから<sup>3)</sup>、積雪寒冷地におけるコンクリート構造物に使用する短繊維補強材料として適材であると考えられる。

筆者らは、既往の研究において、PVA 短繊維混入による耐力向上効果を種々の RC 部材実験により確認してきた。RC 版の押し抜きせん断破壊に対しては、PVA 短繊維を混入させることで、その耐力向上効果や耐衝撃性向上効果が得られることを静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、PVA 短繊維

は高価な材料であることから、用途に応じてより少ない使用量で高い効果を得るための効率的な使用方法の確立が求められる。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率的に出現する部位を明確にすることも重要と考えられる。

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）に使用した場合の静的耐荷性能および耐衝撃性向上効果について検証することを目的に、下側半断面または全断面に PVA 短繊維混入コンクリートを用いた 4 辺支持 RC 版の静載荷実験および重錘落下衝撃実験（以下、衝撃実験）を行った。

## 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、載荷方法、PVA 短繊維の体積混入率（以下、短繊維混入率  $V_f$ ）、短繊維混入箇所を変化させた全 6 体である。本研究では、短繊維の効果を明確にするため、既往の研究成果<sup>4)</sup>を参

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-S	静的	0		-
F2-L-S		0	2	
F2-A-S		2		
N-II	衝撃 (繰り返し)	0		1,2,3,4,5
F2-L-II		0	2	1,2,3,4,5,6
F2-A-II		2		1,2,3,4,5,6

\*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員 (正会員)

\*2 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

\*3 室蘭工業大学大学院講師 工学研究科 暮らし環境系領域 博(工) (正会員)

\*4 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合および圧縮強度の一覧

短繊維混入率 $V_f$ (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				高性能 AE 減水剤 (C×%)	スランブ (cm)	圧縮強度 (MPa)
			W	C	S	G			
0	42	41	153	364	740	1058	1.00	8.5	35.1 (※41.8)
2	45	60	170	378	1050	701		14.5	36.0

※N-S 試験体

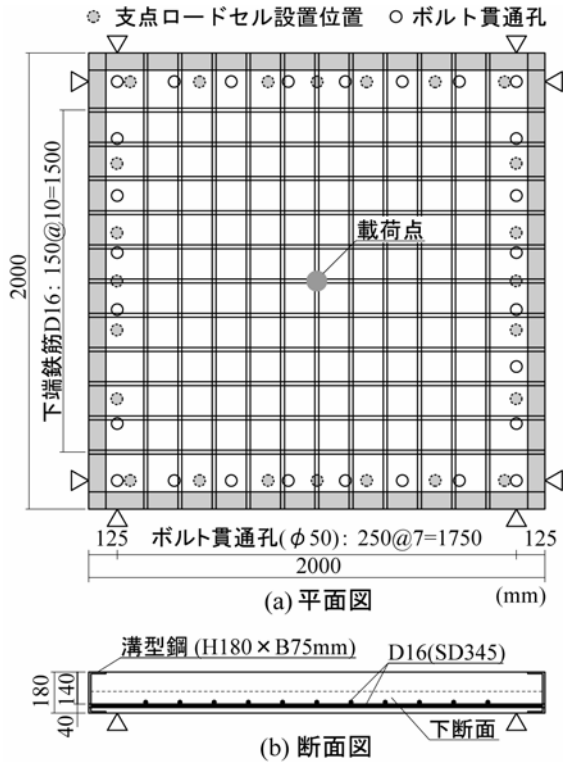


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

考に、短繊維を混入させる断面の短繊維混入率  $V_f$  を 2% とした。ここで、表中、試験体名の第一項目は、短繊維混入率  $V_f$  (N : 0%, F2 : 2%), 第二項目は短繊維の混入断面 (L : 下断面, A : 全断面), 最終項目は荷重方法 (S は静的, II は衝撃) を示す。

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、定着を確保した。なお、F2-L-S および F2-L-II 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ている。

表-3 PVA 短繊維の寸法および材料特性値

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 ひずみ (%)
30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

## 2.2 コンクリートの配合および使用材料

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および力学特性の一覧を示す。実験時の圧縮強度は 35 MPa ~ 42 MPa 程度であった。N-S 試験体の圧縮強度が他に比べ若干大きくなったのは、本試験体のみ打設時期が早かったことによるものである。これらの配合は、短繊維を混入する場合でも、材料分離が無く適切なコンシステンシーを有し、かつ、圧縮強度が同程度になるように調整した。表-3 に、PVA 短繊維の寸法および材料特性値を一覧にして示す。

## 2.3 実験方法

試験体の支持条件は、荷重方法にかかわらず純スパン長 1.75 m の 4 辺支持状態とした。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、静荷重および衝撃実験ともに荷重治具には直径 90 mm の鋼製円柱を用い、荷重点は RC 版の中央点とした。

静荷重実験は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて荷重を行った。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。衝撃実験は 300 kg の重錘を用いて、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方法により行った。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。

## 2.4 測定項目

本実験の測定項目は、荷重荷重  $P$  (以下、静荷重実験の場合は静荷重、衝撃実験の場合には重錘衝撃力)、合支点反力  $R$  (四辺の反力の合算値、以下、支点反力)、荷重点変位  $\delta$  (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 版を中心

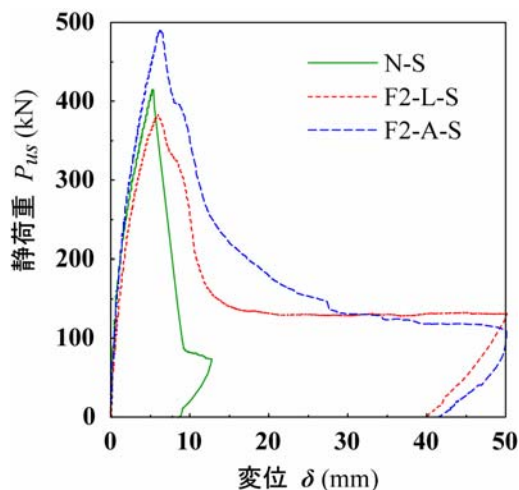


図-2 荷重-変位関係

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。

静荷重の測定には、容量 500 kN の静荷用ロードセルを用いた。重錘衝撃力の測定には、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た。また、支点反力は、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、支点器具内に内蔵する形で測定した。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。なお、衝撃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 200 ms まで 0.1 ms/word で A/D 変換した。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状態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 (5word) とした。

### 3. 静載荷実験結果

#### 3.1 荷重-変位関係

図-2 に各試験体の荷重-変位関係を比較して示す。N-S 試験体と F2-L-S 試験体を比較すると、F2-L-S 試験体の最大荷重は N-S 試験体と同程度となり、下断面のみに PVA 短繊維を混入することによる静的耐荷力の向上効果は認められなかった。これは N-S 試験体のコンクリートの圧縮強度が若干高かったことが影響したものと考えられる。一方、変形性能に着目すると、N-S 試験体は約 5 mm で最大荷重に到達後、急激に荷重が低下し押し抜きせん断破壊に至ったのに対して、F2-L-S 試験体は最大荷重到達後、荷重が急激に低下したものの、荷重

128 kN 程度で安定し、変位は 50 mm を上回った。これは、下断面に混入した 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たことによるものと考えられる。一方、F2-A-S 試験体は最も高い最大荷重を示し、同時に F2-L-S 試験体と同様に高いエネルギー吸収性能を示した。なお、F2-L-S および F2-A-S 試験体は変位が 50 mm を超えた時点で実験を打ち切っている。

以上のことから、短繊維を RC 版の下断面または全断面に混入させることで靱性能の向上効果が得られ、短繊維混入断面の相違に関わらずほぼ同等のエネルギー吸収が期待できることが分かった。

### 4. 衝撃実験結果

#### 4.1 時刻歴応答波形

図-3 に、衝撃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  $\delta$  に関する応答波形を示す。なお、本実験において N-II 試験体は衝突速度  $V = 5$  m/s で、F2-L-II、F2-A-II 試験体は衝突速度  $V = 6$  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、 $V = 3 \sim 6$  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示す。

重錘衝撃力  $P$  の波形は、 $V = 4$  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、 $V = 5$  m/s 以降では 2 波目の振幅が減少し、各試験体の最終衝突速度  $V_{final}$  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  $R$  の波形は、 $V = 4$  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。 $V = 5$  m/s 以降では、N-II 試験体が  $V = 5$  m/s、短繊維を混入した試験体は  $V = 6$  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  $\delta$  の波形は、 $V = 4$  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にあると推察される。また、F2-L-II 試験体の  $V = 5$  m/s においては、最大応答後、変位  $\delta$  が零以下を示している。さらに、このとき、RC 版上面には載荷点から四隅に進展するひび割れが認められた。このことから、下断面のみに短繊維混入コンクリートを用いた場合には、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、

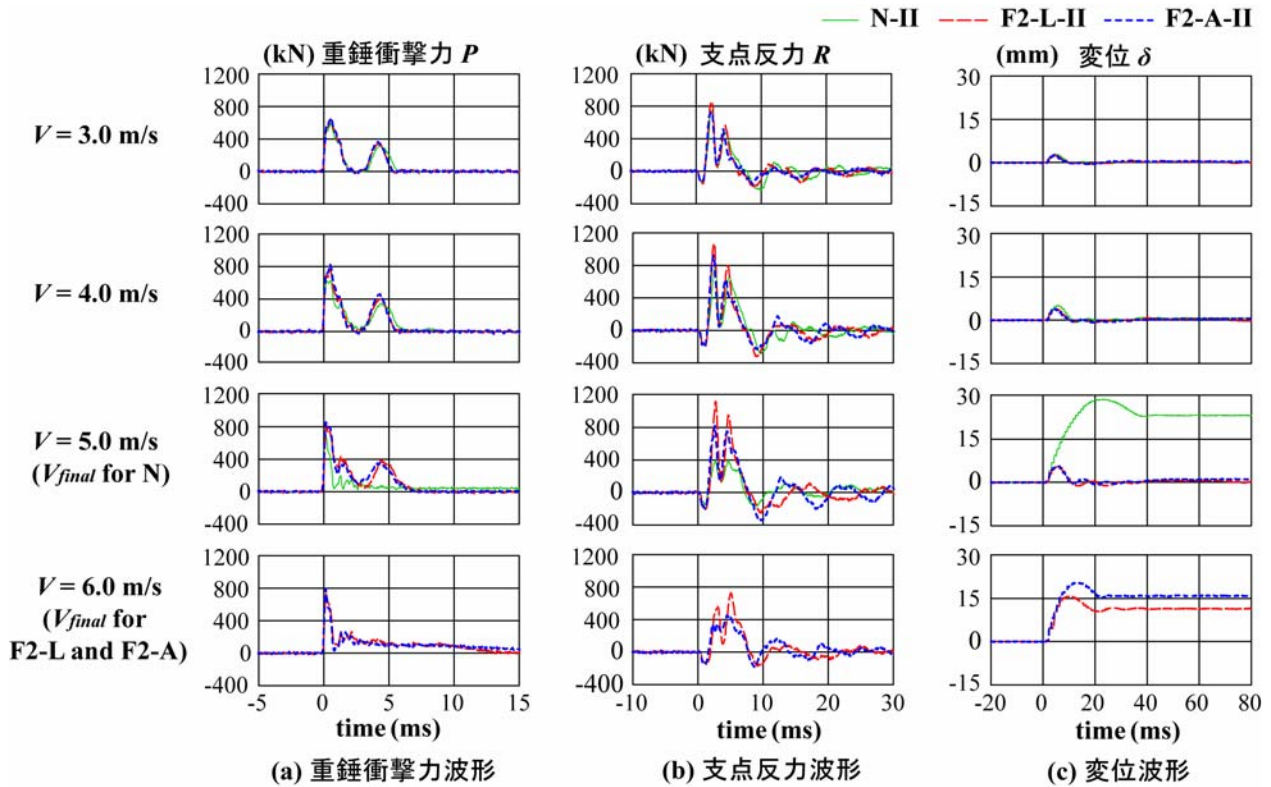


図-3 重錘衝撃力，支点反力および変位に関する応答波形

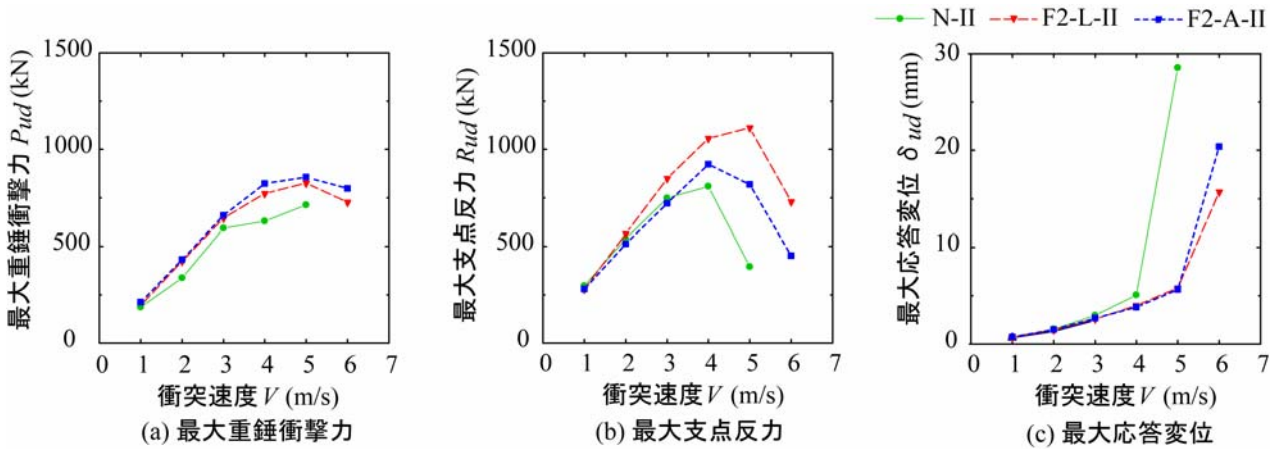


図-4 最大重錘衝撃力，最大支点反力および最大応答変位と衝突速度との関係

各試験体の最終衝突速度  $V_{final}$  では変位が復元せず大きく残留している。

#### 4.2 各種応答値と衝突速度との関係

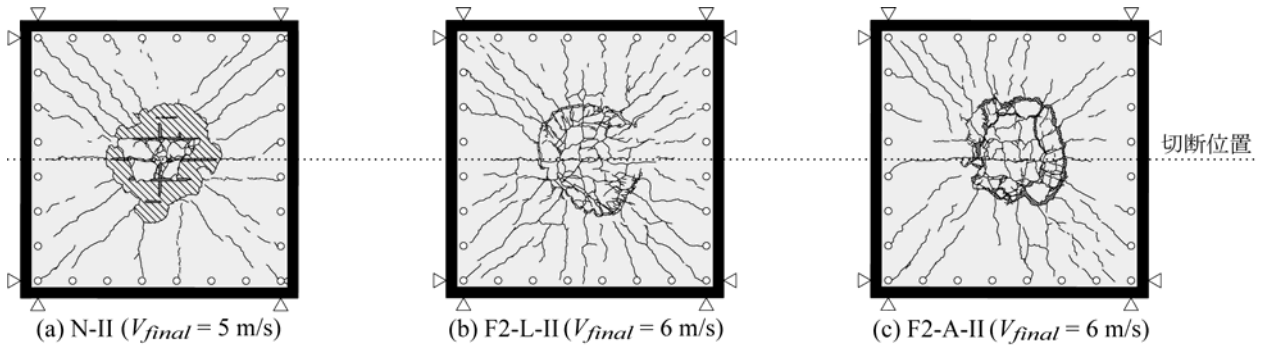
図-4に，各試験体の (a)最大重錘衝撃力  $P_{ud}$ ，(b)最大支点反力  $R_{ud}$ ，および (c)最大応答変位  $\delta_{ud}$  と衝突速度  $V$  との関係を示す。

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-II，F2-A-II 試験体は  $V_{final}=6$  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-II 試験体は， $V=5$  m/s において  $P_{ud}$  が増加し終局に至っている。これは，既往の研

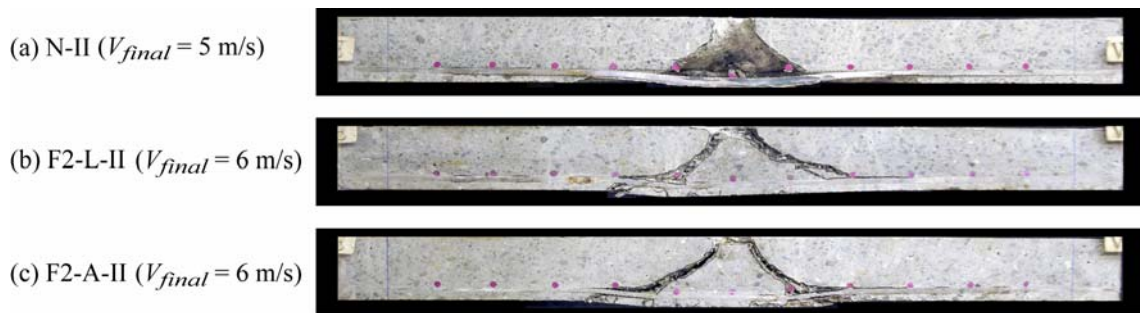
究<sup>4)</sup>における短繊維無混入試験体の結果と同様であり，RC 版が脆性的に破壊した場合の特徴と考えられる。

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-II，F2-A-II 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-II 試験体は増加したのに対して，F2-A-II 試験体は低下している。このことから，F2-A-II 試験体よりも F2-L-II 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。





図－5 衝撃実験終了後における RC 版裏面のひび割れ分布性状



図－6 衝撃実験終了後における中央部切断面のひび割れ分布性状

最大応答変位  $\delta_{ud}$  は、衝突速度  $V=4\text{ m/s}$  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、 $V=4\text{ m/s}$  まではいずれの試験体も弾性的な挙動を示していると考えられる。 $V=5\text{ m/s}$  において、N-II 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-II, F2-A-II 試験体では  $V=5\text{ m/s}$  までほぼ同様の挙動を示し、 $V=6\text{ m/s}$  において終局に至ったが、最大応答変位  $\delta_{ud}$  は F2-L-II 試験体の方が F2-A-II 試験体よりもいくぶん小さい。

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。

#### 4.3 ひび割れ分布性状

図－5に、衝撃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-II, F2-A-II 試験体の方が N-II 試験体よりも多数発生した。また、N-II 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-II, F2-A-II 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を示すものと考えられる。なお、F2-L-II 試験体と F2-A-II 試験体を比較すると、ひび割れの分散性は F2-L-II 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。以上のように、ひび割れ性状からも F2-L-II 試験体が

F2-A-II 試験体よりも健全であることがうかがわれる。

図－6に、衝撃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。いずれの試験体も荷重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、主鉄筋に沿った割裂ひび割れは N-II 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-II 試験体では荷重位置のコンクリートが圧壊しており、局部損傷によりエネルギーを吸収した可能性がある。なお、いずれの試験体においても打ち継ぎ面のひび割れや剥がれは認められなかった。

#### 4.4 静的、動的耐力および動的応答倍率

表－4に各試験体の静載荷実験および衝撃実験の結果を一覧にして示す。なお、動的耐力には、4.2 節の考察および既往の研究<sup>4),5)</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-II 試験体の結果で除した

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

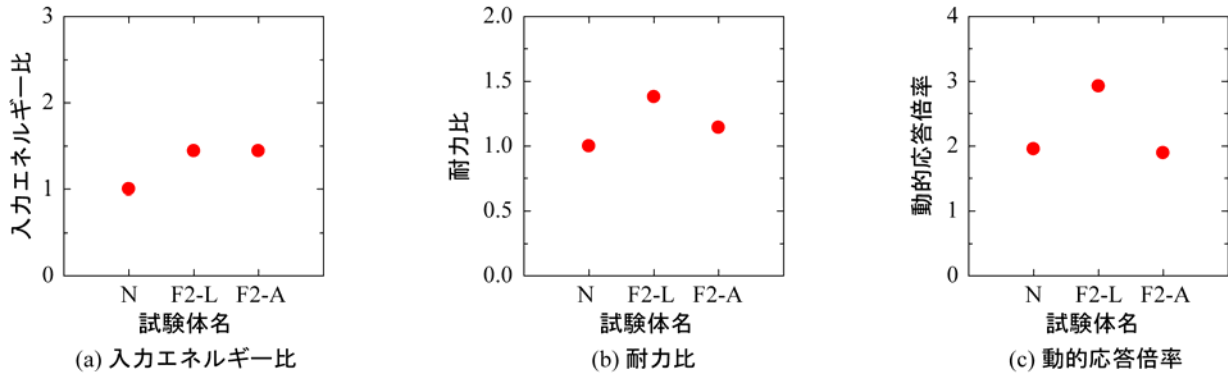


図-7 各試験体の入力エネルギー比，耐力比および動的応答倍率

ものである。

図-7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倍程度に向上することが分かる。図(b)より、耐力比はF2-L-II、F2-A-II試験体においてそれぞれ1.4、1.1倍程度に向上し、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-II、F2-L-II、F2-A-II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-II試験体の方がF2-A-II試験体よりも耐力比や動的応答倍率が大きいのは、荷重点周辺での局部損傷がF2-L-II試験体の方で顕著であることから、入力エネルギーが局部損傷によって吸収され、版への入力エネルギーが小さくなったためと考えられる。

### 5. 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版の静的耐荷性状および耐衝撃性状を4辺支持条件の下、静荷重実験および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短繊維を下断面のみに混入することによる静的押し抜きせん断耐力の増分は小さいもののエネルギー吸収量は無混入に比べて飛躍的に増加する。なお、

このエネルギー吸収性能は全断面に混入した場合と同程度である。

- 2) 動的押し抜きせん断耐力は、下断面のみに混入した場合で最も大きく、無混入の1.4倍程度にまで増大する。
- 3) 動的応答倍率は、下断面のみにPVA短繊維を混入した方が全断面に混入する場合よりも大きく曲げのモードがより卓越していることがうかがわれる。以上から、局部的に静的・衝撃荷重が作用するRC版部材の下断面のみにPVA短繊維を混入する方法は合理的であるものと考えられる。

### 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) 真嶋光保，幸左賢二，大野定俊：繊維補強セメント／コンクリート複合材料，技報堂出版，1994。
- 4) 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。
- 5) 岸徳光，三上浩，松岡健一，安藤智啓：静荷重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。