

芝浦工業大学大学院 学生員 松崎 謙太郎*1

芝浦工業大学 正会員 矢島 哲司*1

芝浦工業大学 正会員 勝木 太*1

東京大学生産技術研究所 正会員 西村 次男*2

東京大学国際産学共同研究センター F会員 魚本 健人*3

1.はじめに

近年、鉄筋のような腐食を生じない補強材として連続繊維補強材（FRP：Fiber Reinforced Plastics）の開発・研究が活発に行われている。しかし、現状では長期使用実績による耐久性が保証されているわけではなく、諸処の条件に対して定量的な評価が求められる。特に、補強・補修用として用いる場合の、コンクリート中に埋没した状態でのアルカリや、アウトケーブル等の露出状態で受ける酸性雨等の影響を考慮し、耐化学性を明らかにすることは非常に重要である。本研究では、耐久性に影響を与えると思われる劣化原因のうち耐化学薬品性に着目し、各種繊維の耐薬品性およびそれらの温度依存性についての評価を行った。

2.実験概要

実験は、溶液に浸漬した各種繊維について図1の試験体を用いて一方向静的引張試験を行い、破断時の荷重と変位量を測定した。表1に使用した各種繊維の材料特性と浸漬条件を示す。

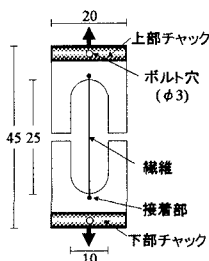


図1 繊維試験体(単位:mm)

表1 各種繊維の材料特性および劣化条件

繊維	炭素繊維(PAN系)	テクノール	ケブラー49	Tガラス繊維
繊維直径(μm)	6.68	12.15	12.31	12.77
引張強度(MPa)	3175	3693	3707	2529
標準偏差(MPa)	786	358	737	929
変動係数(%)	24.76	9.69	19.88	36.71
浸漬溶液	H ₂ O, HCl, NaOH			
浸漬濃度(mol/l)	1mol/l			
浸漬温度(°C)	20°C, 40°C, 80°C			
測定本数(本)	30~50			
浸漬期間(day)	0, 30, 60, 90, 120, 180			

3.結果および考察

概要では特に強度低下が明確に現れたケブラー繊維のみについて言及し、図2、3にケブラー繊維の材齢と引張強度の関係を示す。図2より、HClに浸漬したものについて浸漬温度が高いほど強度低下が著しいことが明らかである。さらに図3より、同一温度の40°Cでも浸漬溶液の種類によって強度低下の傾向が異なる。これより、繊維の強度低下は、浸漬溶液および温度に依存すると言える。

本研究では、ワイブルのWeakest Link理論により繊維の強度推定及び温度依存性を評価した。

Weakest Link理論とは繊維を鎖としてモデル化したもので、繊維強度は繊維内部に生じる最大欠陥部に支配されるとしている。ここで、繊維をn個の結合を持つ鎖と考え、鎖の破壊確率を F_n 、1つの結合の破壊確率をFとすると、次式が成り立つ。

$$1-F_n=(1-F)^n \quad (1)$$

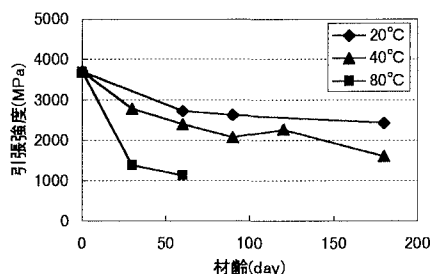


図2 ケブラー繊維の引張強度(浸漬溶液:HCl)

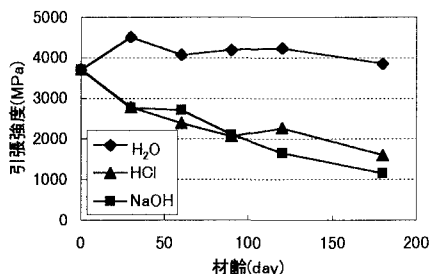


図3 ケブラー繊維の引張強度(浸漬温度:40°C)

キーワード：FRP、耐薬品性、温度依存性、Weakest Link理論、欠陥数

*1 〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14 TEL 03-5476-3166

*2、*3 〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1 TEL 03-3402-6231

さらに、ワイブル係数 m 、 α により以下の 1 次式で表すことができる。

$$\ln(1-\ln(1-F_n))=m\ln(\sigma)-m\ln(\alpha) \quad (2)$$

図 4 にワイブル分布を示すが、それぞれ直線的に分布しその直線は材齢とともに変化することから、繊維強度を Weakest Link 理論により評価できると考えられる。ここで欠陥数 n は以下に示す式で表され、 m 、 α は図 4 を式 (2) で評価することにより求めることができる。

$$n=(\sigma/\alpha)^m \quad (3)$$

本研究では、同一繊維であれば材齢 0 日における m 、 α 、 n の値は浸漬条件によらず同等に取り扱う必要があり、さらに劣化メカニズムは同一の浸漬溶液であれば温度によらず各温度の欠陥数 n に対する近似は同等に扱う必要があると考えた。概要では直線近似を行い、求めた欠陥数 n と材齢の関係を、温度をパラメータとして図 5 に示す。これより、ケブラー繊維の欠陥数 n は、浸漬温度により異なる増加傾向を示すことが明らかになった。

以上の結果より、欠陥数 n を時間の関数として表現することができ、これにより各溶液に浸漬したケブラー繊維の強度推定を行うことができる。図 6 に、温度をパラメータとした解析結果と実験値を示す。浸漬温度が 20℃、40℃については多少のばらつきがみられたが、材齢ごとの強度低下を解析によって追跡する事が可能であることから、ケブラー繊維の強度低下を Weakest Link 理論により評価できることが明らかになった。

次に、各温度における欠陥数 n の増加傾向から繊維の劣化の温度依存性を評価した。図 5 より、材齢 0 日の欠陥数 n_0 は同じ値をとることから、各温度における増加傾向は直線の傾き θ により表すことができる。本研究では、繊維の劣化速度はこの θ により評価できると考え、図 7 に θ と浸漬温度の関係をアレニウスプロットの形で示す。これより、 θ と浸漬温度はほぼ直線で近似でき、欠陥数の増加傾向の温度依存性をアレニウス式により評価できることが明らかになった。

4.まとめ

- (1)各種繊維は浸漬溶液および浸漬温度により強度低下の傾向が異なる。したがって、実際に構造物に用いる場合は使用状況を十分考慮する必要がある。
- (2)繊維の引張強度の推定にはワイブルの Weakest Link 理論の適用が可能であり、欠陥数は温度条件により異なる増加傾向を示す。
- (3)アレニウス式による欠陥数の増加傾向の評価から、繊維劣化の温度依存性の定量化が可能である。

謝辞 本研究は東京大学生産技術研究所第五部魚本研究室で行ったものであり、同研究室の方々に多大なご協力を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

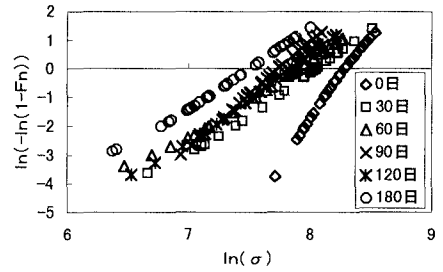


図 4 ケブラー繊維のワイブル分布(浸漬条件: HCl, 40℃)

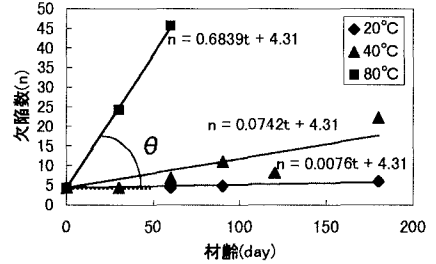


図 5 ケブラー繊維の欠陥数(浸漬溶液: HCl)

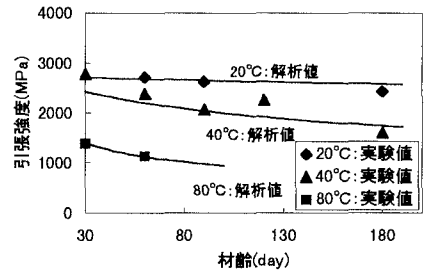


図 6 ケブラー繊維の強度推定(浸漬溶液: HCl)

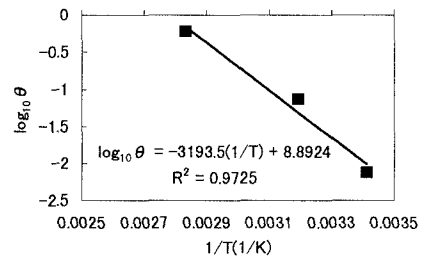


図 7 欠陥数増加傾向の温度依存性(浸漬溶液: HCl)