

## プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性 (18)

—高温環境下におけるガラス繊維およびカーボン繊維の引張強度特性—  
 Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for Prestressing Tendons of Concrete (18)  
 —Tensile Strength Properties of Glass and Carbon Fibers High Temperature Condition—

魚本 健人\*・西村 次男\*・加藤 佳孝\*

Taketo UOMOTO, Tsugio NISHIMURA and Yoshitaka KATO

### 1. はじめに

コンクリート用補強材として用いられる繊維補強プラスチック (FRP) ロッドは高強度、高耐食性、軽量、非磁性体等の特徴を有することから、建設分野における利用の可能性が高く種々の検討が成されている。

土木学会では、連続繊維補強材の耐久性性能試験<sup>1)</sup>として耐化学薬品性試験の必要性が述べられているが、現状では各種繊維の促進試験を含め繊維の耐久性に関する文献はあまり多く見あたらない。本研究では、一方向繊維強化プラスチックロッドを構成するアラミド繊維(テクノーラ、ケブラー K 49) 2種類、ガラス繊維およびカーボン繊維を用い、常温 20°C と、高温環境下(温度 40°C, 80°C, 湿度 60 ± 2%) における耐化学薬品性劣化促進試験(アルカリ溶液、塩酸水溶液および純水)を行い、浸漬試験後の強度特性、SEM 観察による劣化性状について検討した。

前報では、アラミド繊維 2 種類について報告<sup>2)</sup>したが、本報告では、ガラス繊維およびカーボン繊維について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 各種繊維の耐薬品性試験

実験に使用した各種繊維は、アラミド繊維 2 種類(テクノーラ、ケブラー k49) と、ガラス繊維 (T ガラス)、カーボン繊維を(パン系)の計 4 種類で、浸漬前の材料特性を表 1 に示す。表中のアラミド繊維(ケブラー K 49)を除き引張強度は Hodhod 氏によって行われた 100 本の試験結果の平均値である<sup>3)</sup>。

各種繊維の浸漬は、写真 1 に示す様な容器に繊維を入れて行った。浸漬条件としては、アルカリ溶液(高いアルカリ濃度で試験可能とするために水酸化ナトリウム溶液 1 mol/L)、酸性溶液(代表的な塩酸水溶液 1 mol/L)、蒸

\*東京大学生産技術研究所 第 5 部

表 1 各種繊維の材料特性

繊維の種類	ガラス繊維	アラミド繊維	カーボン繊維	
	T ガラス	テクノーラ	ケブラー k49	カーボン
直径 (μm)	12.77	12.15	12.33	6.68
引張強度 (MPa)	2460	3812	3695	3283
標準偏差 (MPa)	853	353	735	510
変動係数	0.347	0.093	0.199	0.155

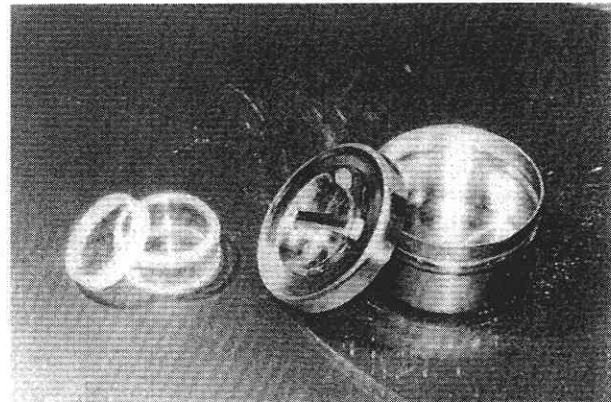


写真 1 浸漬直後の繊維

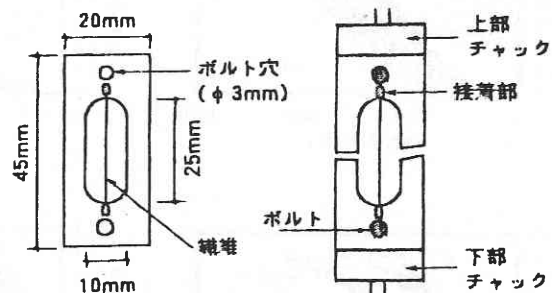


図 1 静的引張試験概念図

留水の 3 種類を要因とし浸漬試験を行った。浸漬試験の設定温度は、常温の 20°C は恒温恒湿室で行い、また、繊維の劣化を促進させる目的で、恒温恒湿室試験装置を用いて

研 究 速 報

環境条件を温度は 40°C, 80°C とし, 湿度は 60 ± 2 % R.H の厳しい条件に設定した. 繊維の浸漬期間は, それぞれ 0, 30, 60, 90, 120 日とし, 所要日数経過後, 繊維を浸漬溶液から取り出し, 超音波洗浄後乾燥させた. 乾燥後の試料は繊維 1 本ずつのモノフィラメントとし, 図 1 に示すように, JIS-R-7601 に準拠した試験用紙にセットし, 変位制御型オートグラフ (49 N) を用いて室温 (20 ± 3°C) で試験を行った. 測定項目は破断荷重 (N) と伸び量 (mm) である. なお, 試験本数はいずれの条件も 30 本以上とし, クロスヘッドスピードを 0.5 mm/min. とした.

3 実験結果および考察

3.1 浸漬後の繊維強度

図 2 はガラス繊維における浸漬材齢毎の, 蒸留水, 塩酸水溶液 (1 mol/l) および水酸化ナトリウム溶液 (1 mol/l) の 3 種類の溶液に, 常温 20°C ならびに 40°C, 80°C, の高温高湿環境下で促進試験を行った結果で, 繊維引張強度と破壊確率との関係を示したものである. 図中に示す引張強度は浸漬材齢毎の引張試験より得られた破断荷重を浸漬前の繊維断面積で除した値である.

図 2 から明らかなように, 浸漬前の初期強度 (約

450 MPa ~ 約 4300 MPa) のバラツキは, アラミド繊維 (テクノーラ繊維を除く) やカーボン繊維と同様にガラス繊維も大きくなることが分かる. また, 浸漬材齢と浸漬温度との関係を見ると, 温度 20°C, 40°C の純水および塩酸水溶液では, 浸漬材齢の違いによる強度の変動は余り認められない. しかし, 温度 80°C では浸漬材齢 30 日以降になると強度のバラツキは浸漬前に比べ小さくなるが, 同じ破壊確率 50% であっても繊維引張強度は約 750 MPa ~ 約 1800 MPa となり, 温度の影響によって引張強度が急激に低下することが明らかとなった.

一方, 水酸化ナトリウム溶液では, 温度 20°C, 浸漬材齢 60 日で引張強度は約 620 MPa ~ 約 2900 MPa, 破壊確率 50% で約 1170 MPa, 温度 40°C, 材齢 7 日で引張強度は約 440 MPa ~ 約 2700 MPa, 破壊確率 50% で約 960 MPa, 温度 80°C, 材齢 9 時間で引張強度は約 460 MPa ~ 約 1500 MPa, 破壊確率 50% で約 97 MPa, となりいずれも著しく強度が低下することが明らかとなった. また, それ以降の材齢になるといずれも測定不能となり強度試験が行えなくなる結果となった. ガラス繊維はアルカリによって劣化することが明らかにされているが, 本実験でも確認できた.

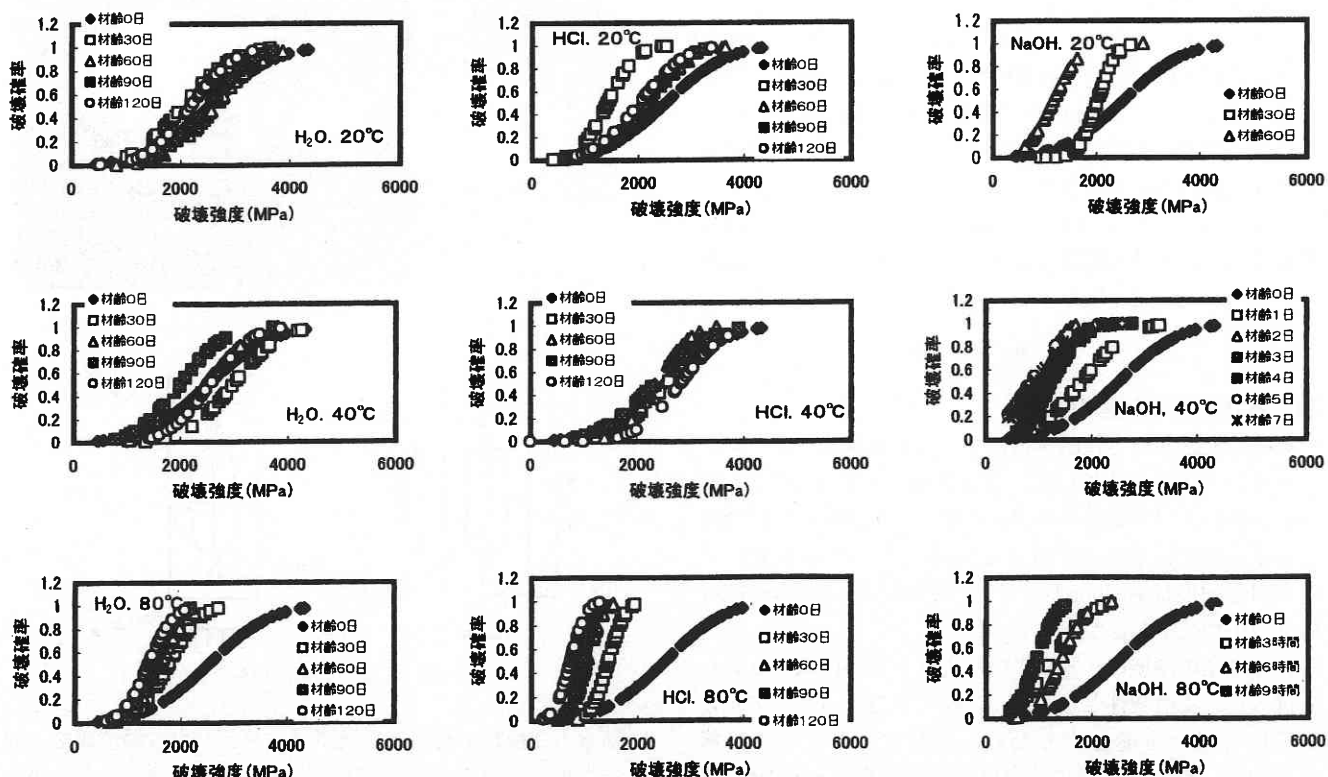


図 2 破壊強度と破壊確立の関係 (ガラス繊維)

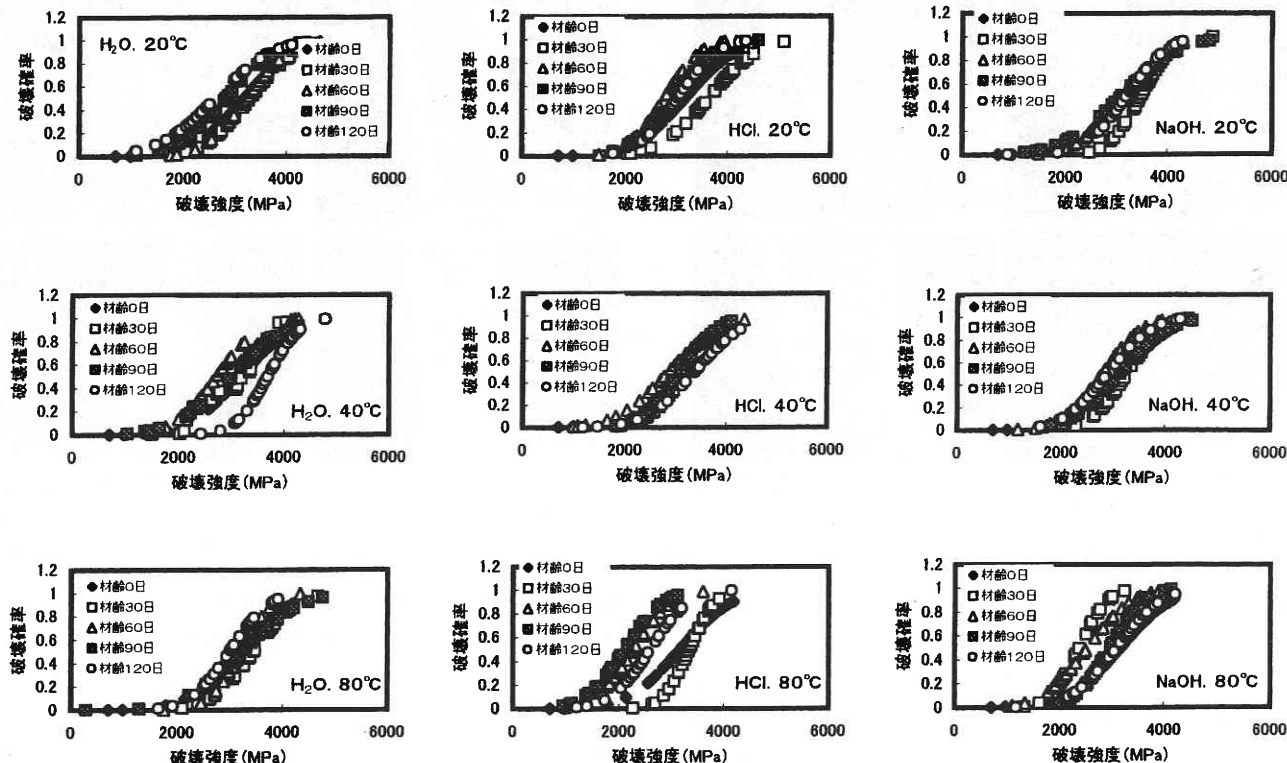


図3 破壊強度と破壊確立の関係 (カーボン繊維)

図3はガラス繊維の浸漬試験と同様に、カーボン繊維における各種溶液と浸漬材齢毎の引張強度との関係を示したものである。浸漬前の初期強度（約 700 MPa～約 4200 MPa、破壊確率 50%で約 3800 MPa）のバラツキは、他の繊維と同様にカーボン繊維も大きくなるのが分かる。次に、浸漬材齢 120 日で浸漬温度 20°C、40°C および 80°C で破壊確率 50%の引張強度をそれぞれ比較すると、蒸留水では 2750 MPa～3690 MPa で強度低下率は約 5%～約 14%，塩酸水溶液では、2600 MPa～3420 MPa で強度低下率は約 4%～約 18%，水酸化ナトリウム溶液では、2950 MPa～3220 MPa で強度低下率は約 2%～約 7%となる。一般にカーボン繊維は耐化学薬品性に優れていると言われていたが、厳しい環境下（温度 80°C、湿度 60±2%）で促進試験を行うと強度低下の違いはあるものの、他の繊維と同様に劣化することが確認された。ガラス繊維やケブラー繊維のように急激な強度低下は認められないが、使用環境によっては何らかの対策が必要になると考えられる。

### 3.2 走査電子顕微鏡 (SEM) によるガラス繊維とカーボン繊維の観察結果

写真2はガラス繊維 (Tガラス) の浸漬前と浸漬温度 80°C で浸漬 12 時間後 (水酸化ナトリウム溶液 1 mol/l,) と浸漬日数 120 日後 (塩酸水溶液 1 mol/l., 蒸留水) の織

維表面の SEM (5000 倍) 観察結果を示す。筆者らは<sup>4)</sup>、すでにガラス繊維の劣化性状はアルカリとガラス繊維が反応して浸食層が時間とともに繊維表面から均一に増加し、アルカリに浸食されていない強度を有する健全な部分が減少するために起こると報告している。本実験の SEM 観察結果より、蒸留水では繊維表面に明白な劣化を確認することができなかった。しかし、水酸化ナトリウム溶液と塩酸水溶液に浸漬したものは繊維表面に損傷を受け、水酸化ナトリウム溶液では繊維直径が約半分程細くなっていることなどが認められ、これらが強度低下の原因となったと考えられる。

写真3はカーボン繊維で、各種溶液 (水酸化ナトリウム溶液 1 mol/l, 塩酸水溶液 1 mol/l., 蒸留水) で浸漬前と 120 日後の繊維表面の SEM (5000 倍) 観察結果を示す。いずれの溶液においてもガラス繊維とは異なり繊維表面に明白な劣化を確認することができなかった。

ガラス繊維およびカーボン繊維の SEM 観察結果より浸漬温度や溶液の種類によって何らかの影響を受けて強度低下することが明らかであるが、SEM 観察では明確な劣化性状を確認することができなかった。これらの劣化性状に関しては、今後さらに検討していく必要がある。

## 研究速報

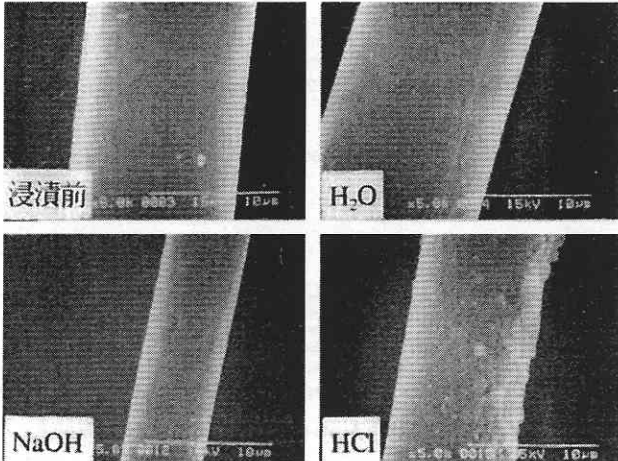


写真2 ガラス繊維浸漬前と浸漬12時間後、浸漬日数120日のSEM(5000倍)観察

## 4. ま と め

本研究では、一方向繊維強化プラスチックロッドを構成するガラス繊維およびカーボン繊維を用い、常温20°Cと、高温環境下(温度40°C, 80°C, 湿度60±2%)における耐化学薬品性劣化促進試験(アルカリ溶液, 塩酸水溶液および純水)を行い、浸漬試験後の強度特性, SEM観察による劣化性状について検討した。その結果をまとめると以下ようになる。

(1) ガラス繊維は、浸漬前の初期強度(約450 MPa～約4300 MPa)のバラツキは、アラミド繊維(テクノーラ繊維を除く)やカーボン繊維と同様にガラス繊維も大きくなることが明らかとなった。しかし、浸漬温度20°C, 40°Cの純水および塩酸水溶液では、浸漬材齢の違いによる強度の変動は余り認められなかった。一方、浸漬温度80°Cではいずれの溶液においても浸漬材齢30日以降になると、環境温度の影響を受け引張強度が急激に低下することが明らかとなった。

(1) ガラス繊維は、水酸化ナトリウム溶液において、温度20°Cの場合浸漬材齢60日で、温度40°Cの場合7日で、温度80°Cの場合9時間でアルカリの影響を受けていずれも著しく強度が低下することが明らかとなった。また、それ以降の浸漬材齢になるといずれも測定不能となり強度試験が行えなくなる結果となった

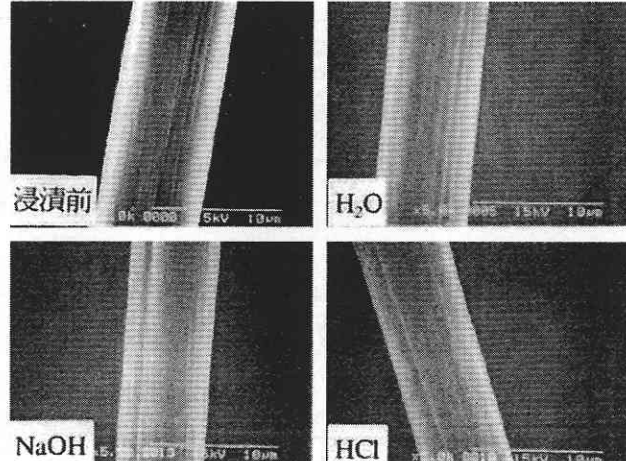


写真3 カーボン繊維の浸漬前と浸漬日数120日のSEM(5000倍)観察

(3) カーボン繊維は、ガラス繊維とは異なり同一条件で試験を行っても、浸漬材齢の進行ならびに環境温度が高くなるに従ってもガラス繊維のような大幅な強度低下が見られない。また、強度低下幅は約2%～約18%となることが明らかとなった。

(4) SEM観察よりガラス繊維は、水酸化ナトリウム溶液と塩酸水溶液に浸漬したものは繊維表面に損傷を受けことが確認できた。特に、水酸化ナトリウム溶液に浸漬すると環境温度が高くなるに従い短時間で繊維がアルカリの影響を受けて劣化することが明らかとなった。カーボン繊維では明確な劣化性状を確認することができなかった。

今後は、各種繊維の劣化進行の程度を把握し、実環境における各種繊維の劣化を予測する必要がある。また、アルカリや酸性による耐化学薬品性の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。

## 参 考 文 献

- 1) 土木学会編：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，pp.105-107, 1982.4.
- 2) 魚本，西村，加藤：プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(17)生産研究投稿中。
- 3) T. UOMOTO, H. HODHOD: Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for prestressing Tendons of Concrete (2), 生産研究, 第43巻, 第3号, pp.19-22, 1991.3.
- 4) 魚本，勝木：各種繊維の耐アルカリ性の評価法に関する基礎研究，土木学会論文集, No.490/V-23, 1994.5.