

プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性 (17) 高温環境下におけるアラミド繊維の引張強度特性

Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for Prestressing Tendons of Concrete (17)
— Tensile Strength Properties of Aramid 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¹⁾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 観察および赤外分光分析による劣化性状について検討した。

そこで本報告では、アラミド繊維 2 種類の強度特性、SEM 観察および赤外分光分析のみの結果を報告する。

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²⁾。

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

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

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

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

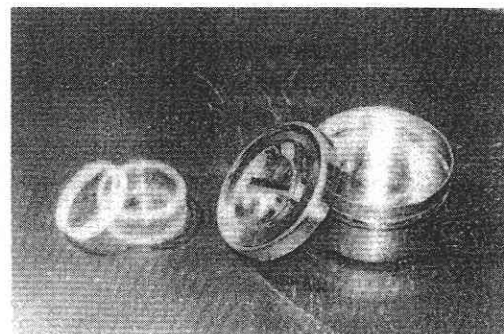


写真 1 浸漬直後の繊維

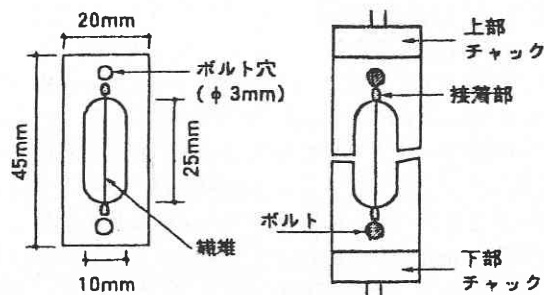


図 1 静的引張試験概念図

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環境条件を温度は 40°C、80°C とし、湿度は $60 \pm 2\%$ 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 ($20 \pm 3^\circ\text{C}$) 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 はテクノーラ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、の恒温恒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 の蒸留水から明らかなように浸漬材齢に関係なく温度 (20°C、40°C、80°C) が高くなるに従って繊維引張強度のバラツキが小さくなることが確認できる。また、同じ破壊確率 50% であっても繊維引張強度は約 3300 MPa ~ 3800 MPa となり、温度の影響による引張強度の低下は余り見られないことが確認できた。一方、図 2 の塩酸水溶液及び水酸化ナトリウム溶液に浸漬させた結果では、蒸留水とは異なり、浸漬温度が高くなるに従い、また、材齢の進行にともない極端な強度低下や強度のバラツキが大きくなること明らかとなった。特に、80°C の塩酸水溶液及び水酸化ナトリウム溶液で顕著な傾向が見られ、浸漬材齢 90 日以降で強度は前者で約 820 MPa (低下率約 80%)、後者で約 2100 MPa (低下率約 45%) 以下となり、テクノーラ繊維は酸やアルカリによる影響を受け劣化することが明らかとなった。

図 3 はケブラー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 種類の溶液と、常温 20°C ならびに 40°C、80°C、の恒温恒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 3 よ

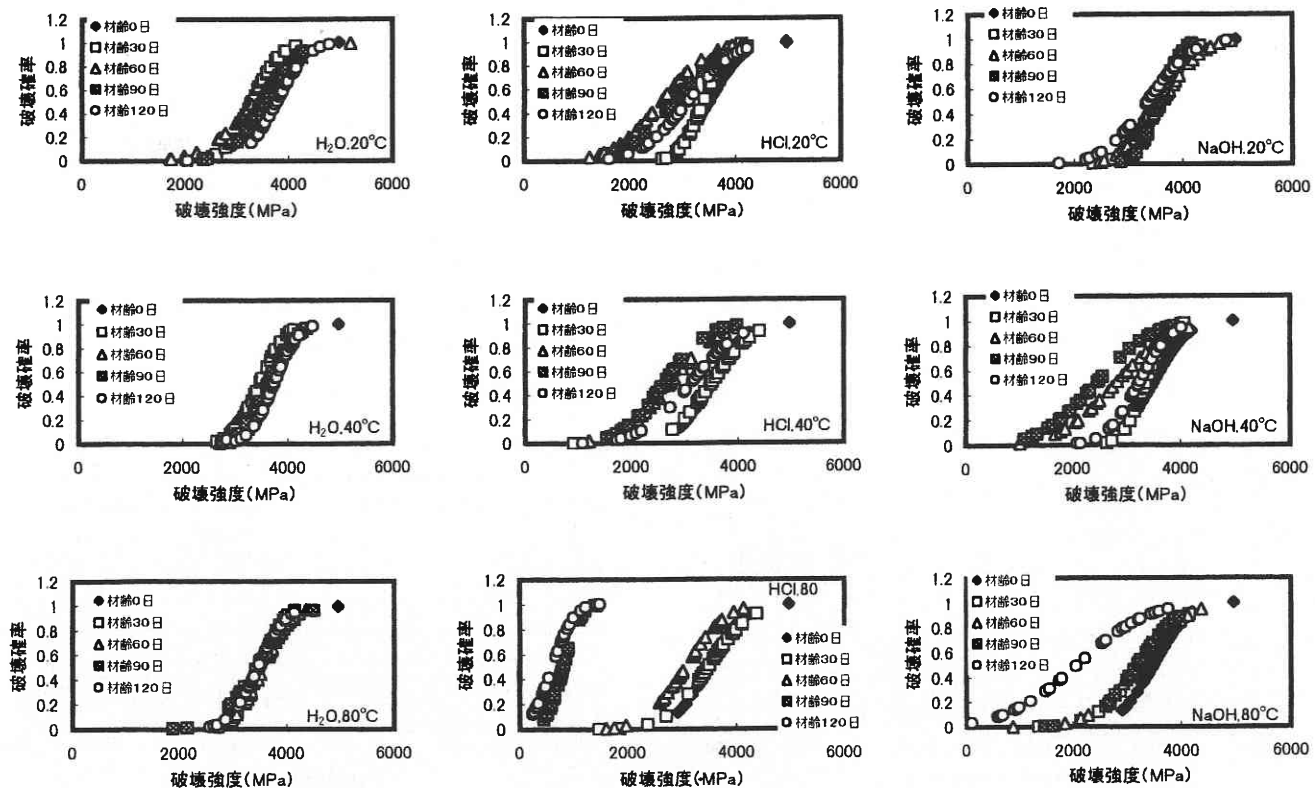


図 2 破壊強度と破壊確立の関係 (テクノーラ)

研 究 速 報

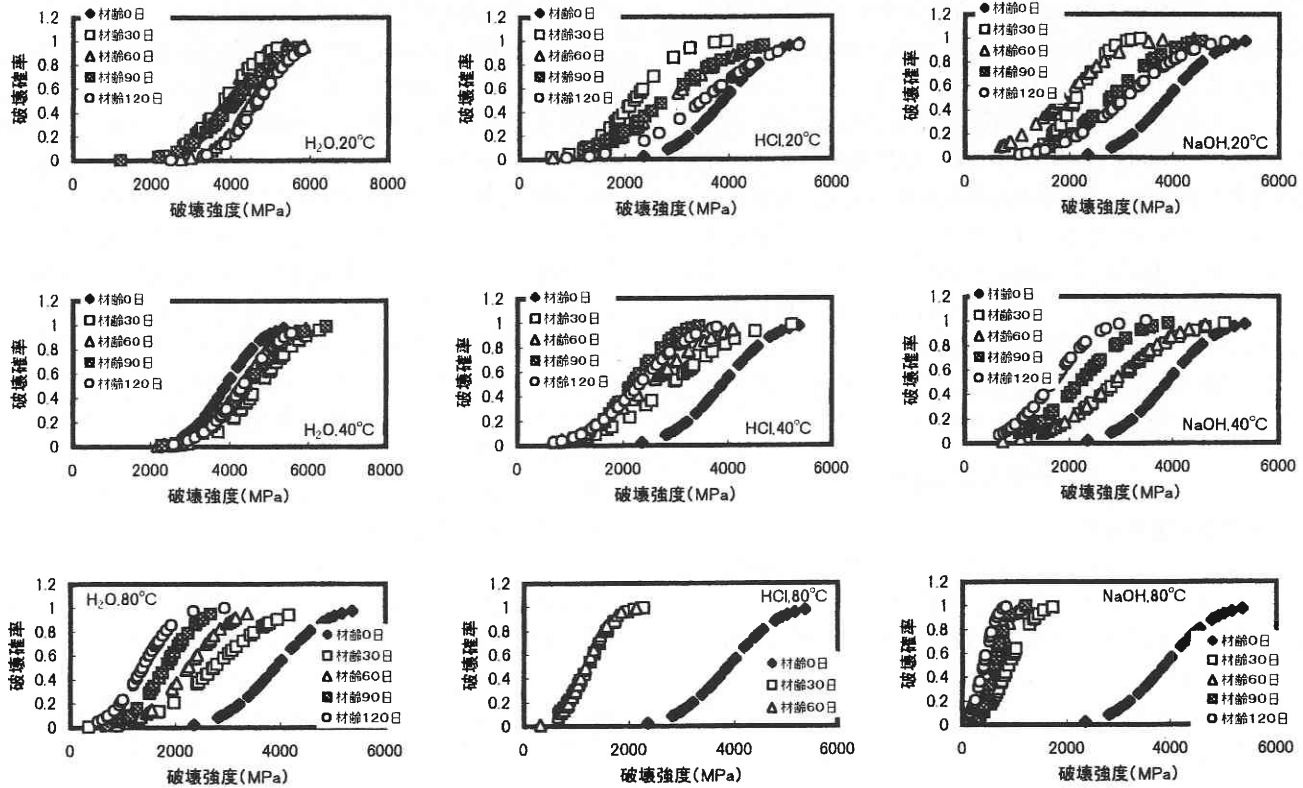


図3 破壊強度と破壊確立の関係 (ケブラー)

り蒸留水の場合は、テクノーラ繊維は温度による強度低下の影響は認められなかったが、同じアラミド繊維でもケブラー繊維は、著しい強度低下を示した。また、塩酸及び水酸化ナトリウム溶液の場合には同一条件で試験を行っても、ケブラー繊維の方がいずれの溶液においても浸漬材齢の進行ならびに浸漬温度が高くなるに従い著しい強度低下が見られ、強度低下の速度が速くなることが明らかとなっ

た。

ケブラー繊維は、芳香族ポリアミドの硫酸溶液を乾湿式紡糸することにより製造されており、製造後においてもケブラー繊維中に硫酸が若干残存していると考えられている。この残存硫酸が繊維の環境温度が高くなるに従い繊維と反応して劣化しやすくなるために、高温環境下ほど強度低下が著しくなったと考えられる。

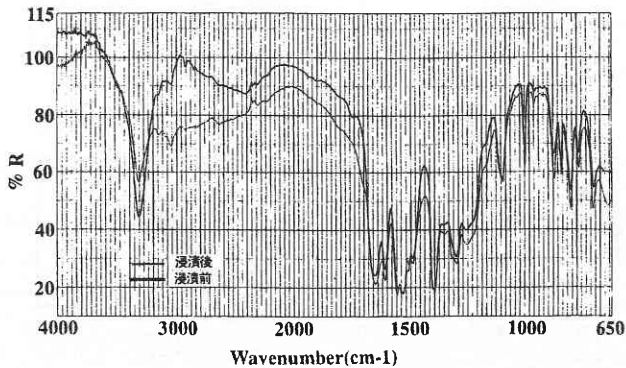


図4 ケブラー繊維の赤外線吸収スペクトル

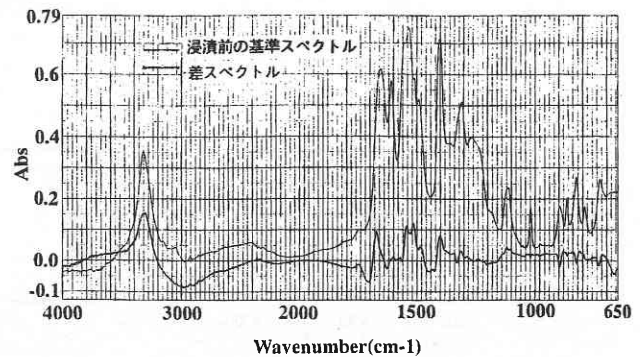


図5 ケブラー繊維の差スペクトル

3.2 赤外分光分析結果

赤外分光分析では、アラミド繊維ポリマーの化学結合状態を分析した。その結果を図4、図5に示す。ケブラー繊維の浸漬前と塩酸水溶液浸漬後（浸漬温度 80°C，材齢 90 日）の赤外吸収スペクトルと差スペクトルの一例を示す。図4の赤外吸収スペクトルより、塩酸水溶液浸漬後（浸漬温度 80°C，材齢 90 日）は浸漬前と比較すると赤外吸収スペクトルのピークは① 3340 cm^{-1} で減少，② 3200 cm^{-1} ~ 2500 cm^{-1} の範囲で増加，③ 1700 cm^{-1} で増加，④ 1650 cm^{-1} で減少するといった変化が見られた。また，図5の差スペクトルからもアラミド繊維の特徴的な結合の—CONH—のアミド部分が切断され，末端が—COOH—のカルボン酸とアミンとに変化していることから繊維が劣化していることが考えられる。また，テクノーラ繊維でも劣化の程度はケブラー繊維より少ないが同様な結果が得られた。

3.3 走査電子顕微鏡 (SEM) によるアラミド繊維の観察結果

写真2はケブラー繊維のSEM (500倍) 観察で，塩酸水溶液 (1 mol/L) に温度 80°C，湿度 60 ± 2% の浸漬条件で 60 日間浸漬後の劣化性状を示したものである。写真より明らかなように繊維表面は健全な部分と損傷を受けている箇所があることが分かる。筆者らは，既にガラス繊維のアルカリ環境下での表面劣化性状について明らかにしており³⁾，繊維の種類や浸漬条件の違いはあるものの今回の試験結果においても非常に良く似た表面の劣化性状が確認さ

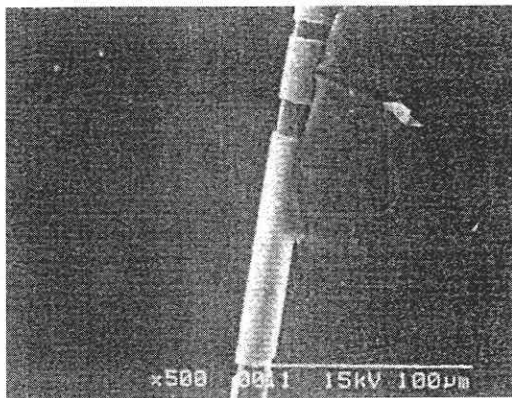


写真2 ケブラー繊維のSEM (500倍) 観察 浸漬日数 60日 (HCl 溶液)

れた。以上のことから，強度低下の一要因として繊維表面の劣化が考えられる。また，テクノーラ繊維は，いずれの溶液においても繊維表面に明白な劣化性状を確認することができなかった。

4. ま と め

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) テクノーラ繊維は，蒸留水では環境温度の影響による引張強度の低下は余り見られないことが確認できた。しかし，塩酸水溶液および水酸化ナトリウム溶液では，蒸留水とは異なり環境温度が高くなる従い，また，材齢の進行にともない極端な強度低下や強度のバラツキが大きくなることが明らかとなった。特に塩酸水溶液 80°C で顕著な傾向が見られ，酸やアルカリによる影響を受け劣化することが明らかとなった。
- (2) ケブラー繊維は，テクノーラ繊維とは大きく異なり同一条件で試験を行っても，いずれの溶液においても浸漬材齢の進行ならびに環境温度が高くなるに従い著しい強度低下が見られ，強度低下の速度が速くなることが明らかとなった。また，酸，アルカリによる影響を受け，テクノーラ繊維と同様に劣化することが明らかとなった。
- (3) 赤外分光分析結果より，ケブラー繊維の場合アラミド繊維の特徴的な結合の—CONH—のアミド部分が切断され，末端が—COOH—のカルボン酸とアミンとに変化し繊維が劣化したためであると考えられる。ケブラー繊維に比べ，テクノーラ繊維では劣化の程度は少ないが同様な結果が得られた。

今後は，アラミド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。

(1998年9月8日受理)

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) TUOMOTO, 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.
- 3) 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, pp. 167-174, 1994. 5.