

PSV-11 プレストレストコンクリート用FRP緊張材の引張強度のバラツキ

東京大学生産技術研究所 正会員 西村次男

東京大学生産技術研究所 正会員 魚本健人

1. まえがき

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、構造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、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。

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、マトリックスは全てビニルエステル樹脂である。いずれのFRPロッドも直径6mmの丸棒状で、一方向に強化されている。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¹⁾²⁾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

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。即ち、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。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

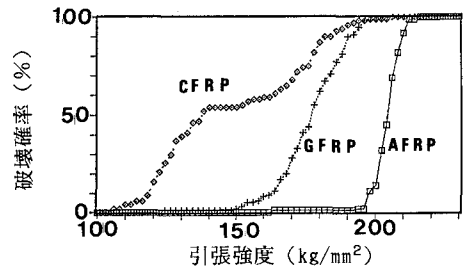


図-1 各種FRPロッドの引張強度の破壊確率

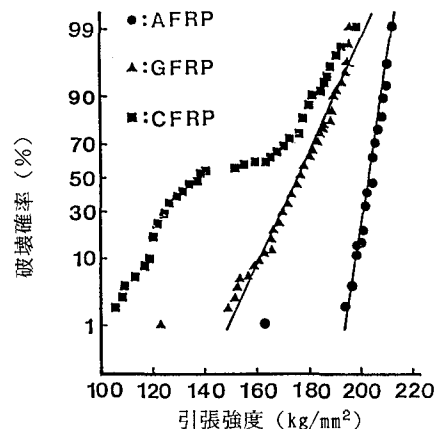


図-2 各種FRPロッドの引張強度と破壊確率との関係(正規確率プロット)

ッドおよび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ロッドでは異なった破壊形式が認められ、「ほうき状」の破壊、抜けと同時に一部破断、応力集中せん断破断の3つに分類することができた。

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、条件によって異なった破壊が生じるが、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 $160\text{kg}/\text{mm}^2$ 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2本の直線でほぼ近似することが出来た。これらのことを考慮して、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。即ち、ロッドの破断を大きく2種類の原因(①と②)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各々の混合型破壊であるとする。上記の結果を尊重して、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。

$$f(x) = p_1 \cdot f_1(x) + p_2 \cdot f_2(x) \quad (1)$$

ただし μ_1, μ_2 : 各々の平均値
 σ_1, σ_2 : 各々の標準偏差、

$$p_1 + p_2 = 1$$

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right]$$

$$f_2(x) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right]$$

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、 $160\text{kg}/\text{mm}^2$ 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 $p_1 = 0.6$ 、 $p_2 = 0.4$ となり、次に示す値が求められる。

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

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

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3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4に示す結果となる。図4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。即ち、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から①繊維破断($160\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上の場合に相当)と②繊維とマトリックスの界面破壊($160\text{kg}/\text{mm}^2$ 以下の場合に相当)が主な原因であると推定される。

参考文献

- 1) 小林一輔: 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: 生研リーフレット、No.158、1987
- 3) 石田、小林、趙、則武: 第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986
- 4) 小林、趙、西村: 生産研究、第41巻、第4号、1989.4

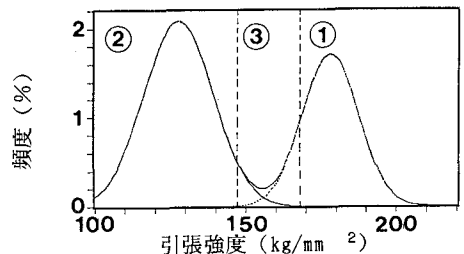


図-3 式(1)を用いた引張強度の頻度分布と破壊形式の分類

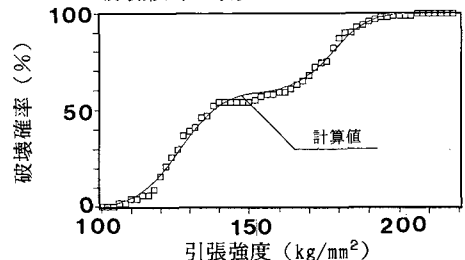


図-4 CFRPロッドの破壊確率と式(1)による計算値