

## ビニロン短繊維混入軽量コンクリート RC 梁の耐衝撃性状

Impact resistant behavior of LW-RC beams mixed with Vinylon short-fiber

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
三井住友建設 (株)	フェロー	三上 浩	(Hiroshi Mikami)
ドーピー建設工業 (株)	正員	竹本伸一	(Shin-ichi Takemoto)
北海道開発土木研究所	正員	田口史雄	(Fumio Taguchi)
室蘭工業大学	○ 学生員	津田裕介	(Yusuke Tsuda)

### 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、一部で実用化されている。特に、最近では混和剤等の材料開発の進歩に伴い、施工性および耐久性に優れた軽量コンクリートの開発が進められている。しかしながら、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。また、このことは、壁高欄等の衝撃的外力を受けるRC構造物に対して軽量コンクリートを適用することを躊躇させる要因の一つとなっている。一方、コンクリートの引張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たビニロン短繊維に着目した研究が盛んに行われている。

このような背景より、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の検討を目的として、ビニロン短繊維混入軽量コンクリートRC梁の重錘落下衝撃実験を行った。本実験では、軽量コンクリートを用いたせん断破壊型の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

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20×30cm。純スパン長が2mの複鉄筋矩形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-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、 $P_{usc}$ 、 $V_{usc}$ は後述の表-3に示す材料特性値を用いて土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>（以後、示方書）に準拠して算出しており、短繊維を混入していない軽量コンクリートRC梁と同様の方法で算定している。なお、各梁の $V_{usc}$ は、示方書<sup>1)</sup>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。せん断余裕度 $\alpha$ は、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。

表-2には、軽量コンクリートの配合一覧を示している。各短繊維混入軽量コンクリートの配合は、短繊維無混入の軽量コンクリート配合（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。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調整にあたり $V_f$ 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や、所用のコンシステンシーを得るために水セメント比 $W/C$ を大きくしたことによるものと考え

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	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	84.03	144.84	0.58
F1	0.5	1~4	77.62	140.92	0.55
F2	1.0	1~7	83.19	144.26	0.58
F3	1.5	1~7	64.00	133.97	0.48

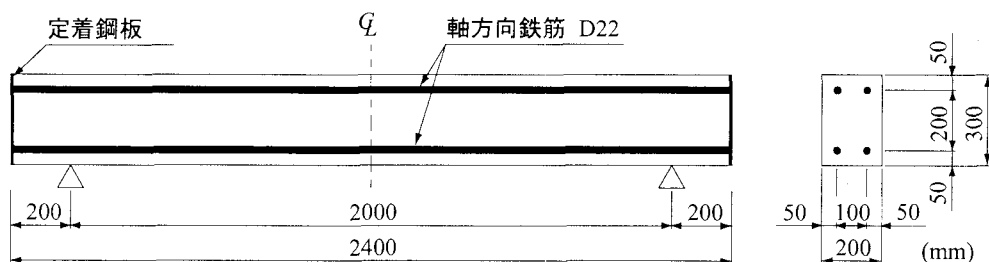


図-1 RC梁の形状寸法および配筋状況

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 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )			スランブ (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	33	16.0	4.0
1.0	48.7	58.0	175	359	1018	348	3.375	0.718	87.5	6.5	5.3
1.5	50.0	63.0	200	400	1043	289	6.000	14.400	200	58×62*	8.4

\*スランブフローを示す。

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)	破断歪 (%)
30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

られる。表-4には、本実験に用いたビニロン短繊維の寸法および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、リバウンド防止用治具付の支点治具上に設置したRC梁のスパン中央部に、所定の高さから重錘を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高さ2 mmのテーパが施されている。

荷重方法は、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荷重法とした。なお、本実験では、梁側面に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)および荷点変位 $\delta$  (以後、変位)波形である。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、梁中央部から両支点側に進展する斜めひび割れおよび下端鉄筋に沿った割裂ひび割れが見られるもの

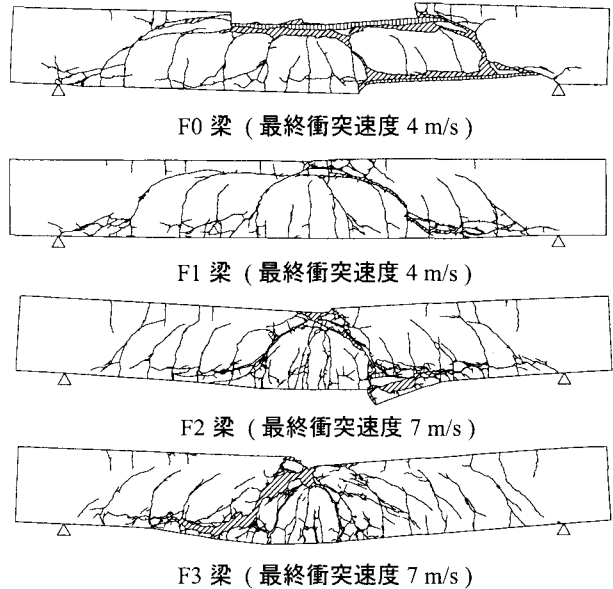


図-2 実験終了後におけるひび割れ分布性状

の、曲げ変形が卓越する形で終局に至っている。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 $V=4$  m/sから $V=7$  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 $V=3$  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、いずれの梁も最終荷重時には、それ以前の性状と異なり、振幅がさらに小さく、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著しい損傷を受け剛性が低下し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10~30 ms程度の三角形波と周期が3 ms程度の波形が合成された波形を示している。F0/1梁の最終衝突速度 ( $V=4$  m/s) では、F2/3梁よりも継続時間が長

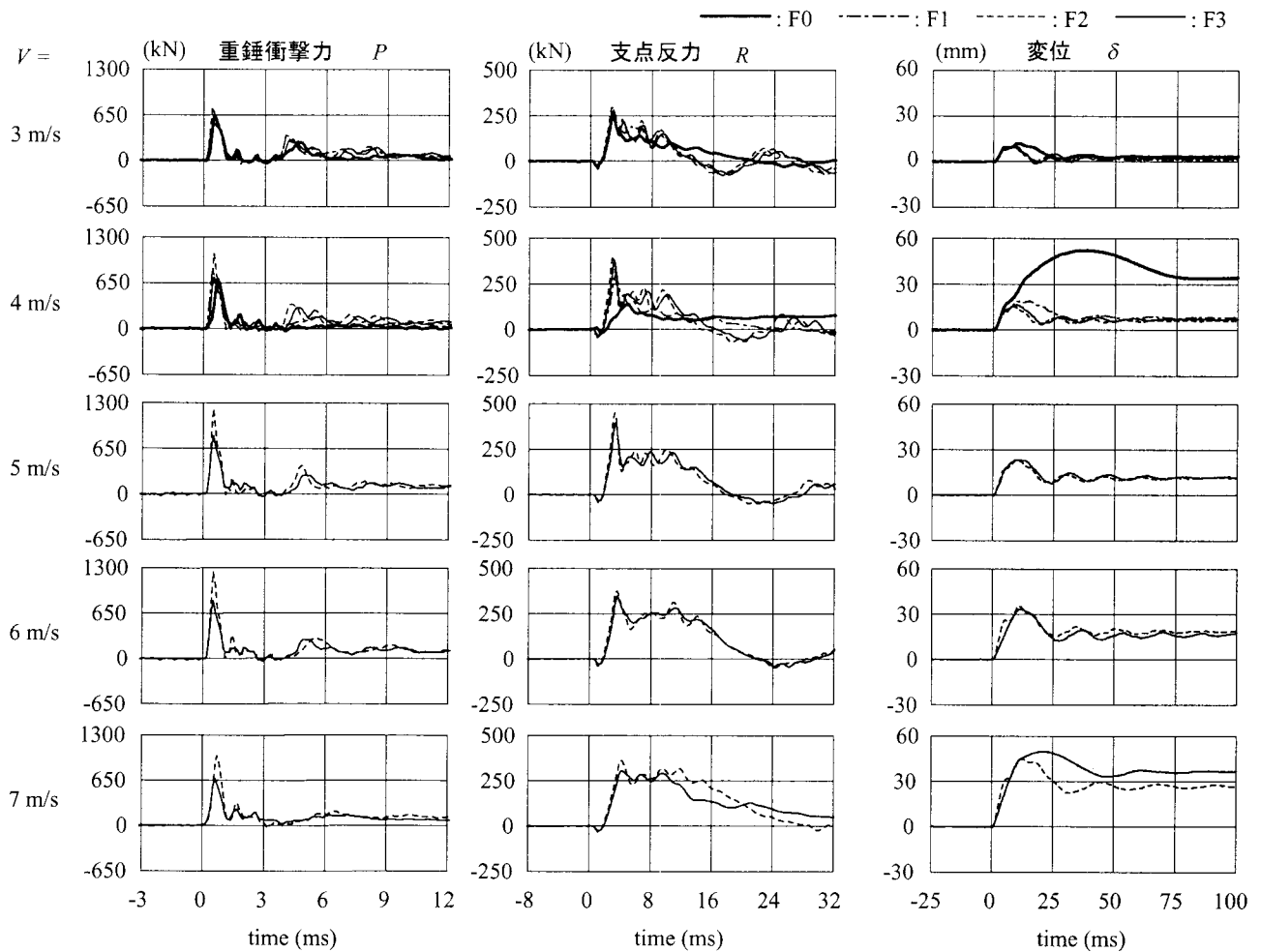


図-3 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

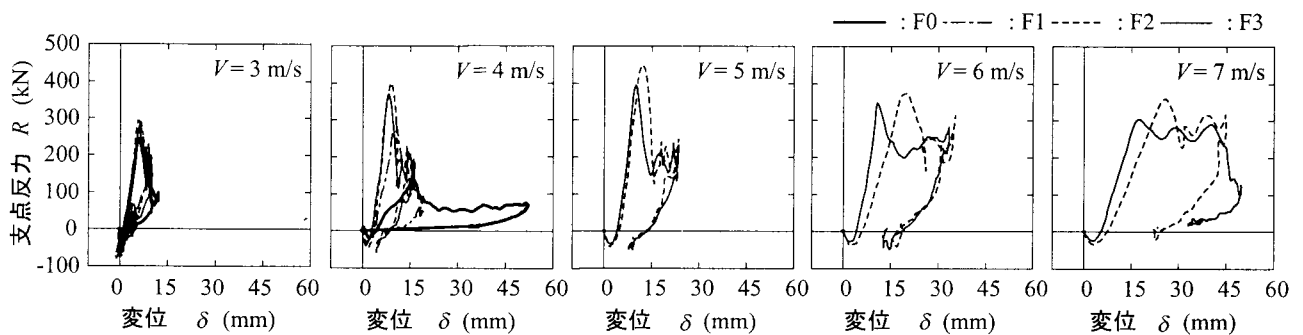


図-4 支点反力-変位履歴曲線

くなっていることから、この時点で塑性化が進行していることが分かる。F2/3梁の最終衝突速度 ( $V=7\text{ m/s}$ ) における波形形状は、 $V=6\text{ m/s}$  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  $\delta$  を見ると、各梁とも最終衝突速度以前では減衰振動状態を示し、振幅は衝突速度  $V$  の増大に伴って増加する傾向にあることがわかる。 $V=4\text{ m/s}$  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梁に比べて周期が大き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、最終載荷時に

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分かる。このことから、短繊維混入率の増大により脆性的な破壊が抑制され、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、各梁の支点反力 ( $R$ ) - 変位 ( $\delta$ ) 履歴曲線を  $V=3\text{ m/s}$  以降について示している。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

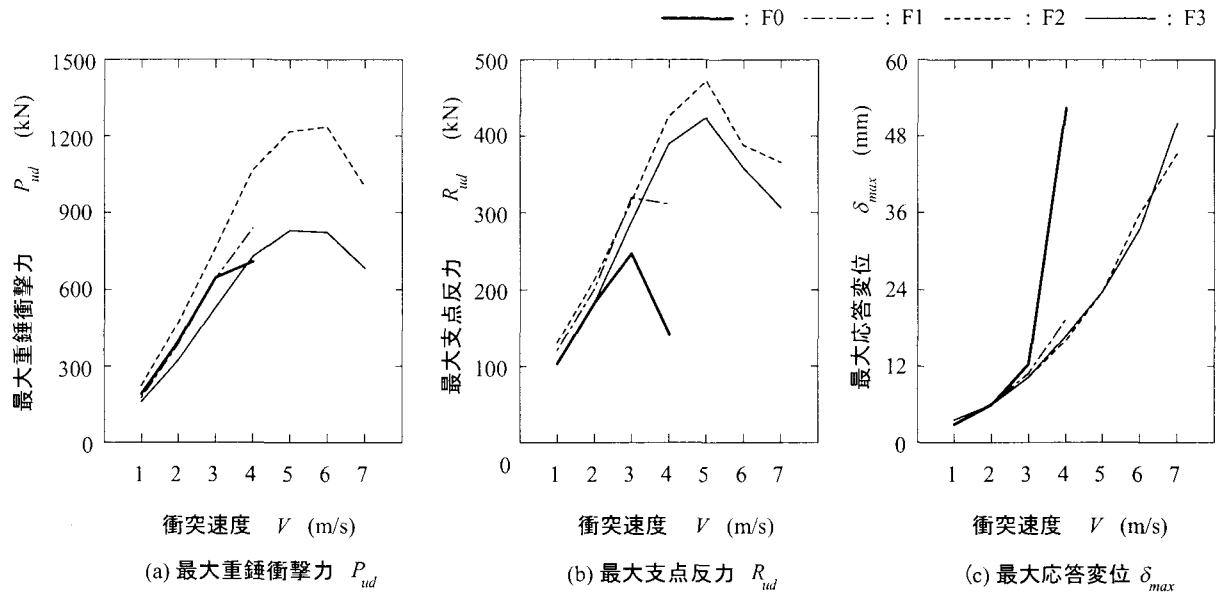


図-5 各種応答値

場合ほど顕著ではないものの、除荷に伴い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、 $V=4$  m/sまでは弾性的な挙動を示しているものの、 $V=5$  m/s以降で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わかる。

以上のことより、 $V_f$ を増加させることにより破壊性状が曲げ破壊型に移行し、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波形分布を示す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、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から分かるように、F1梁は最終衝突速度時においても載荷部の損傷が軽微であることと対応している。一方、F2、F3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梁の場合とはともに $V=4$  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。実験時には、 $V=5$  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より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 $\delta_{max}$ の増加割合も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、動的耐力である支点反力は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、が明らかになった。

なお、F3梁の重錘衝撃力や支点反力がF2梁よりも小さいのは、F3梁のコンクリートの圧縮強度および弾性係数がF2梁に比べて小さいためと考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、ピ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の検討を目的として、ピニロン短繊維混入軽量コンクリート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) ピ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破壊型に移行させることができる。
- 3) ピニロン短繊維を1.0%混入することにより、軽量コンクリートRC梁の衝撃吸収エネルギーは3倍程度増大する。

### 参考文献

- 1) 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.