

[166] FRP ロッドを用いたプレストレストコンクリートはりの曲げ性状に関する研究

正会員 高木 兼士(五洋建設技術研究所)
 正会員 内藤 英晴(五洋建設技術研究所)
 正会員 ○佐藤 善高(五洋建設技術研究所)

1. まえがき

近年、防食性に優れかつ高強度を有するFRP (Fiber Reinforced Plastic) をプレストレストコンクリート (PC) 用緊張材として利用しようという気運が高まっている。PC鋼材の代りにFRPを用いた場合、(1)FRPの比重は鋼材の1/5~1/6であり、部材の軽量化が図れる。(2)防食性に優れているため、腐食環境下においてもかぶりを大きくとる必要がない。(3)弾性係数の小さいFRPを用いると、応力損失が小さくて済む。といった利点がある。現在、FRPの実用化に向けて、FRPの力学的特性に関する研究およびFRP用緊張定着装置の開発が小林ら^{1),2)}によって進められている。しかし、FRPをPC部材に適用した場合の力学的性状については未だ明らかにされていない。本報告は、緊張材としてFRPロッドを用いたPCばりの曲げ試験をおこない、はりの曲げ性状を調査することにより、FRPのPC構造物への適用性について検討したものである。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体の一覧を表-1に、形状寸法を図-1に示す。同図に示すように、緊張材はその偏心距離が核半径となるような直線配置とした。Gタイプのはりにおいては、緊張定着後にダクト内へセメントペーストを充填しボンド形式とした。またNGタイプでは、緊張材表面およびシース内面にグリースをじゅうぶん塗付してアンボンド形式とした。

はりの主筋にはD10 (SD30)、スターラップにφ9 (SR24)を用いた。なお、コンクリートの目標強度は400kg/cm²であり、配合を表-2に示す。

緊張材としては、アラミド繊維とビニールエステル系樹脂とから成る、直径6mm、繊維の体積含有率 $\rho_f = 70\%$ の一方向強化FRPロッドを用いた。FRPロッドの物性値および $\sigma - \epsilon$ 曲線を、それぞれ表

表-1 試験体の一覧

試験体記号	緊張材の種類	BOND/ UNBOND	緊張材有効引張力 Pe (ton)	中央断面下縁での 有効プレストレス (kg/cm ²)
(1) AK1-G	AFRProd(1×φ6)	BOND	1.71	7.5
(2) AK1-NG	AFRProd(1×φ6)	UNBOND	1.71	7.5
(3) AK2-NG	AFRProd(2×φ6)	UNBOND	4.44	25.0

表-2 コンクリートの配合

目標強度 (kg/cm ²)	スラブ (cm)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE剤
400	8	15	45	178	396	794	936	0.12

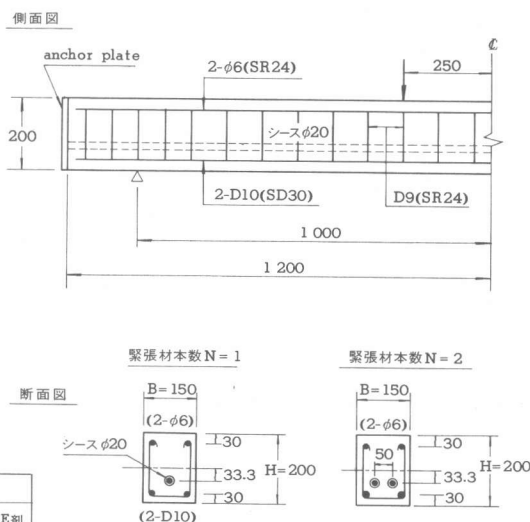


図-1 試験体

ー3, 図-2に示す。なおFRPロッドの引張試験をおこなうと, 定着装置内での応力集中に伴う耐力低下が生じるため, FRPロッドの真の耐力を実験により求めるのは困難である。そこで表-3中のロッドの引張強度としては, 樹脂マトリクスの強度を無視し, 繊維素材の引張強度と体積含有率 V_f とから計算により求めた値を採用した。これより直径6mmのFRPロッドの引張耐力 P_u は5.518tonとなる。また定着装置には, はりの曲げ破壊前に定着装置内でロッドが破断しないことが要求され, 本試験に先だって実施した定着装置の性能試験において, その定着効率(実破断荷重/引張耐力 P_u)が85%以上のものを開発・使用した。図-3に示すように, この定着装置はFRPロッドを直接つかむ部分に圧縮摩擦型グリップを, ジャッキ力をグリップへ伝達する部分にはPC鋼棒を用いた構造となっている。

表-3 ロッドの物性値

物性	FRPロッド ($V_f=70\%$)
直径 (mm)	6.0
引張強度 σ_u (kg/cm ²)	195
弾性係数 E (kg/cm ²)	5 800
破断時伸度 (%)	3.2

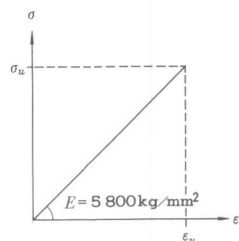


図-2 $\sigma - \epsilon$ 曲線

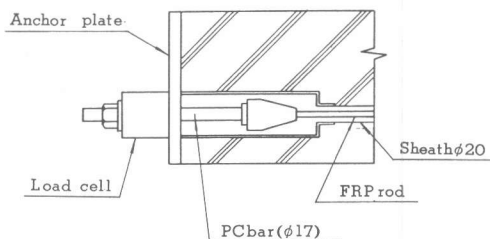


図-3 定着端部の構造

2.2 載荷方法および測定項目

載荷装置を図-4に示す。載荷は支点間距離200cm, センズ/曲げスパン比が1.5の3点対称載荷とした。

測定項目としては, ひびわれ発生荷重, ひびわれ進行状況, 鉄筋・コンクリートおよび緊張材のひずみ, たわみ, 破壊荷重である。さらにアンボンド形式のNGタイプでは, 試験体両端の定着用アンカープレートと定着用ナットとの間に取付けたセンターホール型ロードセルにより, 緊張材引張力もあわせて測定した。

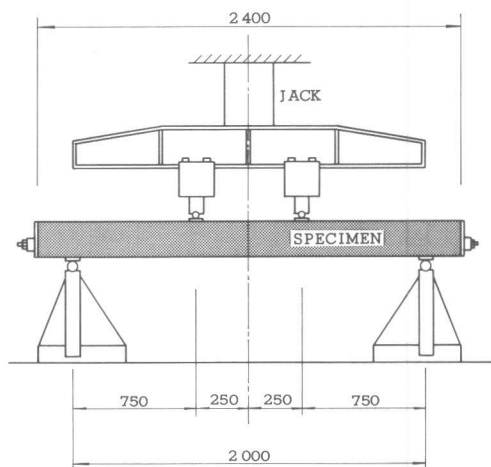


図-4 載荷装置

3. 試験結果および考察

3.1 曲げ破壊モーメントとひびわれモーメント

本試験体に対して緊張材有効引張力 P_e を横軸に, その時の曲げ破壊モーメント係数 λ の計算値を縦軸にとったものを図-5に示す。図中各線路上にある×印は, 試験体の曲げ破壊と同時に, FRP1本当りの引張力がちょうどその引張耐力 P_u に達することを表わしている。通常のPC鋼材には降伏点が存在し, 降伏後に塑性変形を示すため, PC鋼材を用いた場合には緊張材有効引張力を変化させてもPC鋼材が降伏すれば曲げ破壊モーメントはほとんど変化しないことになる。一方FRPロッドの $\sigma - \epsilon$ 曲線は図-2に示すように, 破断まで直線状となりPC鋼材のような塑性領域をほとんど有していない。したがって, 図-5に示すようにFRPロッドを緊張材として用いた場合には, 緊張材有効引張力 P_e の増加にともない曲げ破壊モーメント係数 λ はほぼ直線的に増加することになる。

表-4に曲げ破壊モーメントとひびわれモーメントについての試験結果および計算結果を示す。曲げ破壊モーメントについては, すべて計算値が実験値を下回ってはいるが両者は概ね良く一致している。しかしこの場合の計算による近似度は, 一般のPC鋼材の場合に比べてやや悪いようにも思える。これはFRPロッドの弾性係数がPC鋼材よりかなり小さいことに起因していると考えられ, 今後解明すべき課題である。

表-4に曲げ破壊モーメントとひびわれモーメントについての試験結果および計算結果を示す。曲げ破壊モーメントについては, すべて計算値が実験値を下回ってはいるが両者は概ね良く一致している。しかしこの場合の計算による近似度は, 一般のPC鋼材の場合に比べてやや悪いようにも思える。これはFRPロッドの弾性係数がPC鋼材よりかなり小さいことに起因していると考えられ, 今後解明すべき課題である。

表-4: 曲げ破壊モーメントとひびわれモーメント

試験体記号	コンクリートの 圧縮強度 σ_{cu} (kg/cm ²)	曲げ引張強度 の推定値 [*] σ_{bt} (kg/cm ²)	ひびわれモーメント $M_{cr}/\sigma_{cu}BH^2 (\times 10^{-2})$		計算値 実験値	曲げ破壊モーメント $M_u/\sigma_{cu}BH^2 (\times 10^{-2})$		計算値 実験値	M_u/M_{cr}	
			実験値	計算値		実験値	計算値		実験値	計算値
AK1-G	450	53.5	2.25	2.37	1.05	6.81	5.70	0.84	3.03	2.41
AK1-NG	430	51.9	2.18	2.41	1.11	6.32	5.08	0.80	2.90	2.11
AK2-NG	439	52.6	2.96	3.07	1.04	7.36	6.34	0.86	2.49	2.07

* 曲げ引張強度の推定値 σ_{bt} は、六車らと同様に CEB-FIP 式に示される値を 1.5 倍して求めた。 $\sigma_{bt}=1.5(0.607\sigma_{cu}^{2/3})$

FRP ロッドの表面は比較的滑らかなため、FRP ロッドと PC 鋼棒 (φ 9.2) に対してあらかじめ実施した引抜き試験では、FRP ロッドの付着強度は PC 鋼棒の約 1/4 しかなかった。そこで、グラウチングをおこなう AK1-G では FRP ロッドとグラウトの付着作用は期待できず、したがって AK1-G と AK1-NG の曲げ耐力は同程度であろうと予想された。しかし試験においては、AK1-G の曲げ破壊モーメントは AK1-NG に比べ約 8% 大きくなった。この原因としては、グラウトに膨張剤を添加したため、FRP ロッドがグラウトの膨張圧によって拘束され、その結果 FRP ロッドの付着力が増加したことが考えられる。

六車³⁾と同様に曲げ引張強度 σ_{bt} として CEB-FIP 式を 1.5 倍して求めた値を用いて計算したひびわれモーメントは試験値と良く一致した。またひびわれモーメント M_{cr} に対する曲げ破壊モーメント M_u の比はいずれも 2.0 以上あり、ひびわれ発生から破壊に至るまでの荷重能力をじゅうぶん有していることがわかる。

なお、アンボンドばりの曲げ破壊モーメント M_u を計算するにあたっては六車³⁾の方法にしたがった。すなわち、曲げ破壊時の曲げモーメント分布および破壊断面におけるひずみ分布を図-6 に示すが、この時の緊張材のひずみおよび引張力を次のように表わす。

$$\epsilon_{pu} = \epsilon_{pe} + F [\epsilon_{cpe} + \epsilon_{cu} (d_p - x) / x] \quad (1)$$

$$T_{pu} = A_p \cdot \sigma_p (\epsilon_{pu}) \quad (2)$$

ここに、 ϵ_{pe} 、 ϵ_{cpe} ：有効プレストレス時における緊張材ひずみおよび緊張材位置でのコンクリートひずみ、 ϵ_{cu} ：コンクリートの終局ひずみ、 A_p 、 d_p ：緊張材の断面積および有効高さ、 x ：中立軸深さ、 $\sigma_p(\epsilon)$ ：緊張材の $\sigma - \epsilon$ 関数、である。 F はひずみの適合条件係数と呼ばれ、 F 値を仮定すれば曲げ破壊モーメント M_u および曲げモーメント分布が決定されることになる。この計算方法では、仮定された F 値のもとで部材全長に対する変形の適合条件と、各断面における釣合い条件が満足されるまで繰返し計算をおこなう。

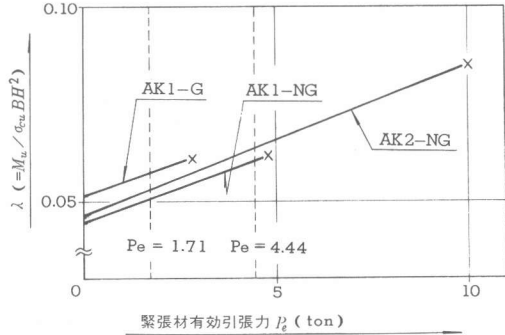
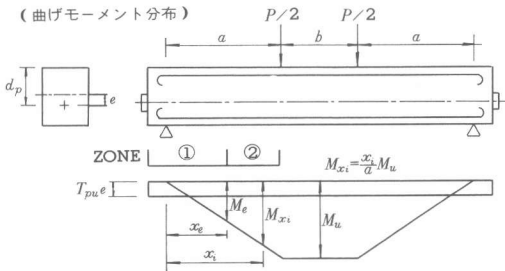


図-5 λ と P_e の関係



(曲げモーメント分布)

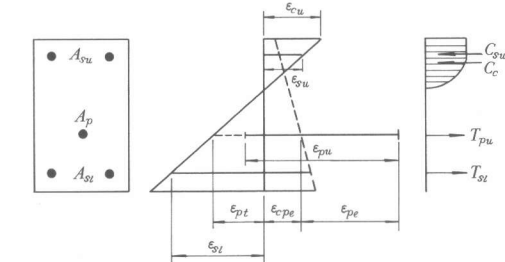


図-6 破壊時の曲げモーメントとひずみの分布

3.2 ひびわれ状況

試験後におけるひびわれ状況を図-7に示す。いずれの試験体においても最初のひびわれはスパン中央の純曲げ区間に発生した。また、ひびわれ間隔はどの試験体でもほぼ同じであり、ボンド形式のAK1-Gとアンボンド形式のAK1-NGとの間にも特に差は見られない。これは、引張側に鉄筋が配置されていないアンボンドばりでは、同様なボンドばりに比べてひびわれ間隔およびひびわれ幅が大きくなるのに対して、本試験体のように鉄筋を配置すると、アンボンドばりであっても鉄筋がひびわれの分散に寄与するためである。

3.3 モーメント-たわみ曲線

スパン中央点における曲げモーメント-たわみ曲線を図-8に示す。いずれの曲線にも2ヶ所の大きな折曲り点があり、これらはひびわれ発生時および鉄筋降伏時に対応する。またすべての試験体は大きな変形性を有しており、ひびわれ発生後も大きな変形を示した後、やがて曲げ破壊に至っている。

4. まとめ

以上をまとめると次のようになる。

- (1) 六車らの提案した F 値を用いた計算法によると、どのケースにおいても計算値が試験値を下回ってはいるものの、両者は概ね良く一致した。したがって F 値による計算法はFRPを用いたPCばりの曲げ耐力算定においても、じゅうぶん実用に供し得るものである。
- (2) アンボンドばりの曲げ耐力は、ボンドばりの約93%に低下した（この値は通常のPC鋼材を用いた場合の低下率の範囲内にある）。したがって比較的表面の滑らかなFRPであっても、グラウトの膨張圧に伴う拘束によって、その付着効果を期待することができる。そこで実用上、アンボンドばりの耐力はボンドばりの値より30%小さいものとして良いという「PC示方書（土木学会）」の条文を、FRPを用いたPCばりにも適用してよいと考えられる。
- (3) FRPの弾性係数は小さいため、FRPを用いたはりのひびわれ発生から破壊に至るまでの変形は大きく、大きな靱性を有していることが確認された。これはFRPのPC部材への適用性を示唆するものである。

参考文献

- 1) 小林, 趙: “繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究(そのI)”, 生産研究, Vol. 36, No. 8, 1984, pp. 24~27.
- 2) 小林, 趙, 西村: “繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究(そのII)”, 生産研究, Vol. 37, No. 6, 1985, pp. 7~10.
- 3) 六車, 渡辺, 西山: “アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究”, プレストレストコンクリート, Vol. 26, No. 1, Jan., 1984, pp. 10~16.

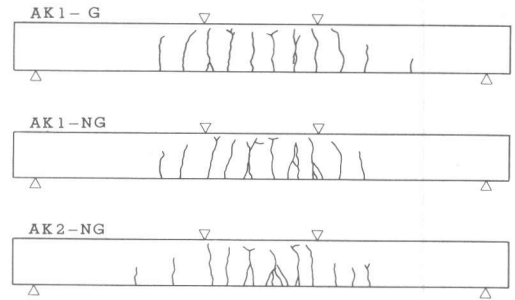


図-7 ひびわれ状況

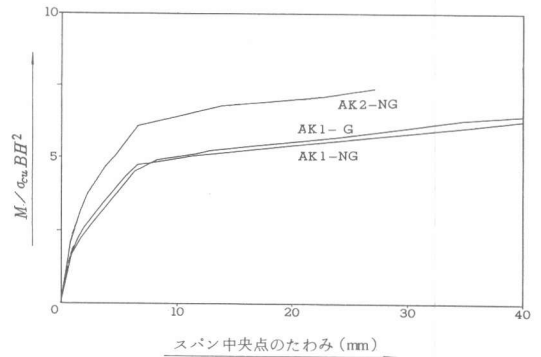


図-8 曲げモーメント-たわみ曲線