



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



## 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

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 土木学会 公開日: 2012-03-16 キーワード (Ja): RC梁, ビニロン短繊維, 衝撃荷重載荷実験, 耐衝撃性 キーワード (En): RC beam, Vinylon short-fiber, impact loading test, impact resistant capacity 作成者: 岸, 徳光, 田口, 史雄, 三上, 浩, 栗橋, 祐介 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/892">http://hdl.handle.net/10258/892</a>

## 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

その他（別言語等）のタイトル	Upgrading effects of impact resistant capacity for RC beams due to mixing Vinylon short-fiber
著者	岸 徳光, 田口 史雄, 三上 浩, 栗橋 祐介
雑誌名	構造工学論文集. A
巻	50
ページ	1337-1348
発行年	2004-03
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/892">http://hdl.handle.net/10258/892</a>

## 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

Upgrading effects of impact resistant capacity for RC beams due to mixing Vinylon short-fiber

岸 徳光\*, 田口史雄\*\*, 三上 浩\*\*\*, 栗橋祐介\*\*\*\*

Norimitsu Kishi, Fumio Taguchi, Hiroshi Mikami and Yusuke Kurihashi

\*工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

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

\*\*\*博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

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

In order to investigate the upgrading effects of impact resistant capacity for shear failure type RC beams due to mixing Vinylon short-fiber, static and falling-weight impact tests were conducted taking a mixed fiber ratio  $V_f$  in volume as variable. Here, the impact test was conducted using a 300 kg steel weight and following iterative loading method with 1 m/s initial and incremental impact velocity of steel weight. The results obtained from this study are as follows; 1) the larger the  $V_f$  ratio, the greater the static and impact resistant capacity due to bridge effects of the short-fiber; 2) when the mixed fiber ratio  $V_f$  was increased by 1, 2, and 3 %, impact resistant capacity of the RC beam was improved by 1.7, 2.3, and 3.1 times with reference to that of normal RC beam, respectively; 3) failure mode of the RC beams was shifted from shear failure type to flexural failure type due to increasing in mixed fiber ratio  $V_f$  of the short-fiber.

**Key Words :** RC beam, Vinylon short-fiber, impact loading test, impact resistant capacity

キーワード：RC 梁, ビニロン短繊維, 衝撃荷重載荷実験, 耐衝撃性

## 1. はじめに

衝撃的外力に対して高い安全性が要求される鉄筋コンクリート (RC) 構造物には, 原子力発電関連施設の他, 道路落石防護施設や砂防ダムなどがある。これまで, このような耐衝撃用途 RC 構造物の安全性を向上させるために, 諸研究機関において種々の耐衝撃性に着目した実験的・解析的研究が進められている<sup>1)~4)</sup>。一方で, コンクリートのひび割れ発生後の引張靱性を向上させるために, 種々の短繊維を混入した場合の研究も進められている。これまで, 鋼繊維を混入した場合の研究が主に実施されており, 土木学会からは「鋼繊維補強コンクリートを用いた RC 柱部材の設計手法 (案)<sup>5)</sup>」が出版されている。

しかしながら, 鋼繊維を用いる場合には, 1) 構造物表面に錆が発生すること, 2) 重量が大きいため運搬・混入等の作業が容易ではない場合があること, 等が検討課題として残されている。そのため, 最近では軽量でかつ耐食性に優れている合成繊維を用いた研究が盛んに行われている。特に, ビニロン繊維は, 親水性がありセメントマトリクスとの付着性に優れていることから, ビニロン短繊維を混入したモルタルやコンクリートに関する研究が盛んに行われている<sup>6)~8)</sup>。著者

等も, ビニロン短繊維を混入した RC 梁および RC 版の静載荷実験を実施し, ビニロン短繊維の混入により, RC 部材の曲げおよびせん断耐力が向上することなどを明らかにしている<sup>9),10)</sup>。

一方, 短繊維を混入した RC 部材の耐衝撃性に関する研究としては, 鈴木らによる鋼繊維混入 RC/PC 梁の実験研究がある<sup>11)</sup>。しかしながら, 鈴木らは鋼繊維混入による RC/PC 梁の耐衝撃性向上効果は明らかにしているものの, 耐衝撃性や破壊性状に及ぼす短繊維混入率の影響については検討していない。また, ビニロン短繊維等の合成繊維を混入した RC 部材の耐衝撃性に関する研究事例は極めて少ないのが現状である。

このような観点から, 本研究では合成繊維の中でも親水性があるビニロン短繊維に限定し, RC 梁に混入した場合の静的および衝撃耐荷性状を明らかにすることを目的として, 普通コンクリートおよび短繊維の体積混入率 (以後, 短繊維混入率  $V_f$ ) を 3 種類に変化させた短繊維混入コンクリートを用いた RC 梁の静載荷および衝撃荷重載荷実験を行った。本実験では, 普通コンクリート使用時にせん断破壊する RC 梁を対象として, RC 梁の耐荷性状や耐衝撃挙動および破壊性状に及ぼす載荷方法および短繊維混入率の影響について検討を行っている。

表-1 試験体の一覧

試験体名	荷重方法	短繊維混入率 $V_f$ (vol. %)	衝突速度 (m/s)	計算曲げ耐力 $P_{uc}$ (kN)	計算せん断耐力 $V_{uc}$ (kN)	せん断余裕度 $\alpha (=V_{uc}/P_{uc})$
V0-S	静的	0	-	179.4	112.7	0.63
V1-S		1		177.9	107.8	0.61
V2-S		2		175.5	99.1	0.56
V3-S		3		175.1	97.7	0.56
V0-I	衝撃	0	1, 2, 3, 4	179.4	112.7	0.63
V1-I		1	1, 2, 3, 4, 5	177.9	107.8	0.61
V2-I		2	1, 2, 3, 4, 5, 6	175.5	99.1	0.56
V3-I		3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	175.1	97.7	0.56

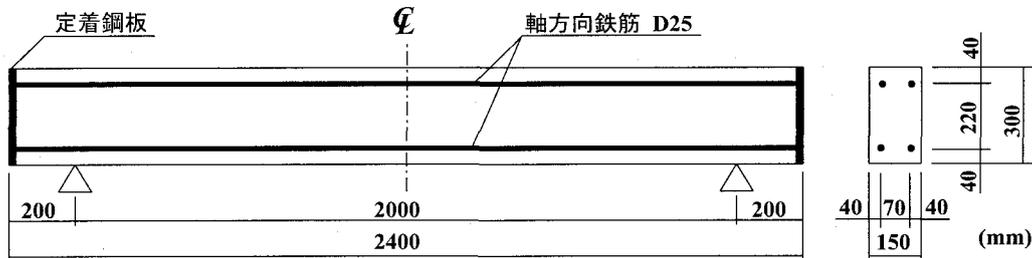


図-1 試験体の概要

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表-1には、本実験に用いた RC 梁の一覧を示している。本実験では、普通コンクリートおよび短繊維混入率を3種類に変化させた短繊維混入コンクリートを用いた4種類の複鉄筋 RC 梁を対象として、静荷重実験および重錘落下による衝撃荷重実験を行った。試験体名の第1項目は、短繊維の体積混入率  $V_f = n\%$  の場合に対して  $Vn$  と示し、第2項目には、荷重方法 (S: 静荷重, I: 衝撃荷重) を示している。また、表中のせん断余裕度  $\alpha$  は、計算曲げ耐力  $P_{uc}$  に対する計算せん断耐力  $V_{uc}$  の比として算出している。ここで、 $P_{uc}$  および  $V_{uc}$  は、それぞれ後述の材料特性値を用い、コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]<sup>12)</sup> に準拠して普通コンクリート使用時と同様の方法で算出している。表より、各試験体でコンクリートの圧縮強度が異なるため、 $P_{uc}$ ,  $V_{uc}$  が若干異なるものの、せん断余裕度  $\alpha$  は 0.6 程度となっていることより、普通コンクリート使用時にはいずれの試験体も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、全て断面寸法(幅×高さ)が 150 × 300 mm、純スパン長が 2 m、軸方向筋に D25 (SD345) を用いた複鉄筋 RC 梁である。なお、せん断補強筋は配置していない。また、荷重方法にかかわらず、荷重位置はスパン中央部としているため、

表-2 ビニロン短繊維の寸法と材料特性値

密度 ( $g/cm^3$ )	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)	破断歪み (%)
1.30	30	0.66	45	29.4	0.88	7.0

せん断スパン比は 3.85 となっている。なお、RC 梁の形状寸法は、後述の重錘落下衝撃試験装置の性能(重錘質量および最大落下高さ)を考慮し、本装置を用いて RC 梁を十分に破壊に至らすことができるように決定している。

本実験に用いた鉄筋の降伏強度は 390 MPa であった。また、表-2には、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 コンクリートの配合および力学特性

表-3には、本実験に用いたコンクリートの配合を一覧にして示している。各コンクリートの配合は、短繊維混入率に対してポンプ圧送が可能で耐凍害性が満足されるように、スランプおよび空気量がそれぞれ  $10 \pm 2.5$  cm および  $5 \pm 1.5\%$  となるように決定している。その結果、圧縮強度は短繊維混入率によって異なっている。

表-4には、各コンクリートの力学性能試験結果として、圧縮および曲げ試験結果を取りまとめている。各試験法および評価法は、土木学会コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準<sup>13)</sup> に示されている鋼織

表-3 コンクリートの配合一覧

$V_f$ (vol. %)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C × %)		スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G	AE 剤	高性能 AE 減水剤		
0	48	140	290	870	1065	0.002	0.5	10.0	6.5
1	49	162	330	1075	775	0.001	0.7	10.4	4.3
2	53	175	330	1085	725	0.0035	0.8	10.5	4.8
3	52	190	360	1307	436	0.003	0.8	10.3	5.6

表-4 コンクリートの力学性能試験結果

短繊維混入率 $V_f$ (vol. %)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	圧縮靱性係数 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げ靱性係数 (MPa)
-	60.3	39.0	-	4.80	0.73
1	52.7	33.1	36.0	4.98	3.71
2	41.0	28.3	31.6	6.32	5.52
3	39.3	26.3	31.8	6.65	5.89

維補強コンクリートに関する規定に準拠している。なお、曲げ試験では、ひび割れ発生後にたわみが急激に増大することも予想されることから、たわみ量はレーザ式変位計を用いて測定し、20 ms/word でデジタルメモリレコーダにより収録した。

表より、圧縮強度は、短繊維混入率  $V_f$  の増大に伴って小さくなっており、弾性係数も同様の傾向を示していることが分かる。また、圧縮靱性係数は  $V_f = 1\%$  の場合で最大となり、 $V_f = 2, 3\%$  ではほぼ同程度となっている。これは、圧縮強度が異なることに影響されているものと考えられる。一方、曲げ強度および曲げ靱性係数は、 $V_f$  の増大とともに大きくなっていることが分かる。特に、曲げ靱性係数は、短繊維の混入により普通コンクリートの場合に比較して5~8倍程度向上している。これは、ビニロン短繊維の架橋効果により、ひび割れの開口が抑制され、コンクリートの引張靱性が向上したことによるものである。

### 2.3 実験方法

静荷重実験は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用い、単純支持状態で実施した。静荷重は、鋼製の荷重治具を用い梁幅方向に全幅、スパン方向中央部に 100 mm の部分分布荷重が作用するように荷重している。

衝撃荷重実験は、支点反力測定用ロードセルと跳ね上がり防止治具付の支点治具上に RC 梁を設置し、そのスパン中央部に所定の高さから 300 kg の円柱状鋼製重錘を自由落下させることにより行っている。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。用いた重錘は荷重部直径が 150 mm であり、衝突時の片当たりを防止するため、底部は高さ 2 mm のテーパを有する球面状となっている。写真-1 には、重錘落下試験装置に RC 梁を設置した状

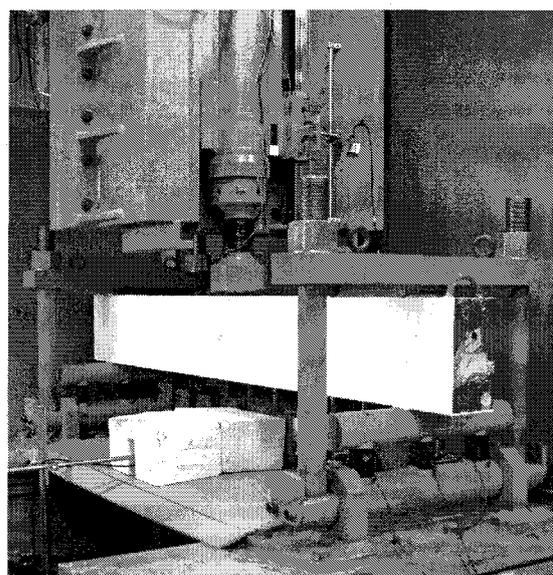


写真-1 衝撃荷重実験状況

況を示している。なお、本装置の最大落下高さは 7 m であり、最大衝突速度は 11 m/s 程度である。

荷重方法は、第 1 回目の衝突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。本実験における梁の終局は、梁側面に明瞭な斜めひび割れが発生して試験体が著しく損傷しせん断破壊に至った時点、あるいは曲げひび割れが卓越してスパン中央部の累積残留変位が純スパン長の 2%<sup>14)</sup> (40mm) に達し曲げ破壊に至った時点としている。

なお、実構造物が受ける衝突現象を想定すると、所定の衝突速度で一度だけ荷重する単一荷重実験により RC 梁の耐衝撃性を検討する必要があるものと考えられる。しかしながら、ビニロン短繊維を混入した RC 梁の衝撃荷重実験に関するデータは極めて少な

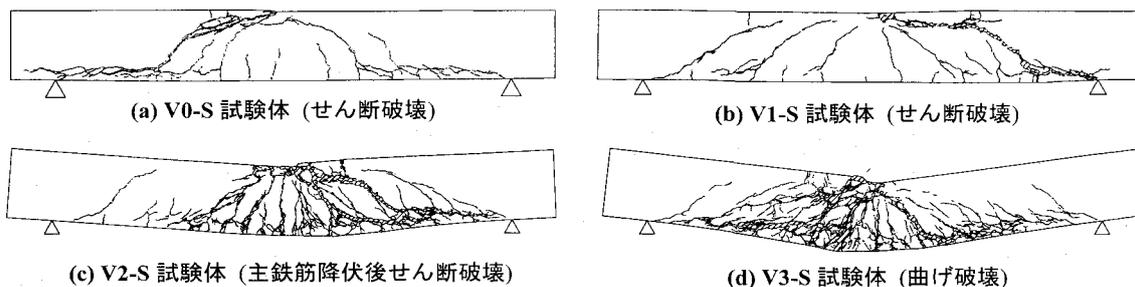


図-2 静載荷実験終了後におけるひび割れ分布性状

く、その耐衝撃特性が明らかにされていないため、現状では適切な衝突速度を決定することが困難である。そのため、本実験では  $V_f$  の異なる各 RC 梁の耐衝撃挙動を検討し、かつそれらの梁が弾性状態から終局状態に至る衝突速度を大略把握することを目的として、前述の漸増繰り返し載荷法を採用することとした。

## 2.4 測定項目

本実験の測定項目は、荷重  $P$  (以下、静載荷の場合には静荷重、衝撃荷重載荷実験の場合には重錘衝撃力と呼ぶ)、合支点反力  $R$  (両支点反力の合算値。以後、単に支点反力と呼ぶ) および載荷点変位  $\delta$  (以後、単に変位と呼ぶ) の各応答波形である。また、実験時にはひび割れの進展状況を詳細に把握するため、重錘落下毎にデジタルカメラを用いて梁側面のひび割れ状況を撮影し、その後ひび割れ分布図を作成している。

静荷重  $P$  の測定は、容量 500 kN の静載荷用ロードセルを用いて行った。また、衝撃荷重載荷実験の場合における重錘衝撃力  $P$  および支点反力  $R$  の測定は、 $P$  の場合には容量が 1,470 kN、応答周波数 DC ~ 4.0 kHz、 $R$  の場合には容量が 980 kN、応答周波数が DC ~ 2.4 kHz のロードセルを用いて行っている。また、載荷点変位  $\delta$  の測定は、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行った。なお、衝撃荷重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、ウェブメモリーを用いて最大 200 ms まで 0.1 ms/word で A/D 変換処理を行っている。また、重錘衝撃力波形の場合には高周波成分が卓越することより原波形を用いることとし、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、ノイズ処理のために 0.5 ms の矩形移動平均法により平滑化を施している。

## 3. 静載荷実験結果

### 3.1 ひび割れ分布性状

図-2 には、静載荷実験終了後における RC 梁のひび割れ分布性状について示している。図より、V0-S 試験体の場合には、載荷点から両支点側に向かってアーチ状のひび割れが形成されていることが分かる。また、

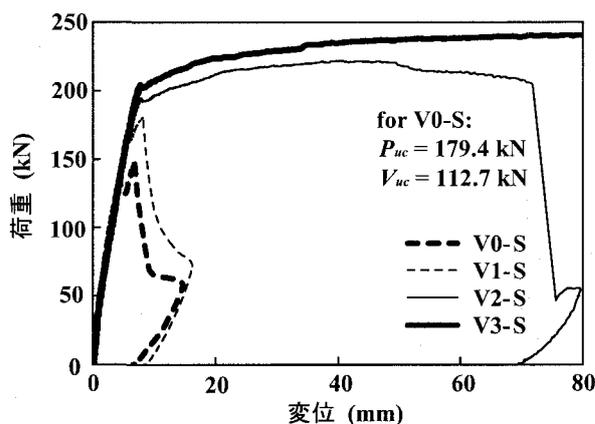


図-3 荷重-変位関係

アーチ状ひび割れの下端から支点側に向かって、下端鉄筋に沿った割裂ひび割れが進展していることが分かる。最終的には、左側スパンのアーチ状ひび割れおよび割裂ひび割れが大きく開口してせん断破壊に至っている。V1-S 試験体の場合には、斜めひび割れがほぼ左右対称に分散して発生していることが分かる。実験では、最終的には載荷点右側の上端鉄筋に沿った割裂ひび割れおよび斜めひび割れの開口により終局に至っている。

V2-S 試験体は、V0/1-S 試験体と異なり、スパン中央部近傍に曲げおよび斜めひび割れが多数発生し、かつ曲げ変形が卓越していることが分かる。ただし、実験では主鉄筋降伏後、変位の増大とともに右側スパンの 2 本の斜めひび割れおよび下端鉄筋に沿った割裂ひび割れが大きく開口して、耐力が急激に低下したことを確認している。一方、V3-S 試験体の結果を見ると、V2-S 試験体の場合よりもさらにひび割れが分散して発生しており、梁の曲げ変形も卓越していることが分かる。実験では、主鉄筋降伏後も荷重の低下は見られず、実験装置の制約上、変位が 140 mm 程度に至った時点で載荷を終了している。

このように、短繊維混入率  $V_f$  の増加に伴い、ビニロン短繊維の架橋効果がより大きく発揮されて局所的なひび割れの開口が抑制され、ひび割れが分散して発生する傾向にあることが明らかになった。また、 $V_f$  が大きい場合ほどせん断破壊が抑制され、曲げ変形が卓越

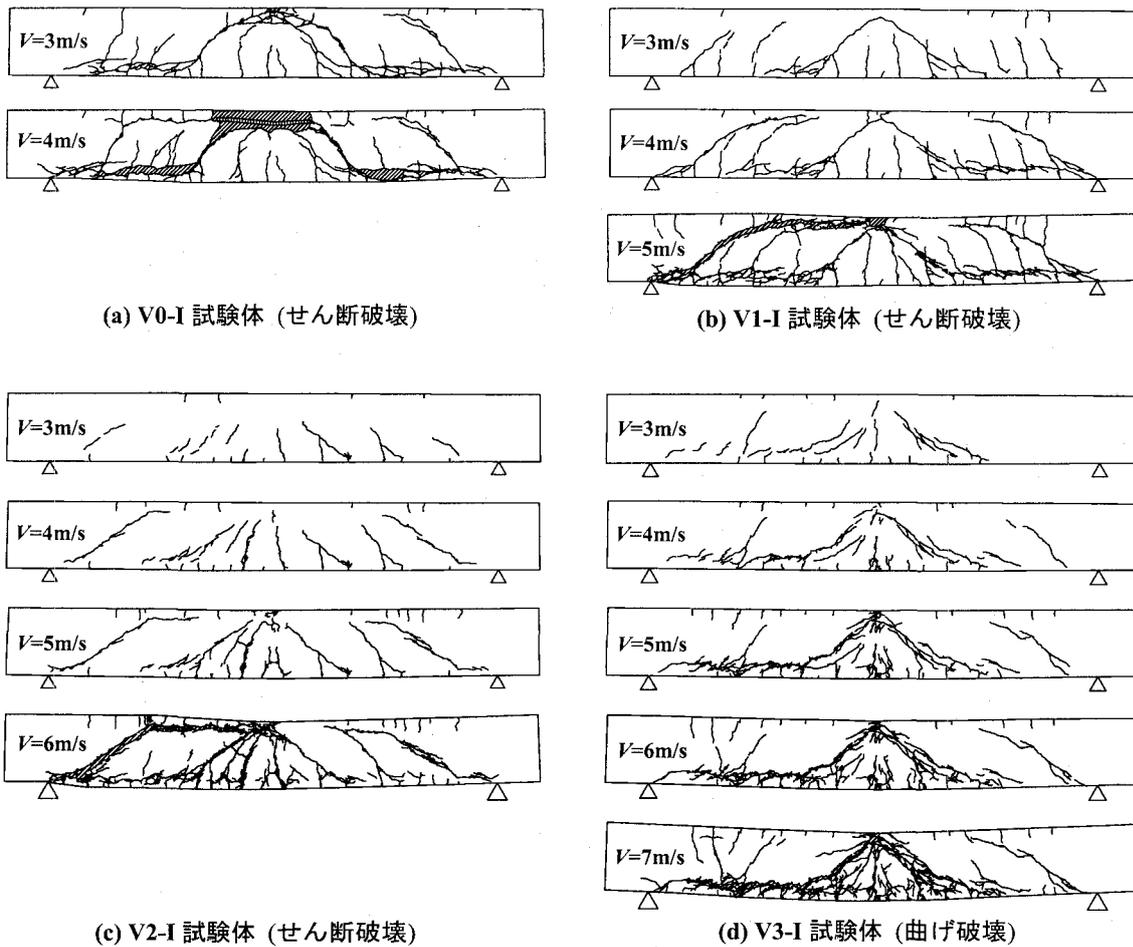


図-4 衝撃荷重載荷実験終了後におけるひび割れ分布性状

する破壊性状になることが明らかになった。

### 3.2 荷重-変位関係

図-3には、各RC梁の荷重-変位関係を示している。また、図には、参考のためV0-S試験体の計算曲げ耐力 $P_{uc}$ および計算せん断耐力 $V_{uc}$ を示している。図より、V0/I-S試験体の場合には、 $P_{uc}$ よりも小さな荷重レベルでピーク値を示し、その後荷重が急激に低下していることから、せん断破壊により終局に至っていることが分かる。このことは、前述のひび割れ分布性状からも明らかである。ただし、これらの試験体の最大荷重を比較すると、V1-S試験体の方がV0-S試験体に比較して30kN程度大きいことが分かる。これは、短繊維の架橋効果により、局所的な斜めひび割れの開口が抑制されて、ひび割れが分散して発生し、せん断耐力が向上したことによるものと考えられる。

V2-S試験体の場合には、荷重がV1-S試験体の最大荷重を上回った後、主鉄筋が降伏に至っていることが分かる。また、主鉄筋降伏後において、荷重は変位40mmまで増加傾向を示しているものの、その後減少傾向に転じ、変位70mm近傍において急激に低下している。これは、図-2のひび割れ分布にも示されているように、斜めひび割れおよび下端鉄筋に沿った割裂ひ

び割れが大きく開口して最終的にせん断破壊に至ったことによるものと考えられる。これに対し、V3-S試験体の場合には、V2-S試験体よりも主鉄筋降伏荷重が大きく、かつ主鉄筋降伏後における荷重低下も見られない。実験では、載荷終了時(変位140mm)まで荷重が増加し続けていることを確認している。

以上のことより、静載荷時には、短繊維混入率 $V_f$ の増加に伴ってせん断耐力が増大することが明らかになった。特に、V3-S試験体の場合には、耐力が $P_{uc}$ を大きく上回っていることから、破壊形式がせん断破壊型から曲げ破壊型に移行していることが分かる。

## 4. 衝撃荷重載荷実験結果

### 4.1 ひび割れ分布性状

図-4には、衝撃荷重載荷実験終了後におけるRC梁のひび割れ分布性状を衝突速度 $V = 3\text{ m/s}$ 以降について示している。図より、V0-I試験体の場合には、 $V = 3\text{ m/s}$ においてアーチ状のひび割れおよび下端鉄筋に沿った割裂ひび割れが開口しており、せん断破壊が進行していることが分かる。 $V = 4\text{ m/s}$ では、 $V = 3\text{ m/s}$ 時に発生したひび割れが大きく開口するとともに、載荷部近傍のかぶりコンクリートが大きく剥落しているこ

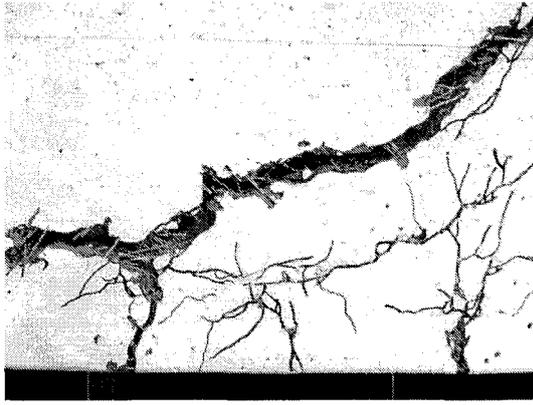


写真-2 ビニロン短繊維のひび割れ架橋状況

とや、下端鉄筋位置のかぶりコンクリートが部分的に剥落していることより、RC梁は明らかに終局に至っていることが分かる。

V1-I試験体の結果を見ると、 $V=3\text{ m/s}$ において、荷重点から約45度の斜めひび割れが発生しており、また支点部近傍では曲げおよび斜めひび割れの発生も見られる。ただし、V0-I試験体に見られるようなひび割れの開口は生じていない。 $V=4\text{ m/s}$ では、斜めひび割れが下端鉄筋に沿った割裂ひび割れに進展するとともに、支点部近傍の曲げおよび斜めひび割れが明瞭なアーチ状のひび割れに進展していることが分かる。さらに、 $V=5\text{ m/s}$ では、左側スパンに形成されたアーチ状のひび割れが大きく開口してせん断破壊に至っていることが分かる。

V2-I試験体の場合には、 $V=3\text{ m/s}$ におけるひび割れは、V0/I-I試験体のそれに比べて軽微であり、曲げおよび斜めひび割れが全スパンに渡って分散して発生している。 $V=4, 5\text{ m/s}$ では、ひび割れが徐々に進展・増加し、支点側ではアーチ状のひび割れが形成されているものの、曲げひび割れや斜めひび割れの大きな開口は見られない。しかしながら、 $V=6\text{ m/s}$ では左側スパンにおいて、荷重部近傍の2本の斜めひび割れおよび上端鉄筋に沿った割裂ひび割れとそれに連結した斜めひび割れが大きく開口し終局に至っている。

V3-I試験体の場合には、 $V=3\sim 5\text{ m/s}$ まで著しいひび割れの開口は見られないものの、V2-I試験体の場合よりもひび割れが荷重点近傍に集中して発生する傾向にあることが分かる。しかしながら、 $V=6\text{ m/s}$ 時においても、V2-I試験体に見られた大きなひび割れの開口は生じていない。さらに、 $V=7\text{ m/s}$ には、斜めひび割れおよび下端鉄筋に沿ったひび割れの開口が見られるものの、せん断破壊には至らず曲げ変形が卓越している。また、この時点において、累積残留変位が曲げ破壊の基準値である40 mmに到達したため実験を終了している。このことより、V3-I試験体の場合には、せん断破壊型に特徴的な斜めひび割れが発生しているものの、短繊維の架橋効果によりその開口が抑制され、

最終的には曲げ破壊により終局に至っていることが分かる。

写真-2には、ビニロン短繊維のひび割れ架橋状況の一例として、V3-I試験体の実験終了後におけるひび割れ開口部の状況を示している。写真より、曲げおよび斜めひび割れの開口が見られ、さらに梁下縁部近傍では、微細なひび割れが多数発生していることが分かる。これは、短繊維の架橋効果によりひび割れが分散して発生したことによるものである。また、ひび割れ開口部では、短繊維の引抜けや破断などは見られず、短繊維がひび割れを架橋していることが分かる。

このように、短繊維混入率 $V_f$ の増大に伴って、局所的なひび割れの開口が抑制されRC梁の耐衝撃性能が向上することが明らかになった。また、短繊維の混入により荷重点近傍部におけるかぶりコンクリートの著しい剥落が抑制されていることも明らかになった。さらに、RC梁の破壊形式は、 $V_f$ の増大に伴って斜めおよびアーチ状ひび割れの形成・開口が抑制されるため、せん断破壊型から曲げ破壊型に移行しており、特に $V_f=3\%$ の場合には優れた耐衝撃性能を示している。

次に、繰り返し載荷実験であることを前提に損傷状態から見た各RC梁の耐衝撃性を比較する。いま、最大限界耐力時の重錘衝突速度をV0/1/2/3-Iに対して、それぞれ $V=4, 5, 6, 7\text{ m/s}$ とすれば、短繊維混入による耐衝撃性向上率(荷重エネルギー比率)はV0-I試験体に対して、V1/2/3-I試験体でそれぞれ1.7, 2.3, 3.1倍となる。これより、短繊維混入率が増加することによって、明らかに耐衝撃性も向上することが確認できる。なお、本実験のような繰り返し載荷の場合は、最終載荷速度が大きい場合ほど載荷回数が多く損傷が蓄積されるため、耐衝撃性の差異が真値よりも小さく示される可能性がある。従って、この比較が、繰り返し載荷時でかつ短繊維混入率の増加と共にコンクリート強度が低下する状況下におけるものであることを考慮すると、単一載荷でコンクリート強度が等しい場合には、短繊維を混入することによって、これ以上の耐衝撃性向上効果が出現するものと判断される。

一方、これらの破壊性状を静載荷時の結果と比較すると、 $V_f=0, 1\%$ の場合には、載荷方法にかかわらずせん断破壊が卓越する破壊性状を示していることが分かる。また、 $V_f=2\%$ の場合には、衝撃荷重載荷の場合においてせん断破壊の傾向が多少強く現れているものの、載荷方法によらず曲げおよび斜めひび割れの開口が混在する破壊性状を示している。 $V_f=3\%$ の場合には、ともに斜めひび割れおよび割裂ひび割れの開口が見られるものの、曲げ変形が卓越する破壊性状を示している。

これらのことより、短繊維を混入したRC梁の破壊性状は、衝撃荷重載荷の場合において多少せん断破壊の性状が強く現れる傾向にあるものの、短繊維混入率

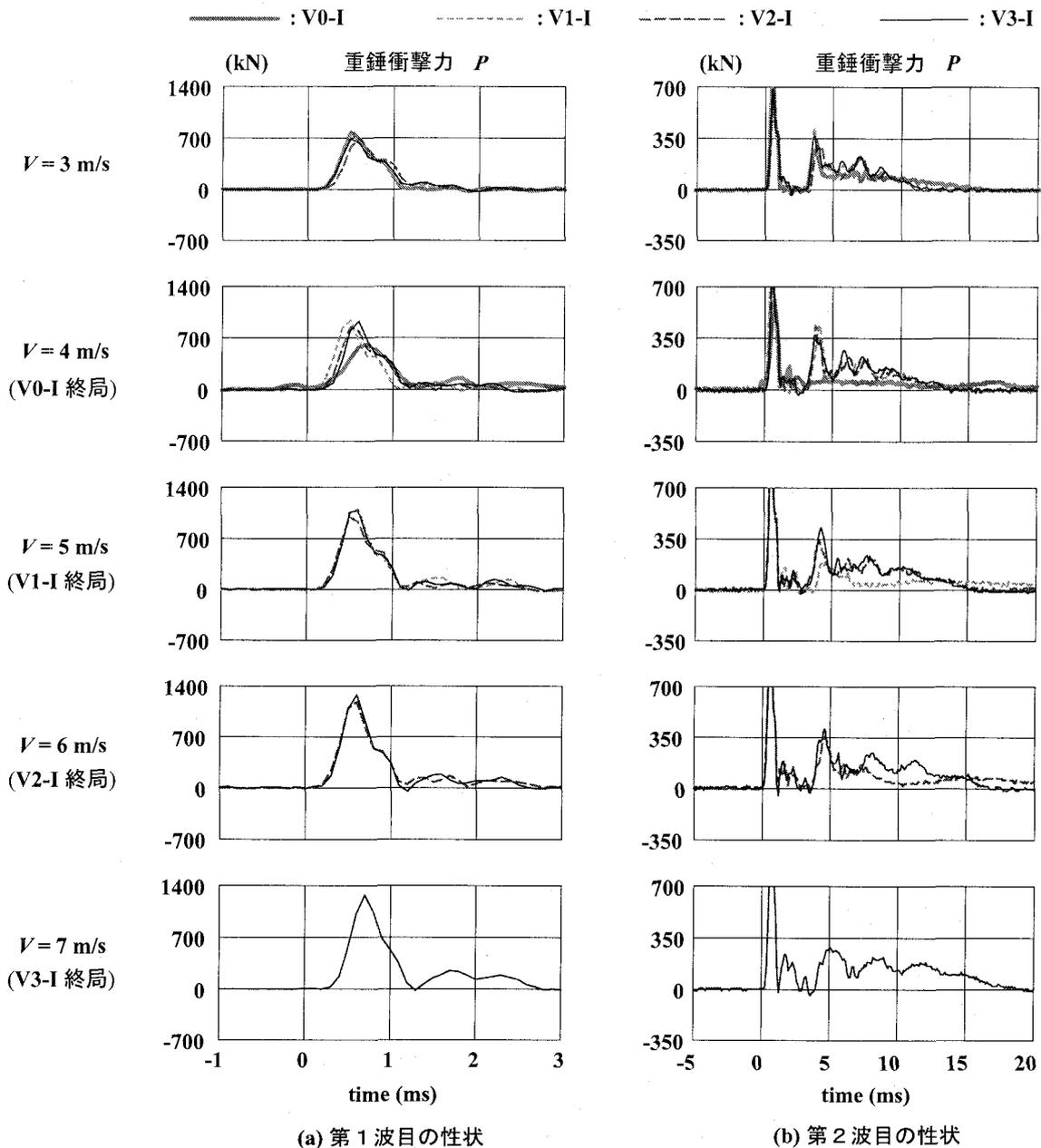


図-5 各試験体の重錘衝撃力波形

$V_f$  が同等の場合には載荷方法にかかわらず静載荷と衝撃荷重載荷の場合でほぼ同様の破壊モードを示すことが明らかになった。

#### 4.2 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-5には、各試験体の重錘衝撃力  $P$  に関する応答波形を  $V = 3 \text{ m/s}$  以降について示している。重錘衝撃力波形は、載荷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。そのため、ここでは各試験体の重錘衝撃力波形の性状を比較検討しやすくするため、(a) 時間軸を拡大した第1波目のみの波形と、(b) 縦軸を第2波目の振幅に合わせて拡大した場合、に分けて示すこととした。

図-5(a)の第1波目の波形性状より、V0-I 試験体の最終載荷時の結果を除き、各衝突速度における波形性状は、試験体にかかわらずほぼ同様の性状を示しており、また衝突速度の増大に伴って最大重錘衝撃力が大きく示されていることが分かる。V0-I 試験体の  $V = 4 \text{ m/s}$  における波形は、初期の立ち上がり勾配が他の波形に比較して緩やかである。これは、図-4(a)のひび割れ分布図からも明らかのように、 $V = 3 \text{ m/s}$  時点で大きな損傷を受け剛性が低下した状況下で、 $V = 4 \text{ m/s}$  において載荷点近傍部のコンクリートが局所的に損傷するとともに、せん断破壊が進行して剛性が一層低下したことに起因しているものと考えられる。

一方、図-5(b)の第2波目の波形性状に着目すると、各試験体の最終載荷時における波形性状はそれ以

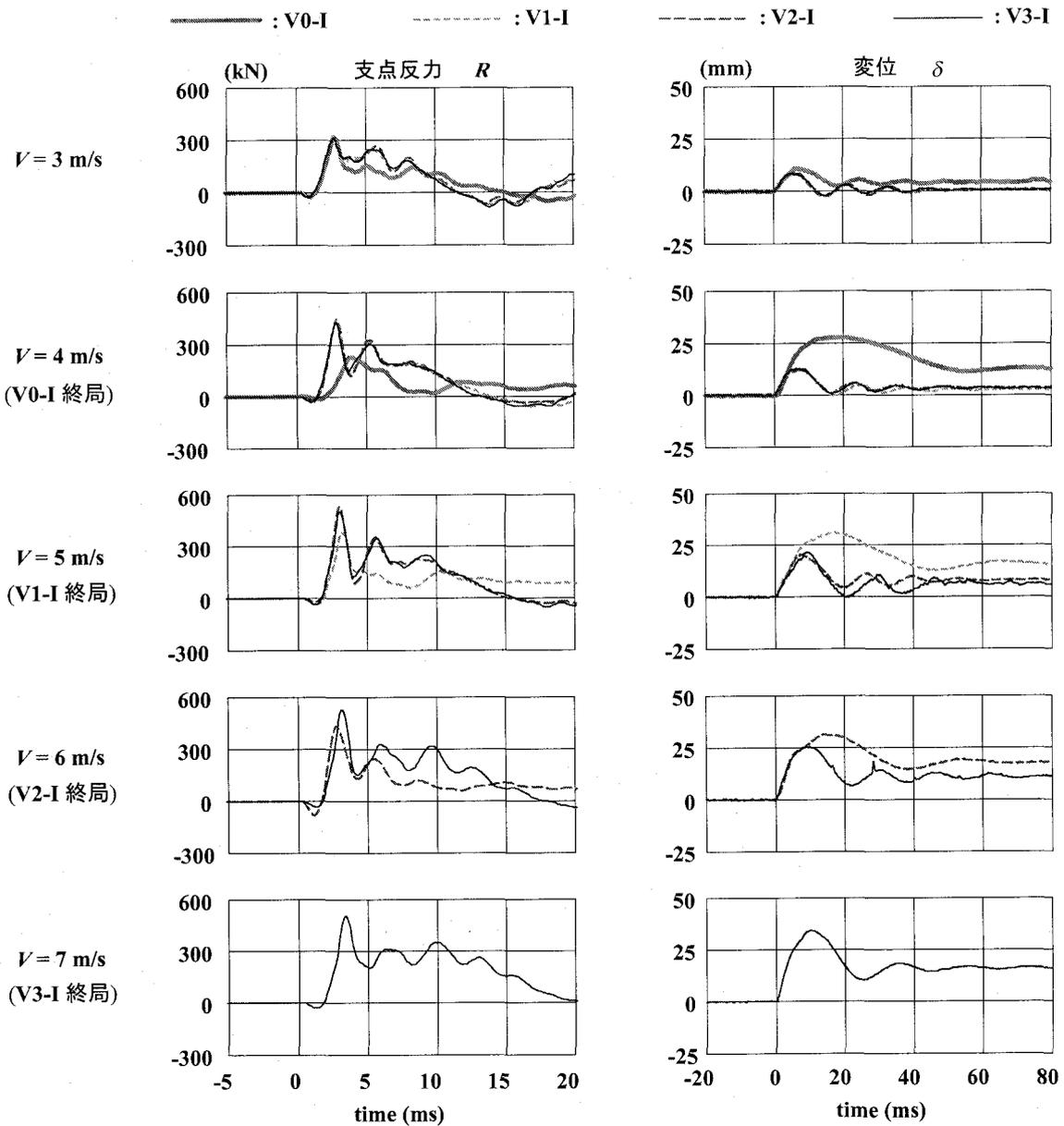


図-6 各試験体の支点反力および変位波形

前の性状と異なり、その周期が長くなっていることがわかる。これは、繰り返し载荷によって損傷が蓄積され、最終载荷時に梁の剛性が大幅に低下したことによるものと推察される。

図-6には、各試験体の支点反力 $R$ および変位 $\delta$ に関する応答波形を $V = 3 \text{ m/s}$ 以降について示している。支点反力波形 $R$ は、各梁とも健全な場合には、継続時間が $10 \sim 20 \text{ ms}$ 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を示している。支点反力波形 $R$ も重錘衝撃力波形 $P$ と同様に、終局に至るまではいずれの梁も類似の波形性状を示している。最終载荷時には、V3-I試験体を除き、いずれも第1波目に振幅の大きい三角形状の波形を示すものの、その後高周波成分も励起せず緩やかに減衰する傾向を示している。一方、V3-I試験体の場合には、 $V = 7 \text{ m/s}$ 時においても $V$

$= 6 \text{ m/s}$ 時と大差のない波形性状を示しており、耐荷力的には未だ終局に至っていないことが推察される。

変位波形 $\delta$ は、いずれの梁も正弦減衰波状の分布を示しており、最大振幅は衝突速度 $V$ の増大に伴い増加の傾向を示している。また、せん断破壊により終局に至ったV0/1/2-I試験体は、最終载荷時(それぞれ、 $V = 4, 5, 6 \text{ m/s}$ )において最大変位が急激に増加しており、第1波目の周期も長く示されている。しかしながら、このような性状は、 $V_f$ が大きい場合ほど抑制される傾向にあることから、短繊維混入率 $V_f$ を増加させることによって、脆性的な破壊から靱性のある曲げな破壊に移行させることが可能であることを暗示している。一方、曲げ破壊により終局に至ったV3-I試験体の場合には、最終载荷時において最大振幅が増大するものの、第1波目の周期の増大は顕著でなく、未だ減衰自由振

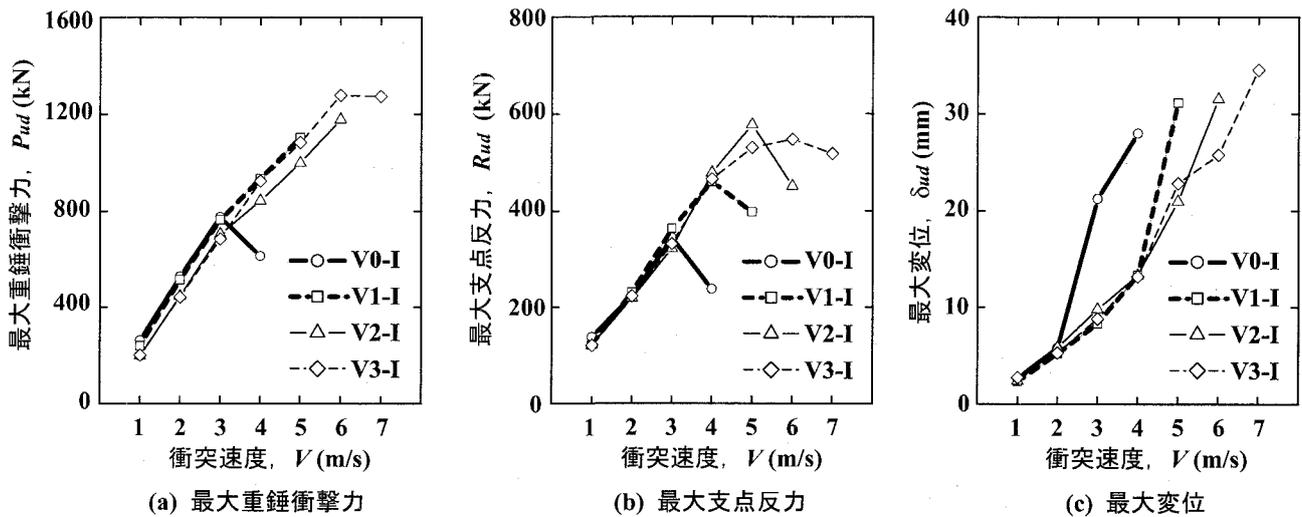


図-7 各種応答値の最大値と衝突速度との関係

動的な性状を示していることから、他の試験体に比較して剛性低下が少ないことが分かる。

以上より、各応答波形はRC梁の損傷状況や破壊モードに密接に関連していることが明らかになった。特に、RC梁の損傷による耐衝撃挙動の変化は、支点反力および変位波形に大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。

#### 4.3 各種応答値と衝突速度との関係

図-7には、(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  $\delta_{ud}$  と衝突速度との関係を各試験体について示している。

図-7(a)より、最大重錘衝撃力  $P_{ud}$  は、衝突速度の増加とともに大きくなる傾向にあることが分かる。ただし、V0-I試験体の場合には、最終載荷時に大きく低下している。これは、図-5(a)に示されているように、 $V=3$  m/s 時点ですでにせん断破壊型の大きな損傷を受け、剛性が低下した状態にあることを示唆している。これに対し、V1/2-I試験体の場合には、最終載荷時においても  $P_{ud}$  の低下は見られない。これは、図-4のひび割れ分布図からも推察されるように、斜めひび割れよりも曲げひび割れが卓越し曲げ破壊型の傾向を示すことによるものと考えられる。また、V3-I試験体の場合には、最終載荷時 ( $V=7$  m/s) と  $V=6$  m/s 時における  $P_{ud}$  はほぼ同程度の値を示している。これは、曲げ破壊型の傾向を強く示し、中央部が塑性ヒンジ的な状態になっているためと推察される。

図-7(b)より、最大支点反力  $R_{ud}$  は、いずれの試験体の場合も衝突速度の増加に伴って増大し、最終載荷時には低下する傾向にあることが分かる。特に、V0/1/2-I試験体の場合には、最終載荷時において  $R_{ud}$  が大きく低下している。これは、斜めひび割れが大きく開口し、脆性的な破壊性状を示したことによるものと考えられる。これに対し、V3-I試験体の場合には、 $V=4$  m/s ま

では他の試験体とほぼ同様の値を示しているものの、5 m/s 以降において  $R_{ud}$  の増加割合が小さくなり、また最終載荷時における  $R_{ud}$  の減少割合も他の試験体に比較して小さい。これは、V3-I試験体は、5 m/s 以降において曲げ変形による塑性化が進行し始め、最終的に撓化性の高い靱性に富んだ耐衝撃性状を示したことによるものと考えられる。

図-7(c)の最大変位  $\delta_{ud}$  に関する結果より、V0-I試験体の場合には  $V=3$  m/s 以降において  $\delta_{ud}$  が大きく増大していることが分かる。これは、この時点において、せん断破壊が進行し始めていることを意味している。また、V1/2/3-I試験体は、 $V=4$  m/s まではほぼ同様の性状を示しているが、それ以降では、 $V_f$  が大きい場合ほど衝突速度に対する最大変位の増加勾配が低減しており、同一衝突速度における最大変位の抑制効果が大きい傾向にあることが分かる。

以上のことより、V0/1/2-I試験体の場合には、最終載荷時における各応答値の変動が大きく、脆性的な破壊性状を示していることが明らかになった。一方、V3-I試験体の場合には、最終載荷時において変位は増大するものの、衝撃力に関する応答値には大きな変動が見られないことより、衝撃力を吸収する靱性に富んだ耐衝撃挙動を示していることが分かる。また、各衝突速度に対するRC梁の耐衝撃性能の変化は、支点反力  $R$  および変位  $\delta$  に関する応答値に顕著に現れている。このことより、以後の検討では、支点反力  $R$  と変位  $\delta$  に関する履歴曲線を用いて、各RC梁の破壊進展状況と耐衝撃挙動との関係を詳細に検討することとする。

#### 4.4 支点反力-変位履歴曲線

図-8には、各試験体の支点反力  $R$  と変位  $\delta$  の履歴曲線を  $V=1$  m/s から最終衝突速度までについて示している。図より、いずれの試験体も  $V=2$  m/s までは、載荷勾配と除荷勾配がほぼ同様であり、弾性的な性状

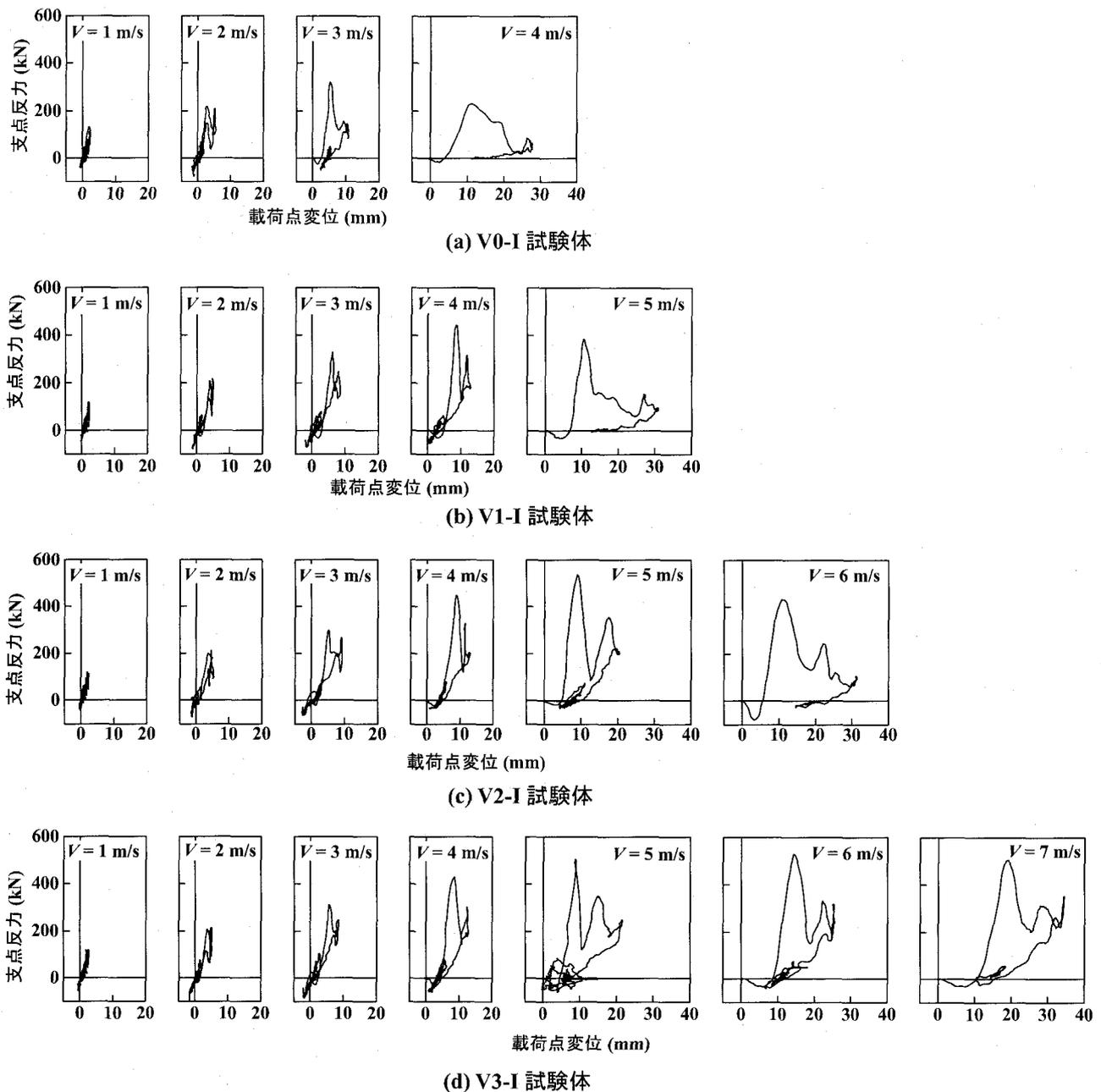


図-8 支点反力-変位履歴曲線

を示していることが分かる。V = 3 m/s 時の結果を見ると、V0-I 試験体は、せん断破壊型の特徴である三角形の履歴曲線を示して<sup>15)</sup>おり、5 mm 程度の残留変位も見られることから、斜めひび割れの発生によって梁が損傷し始めていることが分かる。一方、V1/2/3-I 試験体の場合には、除荷時の変位の増大が若干見られるものの、ほぼ弾性的な性状を示していると言える。これらのことは、図-4 に示したひび割れ分布性状とも対応している。

V = 4 m/s において、V0-I 試験体は、底辺の広い三角形形状となっており典型的なせん断破壊型の履歴曲線を示していることから、この時点でせん断破壊により終局に至っていることが分かる。V1/2/3-I 試験体の場合

には、支点反力の大きい領域では頂点が鋭角な三角形形状の履歴曲線の傾向を示しているものの、最大支点反力の 1/2 程度まで除荷された後変位は 0 に復元する傾向を示し、二等辺三角形形状の分布を示している。これは、短繊維の架橋効果によってひび割れの開口抑制と同時に復元作用が発揮されたことによるものと推察される。

V = 5 m/s の結果を見ると、V1-I 試験体の場合には底辺の広い三角形形状の履歴曲線を示しており、この時点で斜めひび割れが大きく開口し、終局に至ったことが分かる。これに対し、V2/3-I 試験体の場合には、頂点が鋭角な三角形形状の履歴曲線を示し、最大変位も増大して劣化が進行しているものと考えられる。しかしな

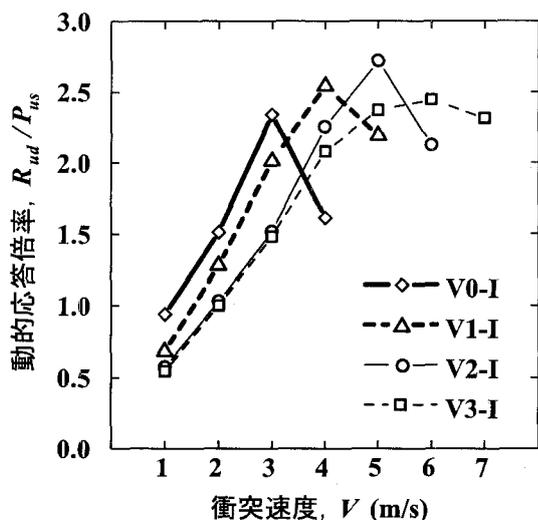


図-9 動的応答倍率

から、短繊維の架橋効果によって未だ十分な復元力を保持しており、除荷後は最大変位が 10 mm 程度の自由振動状態にあることが分かる。

$V = 6$  m/s において、V2-I 試験体は  $V = 5$  m/s における V1-I 試験体と同様に底辺の広い三角形の履歴曲線を示している。これは、コンクリートのひび割れ部を架橋している短繊維が、破断もしくは引き抜けることによりその効力を一気に失ったため、せん断破壊型に近い状態で終局に至ったことによるものと推察される。これに対して、V3-I 試験体の場合には、 $V = 5$  m/s 時よりも三角形の底辺が広がる傾向にあるが、依然として十分な復元力を保持しており、全体として二等辺三角形の履歴曲線を示している。従って、未だ短繊維の架橋効果が十分に発揮されていることが推察される。また、 $V = 7$  m/s においても最大変位が大きくなっているものの、 $V = 6$  m/s 時とほぼ同様の性状を示していることから、短繊維の架橋効果は失われず、最終的には曲げ変形が卓越する形で終局に至っていることが分かる。

以上のことから、支点反力-変位履歴曲線の分布性状は、短繊維混入 RC 梁の耐衝撃機構および破壊進展過程と密接に関連していることが分かる。従って、短繊維混入 RC 梁の耐衝撃設計法の確立のためには、 $V_f$  が支点反力-変位曲線に及ぼす影響を把握し、支点反力-変位曲線を適切にモデル化することが肝要であるものと考えられる。

#### 4.5 動的応答倍率

図-9 には、最大支点反力  $R_{ud}$  を静的耐力  $P_{us}$  で除した動的応答倍率 ( $R_{ud}/P_{us}$ ) と衝突速度との関係を示している。なお、静載荷実験において、V2/3-S 試験体の場合には、主鉄筋降伏後、変位  $\delta$  が純スパンの 1% ( $\delta = 20$  mm) 程度に至った時点で上縁コンクリートの圧壊が見られた。従って、これらの試験体の場合には、

$\delta$  が 20 mm に至った時点を終局と仮定し、その時の静荷重を静的耐力  $P_{us}$  とした。

図より、 $V = 1 \sim 3$  m/s において、同一衝突速度での動的応答倍率は、 $V_f$  が小さい場合ほど大きく示されていることが分かる。これは、衝撃載荷時においてせん断破壊がより卓越する場合には曲げひび割れの発生も少なく、曲げ剛性が大きく評価されるためと推察される。また、各梁の動的応答倍率の最大値は、最終衝突速度よりも 1 m/s 小さい衝突速度で生じており、その値は 2.3 ~ 2.7 程度に分布している。これは、図-7(b) に示すように、最終衝突速度よりも 1 m/s 小さい衝突速度で最大支点反力が最大となるためである。なお、動的応答倍率の最大値 (その梁に固有の動的応答倍率) は  $V_f$  にかかわらず大略 2.5 程度であると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、ビニロン短繊維を RC 梁に混入した場合の耐衝撃性向上効果を明らかにすることを目的として、普通コンクリートおよび短繊維混入率  $V_f$  を 3 種類に変化させた短繊維混入コンクリートを用いた RC 梁の重錘落下衝撃実験を行った。また、RC 梁の破壊性状に及ぼす載荷方法の影響を検討するため、静載荷実験も併せて実施した。本研究で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

##### 静載荷実験結果：

- 1) 短繊維混入率  $V_f$  が大きい場合ほど、ビニロン短繊維の架橋効果が大きく発揮されるため、局所的なひび割れの開口が抑制され、ひび割れが分散して発生する。
- 2)  $V_f$  の増大に伴って RC 梁のせん断耐力が向上し、破壊形式がせん断破壊型から曲げ破壊型に移行する。

##### 衝撃荷重載荷実験結果：

- 1) 静載荷実験の場合と同様に、 $V_f$  が大きい場合ほど局所的なひび割れの開口が抑制されてひび割れの分散効果が発揮されるため、RC 梁の耐衝撃性能が向上する。その結果、衝撃荷重載荷時においても 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。
- 2)  $V_f$  の増大による耐衝撃性能の向上効果は、普通コンクリート使用時 ( $V_f = 0\%$ ) に対して、 $V_f = 1, 2, 3\%$  でそれぞれ 1.7, 2.3, 3.1 倍となる。なお、単一載荷でかつコンクリート強度が等しい条件下であれば、これ以上の耐衝撃性向上効果が発揮される可能性がある。
- 3) 支点反力-変位履歴曲線は、短繊維混入 RC 梁の耐衝撃挙動および破壊進展過程と密接に関連している。従って、短繊維混入 RC 梁の耐衝撃設計法

の確立のためには、 $V_f$  が支点反力-変位曲線に及ぼす影響を把握し、支点反力-変位曲線を適切にモデル化することが肝要である。

- 4) 動的応答倍率の最大値は、最終衝突速度よりも 1 m/s 小さい衝突速度で生じ、 $V_f$  に関わらず大略 2.5 程度となっている。

謝辞：本研究を行うに当たり、室蘭工業大学建設システム工学科松岡健一教授に適切な御指導を戴いた。また、同大学大学院建設システム工学専攻構造力学研究室在学中の安藤 宏君および笠井和俊君をはじめとする大学院生に多大なる御支援を戴いた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 中田吉彦, 榎谷 浩, 梶川康男, 森嶋芳大: 個別要素法による鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1761-1771, 1998.
- 2) 三上 浩, 岸 徳光, 吉田紘一, 安藤智啓: RC 柱模型の横衝撃載荷実験, 応用力学論文集, Vol.1, pp.437-448, 1998.
- 3) 圓林栄喜, 香月 智, 石川信隆, 太田俊昭: 簡易動的解析法による PC はりの動的終局変形の推定, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1665-1676, 1999.
- 4) 井元勝慶, 大野友則: 柔飛来物の高速衝突を受ける RC 板の衝撃応答解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 1 部 (B), pp.1076-1077, 1995.
- 5) 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.
- 6) 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, 2002.1
- 7) 古田昌弘, 金久保利之, 閑田徹志, 永井 覚: 高靱性セメント系複合材料の一軸引張モデル評価法, 建築学会構造系論文集, 第 568 号, pp.115-121, 2003.
- 8) 喜多俊介, 小室文也, 二羽淳一郎: 短繊維補強された RC 部材の力学的性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1717-1722, 2003.
- 9) 田口史雄, 三上 浩, 栗橋祐介, 岸 徳光: ビニロン短繊維混入 RC 梁の耐荷性状に及ぼす短繊維混入率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.287-292, 2003.
- 10) 田口史雄, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: ビニロン短繊維を混入した RC 版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 2 巻, pp.7-14, 2003.
- 11) 鈴木雅博, 酒井博士, 孕石孝平, 六郷恵哲: 短繊維補強 PC はりの衝撃特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.121-126, 2001.
- 12) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準, 2002.
- 14) 三上 浩, 岸 徳光, 松岡健一, 田村富雄: 低速度衝撃を受ける RC 梁の耐衝撃設計法の一提案, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1255-1260, 1996.
- 15) 安藤智啓, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 蟹江俊仁: スターラップを有しないせん断破壊型 RC 梁の単一載荷衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1809-1818, 2000.

(2003 年 9 月 12 日受付)