

混入率を変化させた場合のビニロン短繊維混入 RC 梁 に関する重錘落下衝撃実験

WEIGHT-FALLING IMPACT TESTS ON VINYLON SHORT-FIBER MIXED RC BEAMS
IN CASES VARYING FIBER MIXED RATIO

栗橋 祐介*, 田口 史雄**, 三上 浩***, 岸 徳光****

Yusuke KURIHASHI, Fumio TAGUCHI, Hiroshi MIKAMI, and Norimitsu KISHI

*博(工) (独)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 1-3-1-34)

** (独)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 1-3-1-34)

***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)

****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)

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

(RC beam, Vinylon short-fiber, impact loading test, impact resistant capacity)

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。一方で,コンクリートのひび割れ発生後の引張靱性能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。

従来は,短繊維材料として鋼繊維が多く用いられてきたが,最近では軽量でかつ耐食性に優れる合成繊維も用いられるようになってきている。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¹⁾。著者等も,ビニロン短繊維を混入した RC 梁や 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²⁾。しかしながら,ビニロン短繊維の混入による RC 部材の耐衝撃性向上効果については未だ明らかにされていないのが現状である。

本研究では,ビニロン短繊維を混入した RC 梁の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 梁の耐衝撃挙動および破壊性状に及ぼす短繊維混入率の影響について検討を行っている。

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。試験体名は,英文字の V と短繊維の体積混入率 V_f との組み合わせにより示している。表中のせん断余裕度 α 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³⁾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 α 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,

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 (m/s)	コンクリート 圧縮強度 (MPa)	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	0	1, 2, 3, 4	60.3	179.4	112.7	0.63
V1	1	1, 2, 3, 4, 5	52.7	177.9	107.8	0.61
V2	2	1, 2, 3, 4, 5, 6	41.0	175.5	99.1	0.56
V3	3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	39.3	175.1	97.7	0.56

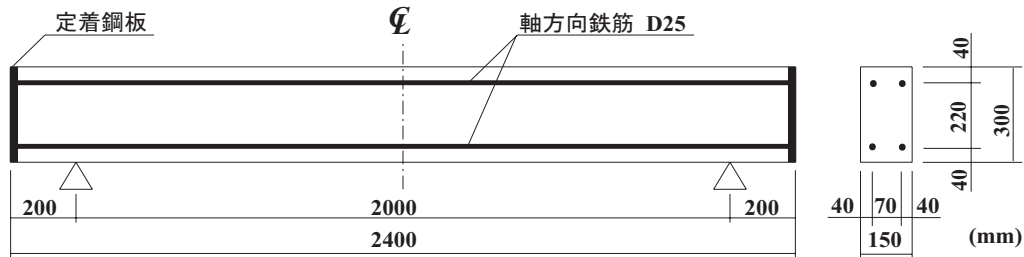


図 - 1 試験体の概要

表 - 2 ビニロン短繊維の寸法と材料特性値

密度 (g/cm ²)	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

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、載荷位置はスパン中央部としているため、せん断スパン比は 3.85 となっている。

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 実験方法

衝撃荷重載荷実験は、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。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。用いた重錘は載荷部直径が 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。

載荷方法は、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載荷とした。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% (40mm) に達し曲げ破壊に至った時点としている。

2.3 測定項目

本実験の測定項目は、重錘および支点治具に内蔵されたロードセルによる重錘衝撃力および合支点反力（以後、支点反力）と、非接触式レーザ変位計による RC 梁の載荷点変位（以後、変位）の各応答波形である。各波形は高帯域用データレコーダ（応答周波数：DC ~ 40 kHz）に一括収録し、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。実験時には、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。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ分布性状

図 - 2 には、各 RC 梁のひび割れ分布性状を衝突速度 $V = 4$ m/s 以降について示している。図より、V0 試験体の場合には、最終衝突速度である $V = 4$ m/s 時において、載荷部近傍および下端鉄筋位置のかぶりコンクリートが大きく剥落しており、終局に至って

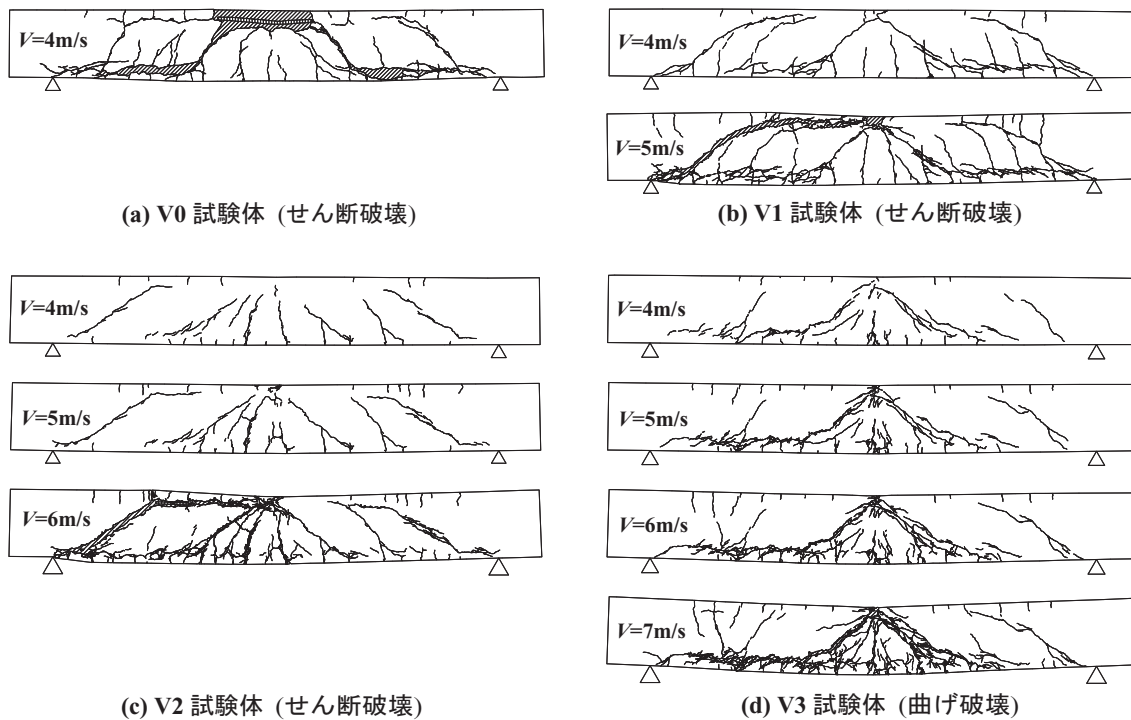


図 - 2 各 RC 梁のひび割れ分布性状

いることが分かる。V1 試験体の場合には、 $V = 4 \text{ m/s}$ において、載荷点近傍の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、支点部近傍では明瞭なアーチ状のひび割れが発生していることが分かる。ただし、V0 試験体に見られたかぶりコンクリートの著しい剥離・剥落は見られない。また、 $V = 5 \text{ m/s}$ 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 試験体の場合には、 $V = 4, 5 \text{ m/s}$ において、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、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 試験体の場合には、 $V = 5 \text{ m/s}$ まで著しいひび割れの開口は見られないものの、V2 試験体の場合よりもひび割れが載荷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 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。このことより、V3 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。

以上のことより、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し、その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。なお、V0/1/2/3 試験体の最終衝突速度は、それぞれ $V = 4, 5, 6, 7 \text{ m/s}$ であった。従って、短繊維混入による耐衝撃性向上効果(載荷エネルギー比率)は、 $V_f = 1, 2, 3 \%$ でそれぞれ 1.7, 2.3, 3.1 倍になっているものと考えられる。

3.2 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図 - 3 には、各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する応答波形を $V = 4 \text{ m/s}$ 以降について示している。

重錘衝撃力 P は、いずれの場合も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 波から構成される波形性状を示している。また、最終載荷時 (V0/1/2/3 試験体でそれぞれ $V = 4, 5, 6, 7 \text{ m/s}$) には、第 2 波目の周期がそれ以前よりも長くなっていることがわかる。これは、繰り返し載荷によって損傷が蓄積され、最終載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

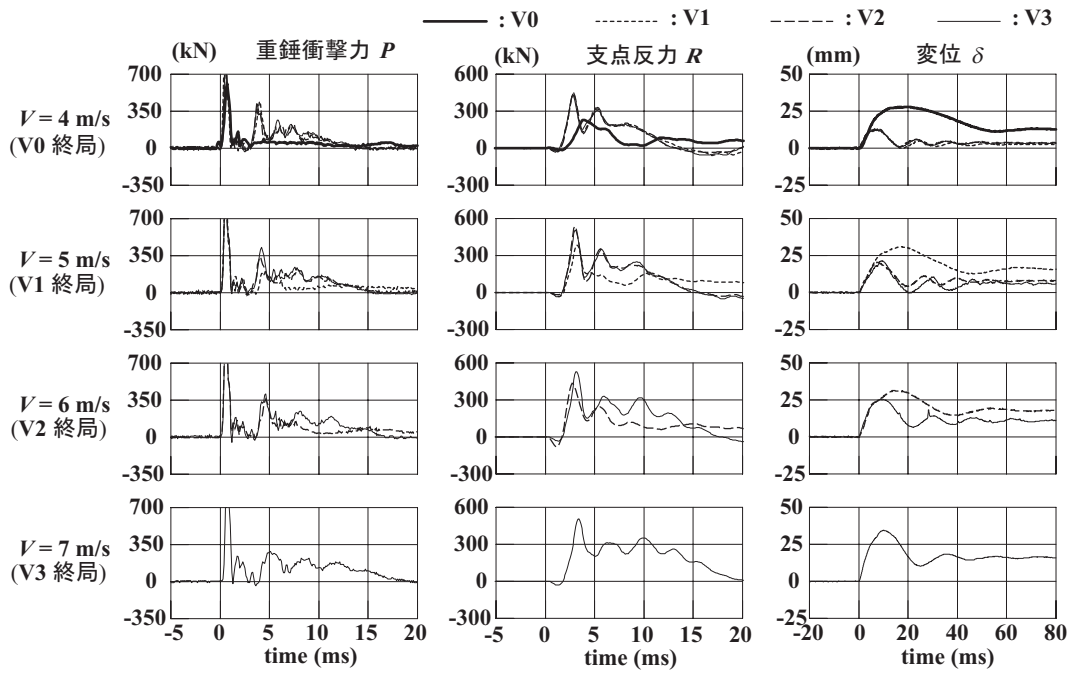


図 - 3 各試験体の重錘衝撃力，支点反力および変位波形

れる。

支点反力波形 R は，各梁とも健全な場合には，継続時間が $10 \sim 20$ ms 程度の正弦半波と周期が 3 ms 程度の波形が合成された波形を示しており，終局に至るまでいずれの梁も類似の波形性状を示している．最終載荷時には， $V3$ 試験体を除き，いずれも第 1 波目に振幅の大きい三角形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， $V3$ 試験体の場合には，最終載荷時 ($V = 7$ m/s) においても $V = 6$ 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 δ 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 の増大に伴って増加する傾向を示している．また，せん断破壊により終局に至った $V0/1/2$ 試験体は，最終載荷時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．一方，曲げ破壊により終局に至った $V3$ 試験体の場合には，最終載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，短繊維混入率 V_f の増大に伴って RC 梁の耐衝撃性が向上し，特に $V_f = 3\%$ の場合には最終載荷時における脆性的な破壊が抑制されていること

が分かる．また，RC 梁の損傷に伴う耐衝撃性の変化は，支点反力および変位波形に大きく現れていることが明らかになった．

3.3 各種応答値と衝突速度との関係

図 - 4 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 δ_{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 - 4(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， $V0$ 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 - 2 に示されているように， $V = 4$ m/s 時にせん断破壊に至るとともに，載荷部のコンクリートが著しく剥落したことによるものと考えられる．これに対し， $V1/2/3$ 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，ビニロン短繊維の混入により載荷部の損傷が抑制されていることによるものと考えられる．

図 - 4(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， $V0/1/2$ 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， $V3$ 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

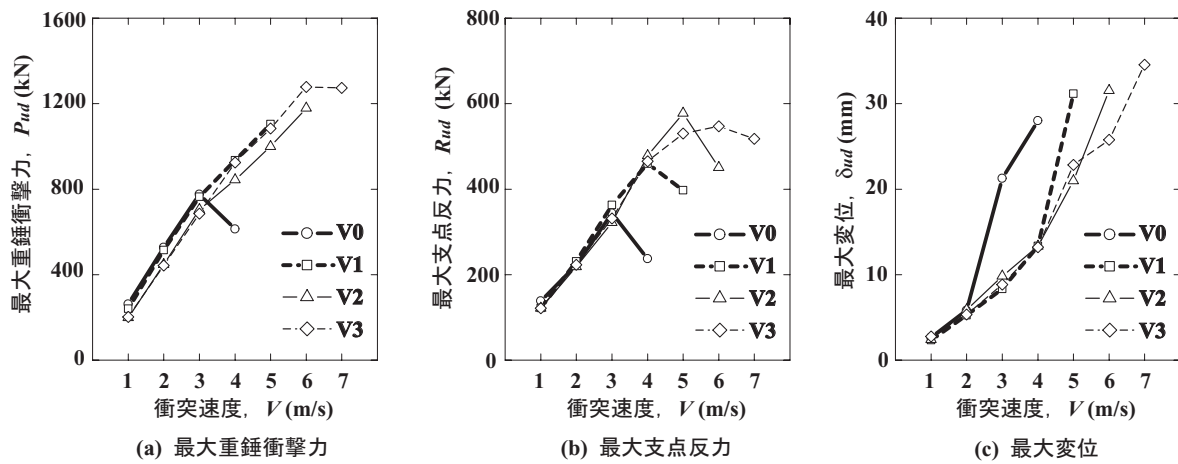


図 - 4 各種応答値の最大値と衝突速度との関係

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 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、最終的に撓性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 - 4(c) の最大変位 δ_{ud} に関する結果を見ると、V0 試験体の場合には $V = 3$ m/s 以降において δ_{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 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 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 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。

3.4 支点反力 - 変位履歴曲線

図 - 5 には、各試験体の支点反力 R と変位 δ の履歴曲線を $V = 3$ m/s から最終衝突速度までについて示している。各試験体の $V = 3$ m/s 時の結果を見ると、V0 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 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云える。

$V = 4$ m/s において、V0 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 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 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。また、V2/3 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。しかしながら、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 試験体は $V = 5$ m/s における V1 試験体と同様に底辺の広い三角形形状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 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形状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

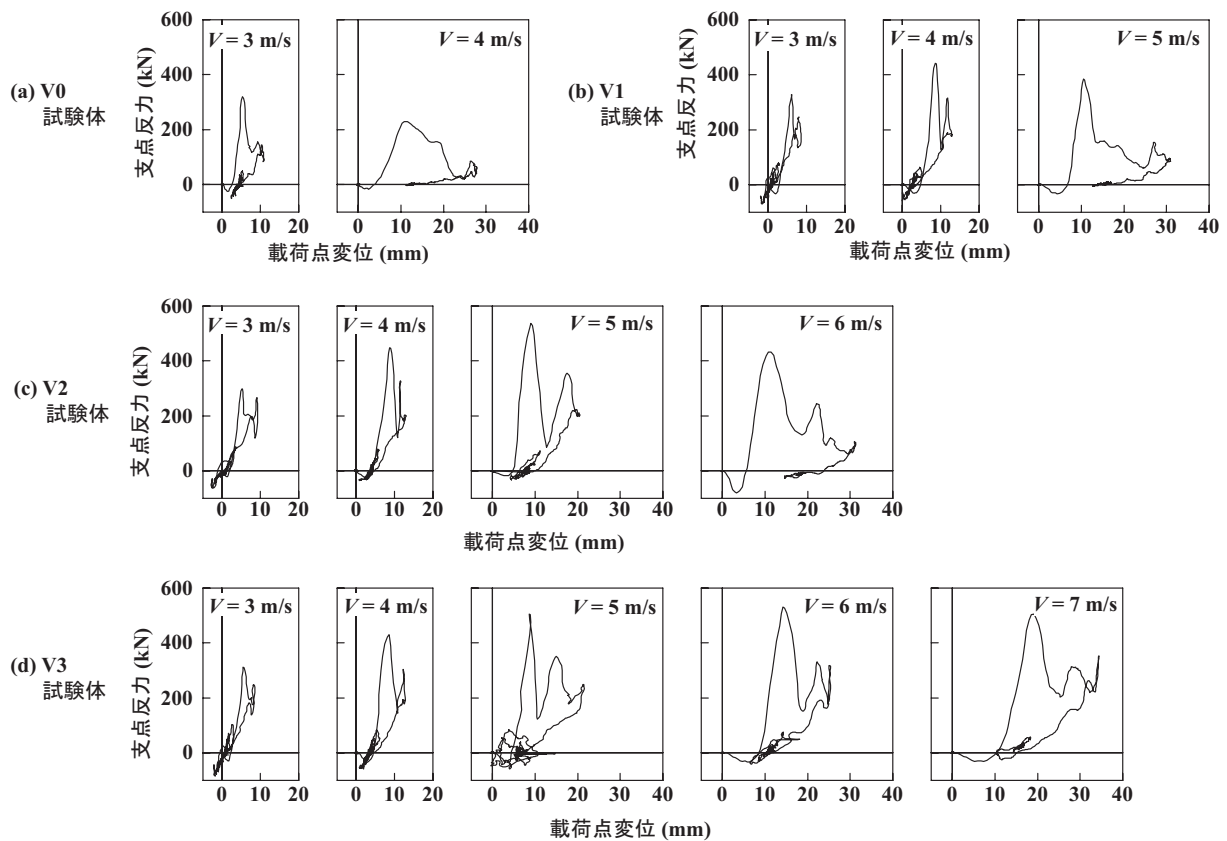


図 - 5 支点反力 - 変位履歴曲線

いることが推察される。また、 $V = 7 \text{ m/s}$ においても最大変位が大きくなっているものの、 $V = 6 \text{ m/s}$ 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、短繊維混入に伴う RC 梁の耐衝撃性向上効果やその耐衝撃機構および破壊進展過程の変化は、支点反力 - 変位履歴曲線の分布性状に明瞭に現れ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. まとめ

本研究では、ピニロン短繊維を 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、短繊維混入率 V_f が異なる 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) 短繊維混入率 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るため、せん断破壊型

RC 梁の耐衝撃性能が向上し、破壊形式が靱性に富む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。
- 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。

参考文献

- 1) 古田昌弘, 金久保利之, 関田徹志, 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.
- 2) 田口史雄, 三上 浩, 栗橋祐介, 岸 徳光: ピニロン短繊維混入 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.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.