

東京工業大学 正岡 長滝重義

同 同 〇佐藤良一

同 同 高田誠

まえがき：プレストレストコンクリート部材（以下PC部材という）の緊張材としては従来から高張力鋼が用いられているが、高強度、低弾性係数を示すGlass fiberの活用に着目し、このGlass fiberを樹脂で硬化させたF.R.P-BarをPC部材の緊張材として応用することの諸問題について検討した結果をとりまとめて報告するものである。

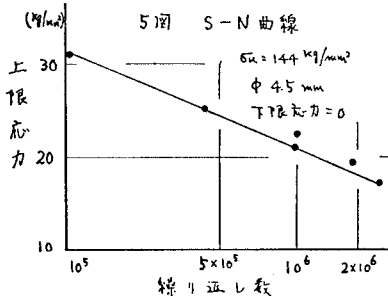
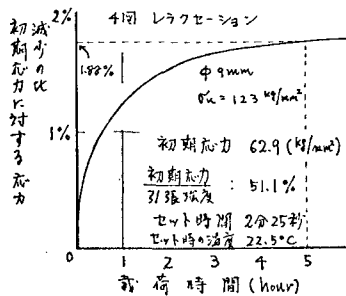
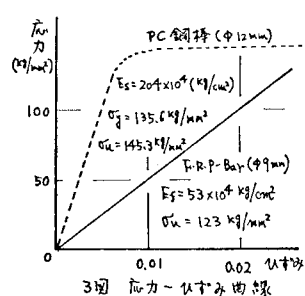
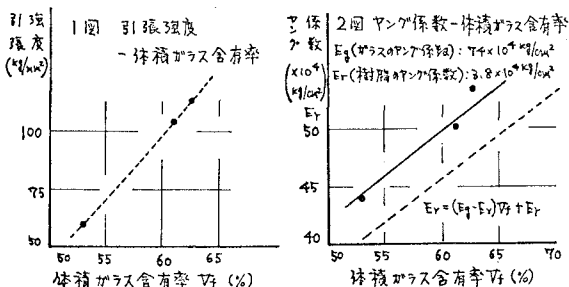
F.R.P-Barの基礎性状

F.R.P-Barは、極めて高い引張強度を有するガラス繊維を樹脂（不飽和ポリエステル樹脂）で一体化した代表的複合材料であり、その力学的特性はガラス繊維、樹脂および両者の界面特性に依存すると思われる。先づ1図、2図は引張強度およびヤング係数とガラス含有率の関係を示したものであるが、これらの特性に対してはガラス繊維の含有率が支配的であることがわかる。

次にF.R.P-Barの応力-ひずみ関係を市販の4種PC鋼棒と比較して3図に示した。図に示す結果よりF.R.P-Barのヤング係数は $53 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ と鋼材の約 $1/4$ であること、又強度が鋼材に匹敵しかつ弾性挙動のみを示すため広範囲の弾性域を有することからわかる。更に4図にレラクセーション試験結果を示す。この図によるとセット時間や温度の管理が不十分のため精度上の問題があるが、レラクセーションは載荷直後が最も著しくその後は収束する傾向にある。このレラクセーションは、ガラス繊維がほぼ完全弾性体であることから樹脂の影響が支配的な現象といえる。最後に5図においてF.R.P-Barの疲労試験結果を示した。この結果、1) F.R.P-Barには現在のところ疲労限度は存在しない。2) S-N曲線は線型である。3) 鋼材に対しかなり低い応力振幅で破壊する。ことなどがいえる。これに因しては部材の疲労特性と関連づけて後述する。

PC部材の試験概要

供試体の作製に用いたコンクリートの配合ならびに供試体の形状寸法は、静的試験および疲労試験ともに1表、6図に示す通りである。緊張材は2表に示す成績のものを用い、断面積や破壊荷重を等しくすることを目的としてF.R.P-Barは2本、PC鋼棒は1本とした。F.R.P-Barの定着は、F.R.P-Barが引張強度のみ高く層間せん断力や圧縮強度が極めて低く更に表面が弱いことと鑑み、7図に示す円筒ターボタイプの定着具を用い更にF.R.P-Barの定着部をガラス繊維とエポキシ樹脂で保護することによって行なった。6図はF.R.



P-Bar 緊張によるPC部材（以下F.R.P-PC部材）の荷重方法を示すものでこれにより曲げ試験を実施した。なおグラウトはW/C = 40%のセメントペーストを用いて実施した。

W (kg)	* C (kg)	** S (kg)	*** G (kg)	**** 減水剤割合 (%)	***** 引張強度 (kg/cm ²)	***** 引張強度 (kg/cm ²)	***** ヤング係数 (×10 ⁴ kg/cm ²)
143	325	667.6	1180.6	3.25	412	32.2	36.7

	直径 (mm)	実断面積 (mm ²)	降伏点力 (kg/mm ²)	引張強度 (kg/mm ²)
F.R.P-Bar	9.0	63.6	—	* 123.0 ** 109.0
PC鋼棒 (φ14)	12.0	92.6	135.6	145.3

* 導管を埋めコンクリート (比重: 2.4) ** 高圧度 比重: 2.60 F.M: 2.61 *** 高圧度 比重: 2.69 F.M: 2.41 **** 荷重7日 (打設後1日で脱型) の後負荷養生

1表 コンクリートの配合および強度性状

試験結果

1) 静的曲げ試験: 9回 はF.R.P-PC部材とPC鋼棒を用いた部材のひびわれ状況を示したものであり、共にひびわれ本数が少なくいわゆる振蕩模様のひびわれを呈すほど極めて類似している。10回、11回は、導入アレストレス量を95kg/cm² (鋼棒の場合は82kg/cm²)、66kg/cm²、38kg/cm²の3段階に劣化させられた場合の両部材のひびわれ量と最大ひびわれ幅およびそれぞれの残留量 (0.4tonを基準) を示したものである。この図によれば、ひびわれ発生は導入アレストレス量に対応しており、緊張材の種類には無関係であることが示されている。又両部材のひびわれ発生後の変形量は、F.R.P-BarとPC鋼棒の弾性係数が大きく異なるにもかかわらずほぼ等しい。そこで主要な変形抵抗要素である付着り効果を調べるため、12回にグラウトの有無が部材の変形におよぼす影響を示した。この図よりグラウトの効果は、特にF.R.P-PC部材において顕著であることがわかる。この現象は、F.R.P-BarとPC鋼棒の表面がともに平滑であることを考えると変形増加にともなういわゆる肌圧応力に起因する付着力の増加がF.R.P-PC部材において著しいことを意味すると考えられる。次に強度特性について述べる。F.R.P-PC部材の破壊強度の算定は13回に示す応力度、ひずみ分布に基づいて行なった。すなわち部材破壊時のF.R.P-Barのひずみは、その付着強度が小さいことからF.R.P-Bar圆心位置のコンクリートのひずみに付着係数を掛けたとした。この付着係数はコンクリートとF.R.P-Barのひずみの比を意味し、それが一体挙動する時 $\eta=1$ となるものである。平面保持の仮定、断面力の釣り合い、F.R.P-Barの応力-ひずみ関係より

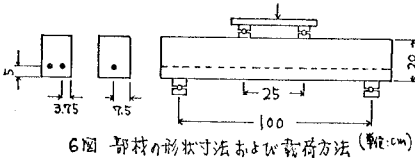
$$\begin{aligned} \epsilon_p &= \epsilon_{pe} + \eta \frac{d \cdot x}{x} \epsilon_{cu} & \text{--- ①} & \quad \text{式①, ②, ③が成り立つから部材破壊時のF.R.P-Barのひずみは} \\ d \cdot x \cdot \sigma_{cu} &= A_f \sigma_p & \text{--- ②} & \quad \text{壊時のF.R.P-Barのひずみは} \\ \sigma_p &= E_f \epsilon_p & \text{--- ③} & \quad \text{④のように表わされる。ここで、} x: \text{中立軸から上縁までの距離,} \end{aligned}$$

$$\epsilon_p = \frac{1}{2} \left\{ (\epsilon_{pe} - \eta \epsilon_{cu}) + \sqrt{(\epsilon_{pe} - \eta \epsilon_{cu})^2 + 4 \eta \frac{d \cdot x}{A_f} \frac{\sigma_{cu}}{E_f} \epsilon_{cu}} \right\} \quad \text{--- ④}$$

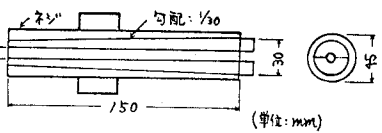
d は有効高さ、 E_p 部材破壊時のF.R.P-Barのひずみ、 E_{cl} はF.R.P-Barの有

* 素材試験および部材の静的試験に用いた
** 部材の疲労試験に用いた

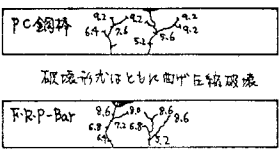
2表 F.R.P-BarおよびPC鋼棒の成績



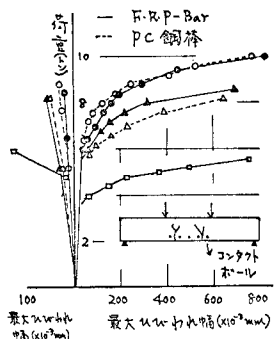
6図 部材の形状寸法および荷重方法 (単位: cm)



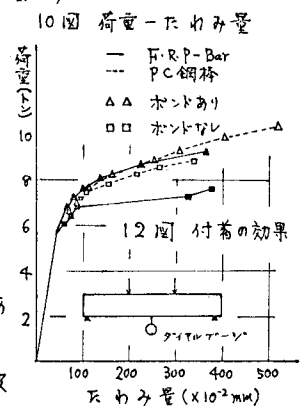
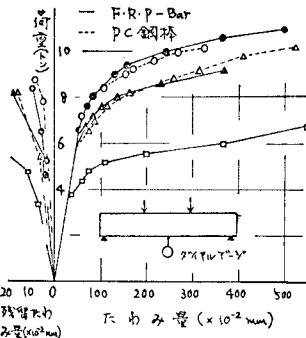
7図 定着具の形状寸法



9図 ひびわれ状況

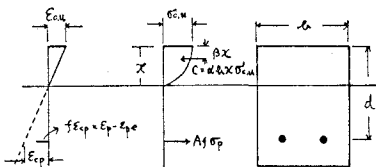


10図 荷重-たわみ量



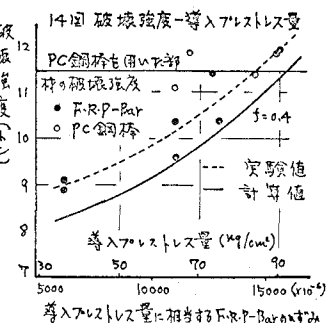
12図 付着の効果

効引張応力に対するひずみ、 σ_p は σ_p に対応する応力、 σ_{cu} はコンクリートの圧縮強度、 α は圧縮部コンクリートの応力-ひずみ曲線の形状に関する係数、 E_{cu} は上縁コンクリートの圧縮弾性ひずみである。中立軸の位置 $x = A_s \sigma_p / \alpha \sigma_{cu}$ -④ これは式③より式④と表わされるから破断曲線がモーメント-変位式⑤となる。こゝ

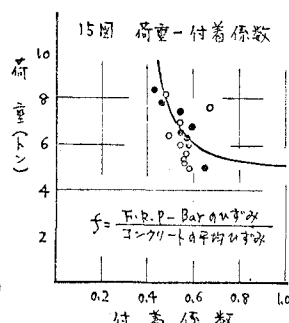


13図 曲げ破壊時のひずみ応力分布

に、 β は圧縮応力分布曲線重心から上縁までの距離と x の比である。計算を行う際に、 $E_{cu} = 4000 \times 10^6$ 、 $\alpha = 0.82$ 、 $\beta = 0.42$ とし、又導入アレストレス量は有効アレストレス量に等しいと仮定した。14図は破壊強度と導入アレストレス量の関係を実験値とともに計算値を示したものである。付着係数は15図より0.4と仮定した。F.R.P.-PC部材の強度特性はPC鋼橋を用いた

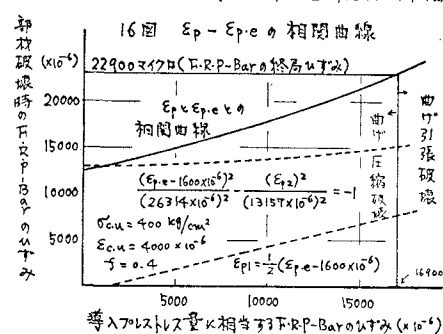


14図 破壊強度-導入アレストレス量



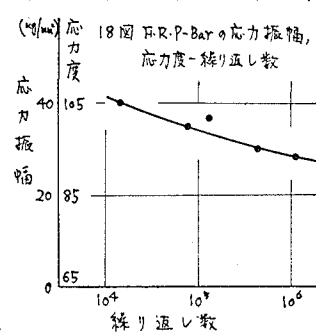
15図 荷重-付着係数

部材破断時のF.R.P.-PC部材のひずみはPC鋼橋が塑性域を有しているのに対し、F.R.P.-BARは広範囲の弾性域のみを有するためと考えられる。16図は式③より E_p と E_{cu} との関係を示した図である。式③を整理すると E_p と E_{cu} は双曲線とその漸近線を加えた



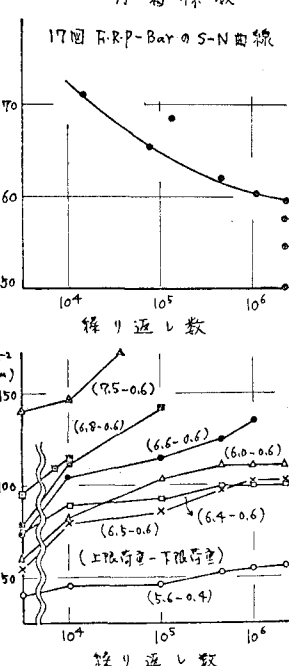
16図 $E_p - E_{cu}$ の関係曲線

曲線関係にある。更に24図よりF.R.P.-BARの終局ひずみが22900マイクロであることから導入アレストレス量が16900マイクロを境にして部材の破断形式が異なることがわかる。2) 曲げ疲労試験: 17図は導入アレストレス量が23kg/cm²のF.R.P.-PC部材のS-N線を示すものである。200万回を疲労限度と仮定すればその応力比は59%と従来のPC部材と異なることを示している。しかしながら



17図 F.R.P.-BAR の S-N 曲線

200万回を超えて破壊するものもあり疲労限度の評価は十分に検討する必要がある。18図は、17図のS-N線に基づいてF.R.P.-BARの応力度、応力振幅と繰り返し数の関係を示したものである。この図によると200万回時の疲労限度は90kg/cm²、応力振幅で25kg/cm²とかなり高い値を示しておりS-N線とともに5図の結果とは異なっている。これは、F.R.P.-BARとコンクリートの複合性を表わすとともに、F.R.P.-BARの疲労が応力度よりもむしろ応力振幅に影響されるためと考えられる。最後に19図は繰り返し数とたわみ量の関係を示したものである。この図によると不安定な変形が持続する。2) 序々に変形が進展する。3) 不安定な変形を示し、変形量が急に増加する。という3つのタイプに分かれていることが示されている。



18図 F.R.P.-BAR の応力振幅、応力度-繰り返し数

あとがき: 実験を行う際に多大な援助を受けた植田中一氏にF.R.P.材料を提供された日東電業工業K.K.に深く感謝いたします。

19図 たわみ量-繰り返し数