

## コンクリート梁の耐衝撃性におよぼす緊張材の特性とプレストレスの影響

EFFECTS OF TENDON PROPERTIES AND PRESTRESSING ON IMPACT RESISTANCE OF CONCRETE BEAMS

三上 浩\* 田村富雄\*\* 岸 徳光\*\*\* 松岡健一\*\*\*\*

Hiroshi MIKAMI, Tomio TAMURA, Norimitsu KISHI and Ken-ichi MATSUOKA

\* 工博 三井建設(株)技術研究所 主任研究員(〒270-01 千葉県流山市駒木518-1)

\*\* 工博 三井建設(株)技術研究所 副所長(〒270-01 千葉県流山市駒木518-1)

\*\*\* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科(〒050 室蘭市水元町27番1号)

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

In this paper, the effects of prestressing on impact resistance of concrete beams using two types of PC tendons are discussed based on experimental results. The PC tendons used in this study are Aramid Fiber Reinforced Plastic (AFRP) rods and PC steel strand. Impact load is applied on the center of each concrete beam by free falling of a 200kgf steel weight. The results obtained from the impact tests are 1) the effects of prestressing on impact resistance of concrete beam varies with tendon properties, 2) the maximum reaction forces due to impact loads are slightly larger than the ultimate static capacity and 3) the shock absorbing energy would be useful as an index of impact resistances of concrete beams.

Keywords: AFRP rods, prestressed concrete beam, impact resistance

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性向上や施工の省力化などを目的として、鉄筋やPC鋼材の代替に各種の連続繊維補強材(FRP ロッド)を用いる研究が盛んに行われている。また、実構造物へのPC緊張材の代替として適用された事例も着実に増加している。[1]

アラミド繊維や炭素繊維を基材とするFRP ロッドは耐食性に優れ、軽量かつ非常磁性であり、引張耐力は同一断面積で鉄筋の2~3倍程度以上と大きい。反面、ヤング係数は鋼材の1/2~1/3程度と小さいため、鉄筋の代替よりもPC鋼材の代替として適用された事例が多い。さらに、FRP ロッドは鋼材のような降伏点を持たず、1~4%程度の弾性引張歪状態で脆性的に破断するなど、コンクリートの補強材として適用するにあたって留意すべき点も多い。このため、土木学会などで試験方法や設計方法ならびに品質規格などを決定するための検討が精力的になされているのが現状である。

著者らは、アラミド繊維製のFRP ロッド(AFRP ロッド)が高引張強度かつ降伏点を持たないことに着目し、耐衝撃用途のコンクリート構造物への適用を想定して研究を行ってきた。なお、一連の研究は異形鉄筋で補強したコンクリート梁の衝撃特性を基準とし、それと比較する形で行っている。

その結果、異形鉄筋で補強した梁の場合には、梁は鉄筋の降伏により衝撃荷重が載荷点直下に集中し、大きく角折れして大変形となることが分かった。一方、炭素繊維やビニロン繊維製ロッドで補強した梁は、ロッドの破断で衝撃破壊しやすく、ロッドの弾性伸び率や引張強度

の大きさが梁の耐衝撃性に大きな影響を与えることが考えられた。他方、AFRP ロッドで補強した梁は、鉄筋で補強した梁に比べて残留する変位量が少なく、他のFRP ロッドを用いた梁のようにロッドの破断で破壊しにくく、耐衝撃性が最も良好であることが分かった。[2-3]

また、AFRP ロッドをPC緊張材に用いた梁の衝撃挙動が緊張材の配置位置に大きく影響されることも既に確認している。[4-5]

本研究は、AFRP ロッドおよびPC鋼より線を緊張材に用いた梁を製作し、プレストレスが梁の耐衝撃性に与える影響を実験的に検討したものである。プレストレスの影響として、プレストレスを導入した梁と導入していない梁を各々緊張材の配置位置を変えて製作し、主としてプレストレスの大小および分布(下縁応力度)が耐衝撃性に与える影響を検討した。

衝撃実験に用いたコンクリート梁の寸法は、24×16×250 cmであり、純スパン200 cmで単純支持した。衝撃荷重は重量が200 kgfの鋼製の重錘を所定の高さから自由落下させて梁中央に載荷している。

なお、衝撃載荷によって緊張材が破断しない場合には耐衝撃性の定量的評価が難しい。本研究では衝撃実験後に静的に加力して残存する耐力を確認し、その処女静載荷における耐力に対する割合の大小で耐衝撃性(健全性)を評価することにした。

## 2. 実験の概要

## 2.1 試験体の概要

実験に用いた試験体は表-1に示す20体である。試

表－１ 試験体および実験結果

| 試験体の呼称 | 載荷速度 (m/sec) | 載荷エネルギー<br>ギ－比率 | 残存耐力<br>① (tf) | 静的耐力<br>② (tf) | 残存耐力比<br>① / ② |
|--------|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| FAP-5  | 5            | 1.00            | 11.06          | 12.20          | 0.91           |
| FAP-6  | 6            | 1.44            | 8.63           | 12.20          | 0.71           |
| FAP-7  | 7            | 1.96            | 4.38           | 12.20          | 0.36           |
| FAP-R  | 1～5          | 2.20            | 9.72           | 12.20          | 0.80           |
| FAN-R  | 1～5          | 2.20            | 4.58           | 8.24           | 0.56           |
| PAP-5  | 5            | 1.00            | 11.88          | 14.60          | 0.81           |
| PAP-6  | 6            | 1.44            | 12.12          | 14.60          | 0.83           |
| PAP-7  | 7            | 1.96            | 10.49          | 14.60          | 0.72           |
| PAP-R  | 1～5          | 2.20            | 7.33           | 14.60          | 0.50           |
| PAN-R  | 1～5          | 2.20            | 9.05           | 10.94          | 0.83           |
| FBP-5  | 5            | 1.00            | 9.16           | 10.20          | 0.90           |
| FBP-6  | 6            | 1.44            | 9.15           | 10.20          | 0.90           |
| FBP-7  | 7            | 1.96            | 9.05           | 10.20          | 0.89           |
| FBP-R  | 1～5          | 2.20            | 7.29           | 10.20          | 0.71           |
| FBN-R  | 1～5          | 2.20            | 4.76           | 7.75           | 0.61           |
| PBP-5  | 5            | 1.00            | 7.24           | 10.18          | 0.71           |
| PBP-6  | 6            | 1.44            | 8.00           | 10.18          | 0.79           |
| PBP-7  | 7            | 1.96            | 6.84           | 10.18          | 0.67           |
| PBP-R  | 1～5          | 2.20            | 6.93           | 10.18          | 0.68           |
| FPN-R  | 1～5          | 2.20            | 6.68           | 9.74           | 0.71           |

試験体の呼称のうち第 1 項は緊張材の種類を、AFRP ロッドを F、PC 鋼より線を P で示している。第 2 項は緊張材の配置位置 (A 配置または B 配置) を示している。第 3 項はプレストレス導入の有無を示し、有りを P、無しを N で示している。－以降の数字は衝撃試験時の重錘の載荷速度を示し、該当する載荷速度 (m/sec) で一回のみの載荷 (単一載荷) を行っている。なお、載荷速度とは、重錘が試験体に衝突する直前での重錘の速度である。－R は衝撃荷重を繰り返し載荷したことを示す。繰り返し載荷は載荷速度が  $v = 1 \text{ m/sec}$  から  $1 \text{ m/sec}$  刻みで最大  $v = 5 \text{ m/sec}$  まで行った。

試験体の形状寸法および緊張材の配置位置を図－1 に示す。緊張材の配置位置は、(1) 断面下側核点位置に 2 本 (A 配置)、(2) 断面上下縁近傍位置に 2 本 (B 配置) の 2 種類とした。なお、総プレストレス量はいずれも同一とし、梁の断面中心におけるプレストレスを  $50 \text{ kgf/cm}^2$  としている。試験体には衝撃による梁側面でのコン

表－２ 緊張材の力学的特性

| 緊張材名称                                       | AFRP ロッド<br>FA15 | PC 鋼より線<br>T15.2B |
|---------------------------------------------|------------------|-------------------|
| 材 質                                         | アラミド繊維           | SWPR7B            |
| 公称直径 (mm)                                   | 14.7             | 15.2              |
| 公称断面積 (mm <sup>2</sup> )                    | 170.0            | 138.7             |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> )                     | 1.30             | 7.85              |
| 引張耐力 (tonf)                                 | 24.0             | 26.6              |
| 降伏耐力 (tonf)                                 | －                | 22.6              |
| ヤング係数<br>( $\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ) | 0.70             | 2.0               |
| 弾性伸び率 (%)                                   | 2.00             | 0.15 ～ 0.20       |

クリートの剥落を防止するため、異形鉄筋 D6 のスターラップを 100 mm ピッチで配置している。

### 2.2 緊張材およびコンクリートの特性

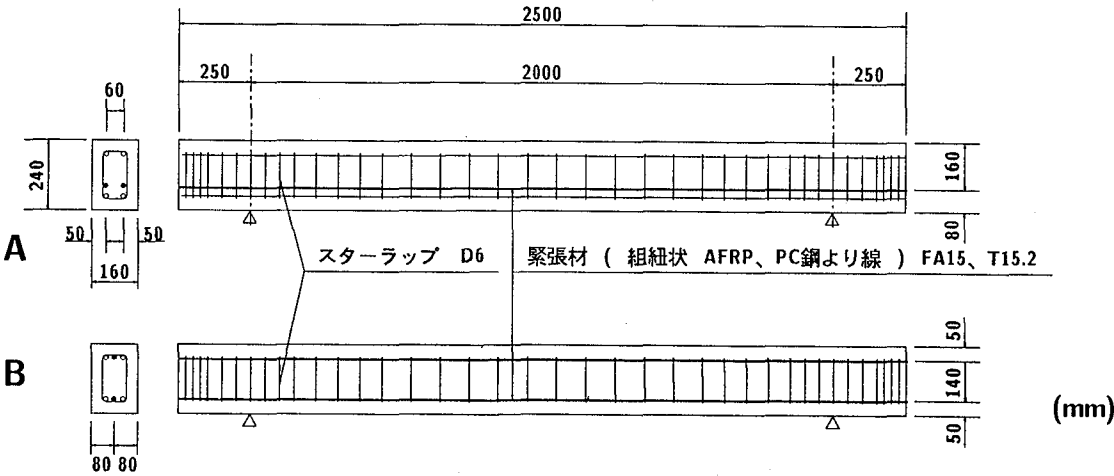
緊張材は組紐状 AFRP ロッド FA15 または 7 本より PC 鋼線 T15.2B であり、プレストレスの導入はプレテンション方式で行った。緊張材の力学的特性を表－2 に示す。両緊張材はほぼ同等の引張耐力を有しているが、AFRP ロッドには降伏点がなく、ヤング係数は PC 鋼より線が AFRP ロッドに比べて 3 倍程度大きく、逆に弾性伸び率は AFRP ロッドの方が 10 倍程度大きいのが特徴である。

コンクリートの 28 日圧縮強度は  $770 \text{ kgf/cm}^2$ 、ヤング係数は  $3.72 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  である。なお、実験時の材令における圧縮強度は  $806 \text{ kgf/cm}^2$  であった。

### 2.3 実験方法

衝撃実験は室蘭工業大学に設置されている落下衝撃万能試験機を用いて行った。衝撃荷重は、直径が 15 cm で重量が 200 kgf の鋼製の円柱からなる重錘を所定の高さにセットした後、試験体中央に自由落下させて載荷した。

衝撃試験、残存耐力確認試験ともに、梁の両端面から 25 cm の位置を支点とした。なお、衝撃試験では梁が支



図－１ 試験体の形状寸法及び緊張材の配置位置

点部でリバウンドするのを防止するため、梁の上下を鋼製の治具を用いて固定した。治具全体は梁の回転を許容し、ピン支持に近い構造となっている。

残存耐力確認試験は、落下衝撃万能試験機に併設された油圧ジャッキ式荷重装置を用いて行った。梁は衝撃試験と同じ位置でピン支持し、加力は梁中央に敷設した重錘と同一の直径を有する鋼製の円盤を介して行った。

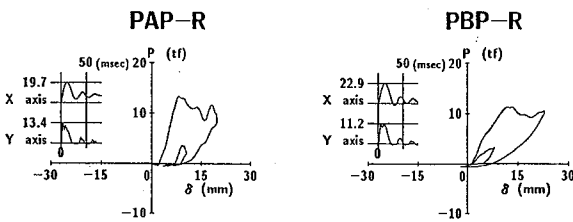
衝撃実験での計測項目は、重錘に取り付けた容量 1000 G の歪ゲージ型加速度変換器による重錘衝撃力および支点部に取り付けた衝撃荷重測定用に開発したロードセルによる反力ならびにスパン中央に設置した容量 80 mm の非接触型変位計による変位の 3 項目である。なお、残存耐力確認試験では、荷重計により載荷荷重を、非接触型変位計によりスパン中央の変位を測定した。

### 3. 実験結果

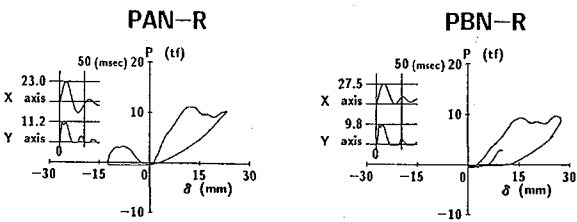
表-1 に、衝撃実験終了後に行った残存耐力確認試験の結果（残存耐力）および断面分割法で求めた処女静載荷における終局曲げ耐力（静的耐力）とそれらの比率（残存耐力比）の一覧を示す。なお、残存耐力試験では全ての梁が上縁の圧縮破壊で破壊した。

静的耐力は、2.2 に示す材料定数を用いて、コンクリート標準示方書にならってコンクリートおよび緊張材の応力-歪曲線をモデル化して計算した。AFRP ロッドは降伏点がないため、1 直線でモデル化している。断面の分割数は、ほぼ一定の解が得られる分割数以上とし、1 cm 刻みの 24 分割とした。

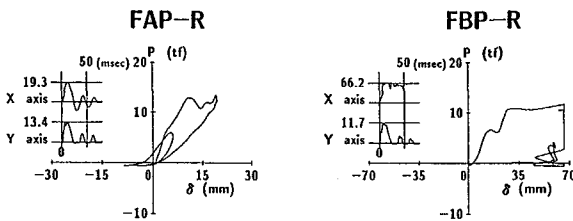
表中の載荷エネルギー比率は、載荷速度が  $v = 5 \text{ m/sec}$  における重錘の運動エネルギーを基準として算出したも



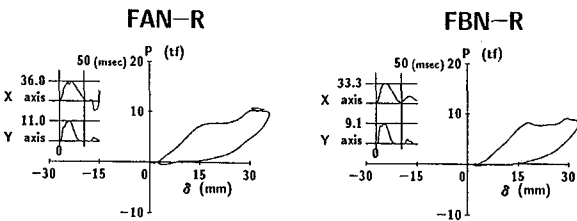
(a) PC 梁の荷重-変位関係  
(繰返し載荷,  $v = 5 \text{ m/sec}$ )



(b) RC 梁の荷重-変位関係  
(繰返し載荷,  $v = 5 \text{ m/sec}$ )



(c) PC 梁の荷重-変位関係  
(単一載荷,  $v = 6 \text{ m/sec}$ )



(d) PC 梁の荷重-変位関係  
(単一載荷,  $v = 7 \text{ m/sec}$ )

図-2 衝撃荷重載荷時の荷重-スパン中央変位の関係

ので、繰り返し載荷した梁では、 $v = 5 \text{ m/sec}$ までの5回の試験の累積した載荷エネルギーに対する比率として示している。

### 3.1 衝撃荷重載荷時の荷重—スパン中央変位の関係

図-2 (a) ~ (d)に、衝撃荷重載荷時の荷重—スパン中央変位の関係を示す。なお、荷重—変位関係は波形の立ち上がりから 50 msec 経過時点までについて示した。(a), (b)図は繰り返し載荷を行った 8 試験体の載荷速度  $v = 5 \text{ m/sec}$  載荷における関係を示し、(a) 図はプレストレスを導入した梁、(b) 図は導入していない梁について整理している。

本研究では、衝撃荷重載荷時の荷重としてロードセル反力の総和を用いた。これは、ロードセル反力の測定値が重錘に取り付けた加速度計の最大加速度に重錘質量を乗じて得られる重錘衝撃力よりもばらつきが少なかったためである。なお、ロードセル反力と平均的な重錘衝撃力はほぼ同程度の値を示していることを確認している。

FBP—R梁の結果は、衝撃実験中に変位計がはずれ測定不能となったため参考として示している。なお、図中の X, Y は各々変位およびロードセル反力の応答波形を示している。ここでは、荷重—スパン中央変位の関係として、特に初期勾配および最大荷重到達後の変位の増加に着目して検討する。

まず、図-2 (a), (b) より、繰り返し載荷を行った試験体について検討を行う。

初期勾配は、プレストレスを導入した梁が導入していない梁よりも大きく、プレストレスの有無に関わらず緊張材（補強材）の剛性の大きい P タイプ梁が F タイプ梁よりも大きい。ここで、剛性とは緊張材（補強材）のヤング係数に断面積を乗じた値である。一方、配置位置の初期勾配に与える影響は、プレストレスの有無や緊張材（補強材）の剛性の違いに比べて小さい。あえて言及すると、P タイプ梁の初期勾配は A 配置が B 配置よりも若干大きく示されている程度である。

これらは、それぞれプレストレスを導入した梁や剛性の高い緊張材（補強材）を用いた梁がプレストレスを導入していない梁や剛性の低い緊張材を用いた梁よりも見かけ上の曲げ剛性が高いことに対応するものと考えられる。また、配置位置が緊張材の違いに比較して初期勾配に与える影響が小さいのは、下端緊張材の全剛性の変化が配置位置を変化させた場合よりも緊張材を変えた場合の方が大きいことに起因するものと考えられる。

一方、最大荷重到達後の変位の増加量に与える緊張材の特性や配置位置の影響は、プレストレスを導入した梁ではさほど顕著ではない。これは、衝撃載荷においても静的載荷と同様にプレストレスが変位を抑制する効果に優れ、変位に与えるプレストレスの影響が他の因子よりも顕著であることを示している。他方、プレストレスを導入していない梁では、補強材の剛性が小さい梁ほど変

位の増加傾向が顕著である。なお、配置位置が変位の増加傾向に与える影響は、初期勾配と同様に顕著ではない。

これらは、プレストレスを導入していない梁では、補強材の剛性が静的載荷と同様に変位量に大きな影響を与え、配置位置の違いに対応する下端緊張材（補強材）の剛性の差による影響が初期勾配と同様に緊張材の剛性差よりも小さいためと考えられる。

次に、図-2 (c), (d) より、単一載荷を行った試験体について検討を行う。

初期勾配は、繰り返し載荷した梁と同様に、いずれの載荷速度でも緊張材の剛性の大きい P タイプ梁が F タイプ梁よりも大きい。配置位置で初期勾配を比較すると、繰り返し載荷した梁と同様に両者の差は顕著でなく、配置位置は剛性の違いに比べて初期勾配に与える影響が小さい。

一方、最大荷重到達後の変位の増加量に与える緊張材の特性や配置位置の影響は、繰り返し載荷した梁と同様にさほど顕著ではない。あえて言及すると、B 配置の梁の方が変位の増加量が若干大きいようである。

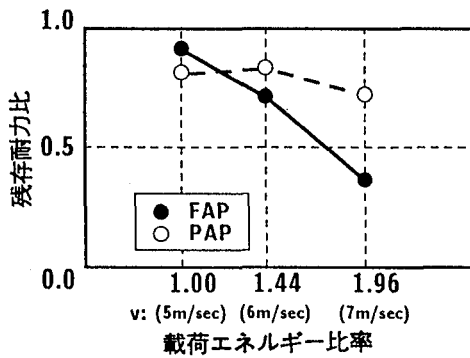
載荷速度で比較すると、初期勾配は両者でほぼ同様であるが、最大荷重到達後の変位の増加量は  $v = 7 \text{ m/sec}$  載荷した梁の方が大きくなっている。この様に、繰り返し載荷と単一載荷で衝撃荷重の載荷方法の違いによる荷重—変位関係の差は少なく、いずれの結果も耐衝撃性の検討に用いることが可能である。

### 3.2 耐衝撃性と載荷エネルギー比率の関係

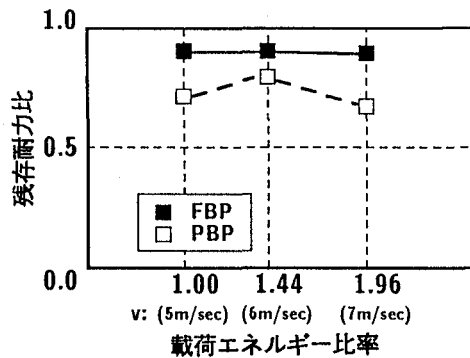
図-3 (a), (b)に、単一載荷を行った 12 体の PC 梁の残存耐力比と載荷エネルギー比率の関係を緊張材の配置位置ごとに示した。A 配置では、AFRP ロッドを緊張材に用いた梁の残存耐力比が載荷エネルギー比率の増加にともない大幅に低下していることが分かる。一方、PC 鋼より線を用いた梁の残存耐力比の低下はさほど顕著ではない。B 配置では、いずれの緊張材を用いた梁も、載荷エネルギー比率に関わらずほぼ一定の残存耐力比を示していることが分かる。

このことから、AFRP ロッドを緊張材に用いた PC 梁の耐衝撃性（健全度）におよぼす緊張材の配置位置の影響は極めて顕著であることが分かる。これは、AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃性が補強筋の配置位置に大きく影響され、また鉄筋を用いた梁では補強筋の配置位置の影響が少なかった既往の研究結果 [2] と符合している。すなわち、AFRP ロッドで補強した梁では緊張材のヤング係数が小さいために変位量が大きくなり、かつリバウンドにより梁上部に引張応力が発生するなどして梁上部が損傷を受けやすい。一方、B 配置では下縁応力度が A 配置に比べて少ないためにリバウンドが少なく [4]、かつ上縁に配置した緊張材が梁上部を補強しているためと考えられる。

なお、本実験の範囲内での衝撃載荷エネルギーでは、



(a) A 配置における関係



(b) B 配置における関係

図-3 残存耐力比と载荷エネルギー比率の関係

AFRP ロッドを緊張材に用いた A 配置の梁以外は、载荷エネルギーの増加が耐衝撃性に与える影響はさほど顕著ではないようである。

### 3.3 耐衝撃性とプレストレスの関係

図-4 に繰り返し载荷を行った 8 体の梁の残存耐力比と梁下縁の導入プレストレスの関係を示した。ここでは、耐衝撃性に与えるプレストレスの影響のみに着目するため、緊張材の配置位置が同一の梁ごとの残存耐力比を比較した。すなわち、下縁プレストレスが 0 と 50 または 100 kgf/cm<sup>2</sup> の 2 点を結ぶ直線の上下関係および勾配に着目して検討した。

まず、F タイプに着目すると、プレストレスを導入していない場合 (プレストレス 0) では、FB タイプの方が FA タイプよりも残存耐力比が大きく、いずれの配置でもプレストレスを導入した梁の方が導入しない梁よりも残存耐力比が大きいたことが分かる。これは、AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃性は、単筋配置した梁よりも複筋配置した梁の方が優れていることに対応している。また、F タイプの場合には緊張材のヤング係数が低いためにプレストレスによる変位の抑制効果が顕著に現れやすく、プレストレスの導入によりさらに梁上部の損傷が緩和されたためと考えられる。

一方、P タイプ梁の場合には、プレストレス 0 で F

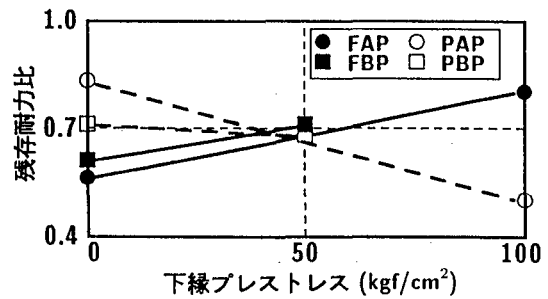


図-4 残存耐力比とプレストレスの関係

タイプとは逆に PA タイプの方が PB タイプよりも残存耐力比が大きく、いずれの配置でもプレストレスを導入した梁の方が残存耐力比が小さいことが分かる。これは、RC 梁の耐衝撃性に関する既往の研究結果 [2] と符合している。すなわち、異形鉄筋を用いた RC 梁の耐衝撃性は下端補強筋比に大きく影響され、A 配置の梁の方が B 配置の梁よりも下端 PC 鋼材量が多いために残存耐力比が大きくなったものと考えられる。

また、プレストレスが大きくなると、緊張材の剛性が高いことと相乗して梁のリバウンド現象が顕著になり、梁上部に大きな引張応力が発生して損傷を受けるために残存耐力比が小さくなるものと推察される。

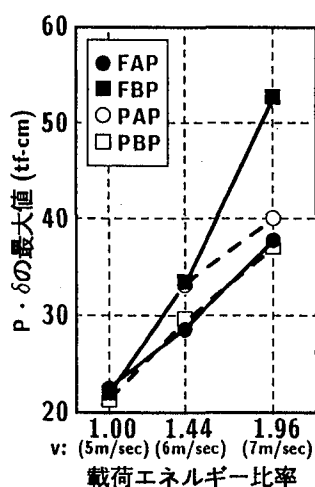
このように、緊張材の特性によって、プレストレスが梁の耐衝撃性に与える影響は全く異なったものとなる。

### 3.4 耐衝撃性と $P\cdot\delta$ の最大値の関係

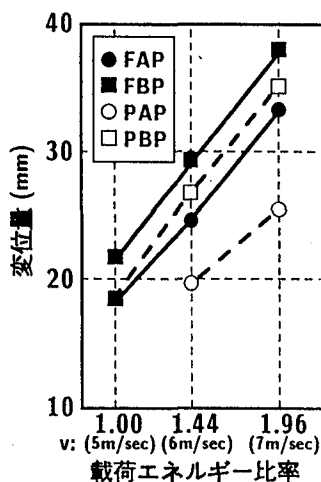
衝撃問題に関する最近の研究成果を取りまとめた文献 6) では、衝撃力を受ける構造物の安全性照査にエネルギーを用いる方法が提案されている。しかしながら、エネルギーの収支問題を含め、実験結果から各種エネルギー量を精度良く求めることは困難である。そこで、本研究では、梁の耐衝撃性 (健全度) を評価する指標として、ロードセル反力 ( $P$ ) が荷重として作用し、载荷点を原点とした相対変位量 ( $\delta$ ) が励起されたと仮定して得られる吸収エネルギーおよび出力エネルギーの 2 つのエネルギー量に着目することとした。これは、損傷によってエネルギーが吸収されると仮定すると、吸収エネルギーが小さく、出力エネルギー (入力エネルギー - 吸収エネルギー) の大きい梁ほど梁の健全度が高いと評価することができるものと考えられるからである。

図-5 に単一载荷を行った PC 梁の  $P\cdot\delta$  の最大値とその時の  $P$  および  $\delta$  を载荷エネルギー比率ごとに示した。なお、 $P\cdot\delta$  の最大値に着目したのは、その半分が概略の出力エネルギーを示し、かつ反力と変位量の影響を分離して検討できるからである。

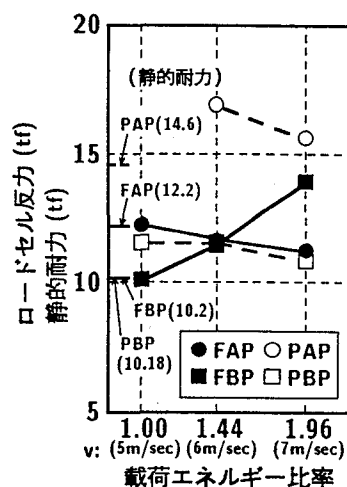
(a) 図から、 $P\cdot\delta$  の最大値が载荷エネルギー比率の増加に対応して増大していることが分かる。 $P\cdot\delta$  の最大値は FBP 梁が最も大きく、次が PAP 梁で、FAP と PBP



(a)  $P \cdot \delta$  の最大値



(b) 変位量



(c) ロードセル反力と静的耐力

図-5  $P \cdot \delta$  の最大値と変位量およびロードセル反力と载荷エネルギー比率の関係

梁が最も小さく両者極めて類似した関係を示している。  
 $v = 7 \text{ m/sec}$  载荷における FBP 梁の  $P \cdot \delta$  の最大値は他の梁に比べて 40 % ほど大きい。これは、FBP 梁が大きな入力エネルギーの作用下でも高い出力エネルギーを保持できることを示し、FBP 梁の残存耐力比が最も高いレベルで安定していること（図-3(b)）に対応している。

(b)図から、緊張材の剛性や配置位置に関わらず、変位量は载荷エネルギー比率の増加に対応してほぼ直線的に増大する傾向を示すことが分かる。ただし、変位量の大小は緊張材の剛性や配置位置の影響を受け、下縁導入プレストレスが最も大きく、緊張材の剛性も大きい PAP 梁の変位量は他の梁と比べて 5 ~ 10 mm 程度小さく示されている。

(c)図から、FBP 梁のロードセル反力のみが载荷エネルギー比率の増加に対応して増大し、他の梁はすべて若干であるが減少していることが分かる。これは、FBP 梁の残存耐力比が最も高いレベルで安定していることに対応するものと考えられる。また、FBP 梁の  $P \cdot \delta$  の最大値の顕著な増加（(a)図）は、変位量の増加傾向が各梁で同様である（(b)図）ことから、主としてロードセル反力の増加によるものであることが分かる。なお、载荷エネルギーが増大してもロードセル反力が減少する現象は、衝撃荷重の载荷によって梁にひびわれが発生して曲げ剛性が低下するためと考えられる。

一方、静的耐力とロードセル反力の大小関係を比較すると、FAP 梁のロードセル反力のみが静的耐力を下まわっていることが分かる。これは、図-3(a)に示したように FAP 梁の残存耐力比が载荷エネルギー比率の増加にともない大幅に低下していることに関連するものと考えられる。他の PC 梁では静的耐力以上のロードセル反力が励起されているが、最大反力と静的耐力との比は、FBP 梁の  $v = 7 \text{ m/sec}$  载荷における 1.36 倍が最大

で、他の梁では最大でも 1.13 ~ 1.16 倍である。

以上を要約すると、梁の概略の出力エネルギーの大小は耐衝撃性と密接に関連するものと考えられる。一方、変位量が载荷エネルギー比率の増加に対応して直線的に増大しその傾向がすべての梁で同様であることより、変位量への緊張材の特性や配置位置の影響は顕著ではない。ロードセル反力は、概略の出力エネルギーと同様に梁の耐衝撃性に密接に関連し、耐衝撃性の高い梁では载荷エネルギー比率の増加に対応してロードセル反力も顕著に増加している。

また、本実験の範囲内での载荷速度および入力エネルギーであれば、励起されるロードセル反力は静的耐力の 1.1 倍 ~ 1.4 倍程度までであり、衝撃荷重下における梁部材の動的耐力は静的耐力とほぼ同程度と考えておけば安全側である。

### 3.5 耐衝撃性と吸収エネルギーの関係

#### (1) 繰り返し载荷の場合

図-6に繰り返し载荷を行った 8 試験体の最終载荷速度  $v = 5 \text{ m/sec}$  における残存耐力比と吸収エネルギーの関係を示す。なお、吸収エネルギーは図-2に示す荷重-スパン中央変位曲線の载荷から除荷にいたるループのなす面積として求めた。なお、FBP 梁の  $v = 5 \text{ m/sec}$  载荷における吸収エネルギーは変位が測定不能であったため、 $v = 4 \text{ m/sec}$  载荷での吸収エネルギーに FBP 梁の  $v = 4 \sim 5 \text{ m/sec}$  载荷における吸収エネルギーの増加率を乗じて評価した。

ここで、残存耐力比は各試験体の静的耐力の計算値を基準として無次元化している。吸収エネルギーも同様に無次元化するべきであるが、基準となる処女静载荷における荷重-変位曲線を精度良く求めることが困難なため、ここでは実測した吸収エネルギーの絶対値を用いることにした。従って、すべての試験体の残存耐力比と吸収エ

エネルギーの関係を同一の尺度で比較することができないことより、共通する因子を有する試験体ごとに分けて比較検討することにした。

図-6(a)は、残存耐力比と吸収エネルギーの関係に与えるプレストレス導入の有無の影響を検討するため、同一の緊張材および配置位置の梁について両者の関係を比較したものである。これより、すべてのケースで吸収エネルギーが大きな梁ほど残存耐力比が小さいことが分かる。また、3.3で述べたように、Fタイプ梁では配置位置に関わらずプレストレスを導入した梁の方が導入しない梁よりも残存耐力比が大きく、Pタイプ梁では全く逆の傾向を示すことが分かる。ただし、B配置における残存耐力比の差は、緊張材の特性に関わらずA配置ほどは顕著ではない。

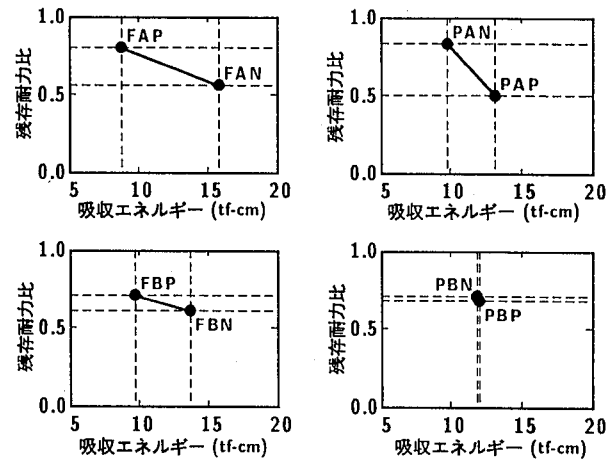
図-6(b)は、残存耐力比と吸収エネルギーの関係に与える緊張材の特性の影響を検討するため、同一の配置位置およびプレストレス応力の梁について両者の関係を比較したものである。これより、すべてのケースで吸収エネルギーが大きな梁ほど残存耐力比が小さいことが分かる。また、プレストレスを導入した梁では、配置位置に関わらずFタイプ梁の方がPタイプ梁よりも残存耐力比が大きく、プレストレスを導入していない梁では、全く逆の傾向を示すことが分かる。配置位置の影響は図-6(a)と同様であり、B配置では残存耐力比の差は顕著ではない。

図-6(c)は、残存耐力比と吸収エネルギーの関係に与える緊張材の配置位置の影響を検討するため、同一の緊張材およびプレストレス状態（プレストレスの有無）の梁について両者の関係を比較したものである。

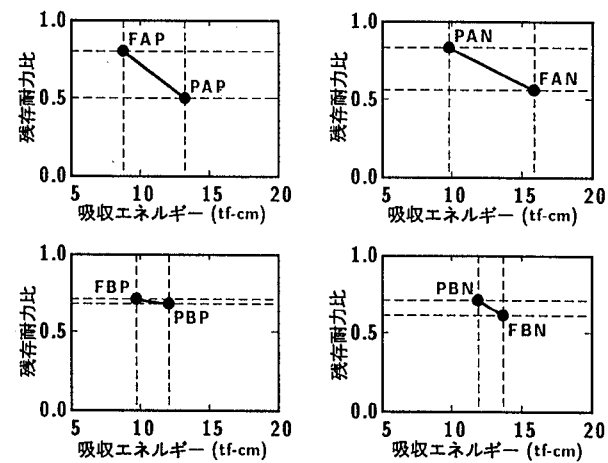
これより、すべてのケースで吸収エネルギーが大きな梁ほど残存耐力比が小さいことが分かる。また、Fタイプ梁でプレストレスを導入した場合はA配置の方がB配置よりも残存耐力比が大きいことが分かる。これは、図-3に示した単一載荷の載荷速度が $v=6\text{ m/sec}$ 以上の場合の残存耐力比の大小関係と逆である。このように、Fタイプ梁では載荷エネルギーの大きさによって配置位置の残存耐力比に与える影響は全く異なったものとなっている。

一方、Fタイプ梁でプレストレスを導入していない場合は、B配置の方がA配置よりも残存耐力比が大きい。なお、Pタイプ梁ではFタイプ梁と全く逆の傾向が示されており、緊張材の特性によって耐衝撃性に与える配置位置の影響も全く異なったものとなっている。

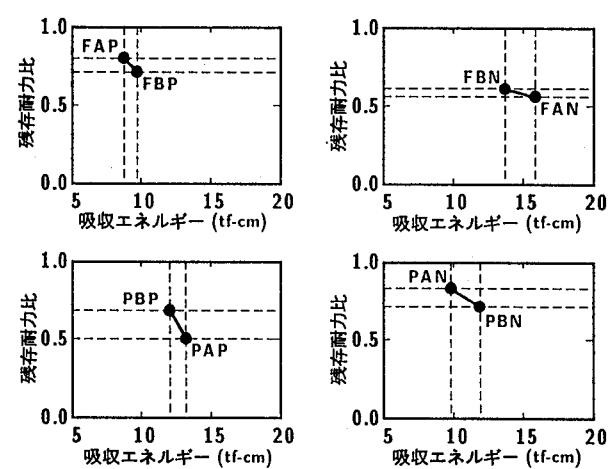
以上を要約すると、最大 $v=5\text{ m/sec}$ までの載荷速度で繰り返し載荷を行った場合には、梁の吸収エネルギーは耐衝撃性評価のための指標として十分に有効であると考えられる。また、吸収エネルギーを基に耐衝撃性に与えるプレストレスや緊張材の特性および配置位置の影響を定量的に検討することも可能であるものと考えられる。



(a) プレストレス導入の有無の影響



(b) 緊張材の特性の影響



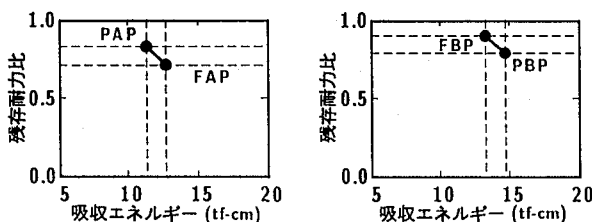
(c) 配置位置の影響

図-6 繰り返し載荷における残存耐力比と吸収エネルギーの関係

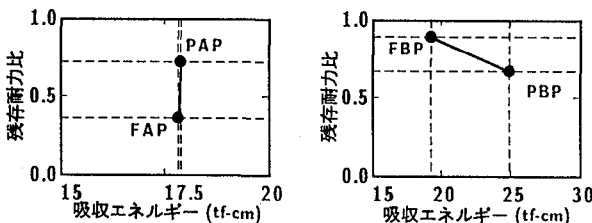
## (2) 単一載荷の場合

図-7には載荷速度が $v = 6 \text{ m/sec}$ および $7 \text{ m/sec}$ での単一載荷における残存耐力比と吸収エネルギーの関係を示している。図-7(a),(b)は、上記の係に与える緊張材の特性の影響を検討するため、同一の配置位置およびプレストレス分布の梁について両者の係を比較したものである。

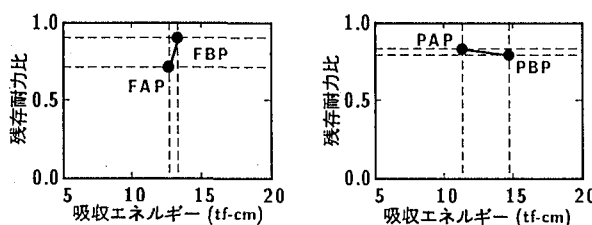
これより、 $v = 6 \text{ m/sec}$ 載荷におけるA配置の梁では、吸収エネルギーの大きな梁で残存耐力比が小さく、繰返し載荷と同様の傾向を示していることが分かる。しかし、FAとPAタイプ梁の残存耐力比の大小関係は繰返し載荷（図-6(b)）とは逆の結果を示している。また、 $v = 7 \text{ m/sec}$ 載荷では吸収エネルギーが大きな梁で残存耐力比が小さく、FAとPAタイプ梁の残存耐力比の大小関係も繰返し載荷とは逆の結果を示している。



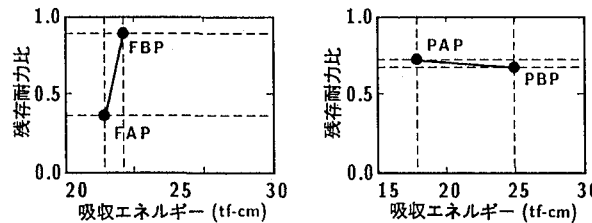
(a) 緊張材の特性の影響 ( $v = 6 \text{ m/sec}$  載荷)



(b) 緊張材の特性の影響 ( $v = 7 \text{ m/sec}$  載荷)



(c) 配置位置の影響 ( $v = 6 \text{ m/sec}$  載荷)



(d) 配置位置の影響 ( $v = 7 \text{ m/sec}$  載荷)

図-7 単一載荷における残存耐力比と吸収エネルギーの関係

一方、B配置の梁では両載荷速度で吸収エネルギーが大きな梁ほど残存耐力比が小さく、残存耐力比の大小関係も繰返し載荷と同様となっている。

図-7(c),(d)は、残存耐力比と吸収エネルギーの係に与える緊張材の配置位置の影響を検討するため、同一の緊張材を用いた梁について両者の係を比較したものである。

これより、Fタイプ梁では両載荷速度において吸収エネルギーの大きな梁で残存耐力比が大きく、繰返し載荷（図-6(c)）とは異なる結果を示していることが分かる。この相反する結果は、載荷エネルギーが大きい場合にFAタイプ梁の吸収エネルギーが比較的小さいにも関わらず残存耐力比が極めて小さいことに起因している。

一方、Pタイプ梁では両載荷速度において吸収エネルギーの大きな梁で残存耐力比が小さくなっている。しかし、配置位置による残存耐力比の差は僅かであり、繰返し載荷における差よりもかなり小さい。また、PAとPBタイプ梁の残存耐力比の大小関係は繰返し載荷とは逆の結果となっている。このように、Pタイプ梁において緊張材の配置位置が耐衝撃性に与える影響を吸収エネルギーで評価する場合の有効性にも載荷エネルギーの大きさが影響を与えているものと考えられる。

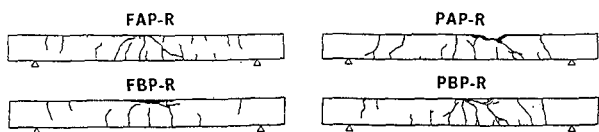
すなわち、吸収エネルギー単独で小さな載荷エネルギーと同様に大きな載荷エネルギーが作用する場合の梁の耐衝撃性を良好に評価することは難しく、他に重要な要因が関与しているものと考えられる。次節に一つの要因と考えられる衝撃実験終了後のひびわれ性状について検討を行うこととする。

## 3.6 耐衝撃性とひびわれ性状の関係

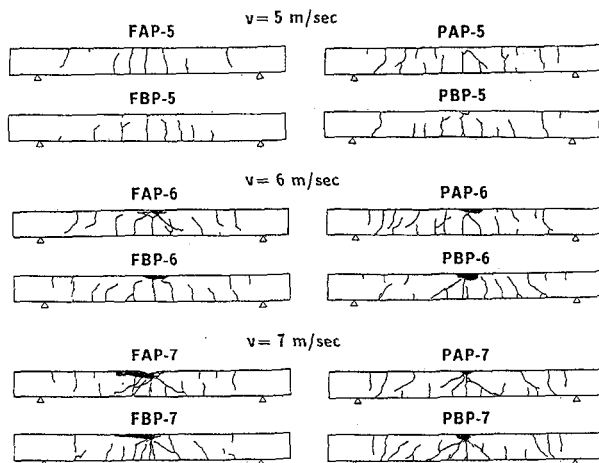
図-8にプレストレスを導入した各試験体の衝撃実験終了後のひびわれ性状を示す。図-8(a)は最大 $v = 5 \text{ m/sec}$ までの繰返し載荷を行ったPC梁の最終ひびわれ性状を、図-8(b)は単一載荷を行ったPC梁の $v = 5, 6, 7 \text{ m/sec}$ 載荷でのひびわれ性状を示す。

$v = 5 \text{ m/sec}$ までの繰返し載荷による累積載荷エネルギーと単一載荷の $v = 7 \text{ m/sec}$ における載荷エネルギーはほぼ等しい。しかし、ひびわれ性状を比較すると、Fタイプ梁では $v = 7 \text{ m/sec}$ の単一載荷の方が梁上部の損傷が激しく、かつ載荷点直下に押し抜きせん断型のひびわれが明瞭に発生していることが分かる。また、これらの傾向はB配置の梁に比べてA配置の梁で顕著である。

一方、Pタイプ梁の繰返し載荷では、いずれの配置でも損傷がスパン中央から若干ずれた所で顕著であり、押し抜きせん断型のひびわれは発生していない。一方、 $v = 7 \text{ m/sec}$ の単一載荷ではスパン中央上部のみに損傷が集中し、かつ載荷点直下には押し抜きせん断型のひびわれが明瞭に発生している。なお、すべての試験体で支点に近い位置の上縁から進展するひびわれが発生してい



(a) ひびわれ性状 (繰り返し載荷)



(b) ひびわれ性状 (単一載荷)

図-8 ひびわれ性状

る。これは、その位置で見かけ上の固定点が形式化され、負の曲げモーメントが励起されたためと考えられる。

本研究では、衝撃実験後に静的な載荷試験を行って残存耐力を確認し、それを耐衝撃性（健全性）の指標に用いている。そのため、衝撃実験でのひびわれ状況が残存耐力に影響を与える場合には、そのひびわれ状況が残存耐力比と吸収エネルギーの関係にも大きな影響を与えることとなる。すなわち、単一載荷したFAタイプ梁では、載荷エネルギーの増大とともに載荷点直下に押し抜きせん断型のひびわれが明瞭に発生し、残存耐力が他の梁に比べて著しく小さくなったものと考えられる。

これは、載荷エネルギーが大きい場合にはFAタイプ梁とPタイプ梁に押し抜きせん断型のひびわれが顕著に発生するが、このひびわれが残存耐力を低下させる度合いは、剛性の低いAFRPロッドを緊張材に用いたFAタイプ梁でより大きいためと考えられる。一方、吸収エネルギーもせん断変形量が曲げ変形量に比べて小さいことより、他と比較して小さく評価されたものと考えられる。

このように、ひびわれの状況が類似している場合には、残存耐力比と吸収エネルギーの関係を耐衝撃性評価の指標として適用することが可能である。しかしながら、ひびわれの状況が異なる場合には、上記の関係のみで耐衝撃性を評価することは不可能のように考えられる。今後はエネルギーの収支に着目し、吸収エネルギーを含む総合的なエネルギー論で耐衝撃性評価が可能であるかの検討を行う必要があるものと考えられる。

#### 4. まとめ

AFRP ロッドおよびPC鋼より線を緊張材に用いた梁を製作し、重錘衝撃実験および衝撃実験終了後に残存耐力を静的に確認して、緊張材の特性およびプレストレス応力と応力分布が梁の耐衝撃性に与える影響を検討した。さらに、耐衝撃性を評価する指標としての概略の出力エネルギーおよび吸収エネルギーの妥当性を検討した。

衝撃荷重は重量が200 kgfで直径が15 cmの鋼製の重錘を自由落下させて載荷した。本実験での最大載荷速度は $v = 7 \text{ m/sec}$ である。以下に、本実験の範囲内で得られた結論を要約する。

- 1) 衝撃載荷時の荷重-スパン中央変位の関係における初期勾配や最大荷重後の変位量の増加傾向は、静的載荷と同様に、プレストレスの有無や緊張材（補強材）の剛性に大きく影響される。一方、緊張材（補強材）の配置位置がこれらに与える影響はあまり顕著ではない。また、衝撃力の載荷方法が上記関係に与える影響もさほど顕著ではない。
- 2) AFRP ロッドを緊張材に用いたPC梁の残存耐力は緊張材の配置位置に大きく影響され、上下縁に配置した梁では残存耐力が大きく、載荷エネルギーが増加しても耐力低下はみられない。一方、PC鋼より線を用いた梁では残存耐力に与える緊張材の配置位置の影響は顕著ではない。
- 3) AFRP ロッドを用いた梁では、プレストレスの導入が残存耐力を高めるのに有効である。一方、PC鋼より線を用いた梁ではプレストレスを導入しても残存耐力は向上しない。このように、緊張材の特性によってプレストレスが残存耐力に与える影響は全く異なっている。
- 4)  $P \cdot \delta$  の最大値（出力エネルギーの指標）は耐衝撃性と密接に関連し、 $P \cdot \delta$  の最大値が載荷エネルギーの増加に対応して顕著に増大する梁の耐衝撃性は極めて良好である。この傾向は、衝撃載荷によって励起されるロードセル反力が載荷エネルギーに対応して増加する場合に最も明瞭である。
- 5)  $P \cdot \delta$  の最大値が載荷エネルギーに対応して増加しても、ロードセル反力が減少している梁では比較的大きな損傷を受けているものと考えられる。特に、励起されるロードセル反力が静的耐力以下の梁の耐衝撃性は他の梁に比べて著しく劣る。
- 6) 衝撃荷重によって励起される最大ロードセル反力は静的耐力を若干上回る程度であり、動的耐力が静的耐力と同程度であると考えerことは安全側である。
- 7) 低載荷速度（ $v = 5 \text{ m/sec}$ 程度まで）であれば、プレストレスの有無や緊張材の特性および配置位置に関わらず、残存耐力比と吸収エネルギーの関係は梁の耐衝撃性を評価するための指標として有効である。
- 8) 載荷速度が $v = 6 \text{ m/sec}$ 以上と大きい場合には、残存耐力比と吸収エネルギーの関係のみでは耐衝撃性

を十分に評価することはできない。この傾向は特に、AFRP ロッドを緊張材に用いて A 配置した梁で顕著である。

- 9) 8)の原因として、低剛性の緊張材を用いた梁に押し抜きせん断型のひびわれが発生した場合、残存耐力が大幅に低下する一方、吸収エネルギーの増加は少ないことが考えられる。
- 10) 耐衝撃性の評価要因としてひびわれ性状は重要であり、性状が類似している場合には残存耐力比と吸収エネルギーの関係を評価指標として適用できるものと考えられる。

本研究を行うに当たり、室蘭工業大学大学院生の松坂祐介君（故人）を始めとする構造力学講座の諸君ならびに技官の田中功氏に多大なるご支援を頂きました。記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物へ

の適用，コンクリートライブラリー第 72 号，1992.

- 2) 三上浩，田村富雄，岸徳光，松岡健一：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.923-928，1993.
- 3) 岸徳光，三上浩，田村富雄，松岡健一：RC 梁の衝撃挙動におよぼす補強筋特性の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.1105-1110，1994.
- 4) 田村富雄，三上浩，岸徳光，松岡健一：AFRP ロッドを緊張材に用いた PC 桁の衝撃挙動に及ぼす緊張材位置の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.2，pp.929-934，1993.
- 5) 中島規道，三上浩，岸徳光，松岡健一：PC 桁の衝撃変形挙動におよぼす緊張材の特性と配置位置の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.1111-1116，1994.
- 6) 構造物の衝撃挙動と設計法，土木学会，1994.

(1994年9月14日受付)