

プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性 (10)

— アルカリによる GFRP ロッドの劣化性状 —

Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for Prestressing Tendons of Concrete (10)

— Deterioration of GFRP Rods by Alkaline solution —

魚本 健人*・勝木 太**

Taketo UOMOTO and Futoshi KATSUKI

1. ま え が き

コンクリート用補強材として利用される GFRP ロッドは、コンクリート中に埋設されることから、長期的には高アルカリ環境下に曝されることになる。ガラス繊維を樹脂によって成形した GFRP ロッドは、ガラス繊維自身の耐アルカリ性に問題はあるが、樹脂が繊維の保護材となることから、アルカリによって劣化する可能性が非常に低いと考えられる。しかし、写真1に示すように繊維を取り巻く樹脂は数 μm 以下と非常に薄いために、ロッド中のガラス繊維がアルカリの影響をまったく受けないとは断言できない。そこで本研究では、アルカリ溶液による GFRP ロッドの劣化促進試験を実施し、アルカリ溶液に浸漬した GFRP ロッド断面のアルカリ分布状態を電子線マイクロアナライザー (EPMA) を用いて測定し、GFRP ロッドへのアルカリの浸透を明らかにした。また、浸漬したロッドの静的引張試験を行い、ロッドの強度変化についても明らかにした。さらに、EPMA の測定結果を基に、アルカリの浸透速度を拡散律速理論によって評価し、アルカリによって劣化したロッドの強度低下を定量的に推定した。

2. 実 験 概 要

写真2に GFRP ロッドの浸漬試験装置本体を示す¹⁾。本体の寸法は $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ で、1ケースで20本のロッドの浸漬試験が可能となる。本体にはアクリル板を使用し、ロッドおよびアルカリ溶液挿入口にはシリコン栓を利用して密閉した。また、ロッドの浸漬は静的引張試験において引張区間 (20 cm) となる部分のみとし、定着部分 ($10 \text{ cm} \times 2$) はアルカリの影響を受けないようにした。また、

* 東京大学生産技術研究所 第5部

** (株) 東急建設

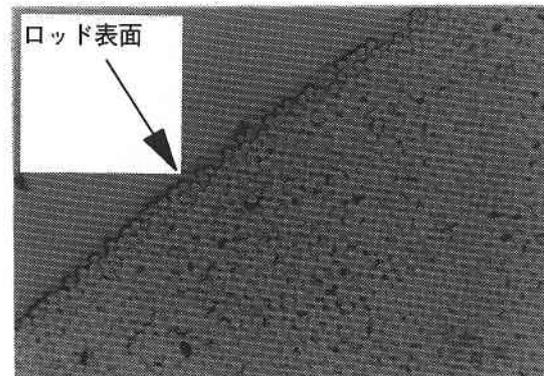


写真1 GFRP ロッド断面 (200倍)

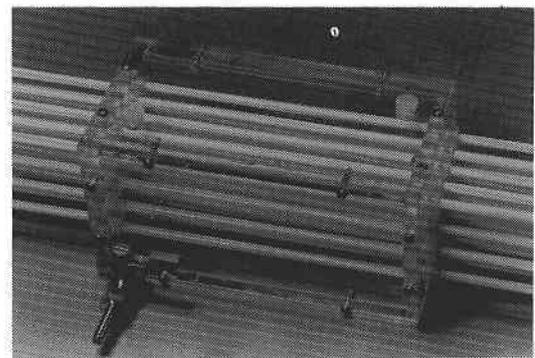


写真2 浸漬試験装置

引張試験は変位制御型オートグラフ (10 tf) で行い、荷重速度は 5.0 mm/min とした。表1に GFRP ロッドの材料特性²⁾および養生条件を示す。アルカリ溶液から取り出したロッドは、蒸留水で洗浄後1日間デシケータの中で乾燥させた。なお、ロッドの定着部分には保護被膜を施し、定着具は小林一輔³⁾によって開発された2つ割りチャックを使用した。

表 3 GFRP ロッドの物性と養生条件

繊維の種類	Tガラス	溶液の種類	NaOH
マトリックス	ビニルエステル樹脂	濃度(mol/l)	1.0
直径(mm)	6.0	温度(°C)	40
強度(kgf/mm ²)	164	養生期間(day)	7, 30, 90, 120

表 2 静的引張試験結果

浸漬日数(day)	7	30	90	120
破断強度(kgf/mm ²)	126	91	56	48
強度低下率(%)	22	45	66	71
標準偏差(kgf/mm ²)	8.2	15.7	16.3	9.4

3. EPMA によるロッド断面内の Na 分布測定結果

EPMA によって、3ヶ月間40°CのNaOH溶液に浸漬したGFRPロッド断面内のNa分布測定結果を写真3に示す。写真中の白い部分がNa浸透箇所を示したものであるが、明らかにロッド断面内にアルカリが浸透していることが確認される。このことから、本実験に使用したロッドの樹脂は、アルカリに対して完全な保護材の役割を果たしていないことが明らかとなった。一方、既報の結果⁴⁾によるとガラス繊維はアルカリによって劣化し強度低下を起こすが、EPMAによってNaが測定された部分のガラス繊維は劣化している可能性が高く、アルカリ溶液に浸漬したGFRPロッドは強度低下を起こすと予想される。

4. 静的引張試験結果

表2に静的引張試験結果を示す。表中に示す浸漬日数ごとの実験値は、試験本数20本の平均値である。表よりアルカリ溶液に浸漬したGFRPロッドは明らかに強度低下を起こし、また、浸漬日数が増加するにしたがってその強度低下率は増加していることが確認される。

ここで、写真4に3ヶ月間浸漬したロッドの破断状況を、図1に静的引張試験における荷重と変位の関係の一例を示す。アルカリ溶液に浸漬したロッドの破断性状は、まずアルカリによって劣化したと考えられる部分の破断が生じ一

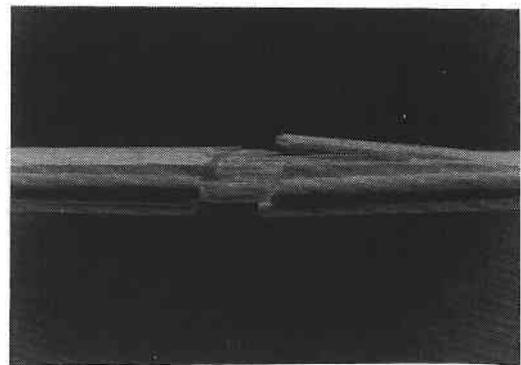


写真4 GFRP ロッドの破断状況

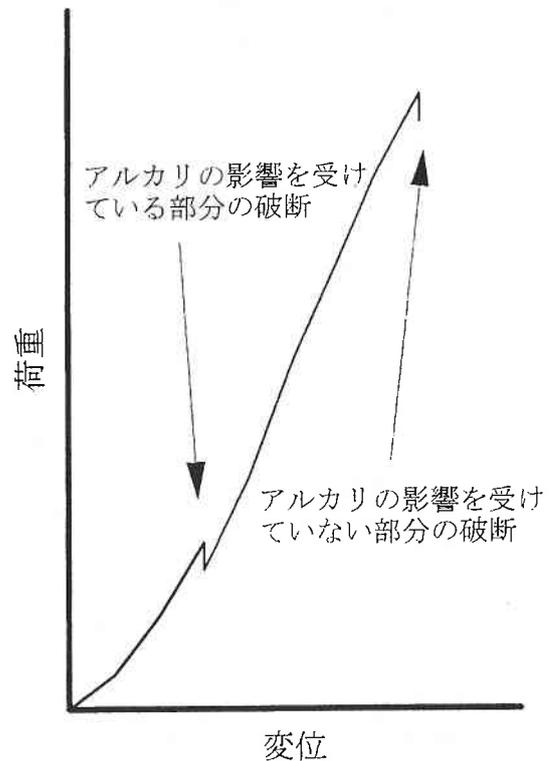


図1 浸漬したGFRPロッドの荷重-変位曲

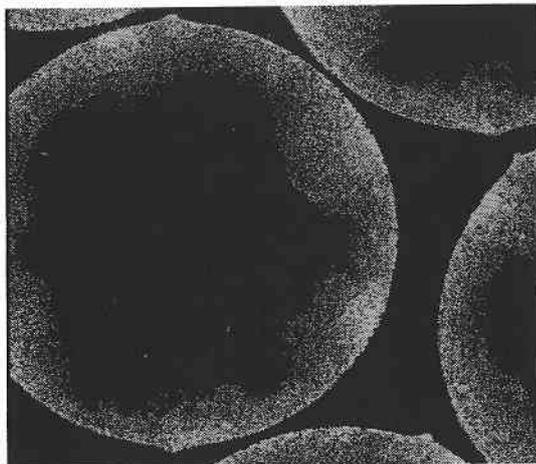


写真3 浸漬したGFRPロッド断面のNa測定結果

瞬荷重の低下が起こる。その後再度荷重が付加され破断に至る。このように荷重低下が生じるのは、アルカリが浸透した部分のガラス繊維が劣化し、この部分の繊維破断が先行するために生じるものと考えられる。したがって、浸漬

研究速報

したロッドの最終破断強度はアルカリの影響を受けていない健全な部分(写真3の黒い部分)のみによって評価されることになる。

5. 劣化した GFRP ロッドの強度低下予測

3および4節の結果を基に、劣化した GFRP ロッドの強度低下を予測するための計算手法を提案する。劣化したロッドの破断強度は、アルカリの影響を受けていない健全な部分のみによって評価されることから、ロッド断面への経時的なアルカリの浸透を予測し、アルカリの影響を受けていない部分の面積を推定すれば、定量化できると考えられる。そこで、フィックの拡散方程式を簡略化した一次元モデル式(1)を利用し、ロッドへのアルカリの浸透を予測した。

式(1)中の拡散係数kは、写真3で Na が検出されていない部分の面積を円の面積に換算して半径を算定し、式(1)を用いて求めた。ここで算定された円の半径を式(1)中の x の値とする。このようにして求められた拡散係数 k は、 $2.8 \times 10^{-6} (\text{cm}^2/\text{hrs})$ である。なお、T ガラス繊維のアルカリ拡散係数は、 $1.0 \times 10^{-10} (\text{cm}^2/\text{hrs})$ であった。

$$x = \sqrt{2 \cdot k \cdot c \cdot t} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

- C: アルカリ濃度 (mol/l)
- k: 拡散係数 (mm^2/hrs)
- x: 一次元浸透距離 (mm)
- t: 浸漬時間 (hrs)

次に、アルカリ溶液に浸漬したロッドの破断強度を求めるための計算式を導くことにするが、以下の2つの仮定条件のもとで行うものとする。

- ① ロッドの最終破断強度は、Na が浸透していない部分の強度のみで評価する。即ち、Na が浸透している部分の強度は無視する。
- ② Na が浸透していない部分の強度は、浸漬前のロッドの強度と同等である。

仮定条件①, ②より、

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_t}{S_t} \quad \dots\dots(2)$$

ここで

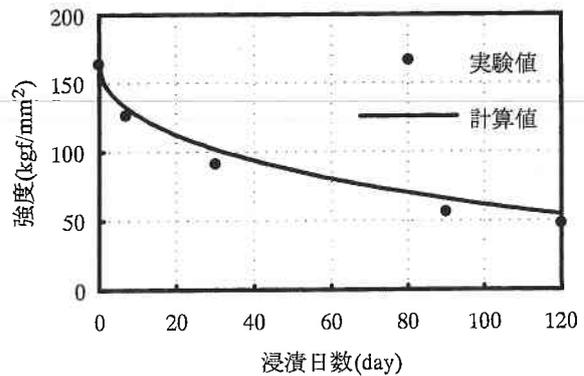


図2 浸漬した GFRP ロッドの強度変化

- σ_0 : 浸漬前の強度 (kgf/mm^2)
- σ_t : 浸漬日数 t 日の強度 (kgf/mm^2)
- P_0 : 浸漬前の破断荷重 (kgf)
- P_t : 浸漬日数 t 日の破断荷重 (kgf)
- S_0 : ロッドの断面積 (mm^2)
- S_t : アルカリの影響を受けていないロッドの断面積 (mm^2)

したがって、浸漬したロッドの強度は、

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{P_t}{S_0} \\ &= \sigma_0 \cdot \frac{S_t}{S_0} \\ &= \sigma_0 \cdot \frac{\pi \cdot (R_0 - x)^2}{\pi \cdot R_0^2} \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここで、式(3)に式(1)を代入すれば式(4)が得られる。

$$\sigma = \left(1 - \frac{\sqrt{2 \cdot k \cdot c \cdot t}}{R_0}\right)^2 \cdot \sigma_0 \quad \dots\dots(4)$$

ここで、

- R_0 : ロッドの半径 (mm)

図2にロッドの破断強度と浸漬日数の関係を示す。図中の実験値は表2より、また、計算値は式(4)を用いて計算した結果である。ただし、拡散係数kは $2.8 \times 10^{-6} (\text{cm}^2/\text{hrs})$ 、アルカリ濃度 C は1.0 (mol/l) とした。

図中の実験値と計算結果は非常に近似しており、本研究で提案した計算手法を用いて、劣化したロッドの強度低下を推定できると判断される。

6. ま と め

本研究の目的は、アルカリによる GFRP ロッドの劣化性状を明らかにするとともに、GFRP ロッドの耐アルカ

研究速報

り性を定量化することであった。以下にその結論をまとめる。

1) EPMA の結果から、マトリックスにビニルエステル樹脂を用いた GFRP ロッドの場合にも、ガラス繊維と同様、アルカリが浸透することが明らかとなった。これは、繊維の保護膜となる樹脂が数 μm 以下と非常に薄いため、アルカリによる劣化の進行を抑えるには、保護膜の層を厚くする必要がある。

2) アルカリ溶液に浸漬したロッドの破断は、劣化した部分の破断が先行し、その後劣化していない部分の破断が生じる。

3) GFRP ロッドへのアルカリの進行速度を拡散律速

理論によって評価することで、ロッドの強度低下を定量化できる。これは、マクロ的にみればガラス繊維 1 本とほぼ同様な考え方²⁾で評価できるものである。

(1994年4月19日受理)

参 考 文 献

- 1) 魚本, 勝本: FRP ロッドの耐アルカリ性試験方法, 生研リーフレット, No. 242, 1994
- 2) 魚本, 西村: プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性 (1), 生産研究, 42巻5号, 1990.5
- 3) 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
- 4) 魚本, 勝本: 各種繊維の耐アルカリ性の評価法に関する基礎研究, JSCE 論文集, No. 490/V-23, 1994.5