

プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性(7)

—アルカリによるガラス繊維劣化のモデル化—

Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for Prestressing Tendons of Concrete (7)
—Computational Model for Deterioration of Glass Fiber by Alkali Solution—

魚本 健人*・宮崎 太*
Taketo UOMOTO and Futoshi MIYAZAKI

1. ま え が き

コンクリート用補強材である鉄筋や高張力鋼の代替品として利用される各種繊維(ガラス繊維, アラミド繊維, 炭素繊維)を用いた FRP ロッドは, 塩化物イオンによる劣化が生じないと考えられ, 海洋構造物などの海洋環境下に建設される構造物や, 融氷剤が多量に散布される橋梁などへの適用が注目されている。しかし, たとえ塩化物イオンによる劣化が生じないと考えられる材料であっても, このような新しい材料をコンクリート用補強材として使用するためには, 鋼材の場合と同様に, 力学的特性や耐化学薬品性などについて十分検討する必要がある。すでに筆者らは, 各種繊維を用いた FRP ロッドの力学的特性ならびに耐アルカリ性について報告している^{1)~5)}。

前報⁵⁾では, アラミド繊維, 炭素繊維は耐アルカリ性に非常に優れているが, ガラス繊維はアルカリによって繊維強度が著しく低下することを報告した。そこで, 本研究では特にガラス繊維の耐アルカリ性を取り上げ, アルカリ溶液に浸漬したガラス繊維を走査電子顕微鏡で微視的に観察し, アルカリによる劣化性状を調べるとともに, その劣化機構を明らかにすることを目的とした。すなわち, アルカリによるガラス繊維の劣化のメカニズムを定量的に評価するために, 走査電子顕微鏡による観察結果を基に, その劣化速度がアルカリの拡散によって支配されるとした拡散律理論を用いて, 繊維の引張破断強度の低下を予測するモデルを提案した。

2. 本研究の位置づけ

各種繊維を連続繊維補強材として利用する場合, 一般に樹脂によって繊維を棒材に成形したもの (FRP ロッド) が使用される。樹脂によって棒材に成形された繊維は, 樹脂が繊維の保護材としての役割を果たすことから, コンクリート中のアルカリと絶縁され, アルカリによ

て劣化する可能性が非常に低いと考えられる。しかし, 一般に繊維を取り巻く樹脂はその厚さが数 μm 以下と非常に薄く, 運搬や保管時に樹脂が物理的な劣化および紫外線劣化を起こす可能性が高いこと, また, アルカリによるエステルの加水分解反応によって樹脂が腐食を起こすことなどにより, 樹脂によってアルカリの侵入を完全に防ぐことは不可能であると考えられる⁶⁾。

一方, FRP ロッドの強度は樹脂ではなく繊維の種類と繊維混入率によって定まっていることから, もし, アルカリによる FRP ロッドの強度低下が生じた場合には, その原因はロッドの強度を支配する繊維自身の劣化に他ならないと考えることができる。

したがって, 繊維そのものの耐アルカリ性を把握することで, FRP ロッドの最悪の状態を想定した耐アルカリ性を評価することが可能なこと, また, 繊維の劣化機構を明らかにし定量化することが FRP ロッドの劣化を定量化することの近道であると考えられる。そこで, 本研究では繊維そのものの耐アルカリ性試験の結果を基に, 繊維の耐アルカリ性の定量化を試みた。

3. 実験概要

表 1 に実験に用いたガラス繊維の成分一覧表を示す。ガラス繊維の種類は T ガラスであり, その材料特性については前報⁵⁾を参照されたい。繊維の浸漬条件は, アルカリによる劣化を促進させる目的で, 繊維を 1 mol/l の NaOH 溶液に浸漬し, 40°C の恒温室で保管した。浸漬期間は, 1, 4, 7, 14, 21, 28 日とし, 所要日数経過後, 繊維をアルカリ溶液から取り出し, 蒸留水で洗浄後, 1 日間デシケータの中で乾燥させた。乾燥させた繊維を走査電子顕微鏡の試料台に蒸着し, 3000 倍で観察した。

表 1 ガラス繊維の組成一覧表

ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
0.8	65.1	23.9	.108	.296	9.74	.084

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

研 究 速 報

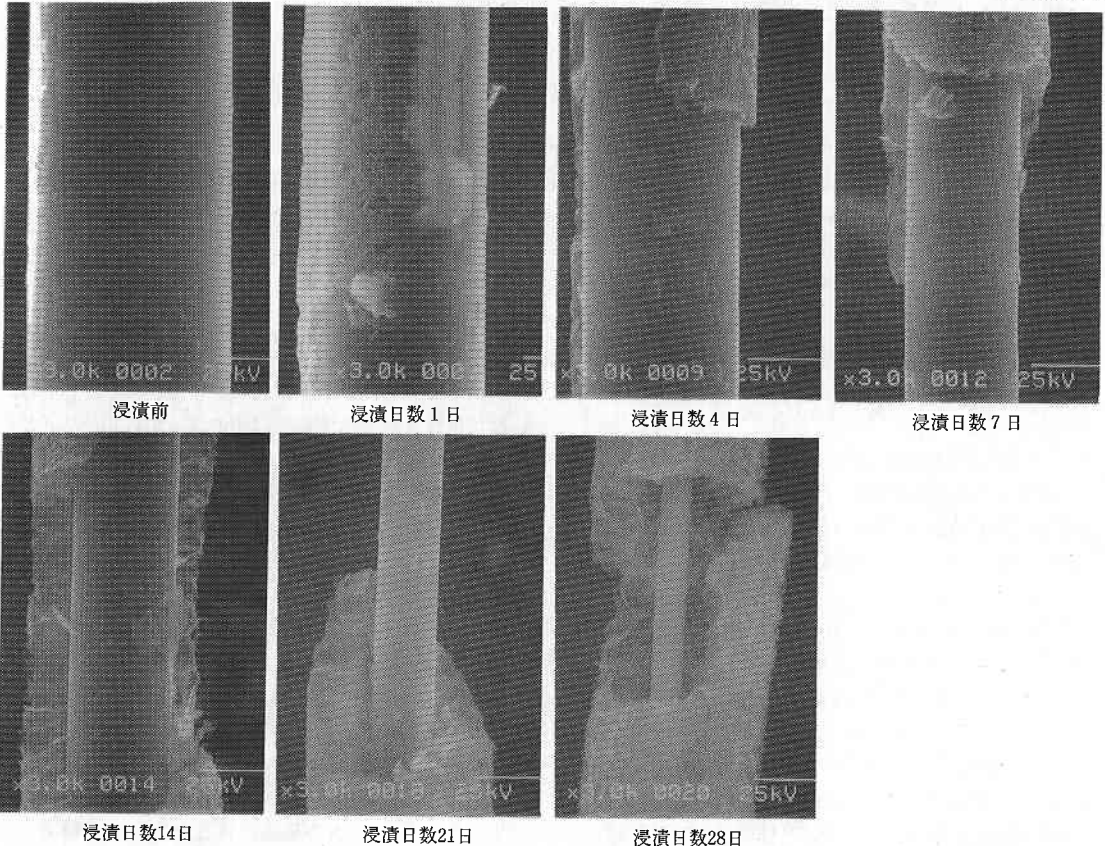


写真1 アルカリによるガラス繊維の劣化性状 (3,000倍)

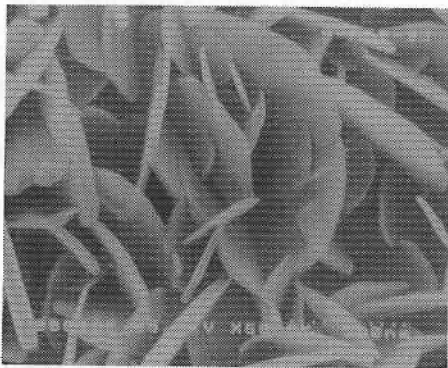


写真2 アルカリ反応生成物 (60,000倍)

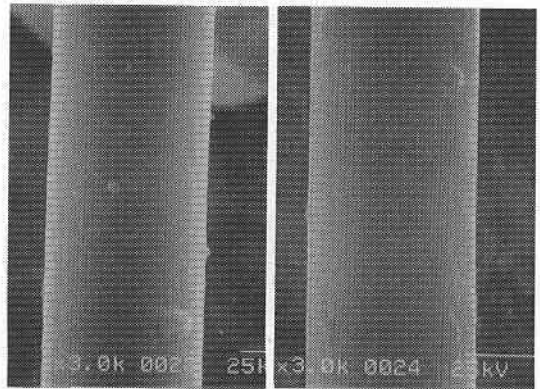
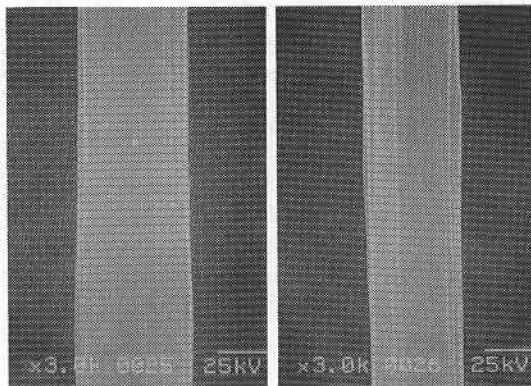


写真3 アラミド繊維観察結果 (3,000倍)

4. 観察結果および考察

アルカリ溶液浸漬前および浸漬日数 1 日～28 日のガラス繊維を走査電子顕微鏡で観察したものを写真 1 に示す。浸漬前のガラス繊維の表面は、非常に滑らかであるにもかかわらずすでに浸漬日数 1 日において、ガラス繊維の

SiO₂ 成分とアルカリが反応することによって生じたと考えられる反応生成物が付着しているのが確認できる。さらに、浸漬日数が増加するにしたがい、その反応生成物の層が均一に増加し、アルカリと反応していない健全な部分が減少していることが確認される。このことより、



浸漬前 浸漬日数56日
写真4 炭素繊維観察結果 (3,000倍)

ガラス繊維の強度低下は、時間とともに強度を持たないアルカリ反応層が増加し、強度を持つ健全な部分が減少していくために起こるものと考えられる。

写真2に、アルカリ反応生成物の拡大写真を示す。反応生成物の結晶は板状であり、その構造は透水性のよいものとなっていることが確認できる。したがって、反応生成物によってアルカリの進行が抑制されることは、ほとんどないと考えられる。

比較のために、浸漬前および NaOH 溶液 (2 mol/l) に56日間浸漬し40°Cの恒温槽で保管したアラミド繊維と炭素繊維を走査電子顕微鏡で観察した写真を写真3および4に示す。両者の場合には、ガラス繊維のような明白な劣化を観察することはできず、アルカリによる侵食はないと判断される。

5. ガラス繊維の劣化を予測するモデル

アルカリがガラス繊維表面から内部方向へ、図1に示すように均一に進行するものとし(写真1参照)、その速度がアルカリの拡散によって支配されるものとする。その支配方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + F(x, y, t; C) \quad (1)$$

ただし、

- t : 時間 (hr)
- x, y : 繊維表面からの反応量 (cm)
- C : 繊維表面のアルカリ濃度 (mol/l)
- D : アルカリの拡散係数 (cm²/hr)
- $F(x, y, t; C)$: アルカリの消費を伴う反応

また、ガラス繊維の断面がほぼ円形であることより、(1)式を(2)式に示すように極座標系に変換することが可能

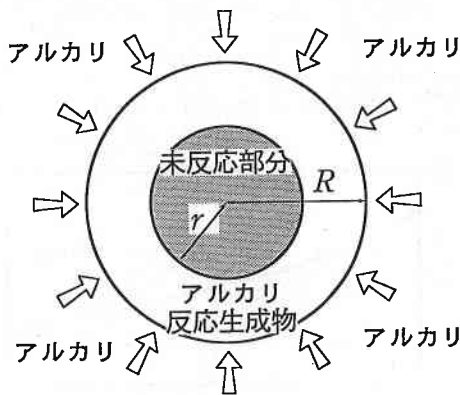


図1 アルカリ反応モデル

となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right) + F(r, t; C) \quad (2)$$

ただし、 r : 繊維中心からの未反応量 (cm)

(1)および(2)式における関数 F の反応速度は無限大であるので、アルカリの消費速度も無限大である。したがって、拡散により繊維に進入したアルカリは、繊維中の SiO₂ 成分と反応することにより一瞬に消費されることとなる。しかし、繊維のある部位において、アルカリは無限に消費されるのではなく、SiO₂ 成分が単位体積あたり消費し得るアルカリ量は、単位繊維中の SiO₂ 量 (mol/l) にアルカリと SiO₂ の反応比を乗じた値 (有効消費アルカリ量 SI; mol/l) が上限となる⁷⁾。実際の計算は、有効消費アルカリ容量の概念を取り入れ、繊維中心からの距離 (r) と時間 (t) に離散化して差分法を用いて行った。

6. 解析結果および考察

図2に走査電子顕微鏡によって測定したアルカリと未反応部分の直径と浸漬日数との関係を示す。また、図中には(2)式によって解析した未反応部分の直径を併せて示す。ただし、解析条件として差分係数0.49、アルカリ消費容量1.3mol/l、アルカリ濃度1 mol/lを用いた。この図からも明らかなように、実測値と解析値は非常に近い値を示しており、アルカリとガラス繊維の反応速度は拡散律速理論によって十分評価できると判断される。

また、表2に前報⁵⁾で報告した浸漬日数毎のガラス繊維破断強度を、図3にはその破断強度と浸漬日数との関係を示す。ただし、各浸漬日数毎の繊維破断強度は、50~60本試験を行った結果の平均値であり、繊維破断強度

研 究 速 報

表 2 ガラス繊維の浸漬日数毎の破断強度

浸漬日数	0日	1日	4日	7日	14日	21日	28日
破断強度 (kg/mm ²)	251	205	136	132	109	58	37

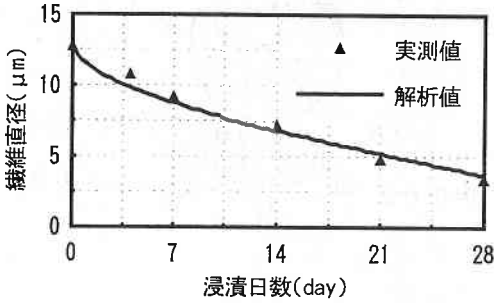


図 2 未反応部分直径と浸漬日数の関係

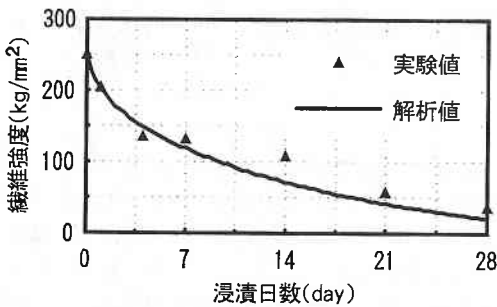


図 3 繊維破断強度と浸漬日数の関係

は静的引張試験より得られた各浸漬日数毎の繊維破断荷重を浸漬前の繊維断面積で除した値である。また図中には解析値を示してあるが、これはアルカリと未反応部分の繊維強度は浸漬前の強度と同等であると仮定し、上述した直径の解析値を用いて求めた浸漬日数毎の断面積と、浸漬前の繊維破断強度および断面積を用いて算定した。以下にその算定式を示す。

$$\sigma_0 = P_0/S_0 = P_t/S_t = \sigma_t$$

$$P_t = \sigma_0 \times S_t$$

$$\sigma_t = P_t/S_0 = \sigma_0 \times S_t/S_0$$

ただし、

- σ_0 : 浸漬前の繊維破断強度
- σ_t : アルカリと未反応部分の破断強度
- σ_t : 各浸漬日数における繊維破断強度
- P_0, S_0 : 浸漬前の破断荷重と断面積
- P_t, S_t : 未反応部分の破断荷重と断面積

図中の実験値と解析値はよく一致していることから、

拡散律速理論によってアルカリの進行速度を算定し、浸漬前の強度と未反応部分の強度が同等であるとして、ガラス繊維の強度低下を定量的に推定することが可能であると考えられる。

7. 結 論

本研究の目的は、短繊維または連続繊維補強材として使用されるガラス繊維のアルカリによる劣化性状を明らかにするとともに、アルカリによる繊維の劣化を定量的に評価するための解析手法を提案することであった。以下に本研究の結論をまとめて示す。

- 1) ガラス繊維はアルカリによって著しく強度低下を起こす。その原因は、アルカリとガラス繊維が反応し、ほとんど強度を有しないアルカリ反応生成物を形成し、強度を有する未反応部分の断面が減少するためである。
- 2) アルカリとガラス繊維の反応は、ガラス繊維表面から内部方向へほぼ均一に進行し、反応生成物はこの反応を特に妨げていないと推定される。
- 3) この反応を定量的に評価するために、拡散律速理論に基づいてアルカリの進行を予測するモデルを提案し、繊維の強度低下を解析的に予測した。実験値と解析値の相関性が非常に高いことから、ガラス繊維の強度低下を十分この理論によって評価できる。

今後、温度の違いによるアルカリの拡散係数の取り扱いや、アルカリ濃度の違いによる劣化進行の程度を把握し、実環境におけるガラス繊維の劣化を予測する必要がある。また、GRCに用いられる耐アルカリガラス繊維についても、アルカリによる劣化性状を明らかにし、定量的な評価について検討することが必要であるが、本研究で提案した考え方にほぼ従うものと推定される。

(1993年 6月28日受理)

参 考 文 献

- 1) 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, 第42巻5号, 1990.5
- 2) 魚本, ホドホド: プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(2), 生産研究, 第43巻3号, 1991.3
- 3) 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(3), 生産研究, 第43巻5号, 1991.5
- 4) 魚本, ホドホド: プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(4), 生産研究, 第44巻4号, 1992.4
- 5) 魚本, 西村, 宮崎: プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(6), 生産研究, 第45巻5号, 1993.5
- 6) 連続繊維研究小委員会: 連続繊維補強材の耐久性に関する考え方, 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用, コンクリートライブラリー-72, 土木学会, 1992.4
- 7) 小山, 矢島, 古澤, 魚本: アルカリ・シリカ反応のモデル化における拡散係数の取扱い, 第20回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会関東支部, 1993.3