

東京工業大学 正員 長滝重義

防衛大学校 正員 佐藤良一

電源開発 正員 植田伸一

1. まえがき

GFRP-BARで緊張したPC部材は、導入アレストレス量の相異やアラウトの有無等によりその力学的特性が大きく影響されることは、すでに着々の研究により報じたとおりである。本報は、きわめて高い引張強度を有するガラス繊維と樹脂に富む樹脂からなるGFRP-BARで緊張したPC部材が、前述のいくつかの条件のもとで繰り返し荷重を受けた時の力学的特性を、主として実験的に検討したものである。

2. 試験概要

セメントはアサノ早強セメントを用い、その比重は3.14である。骨材は粗骨材、細骨材ともに富士川産であり、それぞれ比重は2.64、2.60であり、F.Mは741、2.61である。減水剤にはボツリス NO.5Lを用いた。表1にコンクリートの配合を示す。この配合によるコンクリートの強度は試験時で400~450 kg/cm^2 であった。また、アラウト用セメントにはアサノ超早強セメントを用い $\text{W/C} = 40\%$ のセメントペーストとして使用した。緊張材としては、直径9mm、引張強度110~120 kg/mm^2 、ヤング係数 $50 \sim 53 \times 10^4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ のGFRP-BARを用いた。これを定着する際には、定着部をガラス繊維とエポキシ樹脂で保護した。図1に部材の形状寸法から載荷方法を示す。たわみ量の測定は、スパン中央において行った。

表1 コンクリートの示方配合

最大骨材寸法 (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg)			
			W	C	S	G
25	44	36	143	325	668	1180

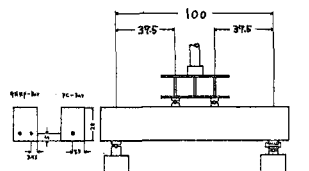


図1 部材の形状寸法および載荷方法(単位:mm)

3. 試験結果および考察

3.1 静的試験

GFRP-BARで緊張したPC部材の静的曲げ強度は、前報で述べたように、緊張材として用いているGFRP-BARが弾性域のみを有しかつ低弾性係数を示すため、導入アレストレス量に着しく影響され、導入アレストレス量の増加と共に非線形的に増大することが図2に示されている。この図に示されているように、付着係数を0.5と仮定した時の計算値は実験値ときわめてよい一致をみる。図3は、導入アレストレス量を95、66、38 kg/cm^2 および0の4段階に等化させた場合の荷重とたわみ量の関係を示したものである。この図によれば、導入アレストレス量が大きくなるほどたわみ量の増加が鋭くなる傾向をみせ、換算断面二次モーメントがおよそ2.7

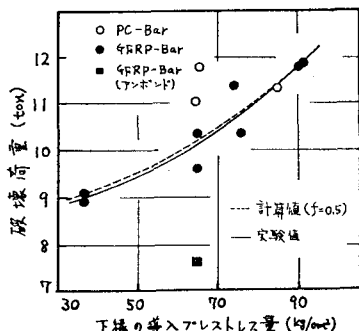


図2 破壊強度-導入アレストレス量

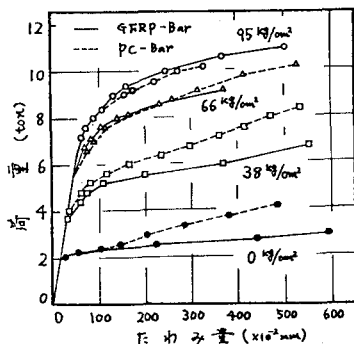
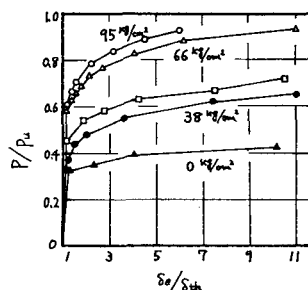
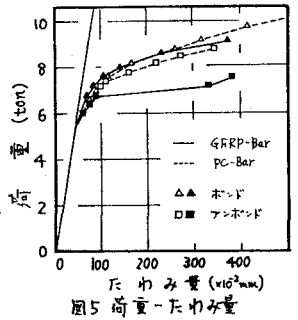


図3 荷重-たわみ量

図4 $P/P_a - \delta_0/\delta_{sh}$

倍のPC-Barを用いた部材のたわみ量に等しくなる傾向にあることがわかる。図4は、さらにこれを検討するために縦軸に P/P_u 、横軸に δ_e/δ_u を示したものである。ここで、 P : 各荷重レベル、 P_u : 破壊荷重、 δ_e : 実測たわみ量、 δ_u : 計算たわみ量である。この図によると、導入アレストレス量が小さい場合は、 P/P_u に対して非弾性的挙動が著しいことがわかる。しかし、導入アレストレス量がある程度以上になると $P/P_u - \delta_e/\delta_u$ 曲線は収束する傾向を示す。一方、今FRP-Barを用いた部材でクラウトを施さない場合、破壊強度はおよそ30%低下する。また、図5に示すように、ひびわれが発生するとたわみ量が数倍することになる。



3.2 疲労試験

表2 疲労試験結果概要

疲労試験結果の概要を表2に示す。この表中では、下縁の導入アレストレス量が73%/mmの各部材をFシリーズ、47%/mmの各部材をFLシリーズ、47%/mmの導入アレストレス量で上限荷重を一定にしたものをFCシリーズと分類して示した。GFRP-Barを用いたPC部材の疲労試験後の静的強度は、荷重履歴のない静的強度に対して、Fシリーズで3%増の値を示し、FLシリーズで16%減の値を示した。ただし、ここで用いた荷重履歴のない静的強度は、図2に示されている実験曲線から所定の導入アレストレス量に対して求めたものである。従来より繰り返し荷重を受けた後のRC部材やPC部材の静的強度は、荷重履歴のない静的強度と比較して低下することはないといわれている。しかし、本実験で実施したF、FLシリーズでは異なった強度の傾向を示しており、少なくとも今FRP-Barを用いたPC部材では、現在のところ、統一的な見解を出すことはできない。したがって、図6、図7にはそれぞれの静的強度に対するS-N曲線を示す。これらの図によれば、疲労試験後の静的強度を基準にした場合、200万回時の応力比はFシリーズで59%、FLシリーズで66%とFLシリーズが7%高いことがわかる。一方、荷重履歴のない静的強度を基準にした場合、Fシリーズで62%、FLシリーズで57%とFシリーズが5%高く前者はまったく逆の結果を示していることがわかる。既往の研究によると、PC鋼材を用いたPC部材では、その静的強度がアレストレス量の大小に拘らず一定であることから、疲労破壊強度は、PC鋼材の初期応力を高くするほど応力比も同様に高くなるといわれている。しかるに導入アレストレス量による破壊強度が著しく異なる今FRP-Barを用いたPC部材では、単純に応力比が上述した傾向と同様の傾向を示すとはいえない。そこで絶対量としての荷重ならびに荷重振幅について、200万回を疲労限と仮定して検討した。まず、疲労限の上限荷重はFシリーズで6.49ton、FLシリーズで5.44tonである。一方、荷重振幅は、ひびわれ発生までは今FRP-Barの応力振幅が極めて小さくひびわれ発生後の応力振幅に比較して無視できるオーダーであることから、Full Prestressingの状態を基準として比較すると、Fシリーズで2.65 ton、

試験番号	荷重 (ton)		破壊回数	破壊形式	備考
	上限	下限			
F-1	5.6	0.4	2,000,000以上	曲げ圧縮破壊 * $P_u = 11.22t$	10万回で4mmのひび
F-2	6.6	0.6	1,100,000程度	曲げ引張疲労破壊	上縁フラスク
F-3	6.0	〃	500,000以上	曲げ引張破壊 * $P_u = 11.04t$	
F-4	6.0	〃	2,000,000以上	曲げ圧縮破壊 * $P_u = 10.56t$	
F-5	6.4	〃	〃	* $P_u = 11.22t$	
F-6	6.8	〃	421,521	曲げ引張疲労破壊	
F-7	7.2	〃	82,113	〃	上縁フラスク
F-8	6.5	〃	219,681	〃	
F-9	8.0	〃	1,236	曲げ圧縮疲労破壊	
F-10	7.5	〃	138,592	曲げ引張疲労破壊	
F-11	7.8	〃	18,447	〃	上縁ひび割れ発生
FL-1	6.0	0.6	16,360	曲げ圧縮疲労破壊	
FL-2	5.4	〃	135,806	曲げ引張疲労破壊	上縁フラスク
FL-3	4.8	〃	4,200,000以上	〃	上縁ひび割れ発生
	5.2	〃	6,500,000以上		
	5.4	〃	3,000,000以上		
	5.6	〃	2,240,000以上		
	6.0	〃	116,839		
FL-4	5.5	〃	695,939	〃	上縁ひび割れ発生
FL-5	5.2	〃	140,128	〃	上縁ひび割れ発生
FL-6	5.4	〃	2,912,318	〃	
FL-7	5.52	〃	1,674,796	〃	
FL-8	5.7	〃	665,534	〃	上縁フラスク
FC-1	6.0	4.0	234,152	曲げ引張疲労破壊	上縁・両側に7mmのひび
FC-2	〃	5.0	2,248,700以上	曲げ圧縮破壊 * $P_u = 8.5t$	
FC-3	〃	4.5	1,089,598以上	曲げ圧縮破壊 * $P_u = 7.9t$	
FC-4	〃	4.5	42,999	曲げ圧縮疲労破壊	アンボンド
FC-5	〃	4.5	54,816	〃	〃
FC-6	〃	4.6	2362,285	曲げ引張疲労破壊	上縁・両側に7mmのひび (4mmのひび発生)
FC-7	〃	4.5	294,338	〃	〃

* 疲労試験後の静的曲げ強度

FLシリーズでは2.62 tonとなりきわめて近い値である。この絶対量としての上限荷重および荷重振幅による疲労強度の評価は、既述の張材としてGFRP-Barを用いたPC部材に適用しても、既往の実験結果と類似した傾向を示していると考えられ、疲労強度は導入アレストレス量が増加するにつれて大きくなるといえる。さらにこれらの関係を明確にするために、弾性論を用いてGFRP-Barの応力振幅、応力度と繰り返し数の関係を図8、図9に示した。

写真1 破壊性状 (FLシリーズ)

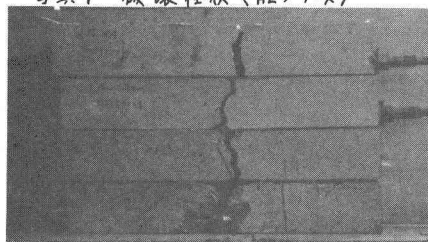


図8によると、GFRP-Barの応力振幅は、FLシリーズがFLシリーズに対しわずかに高く、前述の荷重振幅に相当していることがわかる。ゆえにGFRP-Barを用いたPC部材の疲労限度応力振幅の傾向は、Goodman-Johnson Diagramで示されている傾向と全く同質のものであるとはいえない。

また、図9に示されているように、200万回時の応力度は、FLシリーズで 90 kg/mm^2 、FLシリーズで 74 kg/mm^2 となり、ほぼ初期応力の差だけFLシリーズが高い応力度で破壊する。これらのことは、より高い初期応力を与えた方が有効なGFRP-Barの使用法であることを示すが、既往の設計法に基づく疲労破壊安全率がFLシリーズで1.69、FLシリーズで1.93となり、FLシリーズの方が高い安全率を示すことになる。一方、図8、9において、FLシリーズの応力振幅、応力度-繰り返し数曲線は、FLシリーズのそれよりも高い勾配を示している。これは、写真1に示されているように、150万回未満で破壊するFLシリーズのほとんどの部材には上縁にヒシガ形成されるため、弾性論による応力算定の誤差がFLシリーズよりも大きいことに基づくと思われる。なお写真1に示した試験体は、上から、FL-6、FL-8、FL-4、FL-3である。次に絶対応力度の影響を検討するために上限荷重を一定にして下限荷重のみを変化させた場合の応力振幅、応力度と繰り返し数の関係を前図8、9に示した。この場合、FCシリーズの応力度は 79 kg/mm^2 と一定であり、FLシリーズと比較して200万回時で 5 kg/mm^2 高い応力度が生じていることになるが、応力振幅ではFLシリーズよりも 11.6 kg/mm^2 小さい振幅で破壊することになる。またFCシリーズの破壊性状はFLシリーズ同様上縁コンクリートに圧痕の痕跡をみせており、図8、9の曲線の勾配もほぼ等しい。最後にアンホンドPC部材の耐疲労性は、表2に記載されているようにホンドのあるPC部材よりも著しく劣る。また、その破壊性状は、曲中圧痕疲労破壊であることが認められた。

4. おわりに
材料を提供していた日東電気工業K.K.に感謝する。

参考文献

- 1) 友永 和夫, わが国におけるPC鉄道橋の問題について アレストレストコンクリート, Vol.2, April, 1960
- 2) 野口 功, PC橋の疲労破壊に関する論議について アレストレストコンクリート, Vol.3, No.3, June, 1961

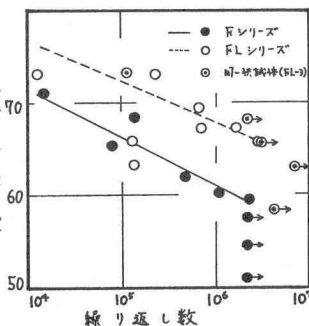


図6 S-N曲線 (疲労試験後の静的強度基準に換算)

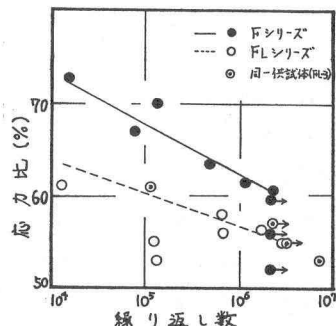


図7 S-N曲線 (図2の実験曲線基準に換算)

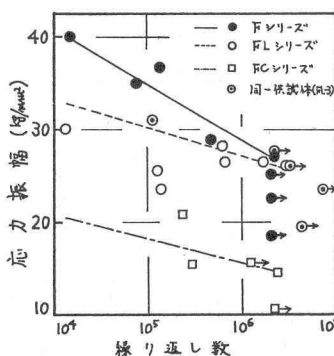


図8 応力振幅-繰り返し数

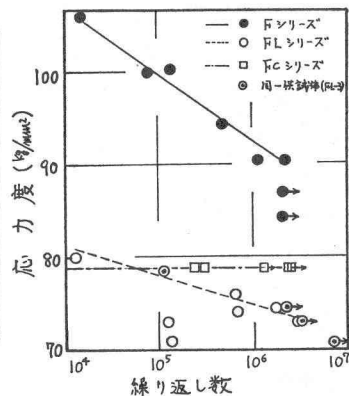


図9 応力度-繰り返し数