報告 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

中井 裕司*1・酒井 博士*2・西村 次男*3・魚本 健人*4

要旨:連続繊維補強材(CFRM)は,高強度,軽量,高い耐食性を有しているため,厳しい腐食 環境における緊張材としての利用が期待されている。著者らは,各種 CFRM と PC 鋼より線 を緊張材としたプレテンションはりを用いて海洋環境と内陸部における自然暴露と,乾湿と 温度により外力を加える促進暴露を行っている。本論では,このうち3年間にわたる自然暴 露供試体に対して行った塩化物イオン含有量の測定と,AE 計測を伴う疲労試験について報告 する。疲労試験の結果,プレテンションはりに対する疲労載荷による緊張材の付着劣化は, PC 鋼より線より CFRM を緊張材とした方が少ないことがわかった。

キーワード:連続繊緊張材,暴露試験,プレテンションはり,疲労試験,付着,AE計測

1. はじめに

連続繊維補強材(CFRM)は,1988年以来, 主として緊張材用途で日本国内において180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 CFRM の劣化は認めら れていない²⁾。一方,CFRM の線膨張係数がコ ンクリートと異なること,結合樹脂および有機 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る³⁾。

本研究は, CFRM 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乾湿 と温度の繰返し外力を与え,経時的な劣化性状 を明らかにすることにある。外力は,2つの方法 で与えた。1つは,飛沫帯と内陸部における計画 15年間の自然暴露試験である。2つ目は,試験 槽を用いて温度と水量をコントロールすること による促進暴露試験である。供試体は,自然暴 露,促進暴露で,それぞれ24体と13体である。

本論は,この内,39ヶ月間にわたり飛沫帯に 自然暴露した1体のPCはりの塩化物イオン含 有量の測定結果と,内陸部に自然暴露した3体 のPCはりの疲労試験結果を報告する。疲労試験

- の目的は,各緊張材の付着性状の差異によるは りの曲げ性状への影響を明らかにすることであ る。なお,全体の暴露試験計画と,暴露前後の全 試験体の静的載荷試験の評価および CFRM の 電子顕微鏡による観察結果は,FRPRCS-6(July 2003)に報告する予定である。
 - 2. 試験方法
 - 2.1 使用材料

使用した緊張材の材料特性を Table 1 に示 す。用いた CFRM は, Aramid で Technora[®], Carbon で 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 あるのに対して, CFRM の場合マイナスもし くはゼロである。また,ヤング率は, Aramid,

Carbon, Steel の比率で約 1:2:4 である。 使用したコンクリートの配合を Table 2 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 Table 3 に示す。コ ンクリートの圧縮強度が長期間に渡って増進 していることがわかる。

*1 住友建設(株) 技術部 (正会員)
*2 (株)ピ-エス三菱 技術推進部 (正会員)
*3 東京大学 生産技術研究所 (正会員)
*4 東京大学教授 生産技術研究所 工博 (正会員)

Material	Aramid	Carbon	Steel	Rebar	
Designation	Technora	CFCC	SWPR-7A	SWM-P	
Designation	φ6.0	φ7.5	φ9.3	φ 6 .0	
Nominal cross section area (mm^2)	32.5	45.3	51.61	28.26	
Nominal diameter (mm)	6.43	7.6	9.3	6	
Guaranteed capacity (kN)	56.9	57	88.8	15.3	
Tensile Capacity (kN)	62.5	60	103	18.6	
Young's modulus (kN/mm ²)	46	104	197	206	
Elongation (%)	3.8	1.2	7.1		
Thermal expansion coefficient (x10-6/ $^{\circ}\!$	-3	0.6	12	12	

Table 1 Properties of tendons and reinforcements

Table 2 Mixture proportion of concrete

W/C	S/A	Air	Cement	Water	Fine A.	Coarse A.	S.P.
(%)	(%)	(%)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
37.2	41.0	2.0	430	160	731	1060	4.73

Table 3 Compressive strength (N/mm²)

	Age	Ave.
Introduce prestress	1 day	38.2
Initial loading	2 months	65.6
2nd loading	44 months	81.2

2.2 供試体の諸元

供試体の断面図を Fig.1 に示す。供試体はプ 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 24 時間で行なった。全緊張材の初期緊張力は, 保証引張耐力の 62%とした。ステンレス製の補 強筋は 30mm ピッチで配置されている。

供試体の寸法は,桁高 200mm,幅 150mm, 桁長 2000mm である。緊張材は,CFRM,Steel で,それぞれ上下に各2本,各1本が配置され ている。計算上の曲げ破壊モードは,緊張材に CFRM を用いた場合はその破断であり,Steelの 場合はその降伏後,コンクリートが圧縮破壊す る。

自然暴露は,太平洋に面した年平均気温15 で年降水量2300mmの伊豆半島の飛沫帯と,年 平均気温15 で年降水量1300mmの千葉市内の



Fig.1 Specimen cross sections



Specimen using concrete, which had a W/C ratio of 0.372, was exposed for 39 months at splash zone of Izu peninsula

Fig.2 Relationship cl⁻ concentration and depth

内陸部において,緊張材ごとに4体を実施した。

飛沫帯に暴露した供試体の塩化物イオンの含 有量を Fig.2 に示す。解体調査の結果, PC 鋼よ り線には発錆は生じていなかった。

内陸部の供試体は,コンクリート土間に設置 した90mmの敷き木の上で暴露した。このうち本 論で紹介する疲労試験に供した供試体は,各緊 張材に1体の計3体である。埋め込みひずみ計で 測定した供試体の乾燥収縮とクリープによる収 縮ひずみを Fig.3 に示す。プレストレス導入後 44ヶ月で約800µの収縮ひずみが観測された。 2.3 載荷と計測方法

供試体の載荷方法を Fig.4 に示す。材齢 2 ヶ 月の暴露前の供試体に処女載荷(Initial loading) として,曲げ耐力の約 65% (14kN m)を与え, ひび割れ荷重と本数を測定した。39 ヵ月間の暴 露後,材齢 44 ヶ月で処女載荷と同一の曲げモー メントを与え (2nd loading),ひび割れ幅の測定 を行った。その後,疲労載荷は,変位 4~5mm の変位制御で 40 万回疲労載荷を 2Hz で行った。 この変位および振幅は,コンクリートの圧縮歪 がおおよそ 1000 µ (。=60N/mm²)で,CFRM, Steel の応力振幅が 100N/mm²と,疲労破壊しな い限界値として定めた。その後,曲げ破壊まで 載荷(3rd loading)した。

疲労試験の前後に行なった静的載荷試験にお
 いて,AE 計測を行った。計測装置は PAC 社製
 DiSP 4 チャンネルで,センサーは PAC 社製 R6I
 (プリアンプ内蔵 60kHz 共振型)である。



Fig.3 Concrete strain due to shrinkage excluding thermal expansion of the exposed specimens at inland site



Fig.4 Loading system

3. 試験結果

3.1 疲労載荷前後の静的載荷試験結果

静的載荷で得られた曲げモーメントと変位お よび最大ひび割れ幅の関係を Fig.5 と Fig.6 に示 す。注目すべきは, Steel 供試体のみ包絡線が劣 化していることである。なお,各供試体の破壊 形態は,計算値と一致した。

ひび割れ荷重・ひび割れ再開荷重(疲労試験 前後)・曲げ破壊荷重と計算値の比較を Table 4 と Fig.7 に示す。ひび割れ荷重は,処女載荷に

		Prestre	Effective		Compres	Tensile	Gracking		Decompression moment					
Specimen	Jacking	ssing	prest	ress	ive	strength	mom	ent	2nd le	ading	3rd load	ling	Flexural c	apacity
	force	stress	in tendon		stress	of con.	Exp./Cal. ratio		Exp./Cal. ratio		Exp./Cal. ratio		Exp./Cal. ratio	
	(kN)	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	(kNm)		(kNm)		(kNm)		(kNm)	
Aramid							9.4	1 12	3.50	0.02	3.25	0.87	22.08	1.03
	138.8	1068	866	0.811	3.75	4.53	8.29	1.15	3.75	0.95	3.75		21.52	
Carbon							9.4	1.00	4.48 4.10	1.09	3.77	0.92	22.31	1.08
	142.5	786	679	0.863	4.10	4.53	8.63	1.09			4.10		20.64	
Steel							9.4	1 21	3.21	1.00	2.88	0.90	23.72	1.00
	111.0	1076	931	0.866	3.20	4.53	7.74	1.21	3.20		3.20		23.76	

Table 4 Results of static load tests

おいて目視でひび割れが観察された時点の荷重 である。ひび割れ再開荷重は,Fig.6に示す曲げ モーメントひび割れ関係において,各載荷にお ける 1.5kNm までの割線勾配に対して 0.002mm 軟化側にシフトした時点の荷重とした。ひび割 れ再開荷重は,論理的には最初の勾配の変化点 であるが,計測器の精度と測定間隔の関係から このように定義した。ひび割れ再開の計算値は, 有効プレストレスから算定されたデコンプレッ ションモーメントである。有効プレストレスは, 緊張材の純リラクセーション率と Fig.3 に示し た収縮ひずみを用いて推定した⁴⁾。曲げ破壊の 計算値は,コンクリートの終局歪を 3500 µ とし, 各緊張材の材料特性は材料試験で得られた平均 値を用いて算出した。

Fig.7 に示すように,実験値は計算値とほぼ-致した。Aramid 供試体で計測したひび割れ再開 荷重は計算値を下回っているが,他の7つの Aramid 供試体におけるひび割れ再開荷重の平 均値は計算値以上になっている。疲労試験後, ひび割れ再開荷重は総じて計算値を下回る。 Fig.6 に示すようにひび割れ再開荷重付近の曲 げモーメントとひび割れ幅の関係において,ひ び割れ周辺の引張り剛性の低下が認められる。 これは,ひび割れ周辺で緊張材の付着劣化が進 んだためテンションスティフネスが減少したた めと考えられる。

3.2 疲労載荷時の推移

疲労試験は平均変位 4.5mm,片振幅変位 0.5mmの変位制御で行なった。Aramid Carbon, Steel 供試体の初期の平均曲げモーメントと片 振幅曲げモーメントは,それぞれ 12.2kNm と 1.1kNm,15.5 と 1.2,17.4 と 1.5 で始められた。 また,最大ひび割れ幅は,それぞれ 0.7mm, 0.5mm,0.5mm であり,コンクリートの圧縮ひ ずみは各供試体ともほぼ 1000 µ であった。疲労 試験が各構成材料にほぼ等しくダメージを与え るように設定できた。





and deflection, or maximum crack width



Fig.6 Relationship between bending moment and crack width at small range



Fig.7 Comparison of results to calculated values

る比率の推移を Fig.8 に示す。緊張材の引張剛 性の大きくなるにつれ,また緊張材のコンクリ ートとの付着特性が劣るにつれ,作用した平均 曲げモーメントは減少が著しい。このことは, 剛性が高い Steel は付着劣化が連続的に生じ,剛 性が低い CFRM は一定範囲の付着劣化が生じる が,その進行は Steel に比較して抑制されるため と考える。

また,疲労回数が増加すると作用した振幅モ ーメントは,CFRM供試体では増大しているが, Steel供試体では減少傾向を示した。この原因は, CFRM供試体では部分的な付着が劣化すること によりテンションスティフネスが減少し,荷重 たわみ関係の接線剛性が硬化し,同一振幅変位 に対する振幅荷重が増大したものと考えられる。 一方,Steel供試体では付着がひび割れ間隔以上 で劣化したために剛性が軟化したと推定される。 このことは,包絡線の劣化からも理解できる。



Fig.8 Relationship between number of cycles and ratio of average or amplitude load for starting load







Aramid

Carbon

Steel

Fig.10 Relationship between bending moment and event location

CFRM 緊張材を用いた部材は,高い荷重の繰 返し状態において,Steelを用いた部材よりも, 優れた付着性能を有し,損傷の進行は少ないと いえる。

3.3 AE 計測の結果

曲げモーメントと累積 AE ヒット計数値の関 係を Fig.9 に示す。ハンチングしている部分が 疲労試験における荷重振幅範囲を示している。 すべての供試体において,疲労載荷に対してカ イザー効果がほぼ成立していると考えられる。 また,緊張材周辺の付着破壊によるせん断型ひ び割れも,疲労載荷の影響で発生しない状況に 至っていると思われる⁵⁾。Carbon 供試体はイベ ント数が少なく,コンクリートに損傷を与える ことなく緊張材の破断で終局を迎えたことを端 的に表現している。

曲げモーメントと全イベント中 2%の座標評 定の結果を Fig.10 に示す。図中の と が疲労 載荷前後のそれぞれのイベント発生地点を1次 元座標上で表している。2nd loading では,純曲 げスパンを中心に曲げひび割れの分布にしたが うように逆台形状にイベントが発生している。 一方,3rd loading では,せん断スパンでも多数 のイベントが観察されている。とくに,各供試 体とも終局荷重付近でせん断スパンにおけるイ ベントの発生が顕著になり,定着に関わる問題 が生じ始めていたことがわかる。

4. まとめ

CFRM と PC 鋼より線を緊張材としたプレテ ンションはりの3年間に渡る自然暴露を行い, 塩化物イオン濃度の測定と曲げ疲労破壊しない 限界の疲労試験を行った結果をまとめると次の とおりである。

(1) 飛沫帯に暴露したはりの表面における塩化物イオン濃度および塩化物イオンの拡散係数は、コンクリート標準示方書とほぼ一致した。

(2) 疲労試験前後の静的載荷において, PC 鋼より線を用いたはりは包絡線が劣化した。

(3) 疲労載荷前のひび割れ荷重,ひび割れ再開

荷重および疲労載荷後の曲げ破壊荷重は , 計算 値とほぼ一致した。

(4) 疲労載荷後のひび割れ再開荷重は,すべての供試体で低下した。

(5) 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が比較的大きかっ た。一方,振幅はCFRMを用いたはりは増加し, PC 鋼より線を用いたはりは減少した。

(6) 疲労試験前後の AE 計測において,カイザ ー効果が顕著に現れた。曲げ耐力付近では定着 部を含むはり全体で AE イベントが生じた。

謝辞

本実験の実施に当たり ACC 倶楽部の人的・ 資金的援助と東京大学生産技術研究所魚本研究 室の研究生・大学院生を始めとする各位に多大 のご協力を頂き,感謝の意を表します。

参考文献

- 1)ACC: ACC Club Project using new materials, Oct.2002
- 2) Fuminori TOMOSAWA, Teruyuki NAKATSUJ I, Kozo KIMURA, Koji SAKA, Hiroyasu KA WAGUCHI: Evaluation of ACM reinforcemen t durability by exposure test, ASME, 17th Int ernational Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE98-4361), 1998
- 3) Rajan Sen, Mohsen Shahawy, Josas Rosas an d Satya Sukumar: Durability of Aramid Fiber Reinforced Plastic Pretensioned Elements und er Tidal/ThermalCycles, ACI Structural Journa 1 no.90-S11, pp.95-104, Jan./Feb.1999
- 4)Research Committee on CFRM in JSCE: Rec ommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber R einforcing Materials, Sep.1997
- 5)湯山茂徳,岡本享久:AE法によるコンクリー ト構造物の健全度診断,非破壊検査第49巻2 号,pp.101-107,Feb.2000