

## (51) 緊張材の特性とプレストレス応力がPC梁の衝撃耐荷性状におよぼす影響

三井建設(株)	技術研究所	○三上 浩
三井建設(株)	技術研究所	田村 富雄
室蘭工業大学	建設システム工学科	岸 徳光
室蘭工業大学	建設システム工学科	松岡 健一

### 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性向上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、実構造物への適用事例も着実に増加している。[1] FRPロッドは耐食性に優れ、軽量かつ非帯磁性であり、引張耐力は同一断面積の鉄筋の2~3倍程度以上と大きい。反面、ヤング係数が鋼材の1/2~1/3程度と小さいため、PC鋼材の代替として適用された事例が多いようである。さらに、FRPロッドは鋼材のような降伏点を持たず、1~4%程度のひずみ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く、土木学会等で試験方法や設計方法ならびに施工基準などを作成すべく検討が精力的になされている。

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。その結果、異形鉄筋で補強した梁は、鉄筋の降伏により衝撃荷重が載荷点直下に集中し、梁は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の大きさや引張強度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応力度の大小および応力分布(下縁応力度)が耐衝撃性に与える影響を検討した。なお、衝撃荷重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ため、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、その静的耐力に対する割合の大小で評価することにした。

### 2. 実験の概要

実験に用いた試験体は表-1に示す20体である。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で、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、該当する載荷速度で一回のみの載荷(単一載荷)を行っている。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1m/secから1m/sec刻みで最大5m/secまで行った。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。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応力を50kgf/cm<sup>2</sup>としている。コンクリートの28日圧縮強度は770kgf/cm<sup>2</sup>、ヤング係数は $3.72 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>である。なお、実験時の材令における圧縮強度は806kgf/cm<sup>2</sup>であった。

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。試験体には衝撃による梁側面でのコンクリー

トの剥落を防止するため、  
異形鉄筋D6のスターラップ  
を100mm ピッチで配置した。

衝撃試験では支点部のリ  
バウンドを防止するため、  
梁の両端面から25cmの位置  
で鋼製の治具を用いて上下  
を固定した。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。

なお、支点部には衝撃荷  
重測定用に開発したロード  
セルを設置し、反力を測定  
した。衝撃荷重は、ピン支  
持された梁のスパン中央に  
重量が200kgf、直径が15cm  
の鋼製の重錘を所定の高さ

から自由落下させて載荷している。残存耐力確認試験は、衝撃試験と同じ位置で梁をピン支持し、梁中央に重錘と同一の直径を有する鋼製の円盤を設置して油圧ジャッキにより加力して行った。

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 比率	残存耐力 (1) (tf)	静的耐力 (2) (tf)	残存耐力比 (1)/(2)
FAP-5	5	1	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	2.2	9.72	12.20	0.80
FAN-R	1~5	2.2	4.58	8.24	0.56
PAP-5	5	1	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	2.2	7.33	14.60	0.50
PAN-R	1~5	2.2	9.05	10.94	0.83
FBP-5	5	1	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	2.2	7.29	10.20	0.71
FBN-R	1~5	2.2	4.76	7.75	0.61
PBP-5	5	1	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	2.2	6.93	10.18	0.68
PBN-R	1~5	2.2	6.68	9.74	0.71

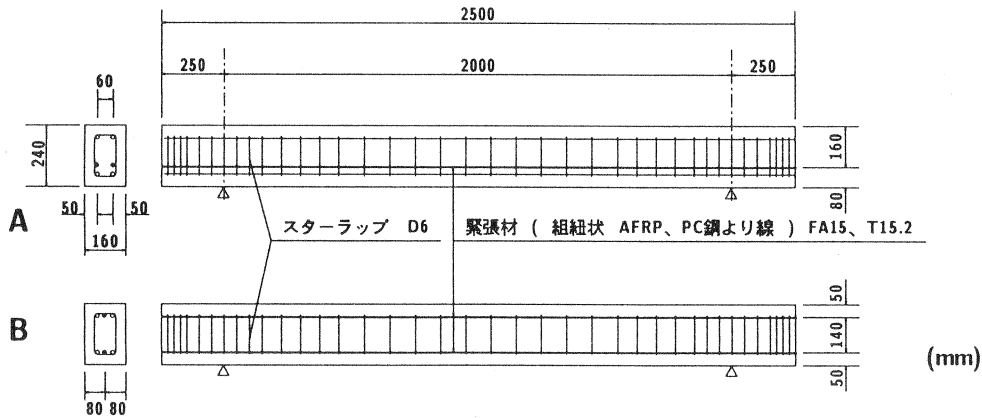


図-1 試験体の形状寸法および緊張材の配置位置

### 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および断面分割法で求めた終局曲げ耐力の計算値とそれらの比率(残存耐力比)の一覧を示す。なお、残存耐力試験ではすべての梁が上縁の圧縮破壊で破壊した。表中の載荷エネルギー比率は、載荷速度が5m/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ので、繰り返し載荷した梁では5m/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。

表-2 緊張材の力学的特性

緊張材の名称	AFRPロッド FA15	PC鋼より線 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(t/m <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 ( $\times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup> )	0.7	2.0
弾性伸び率(%)	2.0	0.15~0.20

(1) 衝撃載荷時の荷重-スパン中央変位の関係

図-2に繰り返し載荷を行った8試験体の 5m/sec 載荷における荷重-スパン中央変位の関係を示す。(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重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 梁の結果は、変位計が衝撃実験中にはずれたため参考として示す。なお、図中のX、Yは各々変位および荷重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後の変位の増加に着目して検討する。

初期勾配は、プレストレスを導入した梁がしていない梁よりも大きく、また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。また、A配置がB配置よりも初期勾配が大きいが、その傾向はFタイプ梁よりもPタイプ梁の方で顕著である。これらは、それぞれプレストレスを導入した梁、剛性の高い緊張材(補強材)を用いた梁、A配置の梁の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。

一方、最大荷重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。また、B配置の梁ほど変位の増加量は大きい、この傾向は特に剛性の高い補強材を用いた場合に顕著となっている。これらは、プレストレスを導入していない梁では、静的載荷と同様に補強材の剛性が変位量に大きな影響を与え、初期勾配と同様に配置位置の影響度合いが剛性の大小によって変化することを示すものと考えられる。

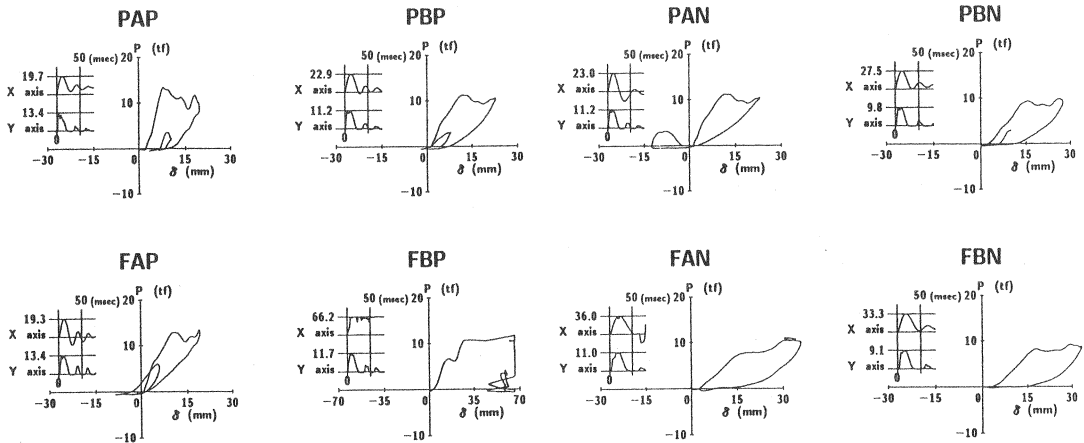


図-2(a) PC梁の荷重-変位関係

図-2(B) RC梁の荷重-変位関係

図-2 衝撃載荷時の荷重-スパン中央変位の関係 (V=5m/sec)

(2) 載荷エネルギー比率と残存耐力比の関係

図-3(a)、(b)に、単一載荷を行った12体のPC梁の載荷エネルギー比率と残存耐力比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鋼材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ロッドで緊張したPC梁の衝撃载荷後の残存耐力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、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が、B配置では下縁応力がA配置に比べて小さ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载荷エネルギーでは、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残存耐力比に与える影響はさほど顕著ではなかった。

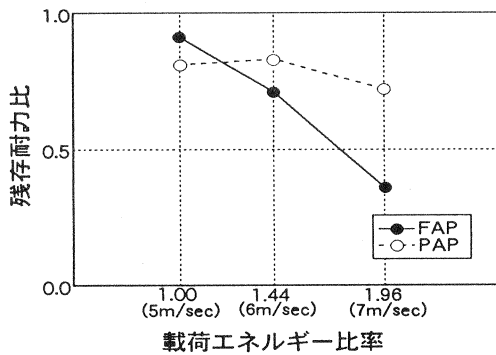


図-3(a) A配置における関係

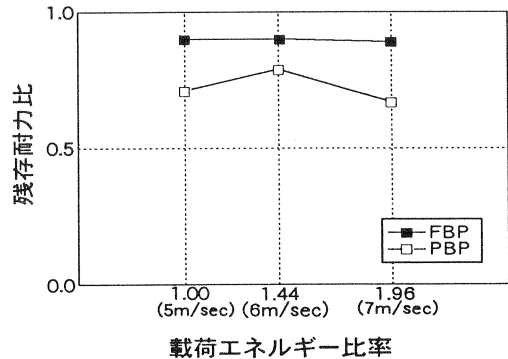


図-3(b) B配置における関係

図-3 载荷エネルギー比率と残存耐力比の関係

(3)残存耐力比に与えるプレストレスの影響

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応力の関係を示した。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について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100kgf/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。

これより、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方が導入しない梁よりも残存耐力比が大きいことが分かる。

これは、AFRPロッドで補強したRC梁の耐衝撃性は、単筋配置の梁よりも複筋配置の梁の方が優れていることに対応している。また、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剛性の高いPC鋼より線を用いた梁に比べて顕著に現れやすく、梁上部の損傷がプレストレスの導入によりさらに緩和されたものと考えられる。

一方、PC鋼より線を用いた梁では、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鋼材量が大きいために残存耐力比が大きくなったものと考えられる。

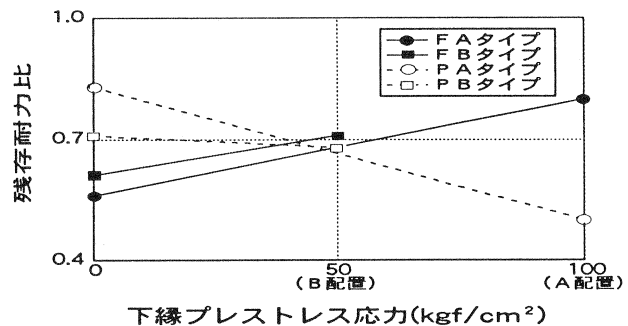


図-4 残存耐力比とプレストレス応力の関係

えられる。また、プレストレス応力が大きくなると、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ったものと推察される。このように、プレストレス応力や応力分布が梁の耐衝撃性に与える影響は、緊張材の特性によって全く異なったものとなる。

(4)  $P \cdot \delta$  の最大値と耐衝撃性の関係

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( $P$ )と変位置( $\delta$ )から求まる出力エネルギーに着目することにした。すなわち、損傷によってエネルギーが吸収されると仮定すると、入力エネルギーから吸収エネルギーを差し引いた出力エネルギーがより大きな梁ほど健全度は高いと評価できるからである。図-5に単一載荷を行ったPC梁の  $P \cdot \delta$  の最大値とその時の  $\delta$  および  $P$  を載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、それが概略の出力エネルギーを示し、かつ反力と変位置の影響を分離して検討できるからである。

(a) 図から、 $P \cdot \delta$  の最大値が載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梁が最も小さく両者極めて類似した関係を示している。7m/sec 載荷における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梁が高い出力エネルギーを大きな入力エネルギーの作用下でも保持できることを示し、図-3に示したように、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。

(b) 図から、緊張材の剛性や配置位置に関わらず変位置は載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、変位置の大小は剛性や配置位置の影響を受け、最も導入プレストレスが大きく、緊張材の剛性も大きいPAP梁の変位置は他の梁と比べて10mm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載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は、変位置の増加傾向が各梁で同様であることから、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。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回っていることが分かる。これは、FAP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に関連するものと思われる。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7m/sec 載荷における1.36倍が最大で、他の梁では最大でも1.13~1.16倍程度である。

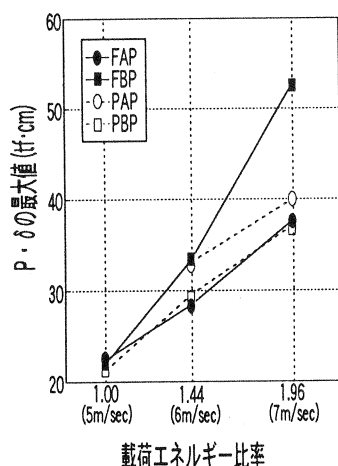


図-5(a)  $P \cdot \delta$  の最大値

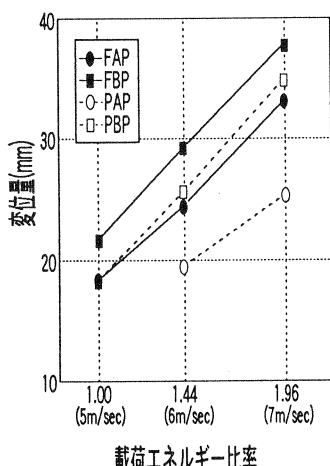


図-5(b) 変位置

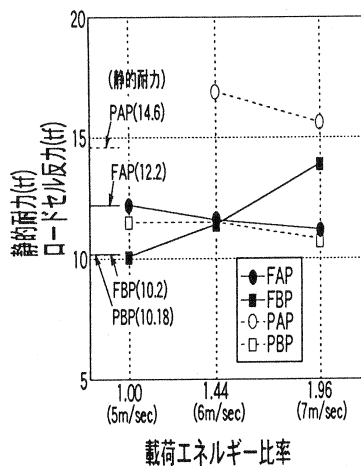


図-5(c) ロードセル反力と静的耐力

図-5 載荷エネルギー比率と  $P \cdot \delta$  の最大値および変位置とロードセル反力の関係

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(残存耐力比の大小)と密接に関連するものと考えられる。一方、変位量は載荷エネルギー比率の増加に対応して直線的に増大し、その傾向はすべての梁と同様であり、緊張材の特性や配置位置の影響は顕著ではない。ロードセル反力の増加は、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するものと考えられ、耐衝撃性の高い梁では載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載荷速度および載荷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、梁部材の衝撃荷重下における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。

#### 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。衝撃荷重は重量が200kgfで直径が15cm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7m/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の剛性および配置位置に影響される。
- 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、衝撃エネルギーが増加しても耐力の低下はみられない。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さほど顕著ではない。
- 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(概略の出力エネルギー)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に対応して顕著に増加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(概略の出力エネルギー)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ロードセル反力の最大値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。

本研究を行うに当たり、室蘭工業大学大学院生の松坂裕介君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)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、土木学会、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