

## ビニロン短繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 梁の耐衝撃性に関する検討

Experimental study on impact resistant behavior of LW-RC beams mixed with vinylon short-fiber

竹本 伸一\*, 岸 徳光\*\*, 三上 浩\*\*\*, 栗橋 祐介\*\*\*\*

Sin-ichi TAKEMOTO, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Yusuke KURIHASHI

\*ドレーパー建設工業(株) 北海道本店 統括部長(〒060-0001 札幌市中央区北1条西6丁目)

\*\*工博 室蘭工業大学教授 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 室長(〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

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

キーワード: RC梁, 軽量コンクリート, ビニロン短繊維, 耐衝撃性

(RC beams, light-weight concrete, vinylon short-fiber, impact resistant behavior)

### 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<sup>1)</sup>, 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事が知られている。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)<sup>2)</sup>において義務づけられている。一方, コンクリートの靱性能を改善する対策として, 種々の短繊維を混入する方法が考えられている。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ているビニロン短繊維に着目した研究が盛んに行われている。著者らもビニロン短繊維を混入した普通コンクリートRC梁に関する静的・衝撃的載荷実験を行い, 短繊維の架橋効果によって梁のせん断耐力が飛躍的に向上することを明らかにしている<sup>3)</sup>。

このような普通コンクリートを用いる場合の検討結果から, 軽量コンクリートを用いる場合にも同様の手法を適用することによって部材の引張靱性やせん断耐力を向上させることが可能であるものと推察される。また, その効果は引張強度が普通コンク

リートよりも小さい軽量コンクリートにおいてより顕著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, 軽量コンクリートにビニロン短繊維を混入した場合の耐衝撃性向上効果を確認することを目的に, RC梁を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。

本実験では, 短繊維を混入しない場合にせん断破壊型で終局に至る断面を対象として, RC梁の耐衝撃性状に及ぼすビニロン短繊維の体積混入率(以後, 短繊維混入率 $V_f$ )の影響に着目して検討を行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 RC梁の形状寸法および静的設計値

表-1には, 本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体は短繊維混入率 $V_f$ を4種類( $V_f=0$ ,

表-1 試験体の一覧

試験体名	短繊維混入率 $V_f$ (vol, %)	衝突速度 $V$ (m/s)	計算せん断耐力 $V_{usc}$ (kN)	計算曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN)	せん断余裕度 $\alpha$
F0	0	1~4	82.5	144.8	0.57
F1	0.5	1~4	77.6	140.9	0.55
F2	1.0	1~7	82.5	144.3	0.57
F3	1.5	1~7	64.0	134.0	0.48

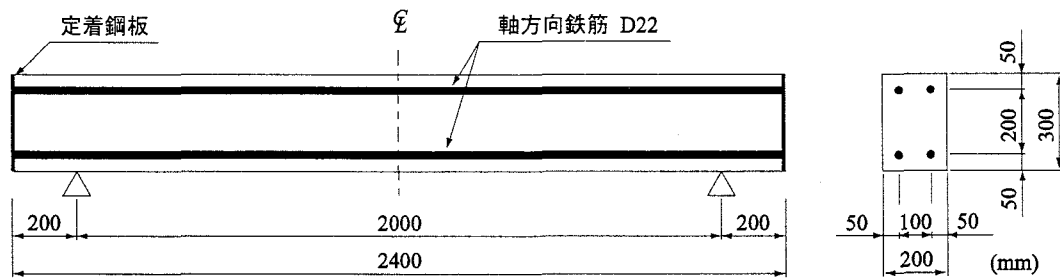


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

表-2 軽量コンクリートの配合

短繊維混入率 $V_f$ (vol. %)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				混和剤 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	高性能減水剤	AE剤	増粘剤		
0	48.7	45.0	152	312	836	481	2.000	0.811	0	18.5	5.4
0.5	48.7	53.0	165	339	954	398	3.940	0.678	0.0330	16.0	4.0
1.0	48.7	58.0	175	359	1018	348	3.375	0.718	0.0875	6.5	5.3
1.5	50.0	63.0	200	400	1043	289	6.000	14.400	0.2000	58 × 62*	8.4

G: 膨張頁岩人工軽量骨材

\*スランプフローを示す。

表-3 軽量コンクリートの力学的特性値

短繊維混入率 $V_f$ (vol. %)	圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$	比重
0	49.4	21.2	0.23	1.8
0.5	38.9	18.8	0.29	1.9
1.0	47.9	20.5	0.21	2.0
1.5	21.8	14.5	0.23	1.7

表-4 ビニロン短繊維の寸法と材料特性値

長さ $l$ (mm)	径 $d$ (mm)	アスペクト比 $l/d$	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)	比重
30	0.66	45	29.4	0.88	7.0	1.3

0.5, 1.0, 1.5%)に変化させた軽量コンクリートを用いたRC梁である。試験体名は短繊維混入率の少ない順にF0, F1, F2, F3として示している。表中のせん断余裕度 $\alpha$ は、計算曲げ耐力 $P_{usc}$ に対する計算せん断耐力 $V_{usc}$ の比として算出している。ここで、 $P_{usc}$ ,  $V_{usc}$ は後述する力学的特性値を用いて示方書に準拠し、

短繊維を混入しないRC梁として算定している。なお、各梁の $V_{usc}$ は、示方書に基づき普通コンクリートの場合の70%に低減して評価している。いずれの梁も $\alpha < 1.0$ であることより、設計的に静載荷時にはせん断破壊することが予想される。

図-1には、RC梁の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた試験体は、断面寸法(幅×高さ)が200×300mm、純スパン長が2mでせん断補強筋のない複鉄筋矩形RC梁である。軸方向鉄筋にはD22を用い、上下端に2本ずつ配置している。なお、軸方向鉄筋の降伏強度は402MPaであった。

表-2には、軽量コンクリートの配合一覧を示している。短繊維混入軽量コンクリートの配合は、 $V_f = 0\%$ の配合(スランプ18cm, 空気量5.5%程度)を基準に、各 $V_f$ に対して、材料分離がなくかつ十分なコンシステンシーが得られるような配合となるように調整した。なお、粗骨材には膨張頁岩を主成分とする人工軽量骨材<sup>4)</sup>を使用している。表-3には、各コンクリートの力学的特性値を示している。表より、 $V_f = 1.5\%$ の場合には圧縮強度が他のコンクリートの半分程度以下となっていることが分かる。これは、コンクリートの配合設計にあたり、 $V_f$ の

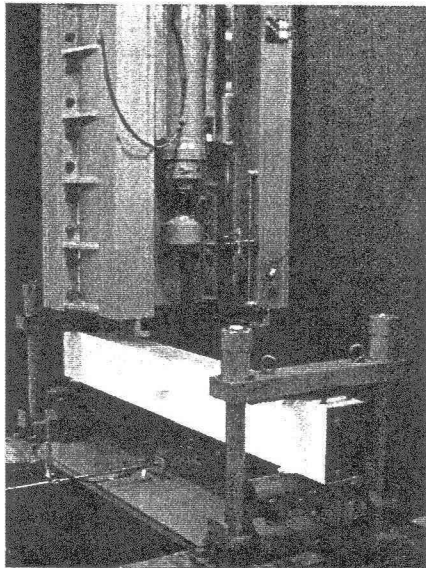


写真-1 実験状況

増加に伴って細骨材率  $s/a$  を大きくする必要があったことや、空気量が多くなったこと等によるものと考えられる。本研究では、このように大きな強度差がある条件下で比較検討を行うものとする。表-4には、本実験に用いたビニロン短繊維の寸法と材料特性値の一覧を示している。

## 2.2 実験方法

実験は、写真-1に示すように、跳ね上がり防止用治具付の支点治具上にRC梁を設置し、所定の高さから重錘をスパン中央部に自由落下させることにより実施している。なお、支点治具全体はRC梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。用いた重錘は質量が300kgで荷重点部の直径が150mmの円柱状鋼製重錘であり、その底部には衝突時の片当たりを防止するために高さ2mmのテーパが施されている。荷重方法は、単一荷重時において終局となる場合の最大入力エネルギーの特定が困難であることより、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漸増繰り返し荷重とした。なお、本実験における梁の終局は、梁側面にせん断破壊型に特有な明瞭なアーチ状のひび割れが発生し試験体が著しく損傷した場合、あるいは累積残留変位が純スパン長の2% (40mm) に達した時点を終局と定義<sup>5)</sup>し、この時点で実験を終了することとした。測定項目は、重錘衝撃力  $P$ 、合支点反力  $R$  (以後、支点反力) および荷重点変位  $\delta$  (以後、変位) 波形である。なお、これら

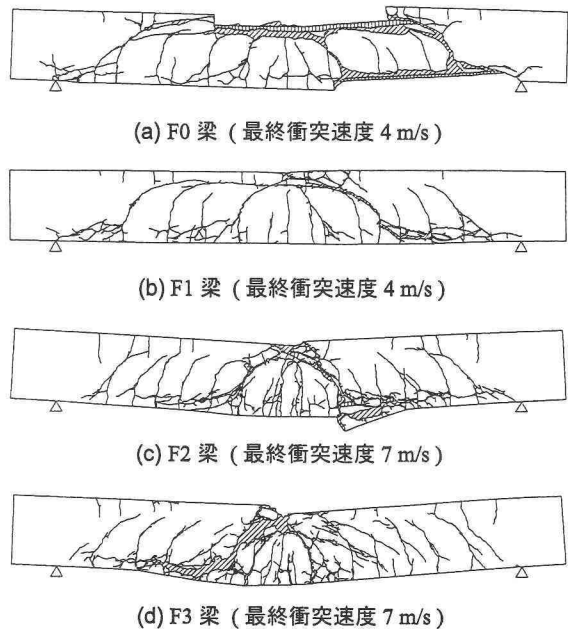


図-2 実験終了後におけるひび割れ分布性状

の測定方法は文献3)と同様である。また、実験終了後には、RC梁側面に生じ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。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ひび割れ分布性状

図-2には、各梁の実験終了後におけるひび割れ分布性状を示している。図より、F0梁の場合には右側スパンにおいてアーチ状のひび割れが大きく開口するとともに、上縁および下縁のかぶりコンクリートが広範囲にわたって剥落していることが分かる。F1梁の場合には、F0梁に見られたようなかぶりコンクリートの剥落は見られないものの、アーチ状のひび割れや割裂ひび割れが大きく開口していることが分かる。一方、F2/3梁の場合には、せん断補強筋が配筋されている場合と同様な曲げせん断ひび割れおよび下端鉄筋に沿う割裂ひび割れが見られ、最終的には荷重点近傍部において小さなアーチ状のひび割れが卓越し、曲げせん断的な破壊により終局に至っている。また、これらの試験体は最終衝突速度がF0/1梁の場合よりも大きくなっていることから、 $V_f$ の増大に伴って破壊モードが曲げせん断破壊型に移行し、耐衝撃性状が向上したものと考えられる。なお、最終衝突速度が  $V=4\text{ m/s}$  から  $V=7\text{ m/s}$  に増大していることから、入力エネルギーから見た耐衝

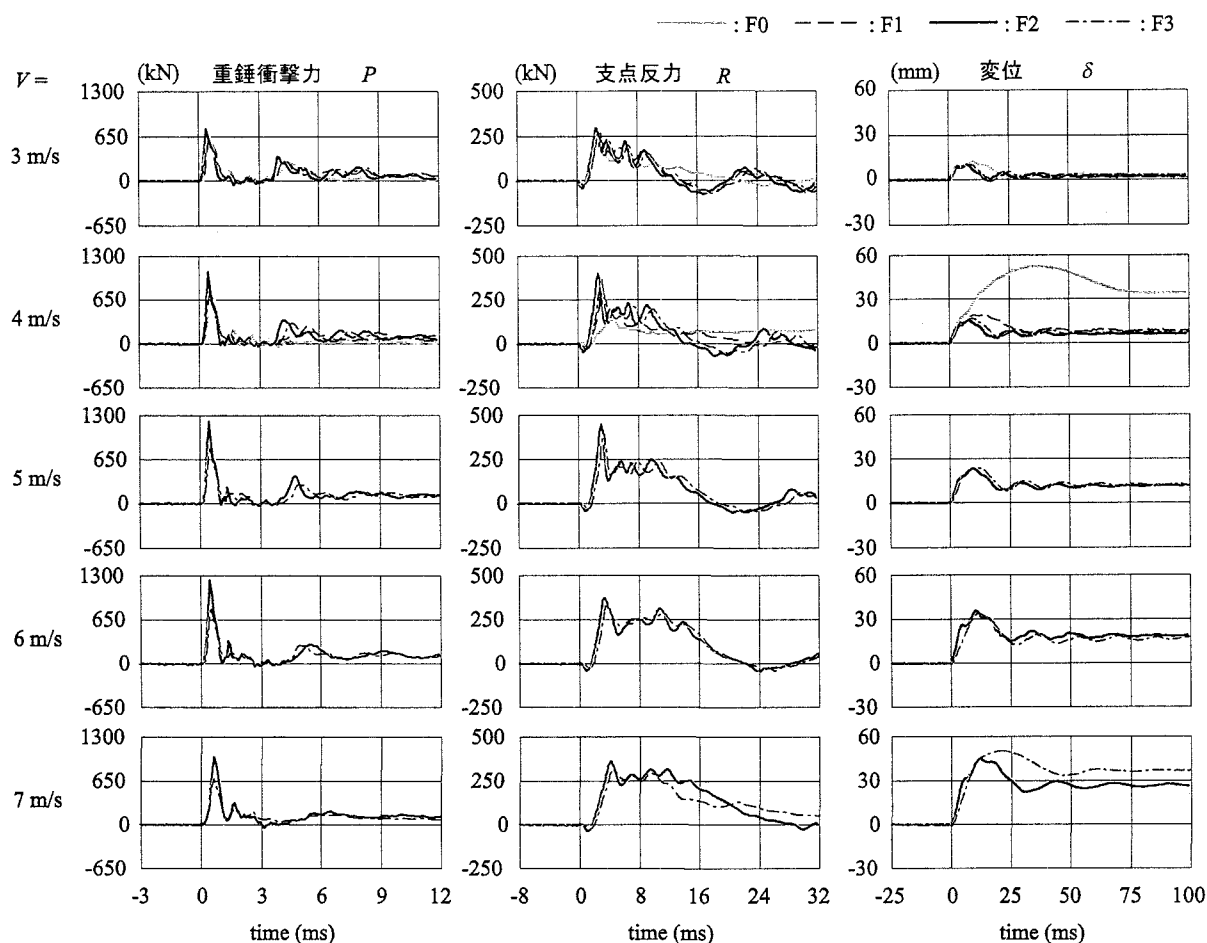


図-3 重錘衝撃力，支点反力および変位波形

撃性は3倍程度以上に向上したと言える。

以上のことより，短繊維の混入によりコンクリートの剥落やひび割れの開口が抑制され，また短繊維混入率を増加することにより，RC梁の破壊形式がせん断破壊型から曲げせん断破壊型に移行することが明らかになった。

### 3.2 重錘衝撃力，支点反力および変位波形

図-3には，各梁の重錘衝撃力 $P$ ，支点反力 $R$ および変位 $\delta$ に関する各応答波形を $V=3\text{ m/s}$ 以降について示している。なお，時間軸は重錘衝撃力が励起した時刻を $0\text{ ms}$ として整理している。

重錘衝撃力波形 $P$ は，衝撃初期の振幅が大きく周期の短い第1波とその後の振幅が小さく周期の長い第2波から構成されている。また，第2波目の波形性状を見ると，いずれの梁も最終衝突速度時には，それ以前の衝突時における性状と異なり，振幅がさらに小さく，かつ周期がさらに長くなっているこ

とが分かる。これは，第1波目における衝突衝撃によってRC梁が既に著しい損傷を受けて剛性が低下し終局に近い状態となったことによるものと考えられる。

支点反力波形 $R$ は，各梁とも最終衝突速度時まで継続時間が $10\sim 30\text{ ms}$ 程度の三角形波と周期が $3\text{ ms}$ 程度の波形が合成された波形分布を示している。F0梁の最終衝突速度( $V=4\text{ m/s}$ )時には， $V=3\text{ m/s}$ 時の値の $1/2$ 程度の値となっており著しい損傷を受けていることが分かる。F1梁の最終衝突速度( $V=4\text{ m/s}$ )では，F2/3梁よりも継続時間が長くなっていることから，この時点で塑性化が著しく進行していることが分かる。F2/3梁の最終衝突速度( $V=7\text{ m/s}$ )における波形性状は， $V=6\text{ m/s}$ の場合とほぼ同様であることより，これらのRC梁は未だ脆性的な破壊には至っていないことが分かる。

変位波形 $\delta$ は，各梁とも最終衝突速度以前では減

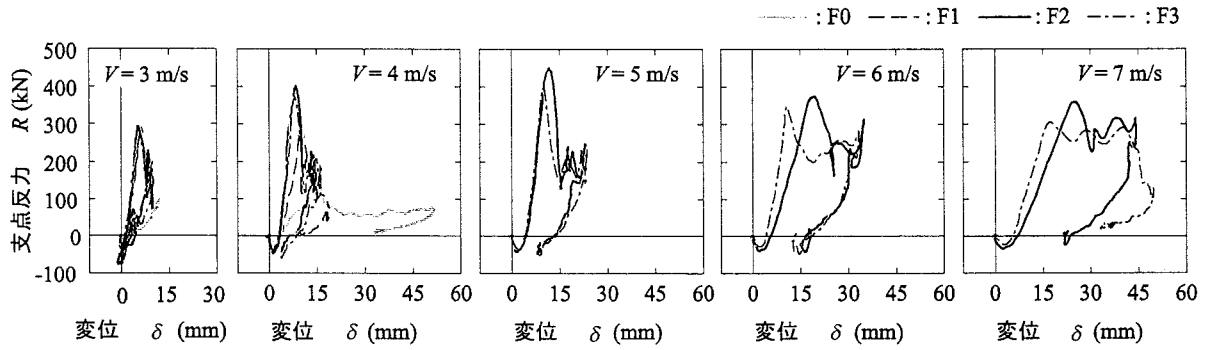


図-4 支点反力-変位履歴曲線

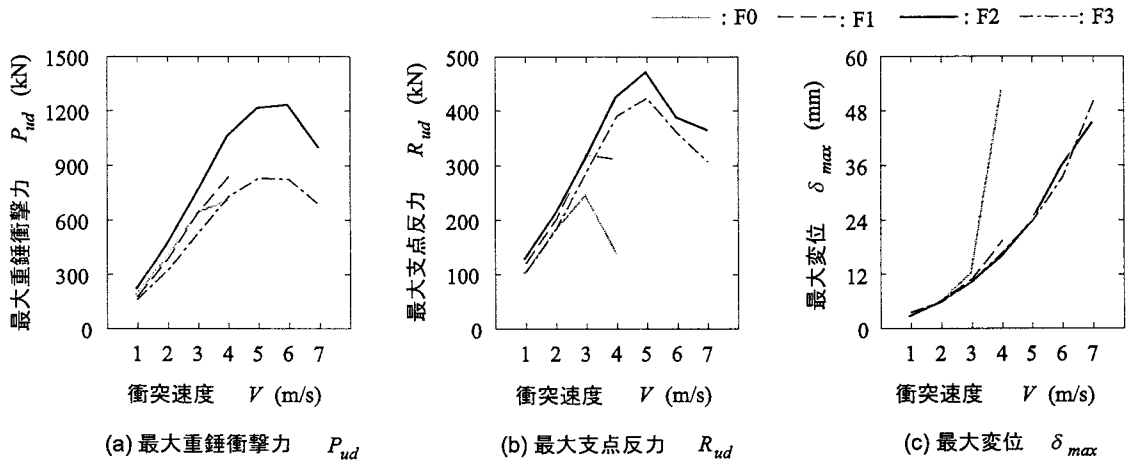


図-5 各種応答値

衰振動的な性状を示し、振幅は衝突速度  $V$  の増大に伴って増加する傾向を示している。  $V=4\text{ m/s}$  では、F0 梁において応答変位、残留変位が急激に増大していることから、脆性的な破壊により終局に至っていることが分かる。また、F1 梁は F2/3 梁に比べて周期が長くなっていることから、塑性化が進行していることが分かる。一方、F2/3 梁の場合には、衝突速度の増加とともに残留変位が増加する傾向にあるものの、最終載荷時においても未だ減衰自由振動状態を示していることより、F0/1 梁に比較して曲げ変形が卓越する状況にあることが確認できる。このことから、短繊維混入率の増大によって脆性的な破壊が抑制され、靱性に富んだ曲げ変形が卓越する挙動性状に移行していることが分かる。

### 3.3 支点反力-変位履歴曲線

図-4 には、  $V=3\text{ m/s}$  以降における、各梁の支点反力  $R$  - 変位  $\delta$  履歴曲線を示している。図より、

$V=3\text{ m/s}$  の場合には、F0 梁で多少塑性化の傾向が見られるものの、いずれの梁も弾性に近い挙動を示していることが分かる。

$V=4\text{ m/s}$  の場合には、F0 梁は最大支点反力到達後、除荷とともに変位が急増していることから脆性的な破壊性状を示していることが分かる。また、F1 梁は F0 梁の場合ほど顕著ではないものの、除荷時に変位が増大していることより塑性化が進行していることが分かる。一方、F2/3 梁の場合には、弾性に近い挙動を示している。  $V=5\text{ m/s}$  以降の場合には、F2/3 梁は三角形の分布から徐々に吸収エネルギーの大きい平行四辺形状の波形分布に移行する傾向にあることが分かる。ひび割れ分布からは、曲げせん断破壊的な性状を示していたが、履歴曲線からは曲げ破壊型特有の分布性状を示していることが分かる。

以上のことより、  $V_f$  を増加させることにより終局に至る衝突速度も増加し、かつ破壊性状がせん断破

壊型から曲げ破壊型に移行して、曲げ破壊型の RC 梁に特有なエネルギー吸収能が大きい平行四辺形状の履歴曲線を示す傾向にあることが明らかになった。

### 3.4 各種応答値の比較

図-5には、最大重錘衝撃力  $P_{ud}$ 、最大支点反力  $R_{ud}$  および最大応答変位  $\delta_{max}$  と衝突速度  $V$  との関係を示している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  は、各梁とも  $V=3$  m/s までは線形的に増大していることが分かる。また、F0 梁では  $V=4$  m/s における増分が小さくなっている。これは、梁上部のコンクリートが著しく損傷したことによるものと考えられる。これに対して、F1 梁の場合には  $V=4$  m/s においても  $P_{ud}$  は線形的に増大している。このことは、図-2からも明らかであるように、F1 梁は最終衝突速度時においても載荷点部の損傷が軽微であることと対応している。一方、F2/3 梁では  $V=5\sim 6$  m/s までは  $P_{ud}$  が増大しているものの、 $V=7$  m/s では大きく低下していることが分かる。これは両梁ともに載荷点部のコンクリートが著しい損傷を受けたことによるものと推察される。なお、F3 梁は他の梁に比べて同一速度における重錘衝撃力が小さい。これは、F3 梁のコンクリートの圧縮強度や弾性係数が他の梁に比べて小さいことによるものと考えられる。

(b) 図より、最大支点反力  $R_{ud}$  は最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  と同様に、 $V=3$  m/s までは線形的に増大していることが分かる。その後、F0/1 梁の場合ともに  $V=4$  m/s において  $R_{ud}$  が低下している。ただし、F1 梁の減少割合は F0 梁のそれよりも小さい。これは、F1 梁の破壊性状が F0 梁に比べて脆性的でないことを示している。一方、F2/3 梁は  $V=6$  m/s で  $R_{ud}$  が急激に低下していることが分かる。これは、 $V=5$  m/s で斜めひび割れが若干開口したことを確認していることから、このひび割れの開口に起因して低下したものと推察される。

(c) 図より、最大応答変位  $\delta_{max}$  は  $V=3$  m/s までは短繊維混入率にかかわらず、ほぼ同様の値を示していることが分かる。 $V=4$  m/s では、F0 梁の  $\delta_{max}$  が急激に増大している。また、F1 梁の  $\delta_{max}$  の増加割合が多少大きくなっている。F2/3 梁の場合には F1

梁よりも  $\delta_{max}$  が小さく、 $V=5$  m/s 以降も両試験体ともに 2 次放物線状の増加傾向を示している。

以上から、短繊維混入率の増大により脆性的な破壊が抑制されること、最大支点反力は F2 梁で最も大きいこと、F2/3 梁の応答変位は曲げ変形が卓越するため急激には増大しないこと、等が明らかになった。

### 4. まとめ

本研究では、ビニロン短繊維の混入による軽量コンクリート RC 部材の耐衝撃性能向上効果を検討することを目的として、ビニロン短繊維を混入しない場合にせん断破壊型で終局に至る RC 梁を対象として、ビニロン短繊維を混入した軽量コンクリート RC 梁の重錘落下衝撃実験を行った。本研究で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) ビニロン短繊維を混入することにより、コンクリートの剥落やひび割れの開口を抑制することができる。
- 2) 短繊維混入率を 1.0~1.5% とすることで RC 梁のせん断耐力を飛躍的に向上させることができ、破壊形式をせん断破壊型から曲げせん断破壊型に移行させることができる。

### 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) コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 構造性能照査編, 土木学会, 2002
- 3) 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, 2004.3
- 4) 人工軽量骨材アサノライト, 太平洋マテリアル(株)
- 5) 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考案, 土木学会論文集, No647/I-51, 177-190, 2000.4