

論文 ビニロン短繊維混入軽量コンクリートを用いた RC 梁の繰り返し衝撃載荷実験

竹本 伸一*1・岸 徳光*2・三上 浩*3・栗橋 祐介*4

要旨: 本研究では、割裂に対して脆弱性を示す軽量コンクリートを用いた RC 梁の耐衝撃性能を向上させることを目的に、ビニロン短繊維を混入した場合の軽量コンクリート RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施した。本研究により、1) ビニロン短繊維を混入することによって軽量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こと、2) 短繊維混入率を 1.5 % 程度まで増大することにより、RC 梁の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こと、等が明らかとなった。

キーワード: RC 梁, 軽量コンクリート, ビニロン短繊維, 重錘落下衝撃実験, 耐衝撃性

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¹⁾、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ことが知られている。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)²⁾ において義務づけられている。一方、コンクリートの靱性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³⁾。

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

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 α
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

*1 ドーピー建設工業 (株) 北海道本店設計部部長 (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術研究所主席研究員 博 (工) (正会員)

*4 北海道開発土木研究所材料研究室研究員 博 (工) (正会員)

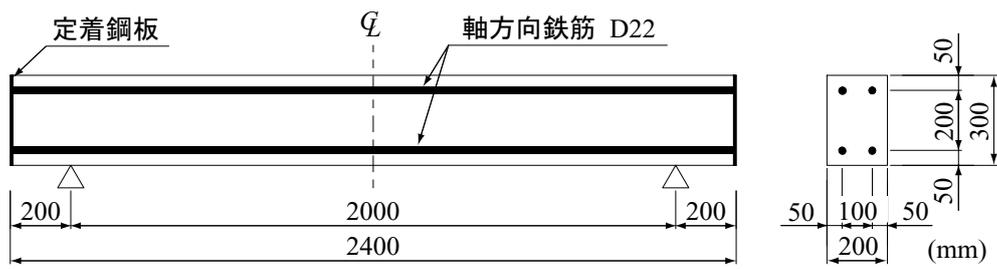


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

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 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/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 ν_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

検討を行っている。

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 ($V_f = 0, 0.5, 1.0, 1.5\%$) 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 と示している。表中のせん断余裕度 α 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} は後述に示す力学的特性値を用いて示方書に準拠し、短繊維を混入していない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、上下方向に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人工軽量骨材⁴⁾を使用してい

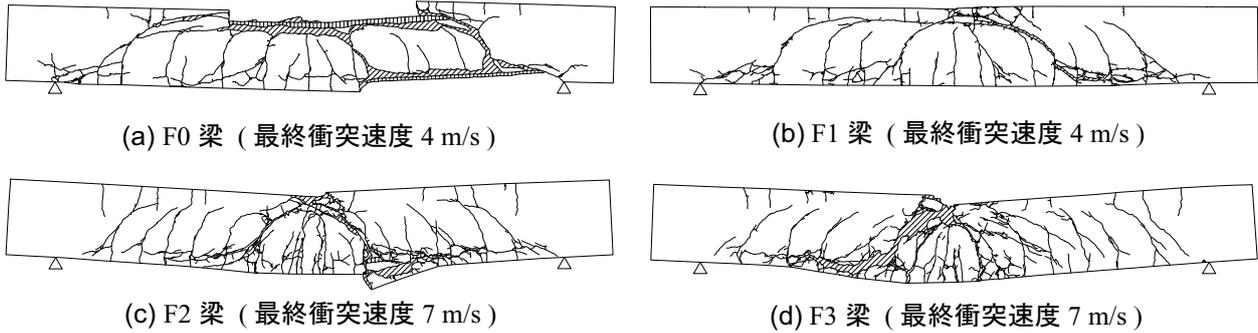


図-2 実験終了後におけるひび割れ分布性状

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、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

衝撃実験は、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 300 kg で荷重点部の直径が 150 mm 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 2 mm のテーパが施されている。荷重方法は、単一荷重時における終局となる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 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% (40 mm) に達した時点を終局と定義⁵⁾ し実験を終了している。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 δ (以後、変位) 波形である。なお、これらの測定方法は文献 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

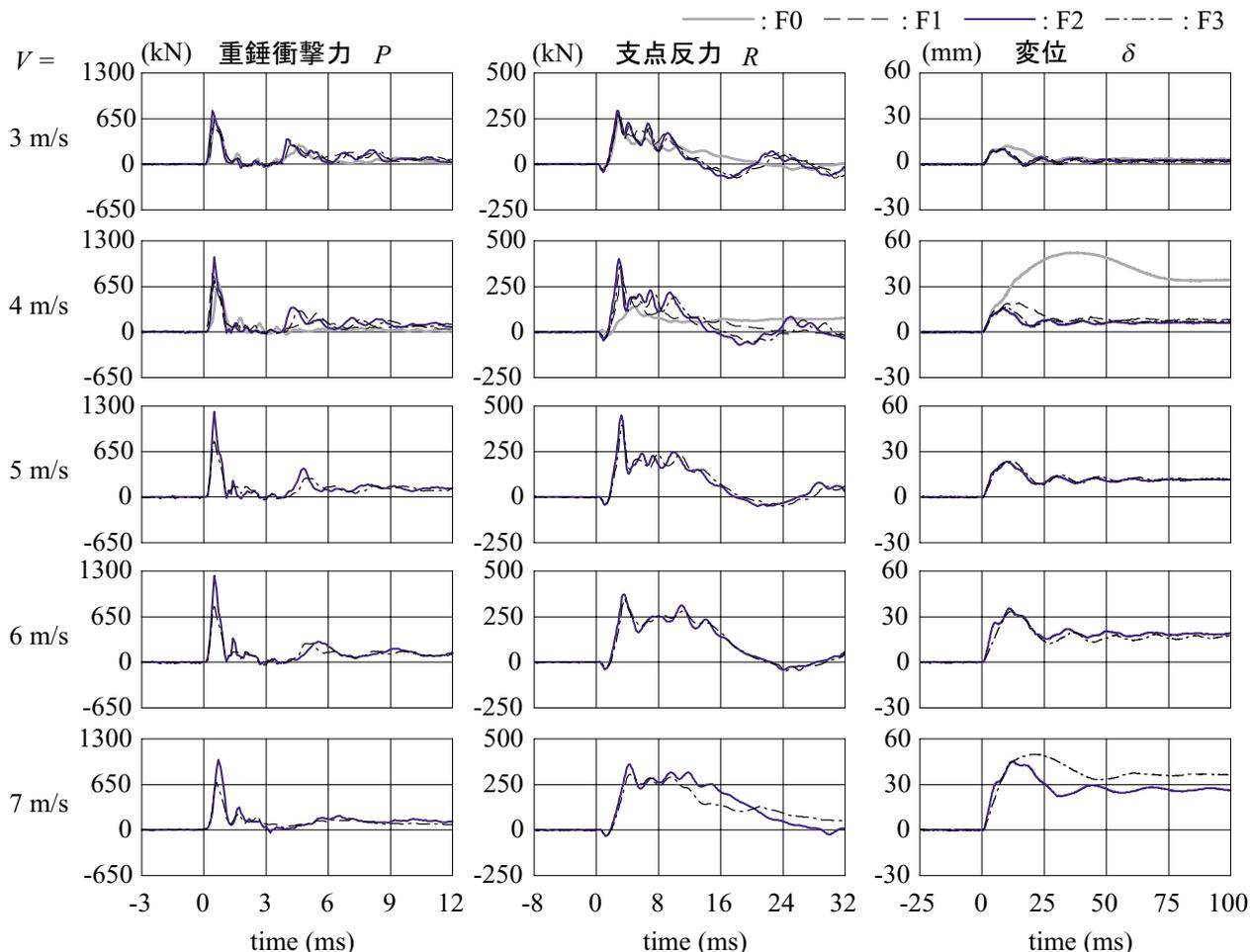


図-3 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

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 δ 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 ms として整理した。

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 ms 程度の波形が合成した波形を示している。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、脆性的な破壊には至っていないことが分かる。

変位波形 δ は、各梁とも最終衝突速度以前では減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

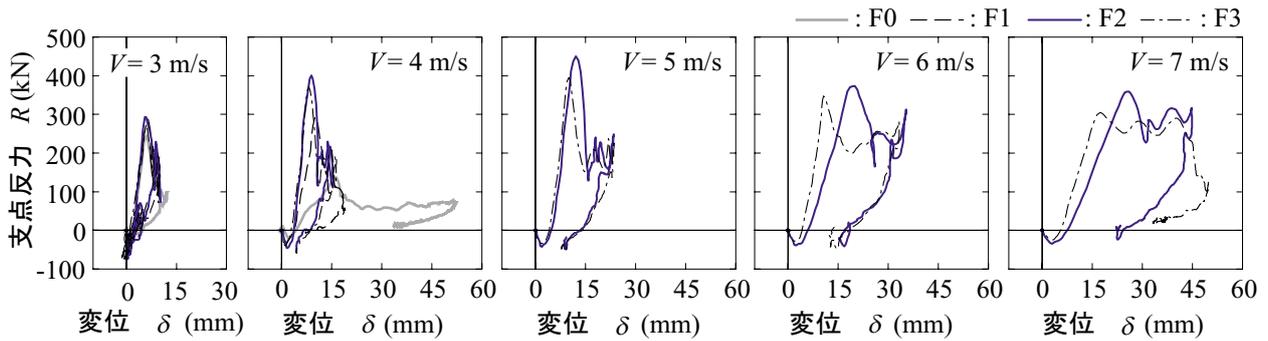


図-4 支点反力-変位履歴曲線

= 4 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大きく示される傾向にあるものの、最終载荷時においても未だ減衰自由振動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破壊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、 $V = 3 \text{ m/s}$ 以降についての、各梁の支点反力 (R) - 変位 (δ) 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時の衝突速度も増加し、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 δ_{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 $V = 3 \text{ m/s}$ 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 $V = 4 \text{ m/s}$ 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、F1 梁の場合には $V = 4 \text{ m/s}$ 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 から分かるように、F1 梁は最終衝突速度時においても载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 $V = 5 \sim 6 \text{ m/s}$ までは P_{ud} が増大しているものの、 $V = 7 \text{ m/s}$ では大きく低下していることが分かる。これは両梁ともに载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

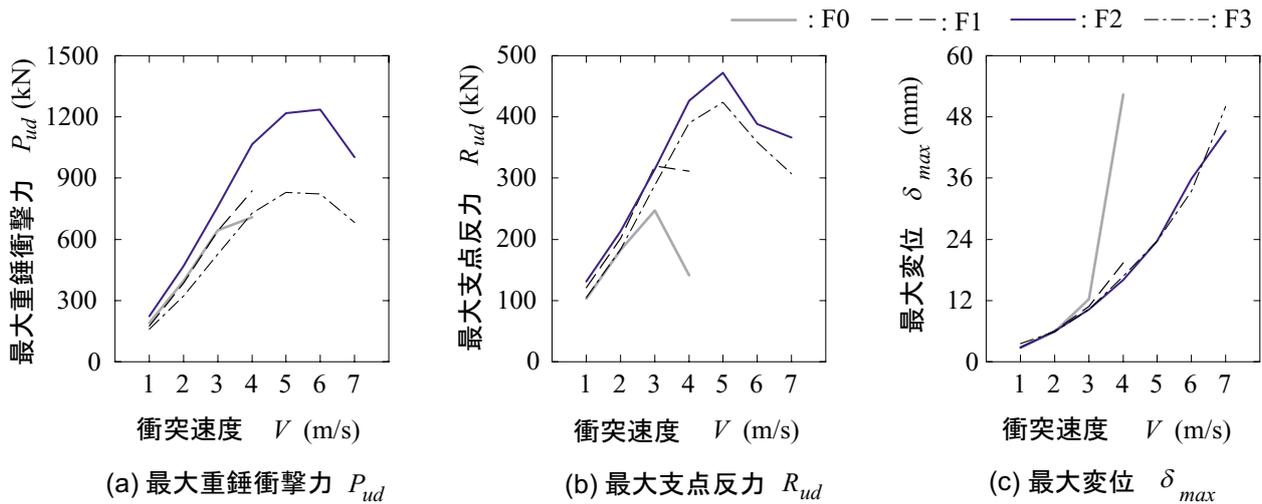


図-5 各種応答値

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 梁の低下割合は 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 δ_{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 δ_{max} が急激に増大している。また、F1 梁の δ_{max} の増加割合も多少大きくなっている。F2/3 梁の場合には F1 梁よりも δ_{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