

報告 高温環境下における各種繊維の引張強度特性

西村 次男*1・魚本 健人*2・加藤 佳孝*3・山口 明伸*4

要旨：一方向繊維強化プラスチックを構成する各種繊維が、純水、酸性およびアルカリ性の溶液によってどのような劣化を生じるかをより厳しい環境下（温度80℃、湿度60±2%）で劣化促進浸漬試験を実施し、浸漬試験後に繊維の強度ならびに走査電子顕微鏡を用いて微視的に観察し、各種繊維の劣化を明らかにした。その結果、アミド繊維からなるテコラは、耐化学薬品性において強度低下は余り認めらず耐化学薬品性に優れていることが明らかとなった。しかし、アミド繊維からなるケブラーk49、ガラス繊維およびカーボン繊維は溶液の種類によってなんらかの影響を受け強度低下することが明らかとなった。

キーワード： 繊維, 高温環境下, 耐化学薬品性, 劣化促進試験

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。著者らはこれまでに、各種繊維とそれを用いた各種ロッドの力学的特性、耐アルカリ性、耐候性について実験的に検討し、その結果を報告している^{1)~4)}。

各種繊維の一般的な性質として、カーボン繊維の場合は、酸性、アルカリ性、有機溶剤のいずれに対しても高い抵抗性を有しており、耐化学薬品性に関して問題になることは少ないと言われている⁵⁾。一方、アミド繊維、ガラス繊維の耐アルカリ性および耐酸性は完全なものではなく、特にガラス繊維についてはアルカリによって容易に劣化してしまうと言われている。土木学会では、連続繊維補強材の耐久性性能試験⁶⁾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当たらない。そこで本研究では、一方向繊維強

化プラスチックロッドを構成するアミド繊維（テコラ、ケブラーk49）2種類、ガラス繊維およびカーボン繊維を用い、高温環境下（温度80℃、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やSEM観察による劣化性状について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

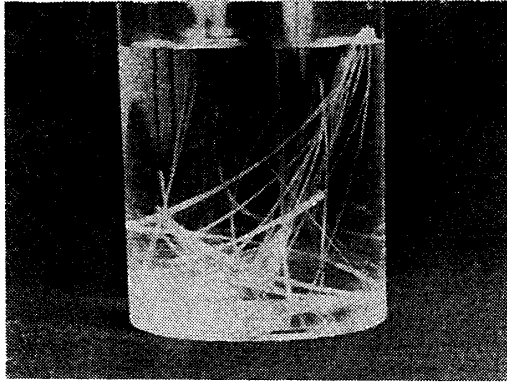
2.1 各種繊維の耐薬品性試験

実験に使用した各種繊維は、アミド繊維2種類（テコラ、ケブラーk49）、ガラス繊維（Tガラス）、カーボン繊維（ボン系）の合計4種類で、浸漬前の材料特性を表-1に示す。表中のケブラーk49を除き引張強度はHodhod氏によって行われた100本の

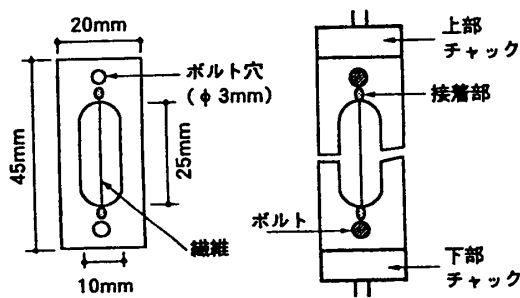
表-1 各種繊維の材料特性

繊維の種類	ガラス繊維		アミド繊維		カーボン繊維
	Tガラス	ケブラー	テコラ	ケブラー-k49	
直径 (μm)	12.77	12.15	12	6.68	
引張強度 (MPa)	2460	3812	3901	3283	
標準偏差 (MPa)	853	353	789	510	
変動係数	0.347	0.093	0.202	0.155	

- *1 東京大学生産技術研究所 技術専門職員 (正会員)
 *2 東京大学生産技術研究所 教授 工博 (正会員)
 *3 東京大学生産技術研究所 助手 (正会員)
 *4 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 助手 博士 (工学) (正会員)



写真一 浸漬直後の繊維



図一 静的引張試験概念図

試験結果の平均値である⁷⁾。

各種繊維の浸漬は、写真一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 1mol/l）、酸性溶液（代表的な塩酸水溶液 1mol/l）、蒸留水の3種類を設定し促進試験を行った。また、繊維の劣化を促進させる目的で、高温恒湿室試験装置を用いて環境条件を温度80℃、湿度60±2%の厳しい条件に設定した。

繊維の浸漬期間は、それぞれ30、60、90日とし、所要日数経過後、繊維を浸漬溶液から取り出し、蒸留水で洗浄後乾燥させた。乾燥後の試料は繊維1本ずつのモノフィラメントとし、図一に示すように、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（49N）を用いて室温（20±3℃）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本とし、クロスヘッドスピードを0.5mm/min. とした。

3 実験結果および考察

3.1 浸漬後の繊維強度

表一2（a、b、c、d）に各種繊維の静的引張試験によって得られた各浸漬日数ごとの繊維強度、標準偏差および変動係数をまとめて示す。ただし、表中に示す繊維強度は、試験より得られた

表一2 静的引張試験結果

(a) アラミド繊維（テカロー）

溶液の種類	特性	浸漬前	30日	60日
HCl	強度(MPa)	3890	3486	3073
	S.D(MPa)	360	632	598
	C.O.V	0.092	0.181	0.195
NaOH	強度(MPa)	3890	3273	3231
	S.D(MPa)	360	680	731
	C.O.V	0.092	0.208	0.226
H ₂ O	強度(MPa)	3890	3506	3569
	S.D(MPa)	360	369	432
	C.O.V	0.092	0.105	0.121

(b) アラミド繊維（ケラーk49）

溶液の種類	特性	浸漬前	30日	60日
HCl	強度(MPa)	3901	1213	1186
	S.D(MPa)	789	444	387
	C.O.V	0.202	0.366	0.326
NaOH	強度(MPa)	3901	899	652
	S.D(MPa)	789	391	250
	C.O.V	0.202	0.435	0.383
H ₂ O	強度(MPa)	3901	2732	2240
	S.D(MPa)	789	945	670
	C.O.V	0.202	0.346	0.299

(c) ガラス繊維

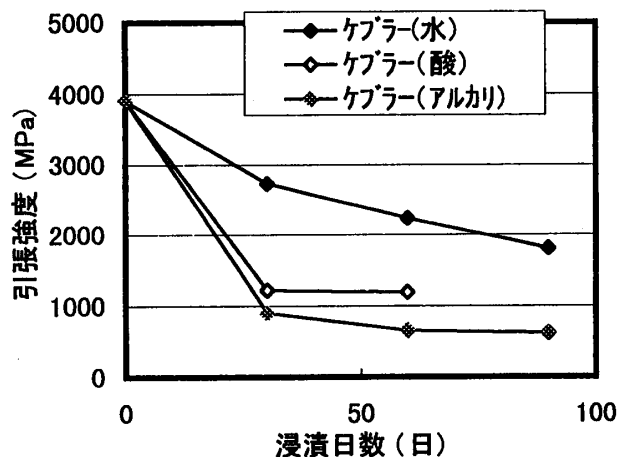
溶液の種類	特性	浸漬前	30日	60日
HCl	強度(MPa)	2510	1448	1047
	S.D(MPa)	870	256	240
	C.O.V	0.347	0.177	0.229
NaOH	強度(MPa)	2510	-	-
	S.D(MPa)	870	-	-
	C.O.V	0.347	-	-
H ₂ O	強度(MPa)	2510	1767	1615
	S.D(MPa)	870	471	420
	C.O.V	0.347	0.270	0.260

(d) カーボン繊維

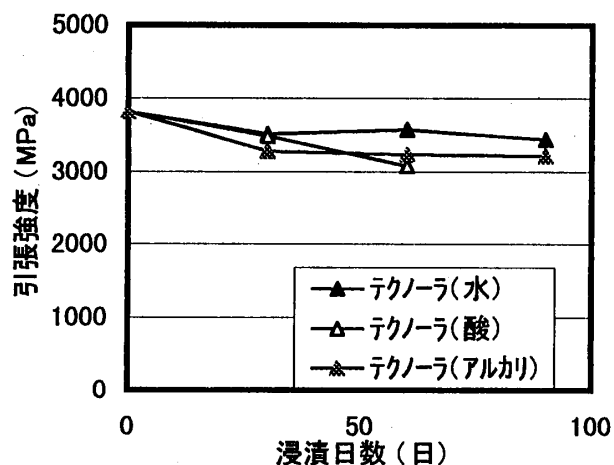
溶液の種類	特性	浸漬前	30日	60日
HCl	強度(MPa)	3350	3348	2272
	S.D(MPa)	520	400	583
	C.O.V	0.155	0.119	0.257
NaOH	強度(MPa)	3350	2386	2545
	S.D(MPa)	520	438	687
	C.O.V	0.155	0.183	0.270
H ₂ O	強度(MPa)	3350	3454	3204
	S.D(MPa)	520	645	485
	C.O.V	0.155	0.187	0.151

表一 各種繊維と溶液浸漬後の強度低下率

溶 液	アラミド繊維		ガラス繊維	カーボン繊維
	ケブラー-k49	テクノーラ		
蒸留水(H ₂ O)	30~43%	8~10%	30~36%	3~4%
水酸化ナトリウム(NaOH)	77~83%	15~17%	-	24~29%
塩酸(HCl)	69~70%	10~21%	42~58%	0~32%



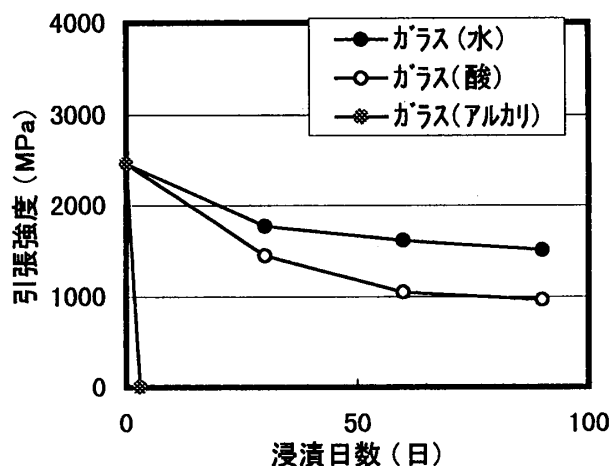
図一 2 アラミド繊維 (ケブラー-k49) の浸漬日数と引張強度との関係



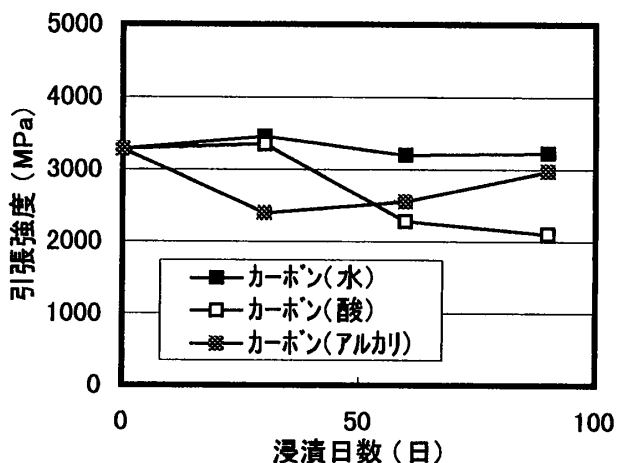
図一 3 アラミド繊維 (テクノーラ) の浸漬日数と引張強度との関係

破断荷重を浸漬前の繊維断面積で除した値である。また、表一 3 はそれぞれの溶液に浸漬した後の各種繊維の強度低下率を表したものである。

表一 3 と図一 2 より、水酸化ナトリウム溶液 (1mol/l)、塩酸水溶液 (1mol/l) および蒸留水の3種類で高温環境下 (温度80°C, 湿度60%±2)



図一 4 ガラス繊維の浸漬日数と引張強度との関係



図一 5 カーボン繊維の浸漬日数と引張強度との関係

での促進試験では、アラミド繊維の中でもケブラー-k49は、他の繊維に比べ強度低下 (浸漬日数60日で約54%~84%程度) は非常に大きく、なんらかの影響を受けて劣化していることが明らかとなった。さらに、ケブラー-k49は、浸漬前の強度の変動係数が0.202であるのに対し浸漬後の変動係数は0.326~0.366と劣化することによって強度のばらつきが大きくなることが確認できる。しかし、表一 3 と図一 3 より、テクノーラはケブラー-k49とは大きく異なりいずれの溶液においても強度低下 (浸漬日数60日で約8%~21%程度) ならびに変動係数は0.092~0.195と小さく、また、ガラス繊維およびカーボン繊維に比較しても

強度低下は小さく優れていることが分かる。

表-3と図-4より、ガラス繊維はアルカリによって劣化することがすでに明らかにされているが、本実験でも水酸化ナトリウム溶液(1mol/l)に浸漬したものは、魚本らによる⁸⁾実験結果と同様に浸漬日数約7日程度より測定不可能となり、アルカリによって劣化することが確認された。また、浸漬日数60日で比較するとH₂O溶液(蒸留水)および塩酸水溶液(1mol/l)においては、強度低下率は約36%~約58%であることが明らかとなった。さらに、変動係数で強度のばらつきを比較するとアミド繊維を浸漬した場合とは若干異なり小さくなる傾向となった。

一方、表-3と図-5より、カーボン繊維は浸漬日数60日で比較すると、H₂O溶液(蒸留水)は約4%、水酸化ナトリウム溶液(1mol/l)は約24%および塩酸水溶液(1mol/l)は約32%程度それぞれ強度低下することが明らかとなった。また、浸漬前の強度の変動係数が0.155であるのに対し浸漬後の変動係数は0.151~0.270となりアミド繊維と同様な傾向を示し、劣化することによって強度のばらつきが増大することが確認できる。一般的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るが、厳しい環境下(温度80℃、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、使用環境によってはなん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)による各種繊維の観察結果

写真-2はアミド繊維(テカラ)、写真-3はアミド繊維(ケブラー-k49)、写真-4はガラス繊維(Tガラス)、写真-5はカーボン繊維で、各種溶液(水酸化ナトリウム溶液1mol/l、塩酸水溶液1mol/lおよび蒸留水の3種類)浸漬前と浸漬60日、120日後の繊維表面のSEM(5000倍)観察した結果を示す。これらの観察結果よりアミド繊維(ケブラー-k49)の塩酸

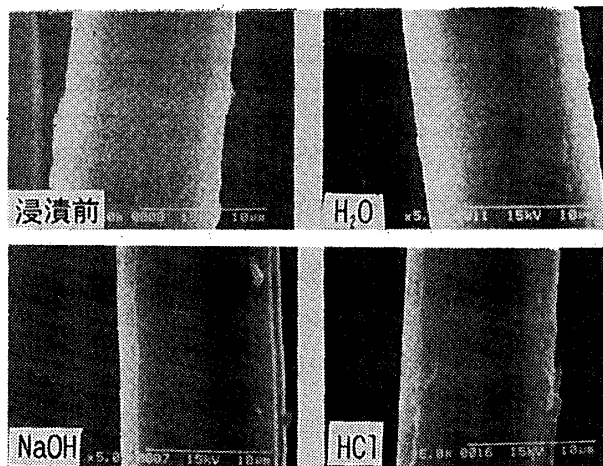


写真-2 アラミド繊維(テカラ)の浸漬前と浸漬日数60日と120日(NaOH)のSEM観察

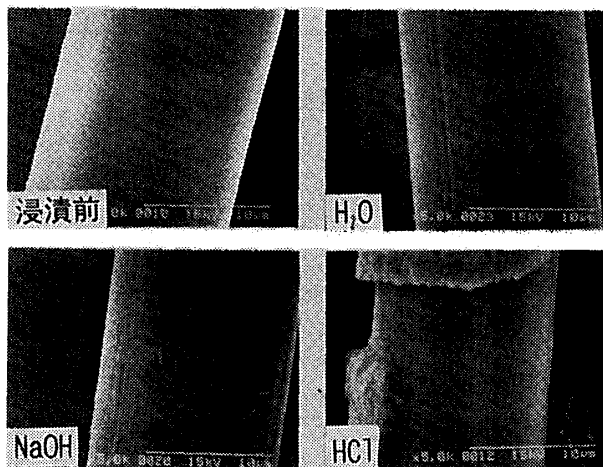


写真-3 アラミド繊維(ケブラー-k49)の浸漬前と浸漬日数60日と120日(H₂O)のSEM観察

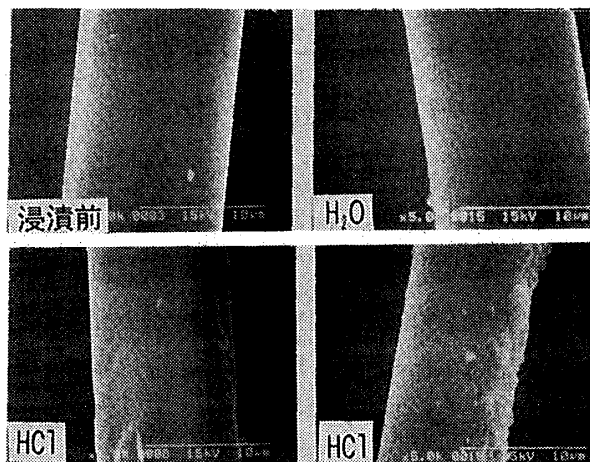
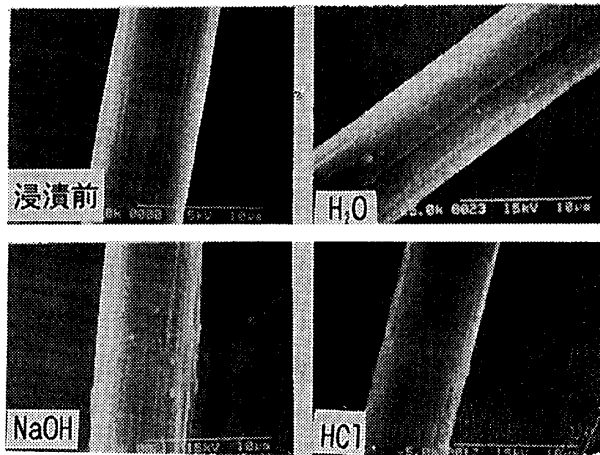


写真-4 ガラス繊維の浸漬前と浸漬日数60日と120日(HCl, 右)のSEM観察



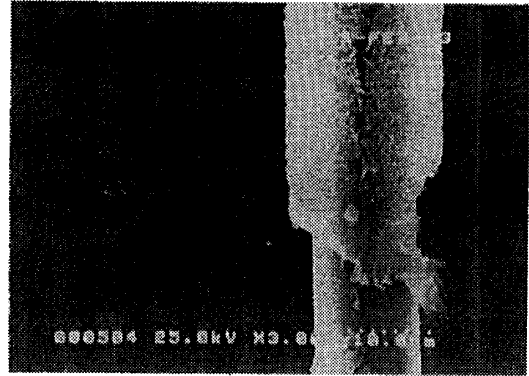
写真一5 カーボン繊維の浸漬前と浸漬日数
60日と120日 (NaOH) のSEM観察

水溶液 (1mol/l) とガラス繊維水酸化ナトリウム溶液 (1mol/l) および塩酸水溶液 (1mol/l) の結果を除き、他の繊維は水酸化ナトリウム溶液 (1mol/l) , 塩酸水溶液 (1mol/l) および蒸留水いずれの溶液においても繊維表面に明白な劣化を確認することができなかった。前に述べたようにいずれの繊維も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。

ガラス繊維の塩酸水溶液 (1mol/l) による劣化は材齢60日で繊維表面に若干の劣化、120日では繊維表面に損傷を受けていることが認められ、これが強度低下の原因と考えられる。

写真一6は、魚本らによって明らかにされたアルカリ濃度 1.0mol/l、保管温度40℃の浸漬条件で7日間浸漬した時のガラス繊維の劣化性状であり、劣化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⁷⁾。

写真一7は、アラミド繊維 (ケブラーk49) で



写真一6 ガラス繊維のSEM (3000倍) 観察
浸漬日数7日 (NaOH溶液)



写真一7 ケブラーk49繊維のSEM (500倍)
観察 浸漬日数60日 (HCl溶液)

塩酸水溶液 (1mol/l) に温度80℃、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。写真一6と写真一7より繊維の種類や浸漬条件の違いはあるものの繊維表面の劣化性状が非常に良く似ていることが分かる。アラミド繊維 (ケブラーk49) は、一般的性質として耐化学薬品性の耐酸性に対してあまり優れていないと言われているが本実験でも同様な結果が得られた。

4. まとめ

一方向繊維強化プラスチックロッドを構成する各種繊維を用い、高温環境下 (温度80℃、

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, 酸性溶液および純水)を行い, 浸漬試験後の強度特性やSEM観察による劣化性状について実験的に検討した結果をまとめると以下ようになる。

(1) 厳しい高温環境下(温度80°C, 湿度60±2%)で劣化促進試験(アルカリ溶液, 酸性溶液および蒸留水)を行うと, いずれの繊維も強度低下することが明らかとなった。

(2) SEM観察では, アラミド繊維のうちケブラーk49が塩酸水溶液(1mol/l)による影響を受け, 繊維表面に劣化性状が観察された。この劣化性状は, 繊維の違いや浸漬条件の違いはあるもののガラス繊維表面の劣化性状(NaOH溶液)と非常に良く似ていることが確認された。また, ガラス繊維でも長期材齢で塩酸水溶液(1mol/l)による影響を受け, 繊維表面に劣化性状が観察され, これが強度低下の原因と考えられる。

(3) カーボン繊維は, アルカリ性, 耐酸性のいずれに対しても高い抵抗性を有し, 耐化学薬品性に優れていると報告されているが⁸⁾, 本実験では特に塩酸水溶液(1mol/l)の浸漬60日において約37%程度強度低下することが明らかとなり, 使用環境によってはなんらかの対策が必要と考えられる。

今後, 温度等, 環境条件の違いによる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。

謝辞: 本研究をまとめるにあたり, 実験に

協力して頂いた千葉工業大学瀬部一馬君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 魚本, 西村: FRPロッドの静的強度と弾性係数, 土木学会論文集, No.472/V-20, pp. 77-86, 1993.8
- 2) 勝木, 魚本: アラミド繊維の耐アルカリ性および耐酸性の評価方法に関する一試案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp. 519-524, 1995.6.
- 3) 山口, 西村, 魚本: プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(11)紫外線によるアラミド繊維劣化のモデル化, 生産研究, 第48巻, 第5号, pp. 8-10, 1996.5
- 4) 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(10)内陸および海洋環境下に暴露した各種FRPロッドの引張特性, 生産研究, 第48巻, 第3号, pp. 71-74, 1996.3
- 5) 連続繊維複合材料研究委員会(日本建築学会編): 新補強材のコンクリート構造物への利用の現状と問題点, pp. 3-4, pp. 32-33
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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