

FRP緊張材を用いたPCはりの長期耐久性に関する検証試験

渡部 寛文¹・中井 裕司²・榎本 剛³・魚本 健人⁴

¹川田建設株式会社（〒114-8505 東京都北区滝野川六丁目3-1）
E-mail:hirofumi_watanabe@kawadaken.co.jp

²正会員 前田工織株式会社 メンテナンス推進部（〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町9-9）
E-mail:nakai@mdk.co.jp

³正会員 東京製綱株式会社 TCT推進本部（〒103-8306 東京都中央区日本橋三丁目6-2）
E-mail:enomoto.tsuyoshi@tokyorope.jp

⁴正会員 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:uomoto@pwri.go.jp

連続繊維補強材(FRP)を緊張材とするプレストレストコンクリート(PC)構造物の長期耐久性を検証するため、プレテンションPCはり試験体を2種類製作し、一方は乾湿と温度により外力を加える促進暴露試験を、もう一方は厳しい海洋環境及び一般の環境における自然暴露試験を行った。いずれの試験体もPC鋼材を緊張材とするはりを同時に製作し、一部の試験体は暴露前にひび割れを発生させておくなど試験条件をいくつか設定した上で、暴露前後のはりの性状について比較した。

Key Words : prestressed concrete, pretension, durability, exposure test

1. はじめに

連続繊維補強材(FRP)は、1988 年以来、その優れた性質が注目され、主として緊張材用途で日本国内において 350 件余りの構造物に適用されており、これまでに劣化の報告は無い¹⁾。また、官学産で行った大規模な暴露試験においても FRP の劣化は認められていない²⁾。一方、FRP の線膨張係数がコンクリートと異なること、マトリクス樹脂および有機系繊維が加水分解することから、コンクリートとの付着劣化の問題が指摘されていた³⁾。

そこで本研究では、FRP および PC 鋼より線を緊張材に適用したプレテンション部材に対して環境的な繰返し外力を与えることにより、経時的な劣化性状の定量化を試みた。この外力は、以下に示す 2 つの方法により与えた。

- (a) 飛沫帯と内陸部における計画 15 年間の自然暴露
- (b) 水槽を用いて温度と水量をコントロールすることによる促進暴露

本論文はこれらの結果をまとめ、報告するものである。

2. 試験履歴およびパラメータ

本試験は、最初の計画を1997年に作成し、98年に試験体を製作、99年4月より暴露を開始した。以来、表-1に示すような試験を実施し、一部の試験体は現在も暴露を継続している。なお表中には記していないが、試験体の暴露状況、表面状態の目視確認を数回実施している。

表-1 試験履歴

年	自然暴露	促進暴露
1998 1999	試験体製作 1次載荷, 暴露開始	
2002	破壊試験 塩分量測定 疲労試験, SEM 2次載荷, 再暴露	破壊試験 (150サイクル) SEM 2次載荷, 再暴露
2007		3次載荷, 破壊試験 (300サイクル)
2010	塩分量測定	
2012	暴露継続中	

本試験のパラメータは、緊張材の種類、暴露方法および暴露時間である。評価方法としては、部材の各限界状態を観察する静的載荷試験、緊張材の付着性状を把握するための疲労試験、FRP 緊張材の電子顕微鏡による観察、塩化物イオンのコンクリートへの浸透量の測定と PC 鋼より線の発錆状況の観察である。

試験体の種類を表-2に示す。記号については、自然暴露試験 (N) は、暴露場所を飛沫帯 (I)、内陸部 (T)、緊張材をアラミド (A)、カーボン (C)、PC鋼より線 (S) とし、全24体を用いた。促進暴露試験 (A) は、緊張材を (A) (C) (S) とし、それぞれ3体、3体、5体、計11体用いた。

表-2 試験体の種類

記 号		1次載	暴露	2次載	疲労
自然暴露	N[A,C,S]Control	○		○	
	N[I,T][A,C,S]1	○	○	○	
	N[I,T][A,C,S][2,3]	○	○	○	
	NI[A,C,S]4	○	○	○	○
促進暴露	A[A,C,S]Control			○	
	A[A,C,S]1	○	○	○	
	A[A,C,S][2,3]	○	○	○	
記 号		破壊	SEM	再暴露	体数
自然暴露	N[A,C,S]Control	○			3
	N[I,T][A,C,S]1	○	○		6
	N[I,T][A,C,S][2,3]			○	12
	NI[A,C,S]4	○			3
促進暴露	A[A,C,S]Control	○			3
	A[A,C,S]1	○	○		3
	A[A,C,S][2,3]			○	5

3. 試験方法

(1) 使用材料

使用した緊張材の材料特性を表-3に示す。用いたFRPは、アラミドがTechnora®、カーボンがCFCC®である。線膨張係数は、PC鋼より線(Steel)の場合コンクリートと同程度あるのに対し、FRPの場合ほぼゼロもしくはマイナスである。また、アラミド、カーボン、PC鋼より線の比率で、引張強度は約1:0.7~0.75:1、ヤング率は約1:2:4である。

コンクリートの配合を表-4に示す。これはプレテンション部材用の配合であり、水セメント比が0.372、12時間の蒸気養生で35N/mm²の圧縮強度を目標としている。各材齢の圧縮強度を表-5に示す。コンクリートの圧縮強度が長期間に亘って増進していることがわかる。

表-3 緊張材の材料特性

Material	Aramid	Carbon		Steel
Designation	Technora φ6.0	CFCC φ7.5	CFCC φ10.5	SWPR7A φ9.3
Nominal cross section area (mm ²)	32.5	45.3	79.1	51.6
Nominal diameter (mm)	6.4	7.6	10.0	9.3
Guaranteed capacity (kN)	56.9	57	104	88.8
Tensile Capacity (kN)	62.5	60	114	103
Tensile Strength (kN/mm ²)	1.92 Ratio [1]	1.32 [0.7]	1.44 [0.75]	2.00 [1]
Young's modulus (kN/mm ²)	46 Ratio [1]	104 [2]	104 [2]	197 [4]
Elongation (%)	3.8	1.2	1.2	7.1
Thermal expansion coefficient (×10 ⁻⁶ /°C)	-3	0.6	0.6	12

表-4 コンクリートの配合

W/C (%)	S/A (%)	Air (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	S.P. (kg/m ³)
37.2	41.0	2.0	430	160	731	1060	4.73

表-5 コンクリートの材齢と圧縮強度

	材 齢	強度 (N/mm ²)
プレストレス導入	1 day	38.2
1 次載荷	2 months	65.6
2 次載荷(150 cycles)	44 months	81.2

(2) 試験体の形状

試験体の断面形状を図-1 に示す。試験体はすべてプレテンション方式で製作された。緊張、コンクリート打設、蒸気養生、緊張力の部材への導入を1日間で行った。全緊張材の初期緊張力は、保証引張耐力の約60%とした。せん断補強筋は、ステンレス線材φ3mmを30mmピッチで配置した。

自然暴露試験体の寸法は、桁高200mm、幅150mm、桁長2000mmである。緊張材は、FRPが上下2本ずつ、PC鋼より線が上下1本ずつ配置されている。計算上の曲げ破壊モードは、FRP試験体では緊張材の破断、PC鋼より線試験体は緊張材の降伏後、コンクリートが圧壊する。

促進暴露試験体は、断面が100mm×100mmで、長さが1500mmである。緊張材は、アラミドが2本を1組として、その他が1本を1組として図心に配置した。

(a) 自然暴露試験体

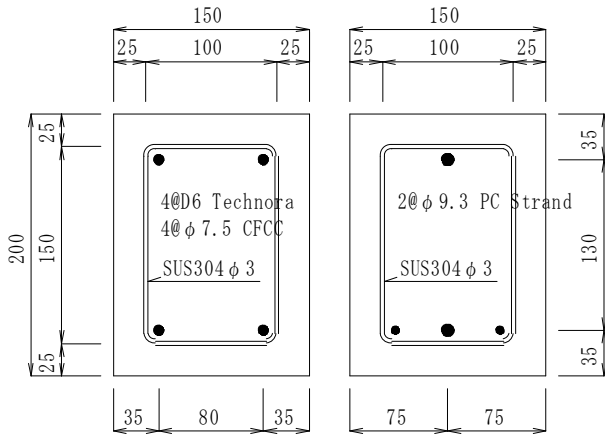


写真-1 飛沫帯の自然暴露

(b) 促進暴露試験体

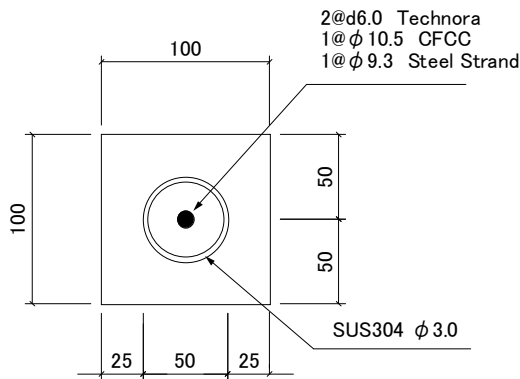


写真-2 内陸部の自然暴露

図-1 試験体寸法

(3) 暴露条件

自然暴露は、静岡県伊東市の海岸に面した飛沫帯（年平均気温15℃，年降水量2300mm）および千葉県千葉市の内陸部（年平均気温15℃，年降水量1300mm）の2箇所に試験体を設置した。また，促進暴露は水循環式の水槽内に試験体を設置し，図-2に示す7日間のサイクルで温度（最高60℃）と湿度（水浸と乾燥）の繰り返し外力を与えた。

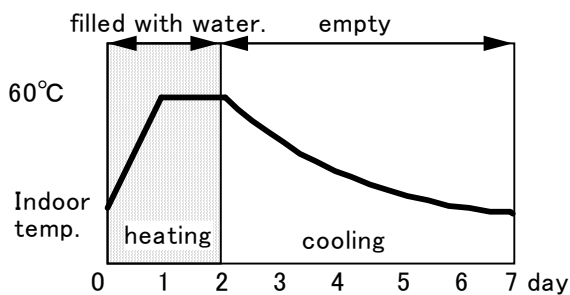


図-2 促進暴露の外力サイクル



写真-3 促進暴露

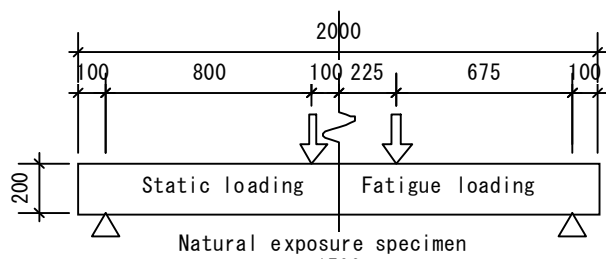
(4) 载荷と測定方法

試験体の载荷方法を図-3に示す。材齢2ヶ月の暴露前の試験体に1次载荷として，曲げ耐力の約60%（自然暴露で35kN，促進暴露で13.5kN）を与え，ひび割れ発

生荷重と本数を測定した。そして 39 ヶ月間の暴露後（促進暴露は 150 サイクル），材齢 44 ヶ月で 1 次載荷と同一の荷重を与え，ひび割れ幅の測定を行った。このうち N[A,C,S]4（内陸部自然暴露）は，変位 4～5mm（振幅 1mm），2Hz の変位制御で 40 万回の疲労載荷を行った。この変位および振幅は，コンクリートの圧縮ひずみがおおよそ 1000μ で，FRP，PC 鋼より線の応力振幅が 100N/mm^2 と，疲労破壊しない限界値として定めた。

その後，N[A,C,S]Control，N[I,T][A,C,S][1,4] および A[A,C,S][Control,1] を曲げ破壊まで載荷し，緒性状の比較を行った。残る試験体は，2 次載荷としてそれぞれの曲げ耐力の 80% まで載荷してダメージを与え，再度暴露を行った。促進暴露試験体は再暴露を 150 サイクル，通算 300 サイクルの外力を与え，暴露終了後に 3 次載荷として曲げ耐力の 60%，80%，そして破壊まで載荷し，性状を確認した。自然暴露試験体は飛沫帯，内陸部ともに再暴露を継続している。

(a) 自然暴露試験体



(b) 促進暴露試験体

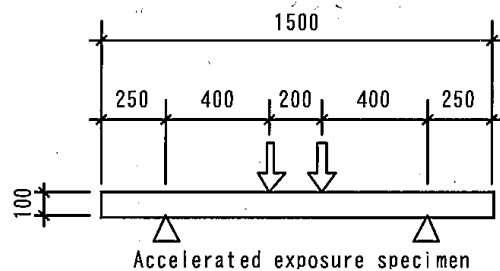


図-3 荷重方法

4. 試験結果

(1) ひび割れ幅とひび割れ本数

1 次載荷の結果を図-4 に示す。ひび割れ本数は，自然暴露，促進暴露ともに 5 本程度生じた。最大ひび割れ幅の平均値は，緊張材にアラミドを用いたものが 0.5mm 程度，カーボンおよび PC 鋼より線を用いたものは

0.3mm 弱であった。また，除荷後の残留ひび割れ幅は，ほとんど観察されなかった。

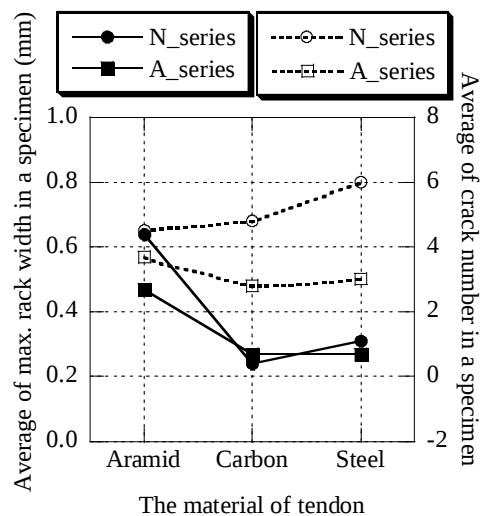


図-4 ひび割れ幅とひび割れ本数（1次載荷）

(2) 各限界状態に対する計算値と実測値の比較

各限界状態に対する計算値と実測値（平均値）の比較を表-6および図-5に示す。crackingは，1次載荷において目視で観察されたひび割れ発生荷重である。Crack reopeningはひび割れ再開荷重で，暴露後（材齢44ヶ月）の載荷において，パイ型変位計で計測したひび割れ幅と荷重の関係における初期の弾性勾配に対して0.002mm軟化側にシフトした時の荷重と，有効プレストレスから計算した荷重の比較である。有効プレストレスは，緊張材のリラクセーション率と図-6に示す収縮ひずみから推定した⁴⁾。Flexural capacityは，曲げ破壊荷重の計算値と実測値の比較である。ここで，計算に用いたコンクリートの終局ひずみは 3500μ とし，各緊張材の材料特性は材料試

表-6 各限界状態に対する計算値と実測値の比較

		自然暴露 (kN)			促進暴露 (kN)		
		A	C	S	A	C	S
Cracking load	Exp.	22.5	23.2	22.6	11.1	10.1	10.1
	Calc.	20.7	21.6	19.3	8.4	8.2	8.1
	E/C	1.09	1.07	1.17	1.32	1.23	1.25
Crack reopening load	Exp.	10.9	12.5	8.6	5.3	5.9	4.0
	Calc.	9.4	10.3	8.0	4.6	4.4	4.3
	E/C	1.16	1.21	1.07	1.16	1.34	0.92
Flexural capacity	Exp.	54.9	57.6	59.4	22.1	25.6	20.0
	Calc.	53.8	51.6	59.4	21.0	24.9	24.0
	E/C	1.02	1.12	1.00	1.05	1.03	0.83



写真4 試験体の載荷状況

験で得られた平均値を用いた。

計算値と実測値の比較では、A_S（促進暴露、PC 鋼より線）を除いて計算値以上の結果を得た。ひび割れ再開荷重は、材齢 2 ヶ月から材齢 44 ヶ月の間にコンクリートの水和反応が進んでいるので、ひび割れ面が再固化した可能性がある。曲げ終局性状は、耐力および破壊モードともに計算値と一致した。この結果、A_Sを除いて、40 ヶ月の暴露による力学的な劣化は生じていないと考えられる。なお、A_Sの耐力低下に関する検討については次節に述べる。

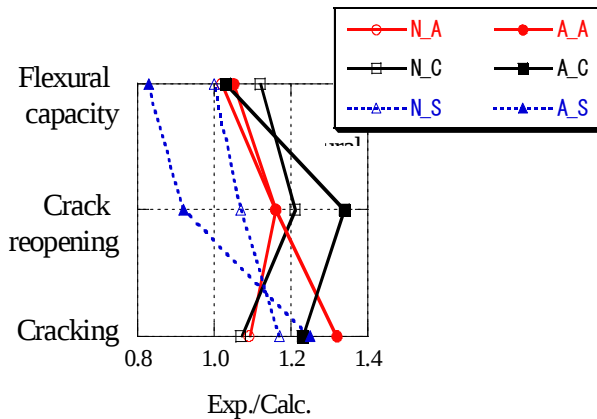


図5 各限界状態に対する計算値と実測値の比較

内陸部自然暴露試験体の一部に埋込型のひずみ計を取り付け、暴露中のひずみ変化を調べた結果を図-6に示す。プレストレスを導入してから44ヶ月の間に、収縮ひずみが約800 μ に達していることが分かる。有効プレストレスの計算にはこの数値を用いた。

(3) 荷重－変位関係

緊張材別の代表的な荷重－変位関係を図-7に示す。自然暴露は、暴露終了後の飛沫帯(Splash zone)、内陸部

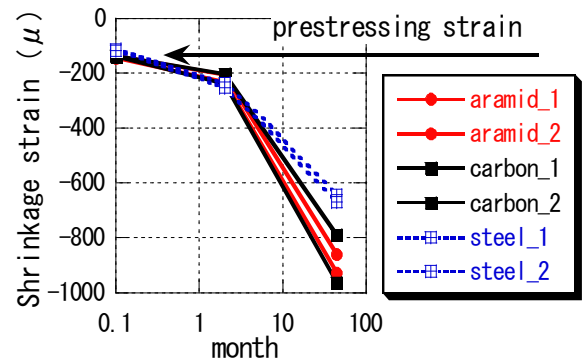
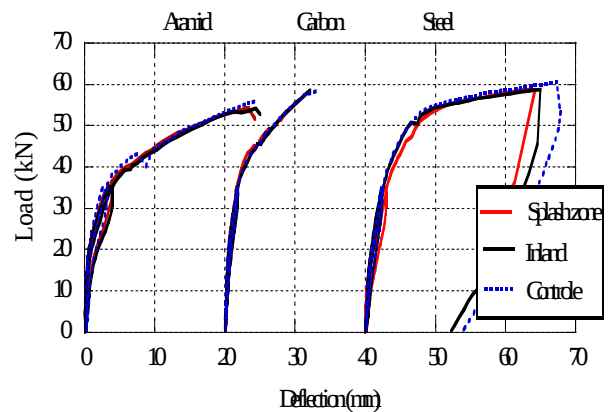


図-6 コンクリートの収縮ひずみ

(Inland)および暴露なしの基準試験体(Control)を、1次載荷と2次載荷について緊張材別に重ねて表示している。グラフの包絡線は、暴露の有無や暴露条件によらずよく一致しており、暴露による試験体の耐荷性能の低下は見られない。

(a) 自然暴露



(b) 促進暴露

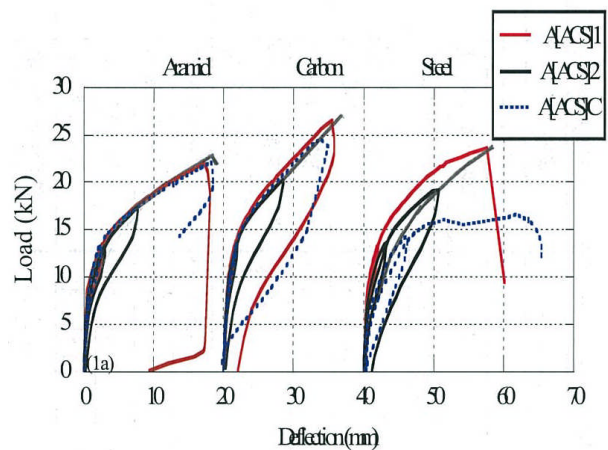


図-7 緊張材別の荷重－変位関係

一方、促進暴露では150サイクル暴露 (A[A,C,S]1), 300サイクル暴露 (A[A,C,S]2)および暴露なし (A[A,C,S]C)を緊張材別に重ねて表示している。アラミドとカーボンについては自然暴露と同様、その包絡線が暴露条件によらずよく一致しており、暴露による耐荷性能の低下は見られない。しかしPC鋼より線(Steel)は、低荷重域(ひび割れ発生荷重程度以下)で包絡線がほぼ一致しているものの、それより上の荷重域では暴露回数によりずれが見られ、特にASC(暴露なし、点線)は曲げ耐力が大きく低下した。

この原因を調べるため、ASCの曲げ載荷後、試験体を上下逆にして負載荷を行い、試験体両端面のPC鋼より線の引き込み量を測定した。その結果を図-8に示す。負載荷により、PC鋼より線の引き込み量は0.25mm以上に達した。この結果より、ASC試験体の耐力低下は定着部のPC鋼より線～コンクリート間のすべりによるプレストレスの減少であると判断した。すべりが発生した原因については、この試験体が養生された状態で屋外に静置保管されていたため、暴露を実施した試験体に比べ乾燥が進んだこと、試験体の断面が小さく、乾燥の影響をより強く受けたことなどが考えられる。NSC(自然暴露の暴露なし)が同条件で保管されていたにもかかわらず耐力低下が見られないのも、断面形状の違いが影響していることを示している。

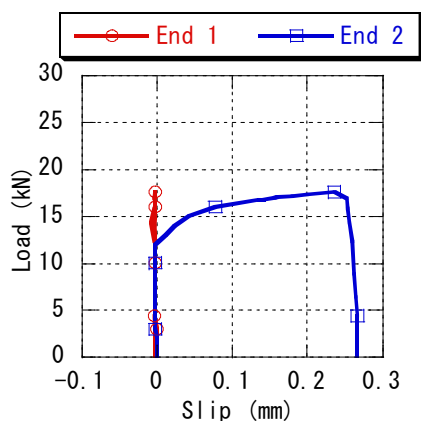


図-8 PC鋼より線の端部引き込み量

また、定着長の観点から考えると、促進暴露試験に用いたプレテンションはりは全長1500mmである。一般に、プレテンション緊張材の定着長は、用いたアラミド緊張材で35φ(320mm)、カーボン緊張材とPC鋼より線で65φ(600mm)とされている。部材としての定着長不足の問題であれば、カーボン試験体でもPC鋼より線と同様の問題が生じる可能性があった。しかし、同一環境に暴露された試験体で、PC鋼より線試験体のみに著しいプレ

ストレスの減少が生じていることから、FRPの線膨張係数や加水分解のリスクよりも、付着に関する高いリスクをPC鋼より線が有していると考えられる。

(4) 疲労試験前後の静的載荷試験

疲労試験は内陸部自然暴露の試験体 (NT[A,C,S]4)に対して実施した。各限界状態に対する計算値と実測値の比較を図-9に示す。アラミド試験体のひび割れ再開荷重(2nd, 疲労試験前)は実測値が計算値を下回っているが、アラミドの平均値としては図-5のとおり実測値の方が大きい。疲労試験後のひび割れ再開荷重(3rd)は総じて計算値を下回る。曲げ破壊荷重は計算値と実測値がほぼ一致しており、これは図-5の傾向と同じで、曲げ破壊荷重については疲労の影響が見られない。試験体の破壊モードが緊張材の破断または降伏であるので、疲労による緊張材の材料的劣化はほとんどないと言える。

疲労試験前後の荷重－変位関係を図-10に示す。アラミド試験体はその包絡線が疲労試験の前後でほぼ一致しているのに対し、カーボン試験体では僅少の、PC鋼より線試験体はさらに大きなずれが生じているのが分かる。

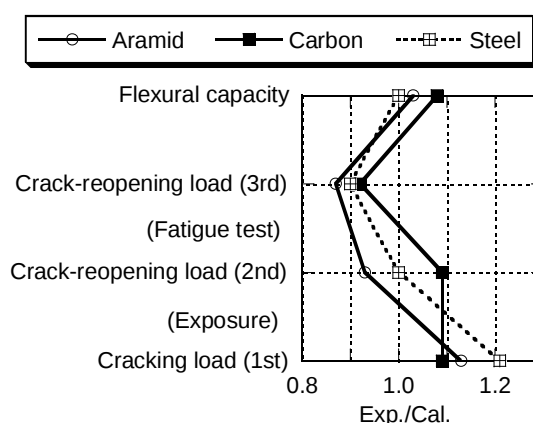


図-9 計算値と実測値の比較(疲労試験前後)

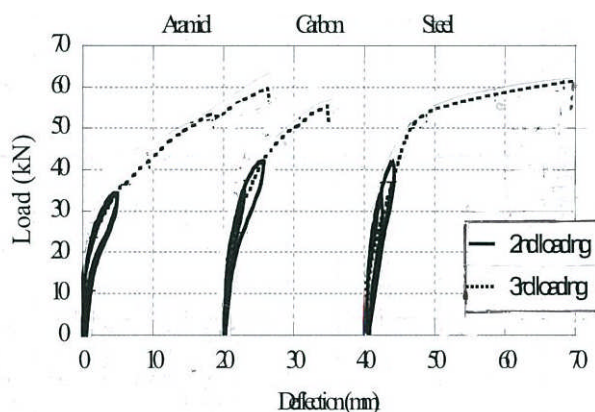


図-10 疲労試験前後の荷重－変位関係

(5) 疲労載荷時の推移

疲労試験は平均変位 4.5mm, 片振幅 0.5mm の変位制御で行なった。各載荷回数における, 平均変位を与えた時の荷重と初期荷重との比率の推移を図-11 に示す。緊張材の引張剛性が大きくなるにつれ ($A < C < S$), また緊張材のコンクリートとの付着が劣化するにつれ, 同じ平均変位を与えたときの荷重は減少が著しくなる。このことは, 剛性の高い PC 鋼より線は付着劣化が連続的に生じ, 逆に剛性の低い FRP は一定範囲の付着劣化が生じるものの, その進行は PC 鋼より線に比較して抑制されるためと考えられる。この結果は, 前節図-10 における包絡線のずれと関連付けて見ることもできる。

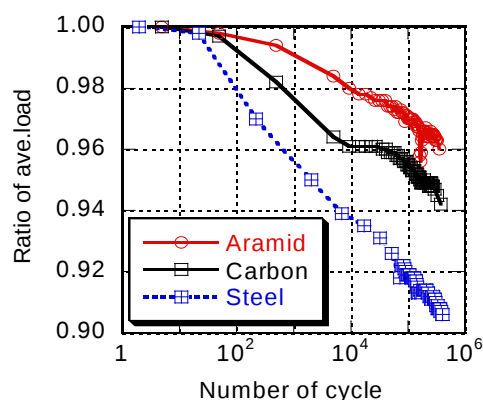


図-11 平均変位と振幅による荷重比率の推移

(6) 電子顕微鏡による緊張材断面の観察

暴露を受けた材齢44ヶ月の試験体から, 静的載荷によるダメージを受けていない部分 (端部より20mm) の FRP 緊張材を取り出し, 電子顕微鏡により断面の観察を行った。その結果, 緊張材の種類, 暴露条件を問わず, 繊維のひび割れや大きな変形, 繊維とマトリクス樹脂とのはく離などは見られなかった。この所見により, FRP

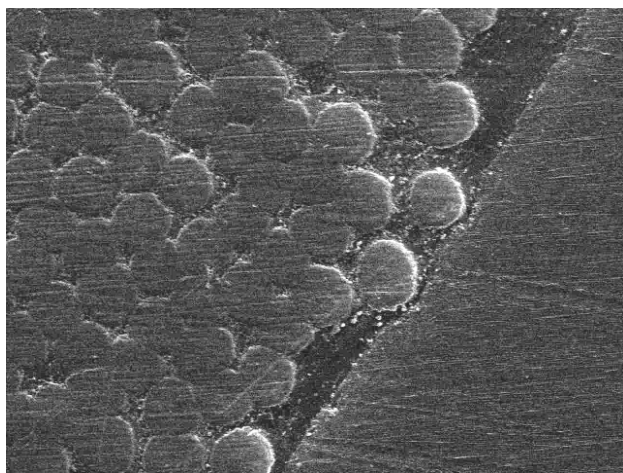


写真-5 アラミド緊張材断面のSEM画像 (×750)

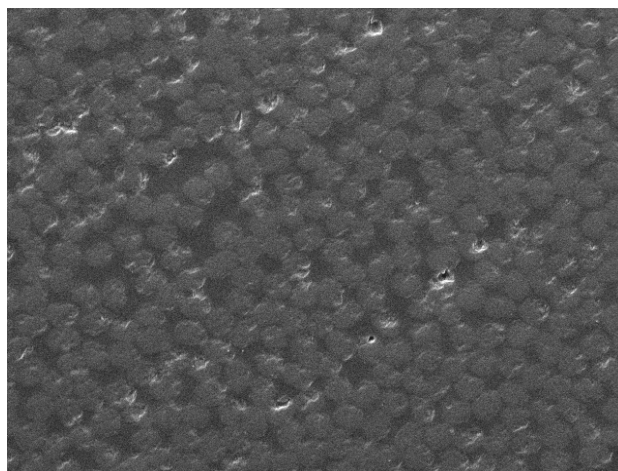


写真-6 カーボン緊張材断面のSEM画像 (×750)

緊張材はコンクリート中において, 線膨張係数の違いや加水分解による繊維の崩壊, 繊維とマトリクス樹脂のはく離は発生しないと言える。

(7) コンクリート中の塩化物イオン浸透量の測定

飛沫帯自然暴露試験体は長期間に亘り海水の浸透を受けてきた。本試験では2002年 (材齢44ヶ月) と2010年 (材齢130ヶ月) の2回, PC鋼より線試験体からコアを採取して塩化物イオンの浸透深さ調査を実施している。調査結果を図-12に示す。

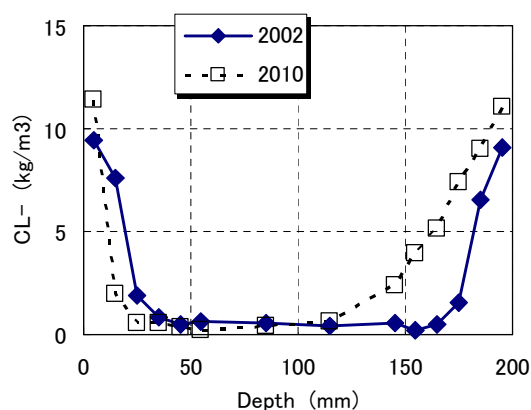


図-12 塩化物イオン濃度分布

グラフは左端が暴露時の上面, 右端が底面である。材齢44ヶ月の時点では上面と底面の濃度分布がほぼ対称で, 濃度の高い範囲は深さ50mm程度までであったが, 材齢130ヶ月では底面の塩分浸透が進み, 高さの中心付近にまで濃度の変動が見られる。ただし, 試験体を貫通したコアに含まれるPC鋼より線には錆の発生が見られなかった。材齢44ヶ月の濃度分布から塩化物イオンの拡散係数を求めたところ, $D=0.66\text{cm}^2/\text{year}$ という値を得た。

(8) 試験体の破壊状況

試験体の破壊状況を代表的なものについて示す。PC 鋼より線試験体を曲げ破壊後に解体してみたが、錆の発生は両端の露出部を除いて認められなかった。



NIAI試験体（飛沫帯自然暴露、アラミド）



AC2,3試験体（促進暴露、カーボン）

写真-7 試験体の破壊状況

5. まとめ

FRP と PC 鋼より線を緊張材としたプレテンションはりに対し、飛沫帯と内陸部における自然暴露試験、および温度と乾湿を外力とした促進暴露試験を実施した結果、以下の知見を得た。

- 1) 暴露条件に関わらず部材のひび割れ発生荷重は計算値以上であった。
- 2) FRP を用いたプレテンションはりの曲げひび割れ後の特性は、PC 鋼より線を用いたはりよりも優れている。
- 3) 促進暴露により、プレストレスは FRP を用いたはりでは安定しており、PC 鋼より線を用いたはりでは減少した。
- 4) FRP の線膨張係数の小ささと、マトリクス樹脂および有機繊維の加水分解等のリスクによる緊張材の付着

劣化は、本研究の範囲内では生じなかった。

- 5) 疲労試験前後の静的载荷において、PC 鋼より線を用いたはりでは包絡線が劣化した。
- 6) 疲労载荷前のひび割れ発生荷重、ひび割れ再開荷重および载荷後の曲げ破壊荷重は、計算値とほぼ一致した。
- 7) 疲労载荷後のひび割れ再開荷重は、すべての試験体で低下した。
- 8) 変位制御の疲労試験で、平均荷重低下割合はPC鋼より線を用いたはりの方が比較的大きかった。
- 9) 暴露後のFRP断面の電子顕微鏡画像では、材料の劣化は認められなかった。
- 10) 長期の飛沫帯自然暴露により、試験体内部の塩化物イオン濃度は高まったが、PC鋼より線の発錆は見られなかった。

謝辞：本研究は、建設用先端複合材技術協会(ACC)の寄付を受けて、東京大学生産技術研究所が実施したものである。長期に亘る試験の継続にご協力いただいた関係各位に対し、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) ACC: ACC Project using new materials, 2007.4
- 2) Fuminori TOMOSAWA, Teruyuki NAKATSUJI, Kozo KIMURA, Koji SAKA, Hiroyasu KAWAGUCHI: Evaluation of ACM reinforcement durability by exposure test, ASME, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE98-4361), 1998
- 3) Rajan Sen, Mohsen Shahawy, Josas Rosas and Satya Sukumar: Durability of Aramid Fiber Reinforced Plastic Pretensioned Elements under Tidal/Thermal Cycles, ACI Structural Journal No.90-S11, pp.95-104, 1999.1
- 4) Hiroshi NAKAI, Hiroshi SAKAI, Tsugio NISHIMURA, Taketo UOMOTO: Durability of aramid and carbon FRP PC beams under natural and accelerated exposure, FRPRCS-6, 2003.7
- 5) 中井裕司, 酒井博士, 西村次男, 魚本健人: 各種連続繊維補強材を用いた PC はりの暴露試験の中間報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.335-340, 2003.7
- 6) 中井裕司, 渡部寛文, 西村次男, 魚本健人: 連続繊維補強材を用いた PC はりの促進暴露試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.2, pp.547-552, 2008.7

TEST FOR DURABILITY OF PC BEAMS USING FRP TENDONS

Hirofumi WATANABE, Hiroshi NAKAI, Tsuyoshi ENOMOTO and Taketo UOMOTO

A long-term study has been undertaken using fiber reinforced polymer (FRP) reinforcement in pretensioned concrete (PC) beams to better understand the durability characteristics of FRP in severe environment. Reference beams were also cast using normal steel reinforcement.