

論文

[2124] FRPロッドを緊張材として用いたPC梁の曲げ性状

正会員○米倉亜州夫（広島大学第四類）

正会員 田澤 栄一（広島大学第四類）

中山 英明（広島大学大学院）

永田浩一郎（極 東 工 業）

1. まえがき

A FRP, CFRP, GFRPロッドなどの新素材は、その引張強度が高く、これらをPC緊張材として利用することが考えられている。このようなFRPロッドを用いたPC梁の曲げ性状に関しては、ある程度明らかにされてきているが、その中で、特に問題となるのは、FRPロッドは、破断時の伸びがPC鋼材に比べて小さいために、PC梁は、緊張材の破断により急激な脆性破壊を起こす可能性があることである。そのため、曲げ圧縮破壊を生じるよう設計することも考えられているが、まだ明確な設計方法は確立されていない。そこで本研究ではCFRPおよびAFRPを緊張材として用いたポストテンション梁の緊張材の量、緊張力、軸方向補強筋の種別と量を変化させた場合の曲げ破壊耐力および曲げ破壊形式をPC鋼材を用いた場合と比較して検討し、この種のFRPロッドを用いたPC梁の設計上の基礎的資料を得ることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用したFRPロッドは炭素繊維製ストランド（以下CFRPストランド）およびアラミド繊維製ロッド（以下AFRPロッド）である。CFRPストランドのマトリックスはエポキシ樹脂である。AFRPロッドは、付着性状を改善するために異形化されたものであり、マトリックスはビニルエステル系樹脂である。メーカーのデータによれば、両者とも付着特性にすぐれ、CFRPストランドの場合、PC鋼より線の約2.5倍、AFRPロッドの場合、約2倍の付着強度を有している。これらのロッドの基本的性質を表-2.1に示す。また比較のためにPC鋼棒（C種1号、SBPR110/125）を使用した。軸方向補強筋にはφ9mm（SR-24）の丸鋼、または、φ5およびφ12.5mmのCFRPストランドを使用し、スターラップおよび定着部補強筋にはφ6mm（SR-24）の丸鋼を使用した。これらの鋼材の基本的性質を表-2.2に示す。

セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、コンクリートの配合は、プレストレス導入時（材令7日）のコンクリートの圧縮強度が500 kgf/cm²程度となるように定めた。

2.2 供試体の種類

供試体は、緊張材の種類、軸方向補強筋の種類、緊張材量、初期緊張量の大きさをパラメータとし、表-2.3に示すとおりとした。

表-2.1 FRPロッドの基本的性質

	径 (mm)	断面積 (mm ²) ※	弾性係数 (kgf/cm ²)	切断荷重 (kgf)	引張強度 (kgf/cm ²)	伸び (%)	重量 (g/m)	断面形状
CFRP	φ 5.0	10.1 (6.5)	1.42×10 ⁶	1960	19400	1.5	24	7本より線
	φ 12.5	76.0 (48.5)	1.45×10 ⁶	16000	21100	1.5	153	7本より線
	φ 17.8	154.9 (98.8)	1.39×10 ⁶	30450	19700	1.5	294	7本より線
	φ 25.0	290.9(185.6)	1.32×10 ⁶	56600	19500	1.5	596	19本より線
AFRP	3×φ 6	84.8 (55.1)	0.54×10 ⁶	16110	19000	3.6	123	異形丸棒

※ () 内は繊維のみの断面積を示す

2.3 供試体の製造

方法および荷重方法

供試体の形状寸法は、図-2.1 に示すようにスパン140cm のI型断面とし、緊張材を下縁から6cmの位置とし、軸方向補強筋を4隅に配置した。

また、せん断補強のためφ6mmのスターラップを図-2.2 に示すように配置した。

プレストレスの導入は35ton センターホールジャッキを用いて行い、導入後、直ちにグラウトの注入を行った。グラウトの配合を表-2.4 に示す。

荷重方法は図-2.3 に示すように2点荷重とし曲げ試験を行った。またせん断スパン有効高さ比

(a/d) は3.0 とした。なお、荷重はプレストレス導入後1週間(材令14日)で行った。測定は、緊張材軸方向補強筋およびコンクリートのひずみ、梁中央のたわみなどを測定した。

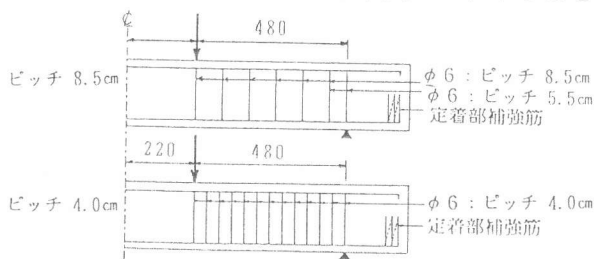


図-2.2 スターラップの配置 (mm)

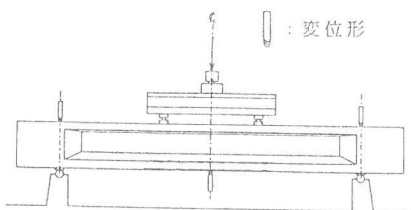


図-2.3 荷重方法

表-2.2 鋼材の基本的性質

	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	降伏荷重 (kgf)	降伏強度 (kgf/cm ²)	伸び (%)
C種1号 PC鋼棒	13	132.7	2.0×10 ⁶	18450	13900	10
	17	220.2	2.0×10 ⁶	27080	12300	12
	21	324.7	2.0×10 ⁶	42210	13000	9
SR-24	6	23.6	2.1×10 ⁶	670	2830	
	9	58.1	2.1×10 ⁶	1720	2960	

表-2.3 梁供試体の種類

供試体	緊張材	軸方向補強筋	緊張量(t) ※	スターラップピッチ(cm)	σ _{c1} (kgf/cm ²)#
P ₁ -S-1	φ13.0	4-φ9.0	8.2 (45%)	8.5	72.0
C ₁ -S-1	φ12.5	4-φ9.0	8.2 (51%)		72.0
C ₁ -C ₀ -1	φ12.5	4-φ5.0	8.2 (51%)		72.0
A ₁ -S-1	3×φ6	4-φ9.0	8.2 (49%)		72.0
C ₁ -S-2	φ12.5	4-φ9.0	12.0 (75%)		105.0
C ₁ -C-0	φ12.5	4-φ12.5	0.0 (0%)	4.0	0.0
C ₁ -C-1			8.2 (51%)		72.0
C ₁ -C-2			12.0 (75%)		105.0
P ₂ -S-1	φ17.0	4-φ9.0	8.2 (30%)	8.5	72.0
P ₂ -S-3	φ17.0		16.4 (61%)		144.0
C ₂ -S-3	φ17.8		16.4 (54%)	4.0	144.0
C ₂ -S-4	φ17.8		22.8 (75%)	4.0	200.0
C ₂ -C-0	φ17.8		4-φ12.5	0.0 (0%)	4.0
C ₂ -C-1		8.2 (27%)		72.0	
C ₂ -C-3		16.4 (54%)		144.0	
P ₃ -S-5	φ21.0	4-φ9.0	24.6 (54%)	4.0	216.0
C ₃ -S-5	φ25.0	4-φ9.0	24.6 (44%)		216.0

※ ()内はP_t/P_u。ここにおいて、P_t:緊張力、P_u:降伏点荷重または引張荷重 #σ_{c1}はプレストレス導入後のコンクリート下縁の圧縮応力

供試体名は (緊張材の種類) — (軸方向補強筋の種類) — (緊張量) を示す
 C₁: CFRP φ12.5 C₀: CFRP φ5 0: 0.0 t
 C₂: CFRP φ17.8 C₁: CFRP φ12.5 1: 8.2 t
 C₃: CFRP φ25.0 S: 丸鋼 φ9 2: 12.0 t
 P₁: PC鋼棒 φ13.0 3: 16.4 t
 P₂: PC鋼棒 φ17.0 4: 22.8 t
 P₃: PC鋼棒 φ21.0 5: 24.6 t
 A₁: AFRP 3×φ6

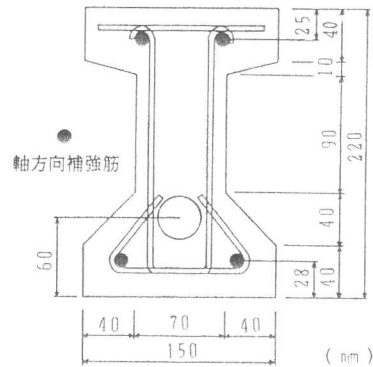


図-2.1 供試体の形状寸法

表-2.4 グラウトの配合

セメント	15kg	W/C = 41% アルミニウム粉末; Cx0.01%
水	6.15kg	
マイティ	100g	
アルミニウム粉末	1.5g	

3 実験結果

3.1 曲げひび割れ発生荷重および曲げ破壊耐力の算定

表-3.1 に載荷試験結果の一覧を示す。CFRPストランドでプレストレスを導入しなかった C_1-C-0 の梁がせん断破壊したのを除けば、FRPロッドを用いた梁の破壊は、曲げ圧縮破壊、緊張材破断、軸方向補強筋破断の3形式である。曲げひび割れ発生荷重の算定において、AFRPロッドおよびPC鋼棒を用いた梁は、ロードセルにより緊張力の管理を行って、有効プレストレスを測定している。しかし、CFRPストランドを用いた梁の場合は、ロードセルを装着していないので、載荷までのプレストレスの損失は不明であり、緊張直後の値を用いて計算した。しかしながら計算値と実験値はほぼ近似しており、曲げ耐力の場合でも、従来の算定方式で評価できることが認められた。

表-3.1 載荷試験結果

	コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲げひび割れ発生荷重(ton)		破壊荷重(ton)		$\frac{P_u-1}{P_u-2}$	破壊形式	
		実験値 P_{cr-1}	計算値 P_{cr-2}	実験値 P_{br-1}	計算値 P_{br-2}			
P_1-S-1	559(538)	5.90	5.98	0.99	16.70	13.70	1.22	曲げ引張破壊
C_1-S-1	616(520)	5.50	5.70	0.96	13.00	12.37	1.05	緊張材破断
C_1-C_0-1	555(503)	5.90	5.67	1.04	11.75	12.40	0.95	補強筋破断
A_1-S-1	554(550)	5.45	5.27	1.03	12.60	11.65	1.08	曲げ圧縮破壊
C_1-S-2	623(545)	7.20	7.32	0.98	15.00	12.33	1.22	緊張材破断
C_1-C-0	620	—	—	—	19.60	23.10	0.85	せん断圧縮破壊
C_1-C-1	596(527)	6.00	5.90	1.02	23.30	23.96	0.97	曲げ圧縮破壊
P_0-S-1	529(482)	5.50	6.05	0.91	20.10	18.91	1.06	曲げ引張破壊
P_0-S-3	619(481)	10.00	9.07	1.10	20.80	18.28	1.14	曲げ引張破壊
C_0-S-3	618(534)	9.20	9.34	0.99	21.60	22.19	0.97	曲げ圧縮破壊
C_0-S-4	609(530)	11.00	11.25	0.98	20.00	20.31	0.98	緊張材破断
C_0-C-0	598	2.00	2.59	0.77	20.70	22.69	0.91	せん断圧縮破壊
C_0-C-1	551(550)	5.90	5.65	1.04	22.70	23.65	0.96	曲げ圧縮破壊
C_0-C-3	647(528)	7.80	8.46	0.92	25.10	27.07	0.93	曲げ圧縮破壊
P_0-S-5	598(535)	14.00	13.28	1.05	26.30	27.64	0.95	曲げ圧縮破壊
C_0-S-5	648(543)	13.00	12.12	1.07	26.30	27.02	0.97	曲げ圧縮破壊

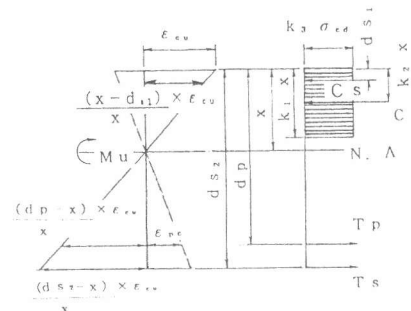


図-3.1 断面のひずみ分布と応力分布

ϵ_{ps} :有効プレストレス力による緊張材位置のコンクリートのひずみ, ϵ_{ps} :有効プレストレス力による緊張材の引張ひずみ, d_0 :圧縮縁から緊張材図心までの距離, d_{11} , d_{12} :それぞれ圧縮縁から圧縮側軸方向補強筋および引張側軸方向補強筋図心までの距離, C:圧縮域コンクリートの合力, C_s :圧縮側軸方向補強筋の圧縮力, T_p , T_s :それぞれ緊張材および引張側軸方向補強筋の引張力, σ_{cd} :コンクリートの圧縮強度, $k_1=0.80$, $k_2=0.40$, $k_3=0.85$

圧縮強度は載荷時の圧縮強度, ただし, () 内は緊張時の圧縮強度

計算は次の方法で行った。 M_{cr} : ひび割れ発生モーメント, l : せん断スパン, Z : 換算断面の断面係数

○曲げひび割れ発生荷重 σ_{ps} : 荷重作用時における断面引張部の有効プレストレス, σ_c : コンクリートの曲げ引張強度

$P_{cr} = 2M_{cr} / l$ $M_{cr} = (\sigma_{ps} + \sigma_c) Z$ (1)

○曲げ破壊荷重

破壊時のコンクリートの圧縮応力分布を図-3.1 のように仮定し、釣合い式 (2) より中立軸 x を求めて計算した。ただし、緊張材および軸方向補強筋破断による破壊の場合は、CFRPストランドの終局ひずみを1.5%として計算した。なお (3) 式は中立軸がフランジ内にある場合の式である。

$C + C_s = T_s + T_p$ (2) $P_u = 2M_u / l$

$M_u = C_s (k_2 x - d_{11} x) + T_s (d_{12} - k_2 x) + T_p (d_0 - k_2 x)$ (3)

$C = k_1 k_3 b x \sigma_{cd}$ $T_s = A_s E_s (x - d_{12}) \epsilon_{ps} / x$ $C_s = A_s E_s (x - d_{11}) \epsilon_{ps} / x$ $T_p = A_p E_p (\epsilon_{ps} + \epsilon_{ps} + (d_0 - x) \epsilon_{ps} / x)$

A_s , A_p : それぞれ軸方向補強筋および緊張材の断面積, E_s , E_p : それぞれ軸方向補強筋および緊張材の弾性係数

3.2 ひび割れ性状および破壊性状

図-3.2-4 に代表的な梁のひび割れ性状およびひずみ分布図を示す。ひずみ分布図はひび割れ発生前、ひび割れ発生後、破壊前の三つの荷重に対して示している。また、図中の C_s , T_p , T_s はそれぞれ圧縮側軸方向補強筋、緊張材、引張側軸方向補強筋の負担力を示している。図より緊張材の種類により破壊性状が異なっている。AFRPロッドを用いた A_1-S-1 およびCFRPストランドを用いた C_1-S-1 は曲げ圧縮破壊、 P_1-S-1 は曲げ引張破壊であり終局耐力も異なっている。これは図-3.1 に示すように弾性係数および断面積が最も小さい A_1-S-1 の方が、同一荷重に対して緊張材の引張応力が大きいことによって、ひずみが大きくなり、平面保持の仮定から求めた中立軸の位置が上がるためにコンクリートの圧縮部領域が狭小となって、圧縮破壊したためと考えられる。これは A_1-S-1 のひび割れ図において荷重10ton のと

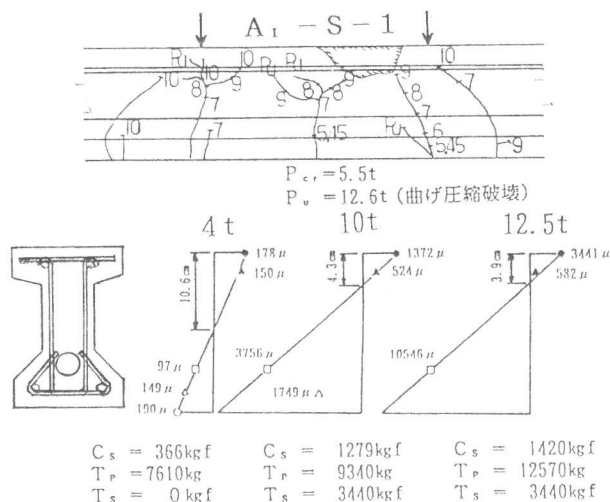


図-3.2 ひび割れ図及び梁中央のひずみ分布図

きに、ひび割れがフランジ内に進展していることから推測される。

軸方向補強筋にCFRPストランドを用いたC₁-C₀-1は、鉄筋を用いたC₁-S-1よりも中立軸はさらに上がっている。しかし、CFRPストランドの破断時のひずみは1.5%であり鉄筋と比べて小さいために、軸方向補強筋が破断し、その後コンクリートの圧縮破壊が生じている。一方、軸方向補強筋量を増やしたC₁-C-1では軸方向補強筋が終局時まで破断することなく引張力を受け持っているために曲げ破壊耐力が大幅に増大している。

緊張材量および緊張力を増やした梁C₁-S-3においても圧縮破壊しているが、ひずみ分布から求めた中立軸は、図-3.5に示すようにC₁-S-1ほど上がっていない。これらのことから、FRPロッドを用いたPC梁が曲げ圧縮破壊をする場合には、緊張量、緊張材量、軸補強筋量を増やすことにより、曲げ圧縮耐力を大きくできると考えられる。またこれは、図-3.6に示すように、破壊荷重と緊張材の引張耐力との関係からも明らかである。緊張材の引張耐力とは、ここではPC鋼棒の場合は降伏荷重を、FRPロッドの場合は、破断荷重を意味している。

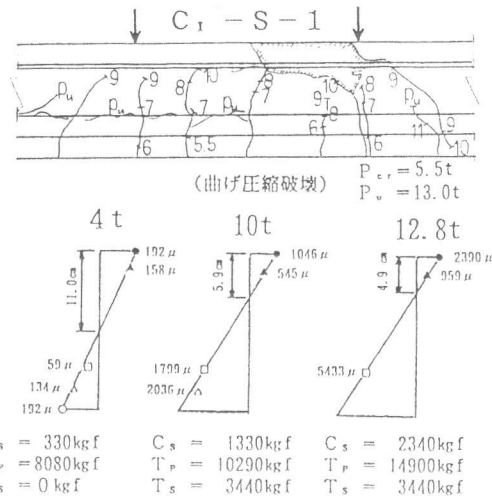


図-3.3 ひび割れ図及び梁中央のひずみ分布図

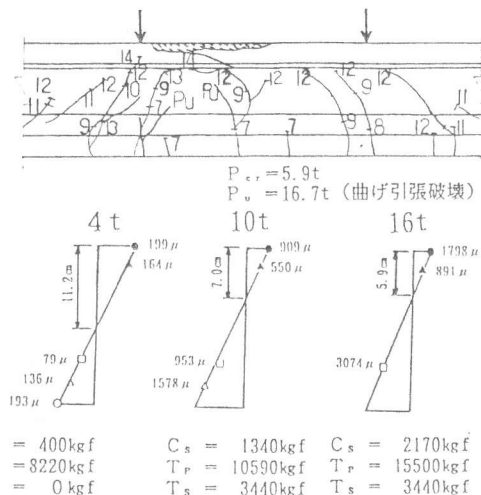


図-3.4 ひび割れ図及び梁中央のひずみ分布図

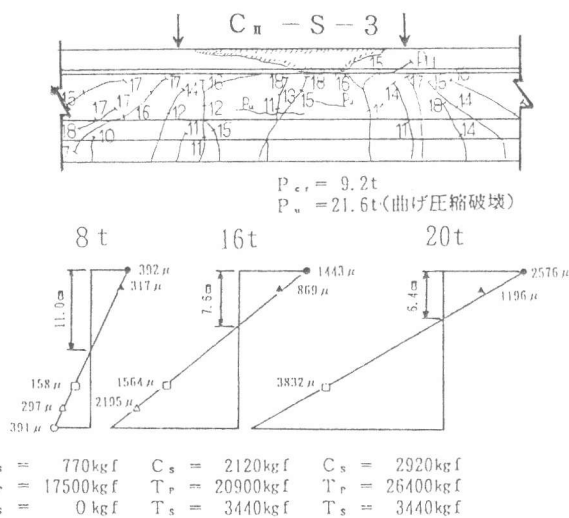


図-3.5 ひび割れ図及び梁中央のひずみ分布図

次に緊張力の相違が曲げ耐力に及ぼす影響について検討する。図-3.7は各梁の曲げ耐力と緊張力比との関係をプロットしたものである。ここでいう緊張力比とは、FRPロッドの破断荷重およびPC鋼棒の降伏荷重に対する初期緊張荷重の比である。図において、CFRPストランド

を緊張材として用いるPC梁は、曲げ圧縮破壊の領域では緊張力比を高くすると耐力が大きくなるが、緊張力比を高くしすぎると部材の破壊は、緊張材の破断による曲げ引張破壊に移行してしまう。従って、引張耐力に対する緊張力の割合が大きい場合には、緊張力の選定に十分注意する必要がある。

3.3 荷重-たわみ関係

以下の項目がPC梁のたわみに及ぼす影響について考察を行った。

(1) 緊張材の種類による影響 図-3.8 に各種緊張材を用いたPC梁の荷重-たわみ関係を示す。ひび割れ後のたわみはPC鋼棒と比べてFRPロッドを用いたほうが大きくなっている。特にAFRPロッドはCFRPストランドよりも終局時の中立軸の位置が上昇するために、たわみが同一荷重において、やや大きくなっている。しかし図-3.9 に示すように緊張材量および緊張力を増やした場合ではPC鋼棒を用いた梁とFRPロッドを用いた梁とのたわみの差が小さくなっている。これは両者とも曲げ圧縮破壊しており、曲げ圧縮破壊する梁では変形量が小さくなるため、緊張材の種類による変形量の差が小さくなったものと考えられる。このときCFRPストランドを用いた梁のほうが、PC鋼棒を用いたPC梁よりも中立軸の位置はやや上がっているが、中立軸の位置が巾の小さい腹部内にあるため、破壊時の圧縮合力の値にはほとんど差はなく、このためPC梁の圧縮破壊耐力との差も小さくなっている。

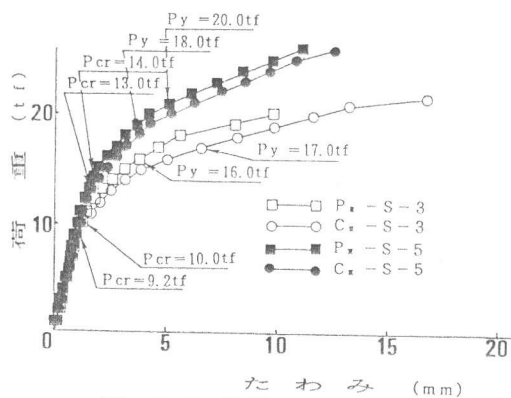


図-3.9 荷重-たわみ関係

(2) 軸方向補強筋の種類および量による影響

図-3.10に異なる軸方向補強筋を用いた場合のPC梁の荷重-たわみ関係を示す。軸方向補強筋にφ9mm

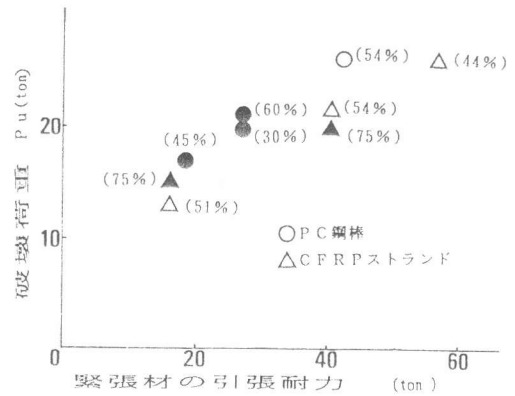


図-3.6 緊張材の引張耐力(破断荷重または降伏荷重)と破壊荷重の関係
※黒ぬりの部分は曲げ引張破壊、他は曲げ圧縮破壊
()内は緊張材の引張耐力に対する緊張力の割合

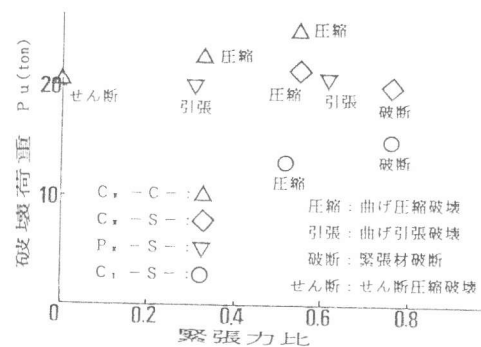


図-3.7 緊張力比-破壊荷重関係

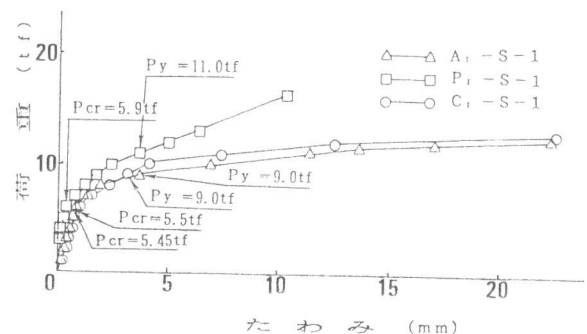


図-3.8 荷重-たわみ関係

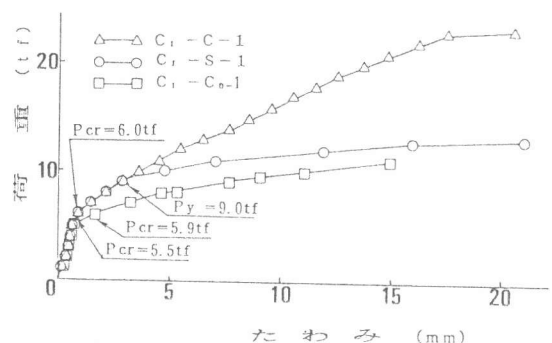


図-3.10 荷重-たわみ関係

の鉄筋を用いたC₁-S-1とφ5mmのCFRPストランドを用いたC₁-C₀-1における軸方向補強筋の引張耐力は等しいが、C₁-C₀-1はひび割れ発生後すぐに、たわみがほぼ直線的に増大している。また軸方向補強筋にφ12.5mmを用いて、その量を増やしたC₁-C-1は、補強筋の引張耐力が大きいのでたわみの増大は小さく耐力も大きくなっている。以上のことは、軸方向補強筋にCFRPストランドを用いた場合の梁の塑性変形状が、同一の引張耐力の鉄筋を用いた場合よりも大きくなるので注意を要することを示している。

(3) 緊張力の相違による影響

図-3.11は緊張力の異なるPC梁について荷重-たわみ関係を示したものである。図より、緊張材および軸方向補強筋にCFRPストランドを用いたPC梁のたわみは緊張力が大きいほど小さくなっており、また表-3.1に示すように、PC梁の耐力も大きくなっている。しかし、ひび割れ発生後の荷重-たわみ曲線の勾配はどの場合でもほとんど変わらない。一方、PC鋼棒を用いた梁では鋼材量が多く、曲げ圧縮破壊する場合には、緊張力を増大させても曲げ圧縮破壊耐力はほとんど増大していない。

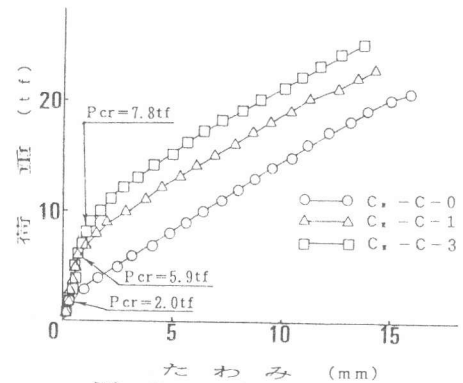


図-3.11 荷重-たわみ関係

4 結論

FRPロッドを用いたPC梁はFRPロッドの弾性係数がPC鋼棒の1/4~2/3程度であるため、ひずみ分布が大きくなり中立軸が上がって圧縮破壊しやすくなる。曲げ圧縮破壊させた場合、PC鋼棒を用いた場合よりも終局時の変形量が大きくなり、ひび割れが圧縮フランジ近くまで上昇するので破壊の予知がある程度可能となる。また、緊張材量を少なくして、緊張材の破断による梁の曲げ引張破壊が生じるようにした場合でも、軸方向補強筋を十分に配置することによって、梁が切断することは防止できるようになる。従って、FRPロッドを用いたPC梁は曲げ圧縮破壊を生じるようにも、引張破壊を生じるようにも設計することが可能であると思われる。

謝辞

本研究は、土木学会連続繊維研究小委員会（委員長、岡村甫東大教授）において分担した研究であり、実験に際して、連続繊維を利用したコンクリート系複合材料研究会（CCC研究会）より、多大な御協力を賜った。また、極東工業㈱からも御協力を賜った。ここに記して御礼申し上げる。

<参考文献>

- 1) 土木学会：連続繊維研究小委員会「連続繊維を利用したコンクリート系複合材料の土木構造成分野への適用に関する技術の現状」