

プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(1)

——引張強度とバラツキ——

Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for Prestressing Tendons of Concrete (1)

——Tensile Strength and Variation——

魚本 健人*・西村 次男*

Taketo UOMOTO and Tsugio NISHIMURA

1. ま え が き

近年、多くの分野で新材料の開発が行われており、これらの材料を有効に利用する方法に関してもさまざまな研究が実施されている。この傾向は建設分野においても同様であり、コンクリート構造物への新素材の有効利用に関する研究が活発に行われている。コンクリートの分野では、従来から大きな問題となっている塩害対策や、今後建設されるであろう磁気浮上型のリニアモーターカー用構造物を建設する際に問題となる非磁性材料の利用を考慮して、種々の試みがなされている。その1つに、PC鋼材(高張力鋼)のかわりに腐食を生じない、また非磁性体である繊維補強プラスチック材(FRPロッドと略す)を緊張材として利用する方法が注目されており、すでに小林らによって多くの知見が得られている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

このような目的で現在検討されているFRPロッドの多くは、一方向強化繊維プラスチック材であるが、その特性はPC鋼材等とかなり異なっている。また、同じFRPロッドと呼ばれているものであっても、その品質は使用する補強繊維の種類、繊維混入率、樹脂の種類などによっても異なったものとなる。FRPロッドを土木構造物材料として利用するためには、強度のみならず耐久であることが不可欠であり、50年以上も使用される土木構造物の場合には、強度等に関しても高い信頼性が要求される。

そこで本研究は、FRPロッドとして、アラミド繊維、ガラス繊維、カーボン繊維を用いた一方向強化プラスチックロッド(それぞれAFRPロッド、GFRPロッド、CFRPロッドと略記する)を取り上げ、これをプレストレストコンクリート用緊張材として十分使用に耐えるものとするための方法を明らかにすることを究極的な目的としている。本報告は、構造物材料として最も基本的な特性であるFRPロッドの引張強度を取り上げ、各FRPロッドの引張強度とそのバラツキについて検討した結果をとり

まとめたものである。なお、本研究で示した結果は、ロッドの品質のみならずチャックの影響も加味されていることに注意が必要である。しかし、実際にFRPロッドをプレストレストコンクリート用緊張材として使用する場合には、チャックの影響をも含めた強度特性で判断されることになるため、両者を含めた特性を明らかにすることはこの材料を構造物材料として実用化する場合に特に重要である。

2. 実 験 概 要

実験に用いたFRPロッドの補強繊維は、アラミド繊維、ガラス繊維、カーボン繊維の3種類で、マトリックスはすべてビニルエステル樹脂である。写真1に示すように、いずれのFRPロッドも直径6mmの丸棒状で、一方向強化されており、その品質は表1のとおりである。なお各ロッドの理論耐力は表1の繊維強度と繊維含有率から混合則により算出したものである。

表1 実験に使用した各種FRPロッドの品質

| | AFRPロッド | CFRPロッド | GFRPロッド |
|-----------------------------------|---------------|--------------------------|---------------------------|
| ロッドの径 | φ6mm | φ6mm | φ6mm |
| 繊維の種類 | アラミド テクノーラ | カーボン T300B 600-50B | T-ガラス RST 110PA-535 |
| 繊維の引張強度 (kg/mm ²) | 310 | 350 | 300 |
| 繊維の引張弾性率 (kg/mm ²) | 7100 | 24000 | 8600 |
| 繊維の破断伸度 (%) | 4.4 | 1.4 | 5.5 |
| マトリックスの種類 | ビニルエステル樹脂 | ビニルエステル樹脂 | ビニルエステル樹脂 |
| 繊維の体積含有率 V _f (%) | 66.0 | 66.1 | 66.8 |
| FRPロッドの理論耐力 (kg) | 5780 | 6540 | 5660 |

*東京大学生産技術研究所 第5部

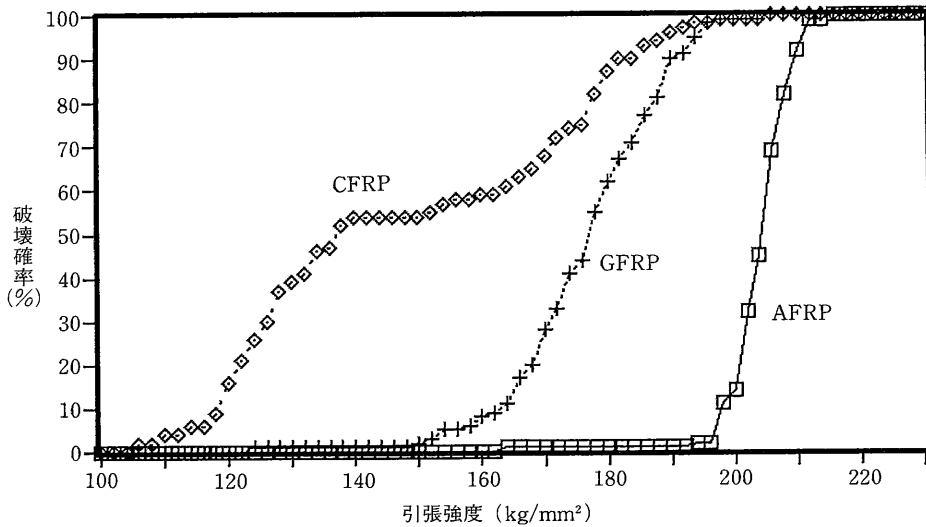


図1 各種FRPロッドの引張強度の破壊確率

FRPロッドの引張試験は、小林らが開発した2つ割りチャック¹²⁾を用いて行った。なお、ロッドの定着部には保護被覆を施し、下地処理として不飽和ポリエステル樹脂を塗布したのち、不飽和ポリエステル樹脂に鉄粉(300mesh)を重量比で約1:1.8の割合で混合し均一になるよう塗布した。この保護皮膜厚さは小林らの結果⁴⁾を考慮して厚さ約300 μ mとした。FRPロッドの引張試験はそれぞれ100本の試験片について実施し、試験はオート

グラフ(10ton)を用い、載荷速度を5mm/分とした。

3. 実験結果と考察

3.1 各種FRPロッドの引張強度と破壊性状

図1および図2は、静的引張応力を受けたFRPロッドの破壊確率を示したもので、図2は正規確率紙にプロットしたものである。

図1から明らかなように、同じ破壊確率で最も高い強度を示すのはAFRPロッドであり、CFRPロッドが最も低い。すなわち、同じ破壊確率10%であっても、AFRPでは約200kg/mm²、GFRPでは約160kg/mm²、CFRPでは約120kg/mm²となっている。

図2に示すAFRPロッドおよびGFRPロッドでは、バラツキの違いはあるもののほぼ直線関係が得られており、これらの破壊強度はいずれも正規分布であるといえよう。特に、AFRPロッドではバラツキも少なく(標準偏差5.7kg/mm²)、平均引張強度は理論強度とほぼ等しい204kg/mm²となっている。また、GFRPロッドはAFRPロッドに比してバラツキの幅は大きく(標準偏差12.2kg/mm²)、引張強度として理論耐力に匹敵する値も得られているが、平均引張強度は177kg/mm²となり理論耐力の約90%である。しかし、CFRPロッドは他のロッドと異なり直線関係がみられず、高応力レベル、中応力レベル、低応力レベルの3段階に分類できる。また、CFRPロッドはバラツキが他のロッドに比較して大きいだけでなく、平均引張強度が147kg/mm²と最も低い値であり、理論耐力に比べてはるかに小さな値である。

これらのFRPロッドの破断性状をみると、AFRPロッド

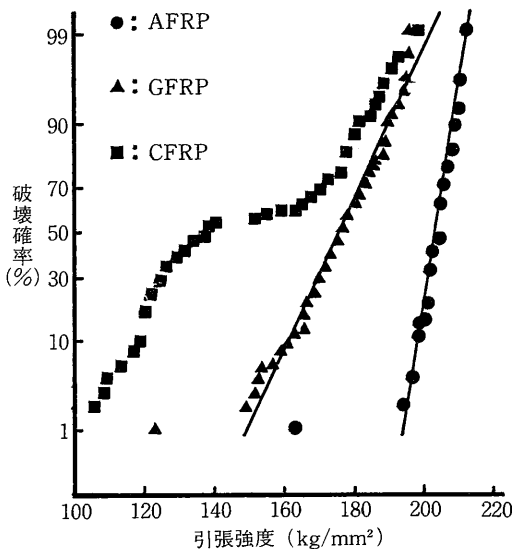


図2 各種FRPロッドの引張強度と破壊確率との関係(正規確率プロット)

研究速報

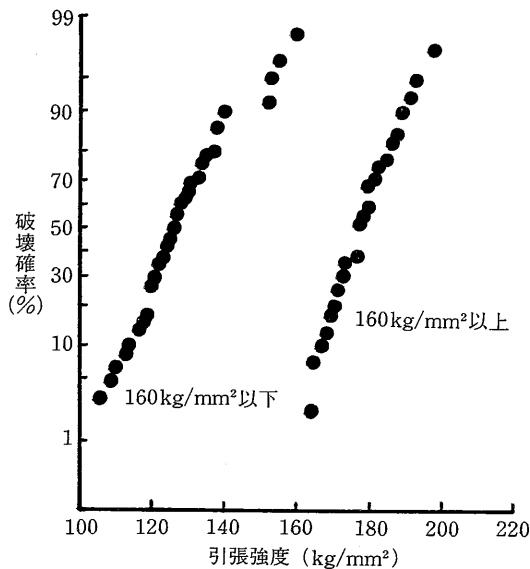


図3 CFRPロッドの強度分布

ドおよびGFRPロッドは強度に関係なくほぼ同様な破壊形式であり、定着部分の抜けと繊維破断が同時に生じていた。一方、CFRPロッドでは条件によって異なった破壊となり「ほうき状」の破壊、抜けと同時の一部破断、応力集中せん断破断の3つに分類することができる。

3.2 CFRPロッドのバラツキと破壊形式

一般に、FRPでは繊維の破損、マトリックスの割れ、繊維とマトリックスの界面剝離または部分割れ、縦われなど多くの破損モードが存在し、条件によって異な

た破壊が生じるが、本研究で行ったCFRPロッドで図2のように特異なバラツキが発生した原因は、このロッドの破壊形式が条件によって異なっていたためではないかと考えられる。そこで、CFRPロッドの160kg/mm²以上となったデータと、それ以下となったデータをわけて正規確率紙にプロットすると図3に示すように2本の直線ではほぼ近似することが出来る。

以上のことを考慮して、図2に示されている高応力レベル、中応力レベル、低応力レベルの3段階に分かれている強度特性を次のように考える。すなわち、ロッドの破断を大きく2種類の原因(たとえば①繊維破断と②繊維とマトリックスの界面破断)で破壊したと考え、更に両者が混在して破壊する領域を第3の破壊として分類する。①と②とはお互いに独立した現象であると考え、それぞれが異なった分布をしているが、ロッド全体の破壊はおのおのの混合型破壊であるとする。

図2および図3の結果を尊重して、①と②はそれぞれ正規分布であると仮定し、①で生じた破壊の割合を p_1 、②で生じた破壊の割合を p_2 とすればロッド全体としての破壊確率の破壊確率密度関数 $f(x)$ は次式であらわせる。

$$f(x) = p_1 \cdot f_1(x) + p_2 \cdot f_2(x) \tag{1}$$

ただし

- μ_1, μ_2 : おのおのの平均値
- σ_1, σ_2 : おのおのの標準偏差
- $p_1 + p_2 = 1$

$$f_1(x) = \frac{2}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right\}$$

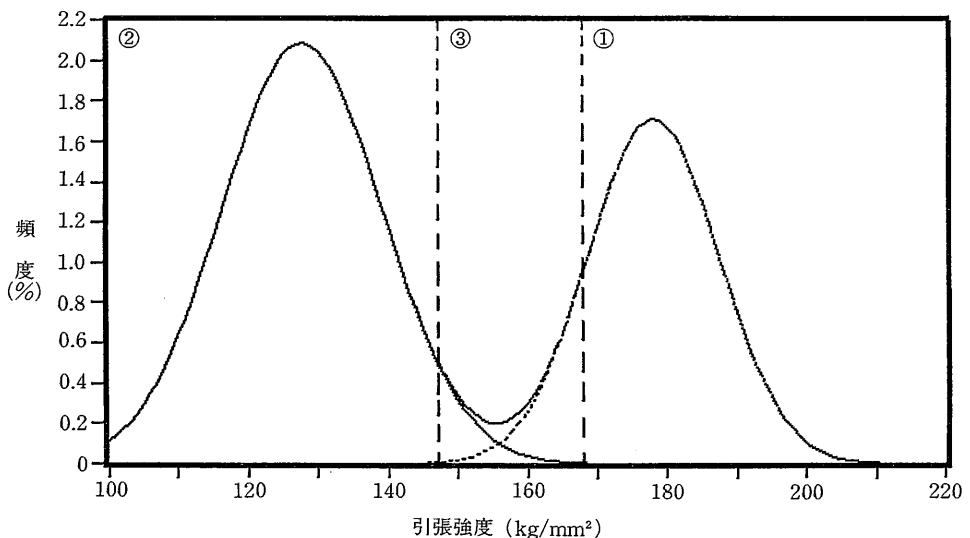


図4 式(1)を用いた引張強度の頻度分布と破壊形式の分類

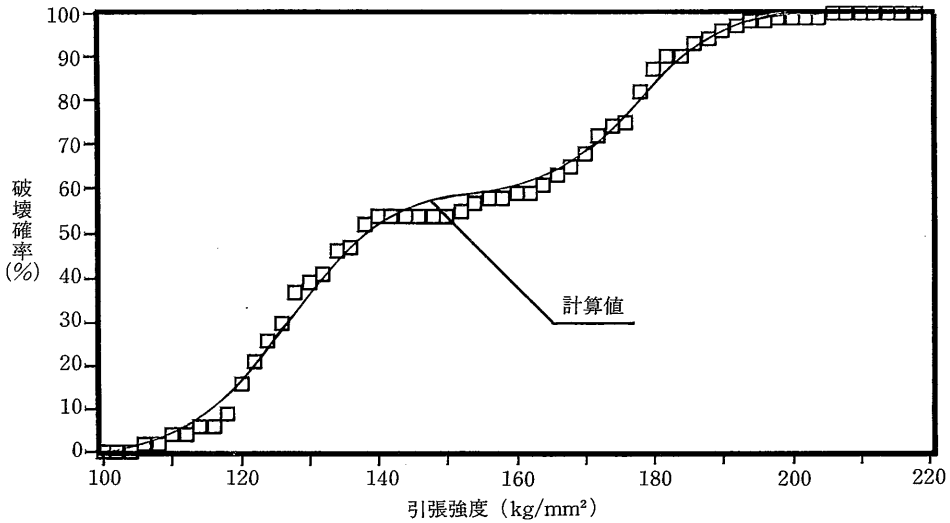


図 5 CFRPロッドの破壊確率と式(1)による計算値

$$f_2(x) = \frac{2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right\}$$

この考えに基づいて図 1 および図 2 に示したデータを 2 種類に分類し、160kg/mm²を境にこれ以上の値となったものとこれ以下の値となったものの平均値と標準偏差を求めると $\mu_1 = 0.6$, $\mu_2 = 0.4$ となり、次に示す値が求められる。

160kg/mm²以上：平均値 $\mu_1 = 178.073\text{kg/mm}^2$,
標準偏差 $\sigma_1 = 9.3297\text{kg/mm}^2$

160kg/mm²以下：平均値 $\mu_2 = 127.746\text{kg/mm}^2$,
標準偏差 $\sigma_2 = 11.480\text{kg/mm}^2$

これらの結果を用いて引張強度の頻度分布を式(1)を用いて計算すると図 4 に示すようになり、上述の①, ②, ③に分類することが出来る。また、累積頻度の計算値と試験値を比較すると図 5 に示す結果となる。

図 5 から明らかなように、計算値と実測値はほぼ一致しており、上記の考え方はほぼ妥当なものであると言える。すなわち、CFRPロッドの強度分布が図 2 に示したようなものになったのは、このロッドの場合には 2 つの異なった破壊形式があり、それぞれが独立して生じているために発生した現象であると考えられる。この 2 つの異なった破壊形式としては破壊性状等を考慮すると①繊維破断 (160kg/mm²以上の場合に相当) と②繊維とマトリックスの界面破壊またはチャック部の破壊 (160kg/mm²以下の場合に相当) が主な原因であると推定される。事実、①の分布曲線から求めた平均強度は

178kg/mm²となり、より理論強度に近い値となる。しかし、この破壊形式については今後アコースティック・エミッション等を用いた検討が必要となる。

4. あとがき

本報告では、チャックの影響をも含めたFRPロッドの引張強度特性について検討したが、プレストレストコンクリート用緊張材として実用化するためにはCFRPロッドに見られたように②の破壊原因を取り除くための検討が必要となる。このような現象は他のFRPロッドの場合にも予想されるものであり、マトリックスの選定またはチャックの構造によって影響を受けるものと考えられる。今後は、さらに樹脂の違いによる影響等を調べるとともに、その他の特性について報告する予定である。

(1990年 3月 27日受理)

参 考 文 献

- 1) 小林一輔：繊維強化複合材料プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究，昭和59年度科学研究費(試験研究 2) 研究成果報告書，1984
- 2) 小林一輔：FRP製プレストレストコンクリート緊張材用定着装置，生研リーフレット，No. 158，1987
- 3) 石田，小林，趙，則武：FRPロッドを用いたプレストレストコンクリート構造に関する研究，第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集，コンクリート工学協会，1986
- 4) 小林，趙，西村：アラミッド繊維を用いたFRP緊張材の樹脂被覆が引張強度に及ぼす影響，生産研究，第 41 巻，第 4 号，1989. 4