

連続繊維補強材のアルカリ耐久性

宮川豊章¹・吉田真樹²・服部篤史³・岩本勲⁴

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工修 愛知県建設技術研究所 (〒457 名古屋市南区東又兵衛町 1-57)

³正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 近畿コンクリート工業 開発部 (〒530 大阪市北区天満5丁目 14-10 梅田 UN ビル)

近年、塩害などの鋼材腐食問題への対応策として、FRPの一種である連続繊維補強材のコンクリート構造物への利用が試みられている。しかし、連続繊維補強材の耐久性についてはまだ系統だった報告例が少ないのが現状である。本研究は、連続繊維補強材のアルカリ耐久性について、補強材の種類、環境溶液、緊張荷重レベルおよび環境温度を要因としてとりあげ、き裂発生、強度、変形などについて検討を加えたものである。

Key Words: fiber reinforced plastic, prestressing tendon, alkali resistance, micro crack, strength, elongation, flexural behavior of beam

1. はじめに

本来半永久構造物であるべきコンクリート構造物において、海水等に起因する鋼材の塩化物腐食が問題となっている。近年その対策として、高張力でかつ耐食性に優れたFRP(繊維強化プラスチック)を鋼材の代替材料として利用しようという試みがある。わが国でもFRPのコンクリート構造物への利用に関する開発研究が進められ、最近ではいくつかの実用例も報告されている^{1), 2), 3)}。しかし、コンクリート分野におけるFRPの利用はいまだ開発段階にあり、ことに長期的な耐久性状に関する詳細なデータは不足しているのが現状である^{4), 5)}。現在までに、アルカリ存在下での樹脂の加水分解等による腐食、水分あるいはアルカリ存在下での繊維-樹脂界面の化学的および物理的劣化⁶⁾、さらに繊維自身のアルカリ存在下での劣化等が報告されているが、コンクリート中という特殊な環境でプレレストレストコンクリート(PC)用緊張材のように高持続荷重を受ける場合の長期的な耐久性の予測にはさらに検討が必要である。

本研究ではコンクリート構造用FRPである連続繊維補強材をPC用緊張材として使用する場合を想定し、特にアルカリ環境下における長期的な耐久性状についての基礎的な検討を行うものとした。

2. 実験概要

実験は連続繊維補強材の浸漬試験、浸漬後の観察、浸漬後の引張試験および浸漬後の連続繊維補強材を緊張材に用いたPCはりの曲げ試験からなる。これらの概要をTable 1に示す。

(1) 浸漬試験

現在市販されている連続繊維補強材の中から耐久性に優れているとされるものを数種選択し、PC構造を想定して緊張、定着し、試験長(定着部を除く母材部)70~130cmの中央30cmを、コンクリート中の細孔溶液を模擬したアルカリ溶液等に、所定の環境温度で最長14カ月の浸漬を行う浸漬試験を実施した。浸漬試験に際しては以下の項目を主な要因とした。

a) 連続繊維補強材

実構造物への適用が期待されているとともに、アルカリ耐久性状が比較的良いとされるアラミド繊維棒材を中心に取り扱った。また、比較用として力学的にはほぼ同等の2者を取り上げ、合計3種の棒材について試験を行った。用いた棒材のメーカー提示の諸性質をTable 2に示す。

b) 環境溶液

環境溶液にはコンクリート中の細孔溶液を模擬した溶液として丸山⁷⁾が使用したアルカリ溶液(pH12.5~13.0, Ca(OH)₂: 2g/l, NaOH: 10g/l, KOH: 14g/l, 以下

Table 1 Outline of Test Program

Solution	Alkaline Solution 60°C				Alkaline Solution 20°C					Tap Water 20°C		Not Immersed	
	0.65Pu		0.00Pu		0.65Pu			0.40Pu		0.65Pu		Not Tensioned	
Tension Level	4~5	10	14	10	14	5	10	14	10	14	10	14	
Immersion Period (Month)		○	○		○		○		○	○	○	○	○
SEM/EPMA Observation													
Tensile Test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Flexural Test of PC Beam	○					○							○

○: Test conditions conducted Pu: Tensile ultimate load

Table 2 Published Properties of Fiber Reinforced Plastics

Specimen	Fiber	Matrix	Shape	Fiber Content (Vol.%)	Nominal Area (mm ²)	Guaranteed Tensile Strength (kN/mm ²)	Young's Modulus (kN/mm ²)	Elongation (%)
Aramid-T	Aramid (Technora)	Vinyl Ester Resin (Bisphenol A, Acrylic Acid, Peroxide)	Spiral Wound Round Bar (φ6)	65	28.3	1.76	53.9	3.6
Aramid-K	Aramid (Kevlar49)	Epoxy Resin (Bisphenol A, Amide)	Braided Cable (φ8)	65	50.0	1.27	63.7	2.2
Carbon	Carbon (PAN Type)	Epoxy Resin (Novolak, Amide)	Spiral Cable (φ7.5)	64	30.4	1.76	137	1.6

Table 3 Conditions of AE Measurement (1)

Environmental Condition	Alkaline Sol. 60°C	Alkaline Sol. 20°C	Tap Water 20°C
Amplifier	40+30dB	40+30dB	40+20dB
Filter Through	0.2~1.0MHz	0.2~1.0MHz	0.1~1.0MHz/ 0.1~0.3MHz
Discriminate Level	250mV	150mV	250mV
Dead Time	1msec	1msec	1msec

Table 4 Grind Condition

Process	Powder	Lubricator	Time
Mechanical Grind (1)	#80(Silicon Carbide 200μm)	Water	2min. in Two Directions
	#320(Silicon Carbide 200μm) #600(Silicon Carbide 200μm)		
Mechanical Grind (2)	#1200(Silicon Carbide 200μm)	Water	6min. in Two Directions
	#1500(Silicon Carbide 200μm)		
Final Grind	Almina Powder (0.3μm)	Water	10min. in Two Directions
	Almina Powder (0.06μm)		
Vacuum Evaporation of Gold (5~10mA)			8min.

Table 5 Conditions of SEM

Accel Voltage	2~7kV
Probe Current	6 × 10 ⁻¹⁰ A
Working Distance	10~12mm
Gun Bias	3 (Manual)

Table 6 Conditions of EPMA

Area	4 × 4mm
Number of Pixel	200
Probe Current	2~3 × 10 ⁻⁸ A
Dwell Time	60msec
Size of Pixel	20μm

Table 7 Conditions of AE Measurement (2)

Amplifier	40+30dB
Filter Through	0.2~1.0MHz
Discriminate Level	150mV
Dead Time	1msec

アルカリ溶液と呼ぶ)を標準溶液とし、また比較用として水道水も用いた。

c) 緊張荷重レベル

緊張荷重としては、従来よく採用されている0.65Pu(Pu: 破断荷重)を標準緊張荷重レベルとし、比較用として0.40Pu, 0.00Pu(非緊張)を設けた。

d) 環境温度

20°C, および劣化促進を目的として60°Cの2種類

の溶液槽を設けた。

浸漬中、主要なものについては定着部にセンターホール型ロードセルを取り付け、浸漬時における緊張荷重の経時変化を測定した。さらに代表的なものについて AE センサー(共振型, 振動板直角方向200kHz, 平行方向800kHz)を1個取り付け、発生する AE イベント数を記録した。浸漬中の AE 測定条件を **Table 3** に示す。

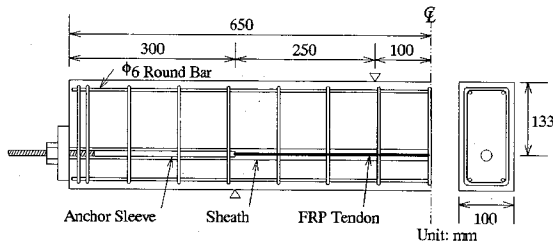


Fig. 1 Prestressed Concrete Beam Specimen

(2) 供試体の観察

浸漬期間を終えた供試体の緊張荷重を除荷し、溶液中から取り出した供試体の外観および断面を観察した。さらに、10ヶ月の浸漬を行った供試体を中心に、走査電子顕微鏡(SEM)、電子線マイクロアナライザー(EPMA)の手法により、微視的劣化と溶液中の元素の侵入状況を観察した。

a) 試験片の作製

供試体を溶液から引き上げた後、そのまま室温で約1週間乾燥させた。供試体表面を乾布で拭いたあと、浸漬部分の中央付近から長さ2~3cmの試料を3個切り出し、観察に用いた。研磨に際しては水を潤滑液に用い、Table 4に示す工程で行った。

b) SEMおよびEPMAによる観察

SEMにより横断面を中心に観察を行った。その設定をTable 5に示す。また、高分子の劣化の一形態とされる高分子材内部への物質の附着状況をEPMAにより観察した。ここで、附着とは、高分子の化学的劣化の原因となるガス、蒸気あるいは溶液(環境剤)が、表面に吸着すると同時に内部に侵入、拡散していく現象を指す。撮影に使用した供試体はSEM観察と同一のものを使用した。計測時の設定をTable 6に示す。なお、注目元素は、アルカリ金属であるNa, Kおよびアルカリ土金属のCaとした。検出される各元素のX線強度を平面に配置し、強度によって分割着色してマッピングを行った。

(3) 引張試験

浸漬した供試体について、引張試験を行った。試験時には供試体にひずみゲージ、AEセンサを取り付け、荷重、ひずみ、AEカウント数等を計測した。

a) 試験料

試験長は、定着部の影響を避けるために浸漬区間30cmの両端10cmずつの余裕をとって50cmとした。ただしアラミドTについては、浸漬時に使用した定着用鋼管スリーブが長く、母材長に余裕がないのでそのままの形状で使用するものとし、試験長は70cmとした。定着体には鋼管のスリーブと定着用

Table 8 Mix Proportion of Concrete

Design Strength (MPa)	NMS (mm)	Sl. (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit mass (kg/m ³)				WRA (cc/m ³)
						W	C	S	G	
40	15	5±1	3	56	42	175	315	740	1087	788

Table 9 Test Conditions of PC Beams

Specimen	Tendon		Prestress Level
T-N-1	Aramid-T	Not Immersed/Not Tensioned	0.65Pu (32.5kN)
T-N-2			
T-2-1	Aramid-K	Alkaline Sol.20°C 0.65Pu 4mon.	0.65Pu (41.2kN)
T-6-1		Alkaline Sol.60°C 0.65Pu 4mon.	
T-6-2			
K-N-1	Aramid-K	Not Immersed/Not Tensioned	0.65Pu (41.2kN)
K-N-2			
K-6-1		Alkaline Sol.60°C 0.65Pu 4mon.	

Table 10 Mechanical Properties of Concrete

Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (×10 ⁴ MPa)	Flexural Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
45.2	3.51	5.77	2.65

Table 11 Mix Proportion of Grout

W (kg)	C (kg)	WRA (g)
3.5	10	150

膨張材を用いた。

b) 荷重方法

供試体を引張方向と供試体軸方向が一致するように定着部でチャックにより試験機に取り付け、荷重開始から破断まで一定荷重速度で荷重する単純荷重方式で荷重試験を行った。荷重速度は繊維の単位断面積あたりに加わる荷重が一律になるよう1分間に $A \times V_f \times (500 \pm 50)N$ (A : 公称断面積, V_f : 引張に抵抗する繊維の混入率) 程度の荷重増加の割合で荷重した。

なお、アラミドTについては、単純荷重方式の他に、カイザー効果のフェリシティー比を求めるため約10kNごとに漸増—除荷する繰返し荷重も行った。

c) 測定項目

荷重開始から破断に至るまで、荷重とひずみを計測するとともに、供試体の外観、破断面等を観察した。

AEは、計測機の性能等からリングダウン法で計測した。AEセンサーは浸漬中の計測と同様のセンサーを用い、計測位置は浸漬部分中央とした。AE測定の設定をTable 7に示す。

(4) PC はりの曲げ試験

浸漬後の連続繊維補強材を用いてポストテンション PC はりを作成し、浸漬による連続繊維補強材の劣化が部材の耐荷性状に与える影響を検討した。

a) PC はり供試体

幅×高さ×全長=10×20×130cm のポストテンション PC はりを、健全な連続繊維補強材を緊張材に用いた場合に曲げに対して緊張材破断型(曲げ引張型)の破壊形式となるように設計し、対称2点荷重による一方静的曲げ試験を行った。供試体を Fig. 1 に、また設計基準強度 40MPa のコンクリート立方配合を Table 8 に示す。緊張材に使用した連続繊維補強材は、健全および緊張、浸漬後のアラミドT、アラミドKの2種類であり、これらを組み合わせて合計8体のPCはりを作製した。緊張、浸漬を行った連続繊維補強材は、初期緊張荷重を 0.65Pu としたもので、20℃または 60℃のアルカリ溶液中でいずれも 4~5ヶ月間の浸漬期間を経たものを用いた。プレストレス導入用の緊張荷重は、浸漬時の初期緊張荷重と同様に健全な連続繊維補強材の破断荷重 Pu に対して 0.65 とした。連続繊維補強材の浸漬区間(30cm)がはりの曲げ挙動を支配するように曲げスパンは中央部分 20cm とし、載荷区間が棒材によって支配されるよう載荷スパンは棒材の定着体部分を除いた 70cm とした。これらの PC はりの一覧および載荷時の各種強度試験結果をそれぞれ Table 9, 10 に示す。

コンクリート材合約 2 週経過後、所定の強度の発現を確認し、プレストレスを導入した。導入後直ちにグラウトし、載荷試験時までさらに約 2 週間室内で養生した。グラウトの配合を Table 11 に示す。

b) 測定項目

試験時の測定項目は以下の通りである。

- 1) 荷重…ロードセル(容量 300kN)により測定した。
- 2) たわみ…スパン中央に 1 個(容量 10mm), 両支点位置にそれぞれ 1 個(容量 5mm)の変位計を設置して測定した。スパン中央たわみは両支点の変位の平均値を差し引いて求めた。
- 3) ひび割れ幅…曲げスパン(20cm)付近の緊張材高さ(d=13.3cm)において、5 連の(型ゲージ(検長 5cm, 容量 2mm)を用いて測定した。

3. 浸漬中の状況

(1) 浸漬中の荷重

緊張して浸漬した棒材の緊張荷重の経時変化の一例をリラクセーション率で Fig. 2 に示す。なお、浸漬中に破断した棒材は見られなかった。

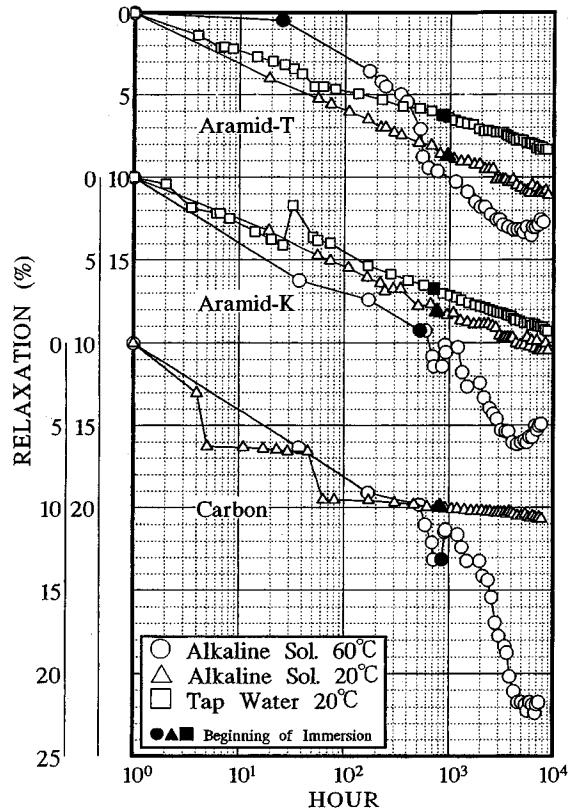


Fig. 2 Relaxation under Immersion (0.65Pu)

Table 12 Relaxation Rate under Immersion

Environmental Conditions		Aramid-T	Aramid-K	Carbon
Alkaline Sol. 60°C	0.65Pu	5.45	11.0	12.8
	0.40Pu	1.33	2.03	-
Alkaline Sol. 20°C	0.65Pu	2.48	2.26	0.68
	0.40Pu	1.33	2.03	-
Tap Water 20°C	0.65Pu	2.03	2.22	-

Unit: %/Log(hour)

どの棒材も時間の対数に対してほぼ直線的な応力緩和を示した。しかし、60℃のアルカリ溶液に浸漬した場合、浸漬開始時(Fig. 2 中に黒点で示す)以降に緊張荷重の低下が促進され、低下がしばらく続いた後、浸漬後約 4000 時間経過後からは荷重の低下傾向は停止し逆に若干の上昇が見られた。初期緊張時から 9000 時間までの荷重低下の割合は、アラミド T で、60℃のアルカリ溶液に浸漬したものが約 13%、20℃のアルカリ溶液で約 11%、20℃の水道水で約 8.5%であった。

各棒材の浸漬開始時から約 3000 時間経過後までのリラクセーション曲線を直線近似し、その傾きを Table 12 に示す。リラクセーションの進行は 60℃のアルカリ溶液中に 0.65Pu で浸漬したものが最も速く、

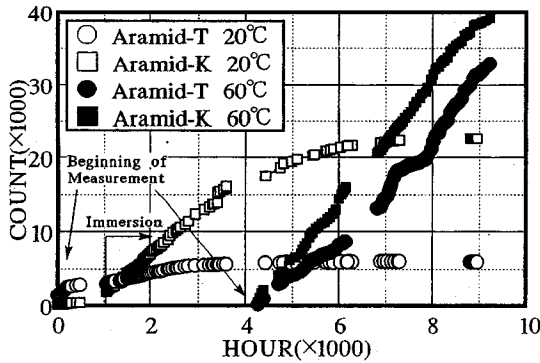


Fig. 3 AE Count under Alkaline Immersion (0.65Pu)

20°Cのアルカリ溶液に同じ緊張荷重で浸漬した場合に比べてリラクゼーションの速度は2倍以上になった。なお、アラミドTおよびアラミドKの場合、20°Cのアルカリ溶液と20°Cの水道水とではアルカリ溶液に浸漬の方が速度は大きくなり、0.65Puで緊張した場合0.40Puの場合より大きくなった。

以上より、緊張、浸漬が棒材の力学的性質に与える影響に対しては、リラクゼーションが一つの目安になるものと考えられ、同一緊張荷重レベルでは60°Cのアルカリ溶液に浸漬したものが最も大きく、続いて20°Cのアルカリ溶液、20°Cの水道水となり、荷重が小さな場合は影響が小さくなるものと推定される。

(2) 浸漬中のAE

緊張浸漬中のAEを測定した結果をFig. 3に示す。AEの発生は、程度の差はあるものの棒材定着時から認められたが、しばらくして発生頻度は低下した。その後、浸漬を開始すると発生頻度は再度増加し、特にアラミドKでは増加の程度が大きかった。その後、20°Cでは時間が経過するにつれて発生頻度は次第に減少したが、60°Cのアルカリ溶液では測定を開始した初期緊張後約4000時間から浸漬終了時の約9000時間までは発生頻度が低下する傾向はなく、ほぼ一定の頻度での発生がみられた。

浸漬開始時以降のAEの発生頻度の増加から、AE発生を伴う内部微小破壊の原因の一つには、環境溶液の侵入の影響があるものと推定される。また浸漬中のAEの発生状況から、60°Cのアルカリ溶液に浸漬する方が20°Cのアルカリ溶液に浸漬するよりも溶液侵入およびそれに続く内部の微小破壊の速度は速く、温度による促進効果があったものと考えられる。

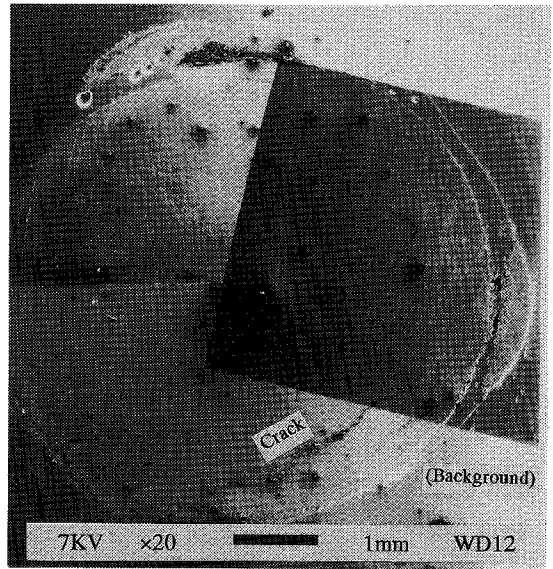


Fig. 4 Example of Section of Aramid-T (Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

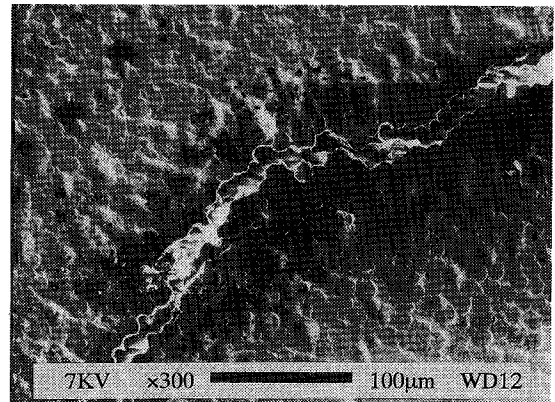


Fig. 5 Crack in Aramid-T (Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

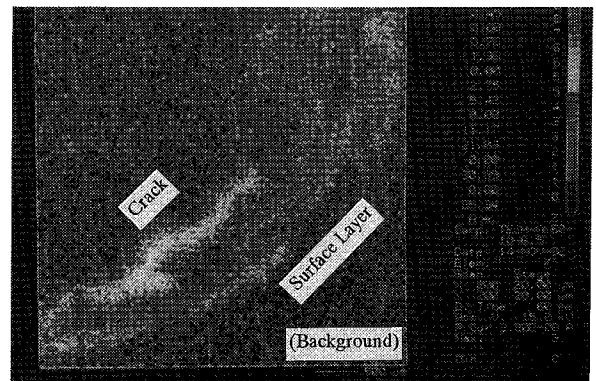


Fig. 6 Distribution of Potassium (K) in Aramid-T (Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

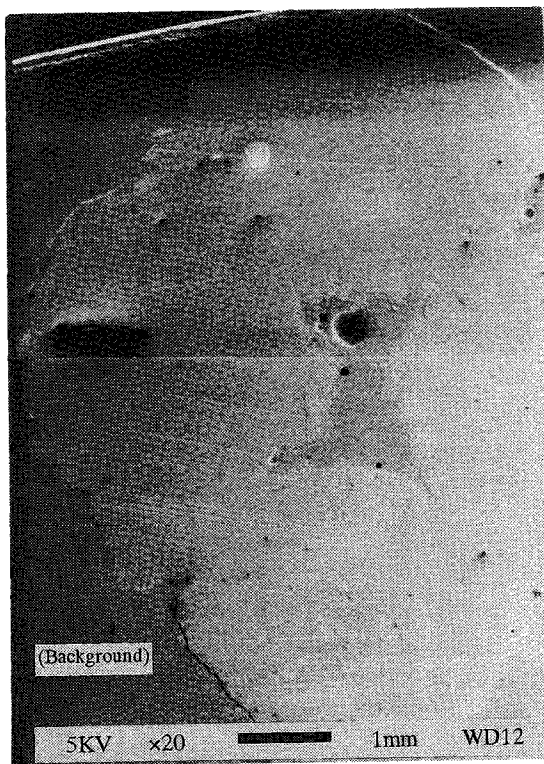


Fig. 7 Example of Section of Aramid-K
(Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

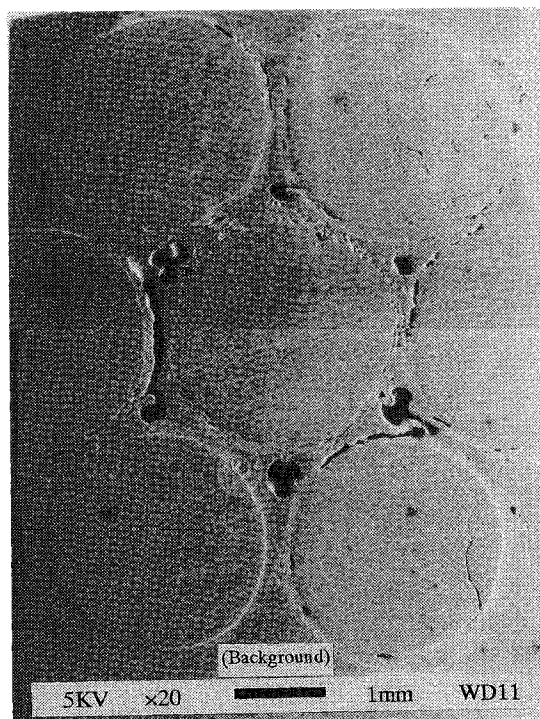


Fig. 8 Example of Section of Carbon
(Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

4. 表面および断面の観察

樹脂の溶出や断面内のき裂の有無、および環境剤としてのアルカリ溶液に含まれる元素の断面内分布等を調べた結果、今回使用した棒材の劣化の形態には、環境剤が棒材内部にある程度侵入し内部に劣化層が形成される形のもと、内部への環境剤の侵入は少なく棒材表面から樹脂が溶出し繊維同士の結合がなくなり棒材の断面が減肉してゆく形のものが見られた。

(1) 内部への侵入

浸漬後のアラミドT棒材の横断面(Fig. 4)には繊維-樹脂界面の剥離が一部の箇所で見られ、それらは棒材外周に並行して連続し、大きなき裂(Fig. 5)として存在していた。EPMAによって環境剤の分布を調べた結果、KとNaはともに内部まで侵入する傾向を示し、Kがより内部まで分布していた。一方Caは表面部のみ分布していた。したがって、環境剤の侵入については、以後Kで代表させることとする。60°Cアルカリ溶液に0.65Puで約9000時間浸漬した棒材断面のKの分布をFig. 6に示す。ある程度内部

にまでKの分布がみられ、特に大きなき裂の周囲約500 μ m幅には集中した分布が見られる。今回の計測では切断した断面を水を潤滑液として研磨、洗浄を行ったことから、EPMAによって検出された環境剤の元素は化学的な結合等のかなり強い力によって結合している元素であると思われる。すなわち、単にき裂を経由したものでなく、樹脂などの変質や腐食反応との関係が強いものと考えられる。さらに、緊張荷重レベルが高くなるほど、き裂の存在は棒材のより内部に広がる傾向があり、環境剤分布の傾向もより内部におよんでいた。

(2) 表面からの樹脂溶出

アラミドK棒材、炭素棒材の横断面をそれぞれFig. 7, 8に示す。また、0.65Puで緊張、浸漬したアラミドK棒材の同じ断面上のK分布をFig. 9に示す。炭素棒材ではKはほとんど検出されなかった。これらより、両棒材では、緊張荷重レベルによらず、棒材本体内部への環境剤の侵入は少なく、棒材表面からの樹脂溶出による腐食傾向が強いと考えられる。特に炭素棒材の樹脂溶出は著しく、約9000時間の浸漬では表面の異形加工部分が脱落し、局所的には溶出が棒材本体に達している箇所も見られた(Fig. 10)。樹脂溶出により接着を失った巻き付け繊維は非常に

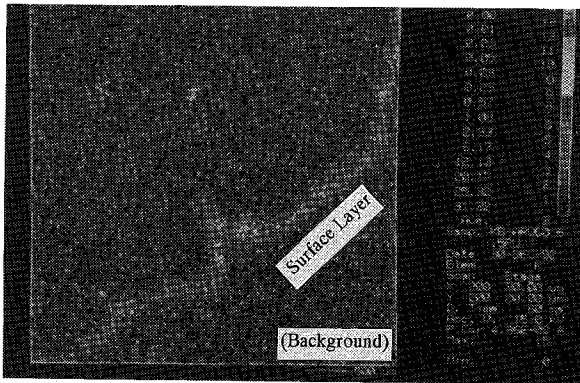


Fig. 9 Distribution of Potassium (K) in Aramid-K
(Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

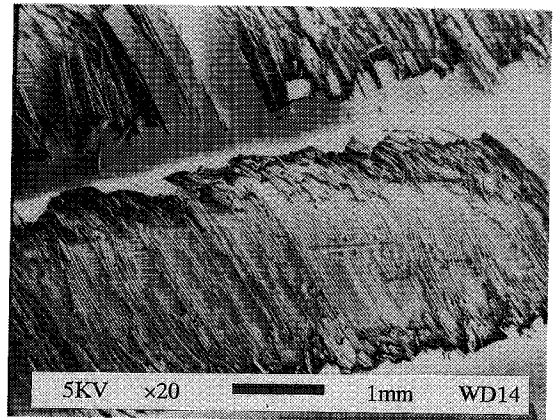


Fig. 10 Example of Surface of Carbon
(Alkaline Sol. 60°C 0.65Pu)

もろく、乾布で付着物を拭き取る際に表面異形加工の巻き付け繊維は多くはがれ落ちた。またアラミド K 棒材は緊張荷重レベルが高いほど表面からの腐食が軽減される傾向にあった。これは棒材が組み紐構造であることから荷重によって棒材が絞られ繊維間の距離が縮まるためではないかと考えられる。

(3) アラミド繊維棒材での劣化の進行

アラミド T 棒材は、繊維自体アルカリに対して優れた耐久性があるとされ、環境剤の侵入によってある程度繊維自体がアルカリ分と接触しても棒材の強度が大きく低下するような腐食には至りにくいと思われるが、Fig. 5に見られたような棒材内の局所的なき裂や腐食が実使用状態でどのような影響を与えるのか検討する必要がある。

アラミド K 棒材は繊維自体アルカリ環境中では若干の問題があるとされる⁹⁾ため、繊維自体がアルカリ分に接触することは避けなければならない。今回の浸漬では環境剤の侵入はごく表面に留まっているものの、今後表面からの腐食がさらに進行したり、表面のピンホールから局所的な侵入があったりすることがあれば棒材の耐力自体が低下するような劣化に結びつく可能性もあると思われ、さらに検討が必要である。

5. 引張試験

(1) アラミド T

a) 引張試験結果

一軸引張試験を行った結果を Table 13 に示す。供試体数が少ないため、定量的な評価は困難ではあるものの、破断強度が大きく低下したものはなかった。なお、若干ながら破断強度が浸漬も緊張も行わなかった棒材(以下、健全棒材と呼ぶ)、20°Cのアルカリ溶

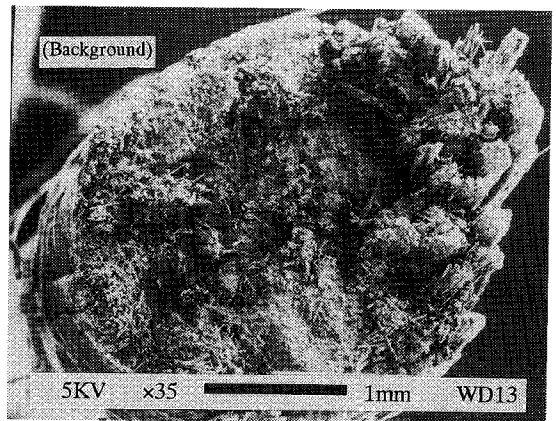


Fig. 11 Fracture Surface of Carbon
(Not Immersed/Not Tensioned)

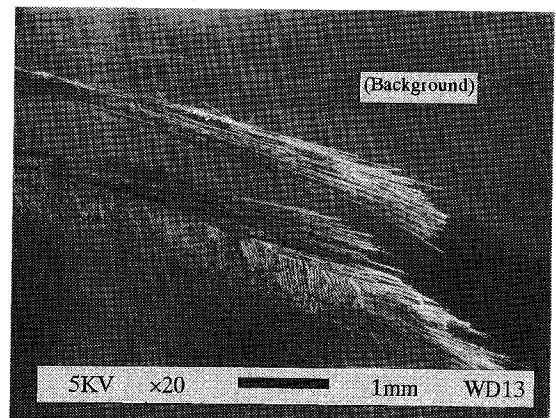


Fig. 12 Fracture Surface of Carbon
(Alkaline Sol. 60°C 0.00Pu)

液 0.65Pu, 60°Cのアルカリ溶液 0.00Pu, 60°Cのアルカリ溶液 0.65Pu の順に低下する傾向が見られた。しかし、全てのアラミド T 棒材中でメーカー提示の保証

Table 13 Results of Tensile Test

Environmental Condition			Aramid-T		Aramid-K		Carbon	
Solution	Tension Level	Immersion Period (Month)	Tensile Strength (kN/mm ²)	Young's Modulus (kN/mm ²)	Tensile Strength (kN/mm ²)	Young's Modulus (kN/mm ²)	Tensile Strength (kN/mm ²)	Young's Modulus (kN/mm ²)
Not Immersed/Not Tensioned			1.96 (1.00)	55.1 (1.00)	1.41 (1.00)	64.3 (1.00)	1.97 (1.00)	154.5 (1.00)
Tap Water 20°C	0.65Pu	10	1.91 (0.97)	54.1 (0.98)	-	-	-	-
		14	1.96 (1.00)	56.7 (1.03)	1.43 (1.01)	62.7 (0.98)	2.10 (1.07)	136.7 (0.88)
Alkaline Sol. 20°C	0.40Pu	10	1.79 (0.91)	46.5 (0.84)	-	-	-	-
		14	-	-	1.44 (1.02)	63.0 (0.98)	-	-
	0.65Pu	5	1.92 (0.98)	57.0 (1.03)	-	-	-	-
		10	1.94 (0.99)	58.5 (1.06)	-	-	-	-
		14	1.89 (0.96)	40.2 (0.73)	1.53 (1.09)	64.7 (1.01)	2.00 (1.15)	151.2 (0.98)
Alkaline Sol. 60°C	0.00Pu	10	1.88 (0.96)	47.1 (0.85)	-	-	1.86 (0.94)	114.4 (0.74)
		14	1.93 (0.98)	45.6 (0.83)	1.26 (0.89)	72.2 (1.12)	1.81 (0.92)	126.1 (0.82)
	0.65Pu	4~5	1.80 (0.92)	53.3 (0.97)	1.44 (1.02)	62.7 (0.98)	1.94 (0.98)	128.0 (0.83)
		10	1.85 (0.94)	61.3 (1.11)	-	-	-	-
		14	-	-	1.37 (0.97)	68.5 (1.07)	1.92 (0.97)	127.3 (0.82)

() : Ratio to the specimen without immersion/tensioning

強度を下回るものはなかった。

応力-ひずみ関係が直線とみなせるようになる荷重から破断荷重の65%前後までの間で求めた弾性係数では、若干の違いが認められた。健全な棒材に比べ緊張および浸漬した棒材のそれは高くなり、緊張せず浸漬したものでは逆に低くなる傾向が現れた。Table 13 に示すように、60°Cのアルカリ溶液に0.65Puで10カ月間浸漬したものが最高で健全棒材の弾性係数の11%増、逆に60°Cのアルカリ溶液に緊張無しで14カ月間浸漬したものは、17%減であった。このように、棒材全体としては、浸漬により弾性係数は低下する一方、その低下の程度にもよるが、緊張により増大する傾向があると考えられる。

b) AE の測定結果

引張試験時に発生した AE のイベント数の一例を Fig. 13 に示す。健全な棒材と60°Cのアルカリ溶液に0.65Puで約9000時間浸漬した棒材の両者に対して9.8kN ほどの漸増繰返し引張試験を行いカイザー効果の発現性状を調べたところ、Fig. 14 に示すように、健全な棒材の場合比較的荷重の低い段階ではカイザー効果の発現は明確でフェリシティー比も内部安定性の目安である0.95⁹⁾を上回る。その後繰返し荷重の増加に伴ってカイザー効果の発現は鈍くなり破断荷重の約70%付近ではフェリシティー比も0.95を下回るようになった。これに対し、60°Cアルカリ溶液に0.65Puで浸漬したものは荷重の低い段階からカイザー効果の発現は不明確でフェリシティー比も低く、さらに荷重の増加に伴って低下したことから、浸漬によって棒材内部には不安定な箇所が生じたものと思われる。

AE 振幅および継続時間による相対的なエネルギーカウント値(1V×1V×1msを1カウントとした)を算定したものを、Fig. 15 に示す。健全なアラミド T の場合、AE 発生の初期からかなり大きなエネルギーカウントをもつ AE も発生し、破断荷重の約30%付近から破断までほぼ同様の傾向のエネルギー分布で AE の発生が続いた。一方、60°Cのアルカリ溶液に0.65Puで浸漬した棒材では、載荷直後から AE が発生するものの、それらの大部分はエネルギーカウント値の小さいものであった。このことから、カイザー効果の発現を鈍らせる棒材内部の不安定な箇所は、棒材の強度に影響するような荷重負担部分の大きいものではなく、表面加工部や劣化した樹脂あるいは界面の損傷部であると思われる。先行して受けた緊張荷重を越えても破断直前に至るまではやはりエネルギーカウントの低い AE がほとんどで、エネルギーカウントの高い AE は破断直前に集中した。

以上の結果を総合すると、緊張および浸漬によって、短期では棒材の弾性係数は増加し安定した引張応答を示すようになるが、さらに長期の浸漬を受けると、棒材内部に断面観察からも推定されるような不安定な箇所が生じるようになったと推定される。ただし、これは棒材の引張強度そのものを大きく低下させることのない程度のものである。

(2) 炭素およびアラミド K

表面から樹脂溶出が認められた炭素棒材は、棒材によっては引張強度や弾性係数の低下がみとめられた。しかし、全ての炭素棒材中でメーカー提示の保証強度を下回るものはなかった。破断の状況について

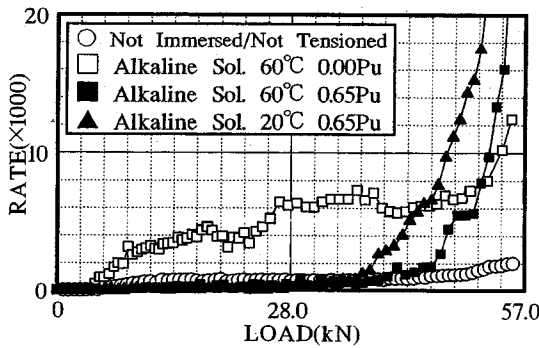


Fig. 13 Example of Count Rate of AE (Aramid-T)

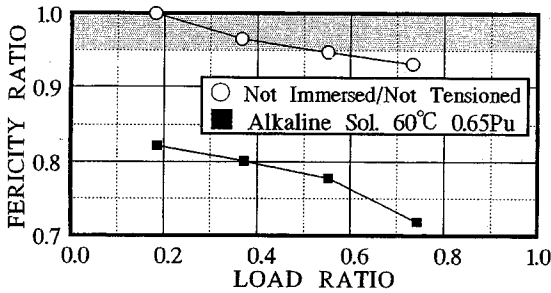


Fig. 14 Ferocity Ratio (Aramid-T)

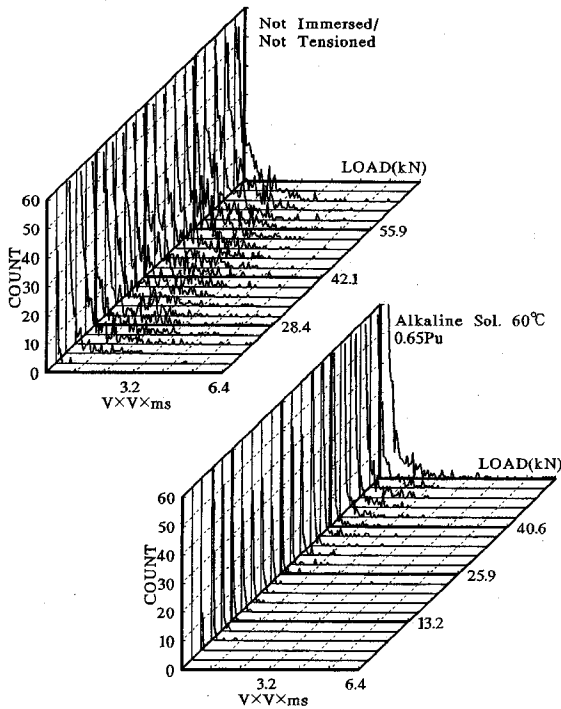


Fig. 15 Relative Energy Count (Aramid-T)

ては、健全な場合、Fig. 11 に示すように、繊維-樹脂界面の結合が強いために破壊は比較的一断面に集中

Table 14 Results of Beam Test

Specimen	Cracking Load (kN)	Maximum Load (kN)	Displacement at Maximum Load (mm)	Failure Mode
T-N-1	41.7 (1.00)	110.7 (1.00)	7.54 (1.00)	I
T-N-2		[91.8]		
T-2-1	42.1 (1.01)	105.4 (0.95)	6.10 (0.81)	I
		[91.1]		
T-6-1	44.4 (1.06)	96.7 (0.87)	3.19 (0.42)	II
		[89.0]		
T-6-2	46.3 (1.11)	102.6 (0.93)	4.20 (0.56)	II
		[89.0]		
K-N-1	55.0 (1.00)	126.2 (1.00)	5.33 (1.00)	I
K-N-2		[106.2]		
K-6-1	56.7 (1.03)	130.2 (1.03)	5.63 (1.05)	I
		[106.9]		

() : Ratio to the specimen without immersion/tensioning

[] : Calculated value

Failure Mode: I: Flexural Tensile, II: Flexural Compressive

し、破断面は繊維の引き抜きの少ない面を形成しが、浸漬の後では、Fig. 12 に見られるように、表層部の巻き付け繊維の劣化により軸方向繊維の拘束効果が減少したためか、繊維の引き抜きの多い破断を呈し、損傷は広い範囲に広がるようになった。

アラミド K 棒材についても同様の傾向がみられるが、今回の浸漬範囲では溶出程度も小さく機械的特性の変化も少なかった。緊張荷重が大きいほど樹脂溶出の傾向は小さく、引張強度等の特性変化ともよく対応した。

6. PC はり

(1) ひび割れ性状

アラミド T およびアラミド K を緊張材に用いた PC はりの曲げ試験を行ったところ、Table 14 に示すように、それぞれの環境下で劣化させた棒材を用いた場合のひび割れ発生荷重は若干ながら上昇する傾向が認められた。ひび割れ発生荷重には緊張材の弾性係数の影響があることから、増加した弾性係数が若干の影響を与えたものと考えられる。

アラミド T 棒材を緊張材に用いた PC はりの、荷重とひび割れ幅の関係を Fig. 16 に示す。健全な棒材を使用した PC はりと比べ、60°C のアルカリ溶液に 4 ヶ月間緊張、浸漬した棒材を使用したはりでは、ひび割れが数カ所に限定され、ひび割れ分散性が低下していることが認められる。このことは、Fig. 17 に示すように、荷重と 5 つの型ゲージから得られるひび割れ幅の平均値および最大のひび割れ幅の関係において、ひび割れの集中により最大値が大きくなり、同

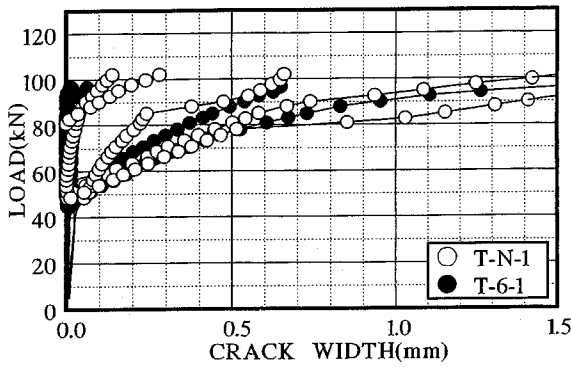


Fig. 16 Crack Width (Aramid-T)

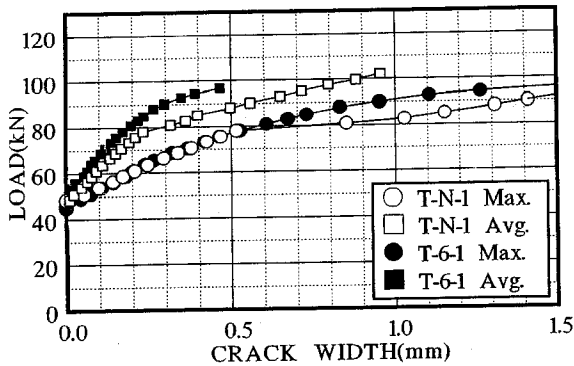


Fig. 17 Maximum and Averaged Crack Width (Aramid-T)

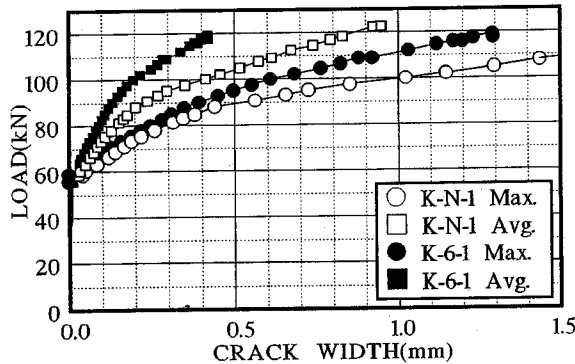


Fig. 18 Maximum and Averaged Crack Width (Aramid-K)

じ平均ひび割れ幅のときのそれぞれの値の差が大きいことから伺える。これらは棒材の付着強度が低下したことが原因で現れたものと考えられる。

アラミド K を用いた PC はりでも、Fig. 18 に示すように、アラミド T と同様、付着強度の低下が原因と思われるひび割れ分散性の低下がみとめられた。

(2) 最大耐力および破壊性状

Table 14 に示したように、アラミド T を用いた PC はりのうち、60°C アルカリ溶液中で浸漬したものを

緊張材とするはりは、圧縮縁のコンクリートの若干の圧潰を伴いながら最終的には緊張材の破断により終局となる曲げ圧縮型の破壊形式を呈した。アラミド T を用いたその他の PC はりおよびアラミド K を用いたものについては、いずれも緊張材破断が先行する曲げ引張破壊型となった。劣化させた棒材は弾性係数が大きくなっているものと推定され、同じ緊張材のひずみに対して負担応力が大きくなるのが原因で、断面のバランス上圧縮縁のコンクリートに作用する応力も大きくなるため、曲げ圧縮型の破壊形式へ移行したのと考えられる。

耐力については、浸漬したアラミド T を用いて作成したはりで、健全な棒材を使用したはりに比べ、大きいもので 10kN (約 10%) 程度の低下を示したものもあった。また、最大耐力時のたわみにも減少がみられた。

耐力やたわみについては、破壊形式とも関るため一概に緊張材の引張性状の影響を論ずることはできないが、劣化した棒材の試験を、はりなどの実使用に近い状態で行った場合、単純引張試験時には現れ難かったような現象による影響が部材挙動に現れるものと考えられる。すなわち、荷重の一部を連続繊維補強材表面の付着によって伝達させるような載荷状態で、マトリクス樹脂の働きによる応力伝達が要求される割合が増加すること、あるいは、はりの軸筋に用いる場合のように、若干の曲げが加わる状態になること等は、はりの挙動に種々の影響を与えるものと考えられる。

7. 結 論

今回の実験において用いた全ての連続繊維補強材について、9000 時間程度までの緊張および浸漬を行った結果、引張強度等の力学特性の顕著な低下は認められず、コンクリート中よりも厳しい促進劣化環境であることを考慮すれば、ほぼ良好な耐久性状が確認された。しかし同時に、現在の時点では力学特性に顕著には現れないものの、性能低下につながる可能性のある内部組織の変化もまた認められた。

内部組織の変化は、主として繊維とマトリクス樹脂の界面に生じるき裂として生じた。このことは、連続繊維補強材が FRP の一種であり、繊維のみあるいはマトリクス樹脂のみの劣化過程をそれぞれ単独に検討することでは、連続繊維補強材の耐久性を考えるうえで不十分であることを意味している。

以下に、今回の研究の範囲内で得られた主要な結果を要約して示す。

(1) アルカリ溶液は水道水に比べて劣化に与える

影響が大きい。アルカリ金属である K と Na は連続繊維補強材の内部に浸入する際、類似した挙動を示し、K の方が浸入傾向が強い。これに対し、アルカリ土金属である Ca は、表面付近や大きなき裂が存在するところのみ集中して存在し、他の 2 つのイオンに比べて連続繊維補強材の内部に浸入する傾向は弱い。

(2) 環境温度 60°C では、20°C と同種の形態で劣化が促進され、促進温度として有用である。

(3) 平行繊維を束ねたアラミド T 棒材の場合、緊張荷重がなければアルカリ溶液の浸入は表面近くに留まり、き裂も表面近くのみが発生する。これに対し、緊張されている場合、アルカリ溶液の浸入はより内部にまで達し、き裂も同様により内部に進む傾向にある。引張性状については繊維自体の高い耐久性と繊維配向の良さから安定した性状を示すが、部材レベルでは課題を残している。

(4) 炭素については表面層の劣化に留まっているが、表層樹脂や巻き付け繊維の劣化が棒材の機械的性質の低下として現れるものと考えられる。アラミド K 棒材についても浸入傾向は低く、組紐形状による利点も見られるが、繊維自体の強アルカリ下での耐久性に若干の問題があるとされるため、今後課題を残している。

(5) 連続繊維補強材の単純な引張強度はあまり低下しない場合でも、連続繊維補強材の性能低下の影響が部材性能に現れる場合がある。

今後は、本実験における常温または高温のアルカリ溶液環境の実際のコンクリート中の環境との関連や、棒材の劣化がコンクリートとの付着挙動に与える影響等について長期的な検討を加える必要があると考えられる。

謝辞: 最後に、本研究の遂行に当たってご指導いただいた藤井學教授(京都大学)、井上晋講師(京都大学)、EPMA の撮影に当たってご支援いただいた川東龍夫助手(近畿大学)、および試料の提供をいただいた

た CCC 研究会会員の皆様に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 小林一輔: 新素材とコンクリート, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.17-28, 1990.8.
- 2) 平賀寿雄: 「なぜ FRP を使うか」コンクリート補強用格子状複合材料, 強化プラスチック, Vol.34, No.6, pp.207-215, 1988.6.
- 3) 六郷恵哲, 真嶋光保: コンクリート構造物への新しい繊維系補強材の利用, 材料, Vol.41, No.471, pp.1817-1822, 1992.12.
- 4) 土木学会: 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 72, 1992.4.
- 5) 日本建築学会連続繊維複合材料研究委員会: 新補強材のコンクリート構造物への利用の現状と問題, 1989.3.
- 6) 例えば, Weitsman, Y.: Moisture Effects and Moisture-induced Damage in Polymeric Composite, *Composite Materials and Structures*, pp.111-120, 1988.
- 7) 丸山武彦: 炭素繊維を中心とする繊維強化プラスチック(FRP)ロッドのコンクリート補強材としての利用に関する実験的研究, 東京大学学位論文, 1991.3.
- 8) 岩本勲, 阿河俊夫, 打田靖夫, 吉川太: コンクリート補強用繊維の基本特性, 土木学会関西支部年次学術講演概要集, 1989.5.
- 9) Corton, H.T.: Micromechanics and Fracture Behavior of Composites, *Modern Composites Materials*, pp.27-105, 1967.
- 10) 奥田聰: 高分子劣化・崩壊のトラブル対策と最新の改質・安定化技術総合資料集, 高分子物質研究会, 1981.5.
- 11) 北條英光, 津田健, 小笠原強: 耐食 FRP 樹脂の腐食形態と腐食速度, 強化プラスチック, Vol.34, No.2, pp.49-54, 1988.2.
- 12) Hull, D.(宮入裕夫, 池上浩三, 金原勲訳): 複合材料入門, 培風館, 1984.
- 13) Polymers-in-Concrete 委員会: 食品工場における塗り床の施工技術と現状, 日本工業技術振興会, 1992.9.
- 14) 魚本健人, 西村次男: プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性, 生産研究, Vol.42, No.5, pp.290-293, 1990.5.

(1994.8.30 受付)

ALKALI RESISTANCE OF FIBER REINFORCED PLASTIC FOR CONCRETE STRUCTURES

Toyo MIYAGAWA, Maki YOSHIDA, Atsushi HATTORI and Kaoru IWAMOTO

Recently, fiber reinforced plastic is applied as reinforcement for concrete. However, few reports have been published concerning its durability. This paper describes the alkali resistance of some kinds of fiber reinforced plastics. The influences of type of fiber, alkali solution, prestressing level and ambient temperature on mechanical behavior are discussed.