

論文 連続繊維棒材を緊張材としたPCはりの水中疲労性状

水田崇志*¹・児島孝之*²・高木宣章*³・松尾真紀*⁴

要旨：アラミド・炭素繊維棒材を緊張材としたプレテンションPCはりを作製し、試験環境（気中・水中）を変えて疲労試験を行った。気中疲労試験ではすべて棒材破断で破壊したが、水中疲労試験での破壊形式は棒材破断と圧縮部コンクリートの剥離による破壊の2つの形式に分かれた。気中疲労では棒材破断したはりであっても、水中疲労ではコンクリートの剥離によって破壊するはりがあった。そのようなはりは気中と比較して疲労寿命が著しく低下した。これは、圧縮部コンクリートのひび割れが水の作用により著しく進展し、コンクリートの圧縮に対する抵抗力が低下したものと推察される。

キーワード：連続繊維棒材、疲労、水中疲労寿命、上限荷重比、応力振幅

1. はじめに

連続繊維棒材は高強度、耐腐食性等の特徴を有するが、これらの特徴を有効に利用する場合、海洋構造物等におけるPC緊張材として使用することが考えられる。その場合、常時湿潤条件下において繰り返し荷重を受けることになる。本研究は連続繊維棒材を緊張材としたプレテンションPCはりの疲労寿命に及ぼす断面形状、上限荷重、応力振幅、試験環境（気中・水中）等の影響について検討を行った。

2. 実験概要

実験計画を表-1に、供試体の実験要因を表-2に示す。緊張材として、組紐状アラミド繊維棒材（AFRP）の呼び径6mm、8mmの2種類と、より線状炭素繊維棒材（CFRP）の呼び径7.5mm（便宜上、φ8と表示）を使用した。比較用緊張材として用いたPC鋼線の呼び径は7mmである。緊張材の機械的性質を表-3に示す。供試体寸法および荷重条件を図-1に、供試体の表示法を図-2に示す。従来より行ってきた矩形断面はり[1]と比較して、より実構造物に近く、ひび割れ発生荷重が破壊荷重の50%程度になるようにT形断面はりを作製した。比較要因として、①緊張材としてAFRPとCFRPを使用する場合の比較、

表-1 実験計画

断面形状	緊張材の種類	下側棒材の初期緊張力	プレストン量 (kgf/cm ²)	試験環境	
				気中	水中
矩形	AFRP φ6	0.6Pu	46.5(45.0)	○	○
		0.7Pu	56.5	○	
	AFRP φ8	0.4Pu	56.5(59.5)	○	○
	CFRP φ8*	0.6Pu	84.6	○	
	PC鋼線 φ7 (SWPD1)	0.4Pu	56.5(56.5)	○	○
T形	AFRP φ8	0.6Pu	74.6	○	
	CFRP φ8	0.5Pu	51.1	○	○

Pu : 棒材引張耐力 上限荷重比: 静的耐力に対する比
 プレストン量: 初期緊張力より算定した、コンクリート下縁の値
 ()は水中疲労を行った供試体の値
 * : 今回載荷試験を行ったシリーズ

表-2 供試体の実験要因

タイプ	断面	試験環境	緊張材の種類
a	矩形	気中	CFRP
b	T形	気中・水中	AFRP・CFRP
c	矩形	気中	AFRP・PC鋼線
d	矩形	水中	AFRP・PC鋼線

タイプc・d [1]参照

- *1 (株)オリエンタルコンサルタンツ 工修(正会員)
- *2 立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)
- *3 立命館大学助教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)
- *4 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻

②矩形断面とT形断面の比較、③試験環境を気中と水中に変化させた場合の比較について検討を行った。

<矩形断面>下側棒材の初期緊張力は、AFRPでは棒材引張耐力 P_u の70%、60%、40%、CFRPでは P_u の60%、PC鋼線では P_u の40%とし、上側棒材の緊張

力は、応力調整のため下側棒材緊張力の60%としたプレテンション方式PCはりである。せん断補強筋は、すべて径3mmのAFRPで、ピッチ35mmのフープ状に配置した。供試体は15×15×210cmとし、かぶり(緊張材中心までの距離)2.5cmの位置に棒材を上下2本ずつ配置した。支持スパン150cm、曲げスパン50cmの3等分点載荷で、せん断スパン有効高さ比(a/d)は4.0である。

<T形断面>下側棒材の初期緊張力は、AFRP・CFRPともに棒材引張耐力 P_u の50%とし、上側棒材の緊張力は、応力調整のため下側棒材緊張力の60%としたプレテンション方式のT形PCはりである。せん断補強筋は、径5mmのCFRPで、ピッチ35mmのフープ状に配置した。供試体は、フランジ幅20cm、フランジ厚6cm、ウェブ幅12cm、はり高さ24cmで、かぶり3cmの位置に棒材を上下2本ずつ配置したプレテンションT形PCはりである。支持スパン180cm、曲げスパン30cm、せん断スパン有効高さ比(a/d)は3.6である。

コンクリートの示方配合を表-4に示す。タイプa・bは、早強ポルトランドセメントを使用し、プレストレス導入時(材令4~5日)のコンクリート強度は約40~500kgf/cm²、載荷試験時(材令2~3カ月)のコンクリート強度はタイプaで約700kgf/cm²、タイプbで約600kgf/cm²であった。また、水中疲労試験用はりは載荷試験前に1週間以上水に浸漬させ、十分な湿潤状態にした後、疲労試験を実施した。

疲労試験前に静的載荷試験を実施し、ひび割れ発生荷重、静的破壊荷重を確認した。疲労試験は下限荷重をいずれも0.5tfとした部分片振り載荷である。載荷速度は2~6Hzとし、所定回数ごとに試験機を止め、上限荷重まで静的に載荷して供試体のたわみ、コンクリートと棒材のひずみを測定し、ひび割れ進展状況を観察した。200万回繰返し載荷しても破壊しなかつたはりは、静的載荷により破壊させ、残存静的強度を測定した。AT8-5-50WとCT8-5-60W供試体は所定の上限荷重比ではひび割れが発生しないため、気中の200万回疲労強度付近の上限荷重まで初載荷を行い、その後所定の上限荷重で繰返し載荷を行った。

表-3 棒材の機械的性質

種類	AFRP	AFRP	CFRP	CFRP	
	(a,c,d)	(タイプb)	(タイプa)	(タイプb)	
呼び径(mm)	3	8	7.5	5	7.5
破断荷重(kgf)	940	7060	6800	2020	7130
引張強度(kgf/cm ²)	16850	17300	22400	20000	23500
弾性係数(kgf/cm ²)	750000	740000	1410000	1380000	1420000
伸び(%)	2.25	2.3	1.7	1.6	1.7

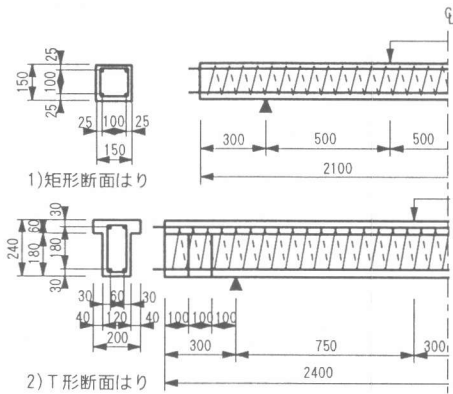


図-1 供試体寸法および載荷条件



図-2 供試体の表示法

表-4 コンクリートの示方配合

タイプ	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)
			W	C	S	G	
a	44	49	176	400	856	925	4.8 C×1.2%
b	40	45	165	413	788	100	4.1 C×1.0%

混和剤：高性能減水剤(β-ナフタルスルホン酸系)
表-2中のタイプc・dの配合[1]参照

3. 実験結果および考察

本論文では、従来から行ってきた矩形断面はりに関する試験結果[1]も合わせて検討する。

3.1 静的曲げ耐荷性状

静的試験結果を表-5に示す。従来の軸力と曲げモーメントに対する終局強度理論より、静的試験を行った供試体について理論解析を行った。条件として、①補強材とコンクリートの付着を完全とみなし、ひずみ分布は平面保持の仮定に従う。②上縁のコンクリートひずみの値を固定し、下縁のひずみの値を任意に仮定する。③コンクリートの圧縮および引張、補強材の引張に対する応力-ひずみ曲線を図-3に示すように非線形モデルと仮定する。④圧縮強度 f_c' 、引張強度 f_t に実験値を使用し、補強材の弾性係数に公称値を使用する。⑤断面の破壊は圧縮ひずみが終局ひずみに達した場合か、補強材の引張ひずみが破断ひずみに達した場合に生じる。以上の条件をもとに、タイプbはりの荷重とたわみ（実験値と解析値）の関係を図-4に示す。コンクリートの引張応力-ひずみ曲線を最大引張応力に達した後に緩やかに下げることにより、ひび割れが発生する付近でのたわみが非常に実験値と近い値を示した。たわみの実験値がひび割れ発生後線形であり、理論値と良く一致することから、補強材である連続繊維棒材とコンクリートの付着が、十分に確保されているものと考えられる。AT8-5SとCT8-5S供試体は、棒材破断により破壊した。解析値も棒材の引張ひずみが、破断時のひずみに達して破壊する結果となり、終局耐力も実験値に近い値を示した。これより、連続繊維棒材を緊張材としたプレテンションPCはりの曲げ性状は、従来の曲げ理論を用いて部材の変形性状および終局耐力を算定することが可能であると考えられる。連続繊維棒材を緊張材として用いたはりは、きわめて脆性的な破壊となり、特にかぶりの少ないはりでは、コンクリート引張縁のかぶりが飛び散る現象が観察された。この現象は、AFRPを緊張材として用いたはりの方がPC鋼線およびCFRPを緊張材として用いたはりよりも著しい傾向にあった。これは、棒材が破断すると同時に連続繊維棒材自体の弾性収縮による影響が大きいものと考えられ、棒材自体の弾性

表-5 静的試験結果

供試体名	終局耐力(tf)		供試体名	終局耐力(tf)	
	実験値	理論値		実験値	理論値
A 6-7-S	4.06	3.68	AT8-5-S	7.60	7.61
A 8-4-S	6.43	6.04	C 8-6-S	6.70	6.86
A 6-6-SW	3.60	3.62	CT8-5-S	7.44	7.97
A 8-4-SW	7.29	6.67	PC7-4-S	5.82	5.85

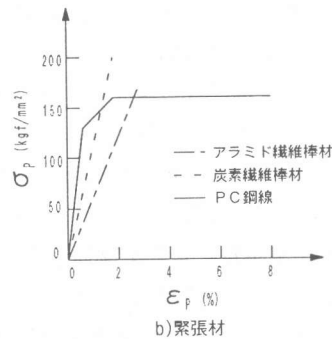
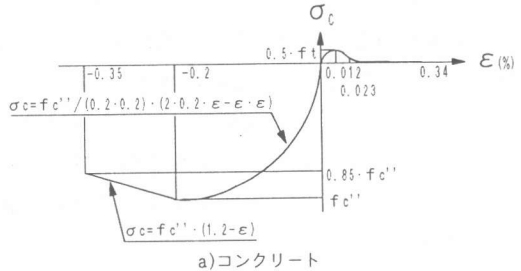


図-3 応力とひずみの関係

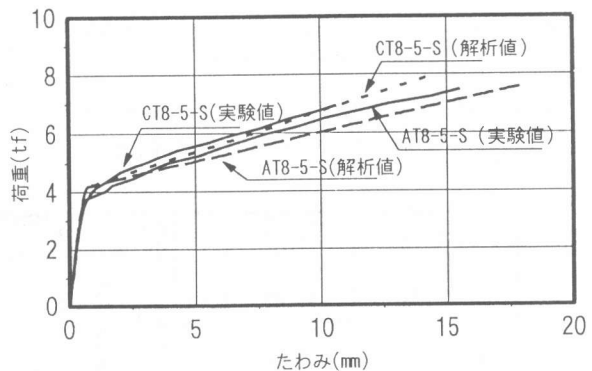


図-4 荷重とたわみの関係(静的試験)

として用いたはりは、きわめて脆性的な破壊となり、特にかぶりの少ないはりでは、コンクリート引張縁のかぶりが飛び散る現象が観察された。この現象は、AFRPを緊張材として用いたはりの方がPC鋼線およびCFRPを緊張材として用いたはりよりも著しい傾向にあった。これは、棒材が破断すると同時に連続繊維棒材自体の弾性収縮による影響が大きいものと考えられ、棒材自体の弾性

係数も何らかの影響を及ぼすものと考えられる。また、コンクリートと連続繊維棒材との付着も要因としてあげられる。

3. 2 気中疲労性状

疲労試験結果を表-6に、気中疲労試験における上限荷重比と破壊までの繰返し回数のおよび引張側緊張材の処女載荷時の応力振幅（上限荷重時の応力-下限荷重時の応力）と破壊までの繰返し回数の関係を各々図-5、図-6に示す。ここでの応力振幅は、解析値を使用する。気中疲労試験を行ったのは、すべて曲げスパン内の引張側棒材の破断によって破壊に至った。上限荷重比で表した200万回疲労強度は、CFRPを緊張材として用いたよりは約85%、AFRPを緊張材として用いたよりは約70%、PC鋼線を用いたよりは約55%となった。

上限荷重比で表す場合には、緊張材の径、初期緊張力、断面形状の影響は顕著に表れず、緊張材が同一種類のものであるならばS-N曲線が同一線上に近づくものと考えられる。T形断面シリーズで上限荷重比で表した場合の200万回疲労強度は、CFRPを緊張材として使用したCT8-5シリーズで約85%、AFRPを緊張材として使用したAT8-5シリーズでは約70%となり、CFRPを緊張材として用いたよりは大きい結果となった。AFRPを緊張材としたプレテンションPCはりも同様にPC鋼線を使用したはりと同様以上の疲労性状を有することを確認しているが[1]、CFRPを緊張材としたプレテンションPCはりも同様にPC鋼線およびAFRPを使用したはりと同様以上の疲労性状を有し、200万回疲労強

表-6 疲労試験結果

断面	供試体名	上限荷重(比)	Pcr (tf)	破壊回数 (回)	破壊形式	Pu (tf)	
気中疲労 矩形断面	A 6-6-60	2.44tf(60%)	2.43	2,000,000	S(B)	3.70	
	70	2.84tf(70%)	2.41	1,553,440	F(B)	—	
	80	3.25tf(80%)	2.54	46,000	F(B)	—	
	A 6-7-70	2.84tf(70%)	2.84	2,000,000	S(B)	4.00	
	75	3.05tf(75%)	2.85	596,330	F(B)	—	
	80	3.25tf(80%)	2.75	6,950	F(B)	—	
	A 8-4-45	2.89tf(45%)	2.70	2,000,000	S(B)	6.90	
	55	3.54tf(55%)	2.75	2,000,000	S(B)	6.90	
	65	4.18tf(65%)	2.75	2,000,000	S(B)	6.30	
	75	4.82tf(75%)	2.75	23,630	F(B)	—	
	C 8-6-70*	4.76tf(70%)	3.25	2,000,000	S(B)	6.80	
	80*	5.44tf(80%)	3.54	2,000,000	S(B)	6.80	
	90*	6.12tf(90%)	3.72	1,497,860	F(B)	—	
	P 7-4-52	3.00tf(52%)	3.00	2,000,000	S(B)	6.20	
	60	3.50tf(60%)	3.00	434,250	F(B)	—	
P 7-6-60	3.50tf(60%)	3.25	1,547,300	F(B)	—		
70	4.07tf(70%)	3.24	225,460	F(B)	—		
水中疲労	A 6-6-70W	2.52tf(70%)	3.42	569,230	F(B)	—	
	94W	3.40tf(94%)	3.40	1,080	F(B)	—	
	A 8-4-40W	2.92tf(40%)	3.60	2,000,000	S(B)	6.70	
	52W	3.80tf(52%)	3.78	261,770	F(C)	—	
	60W	4.37tf(60%)	3.65	12,800	F(C)	—	
	70W	5.10tf(70%)	3.65	1,670	F(B)	—	
	P 7-4-50W	2.91tf(50%)	3.78	2,000,000	F(B)	—	
	60W	3.50tf(60%)	3.88	337,400	F(B)	—	
T形断面 気中疲労	AT8-5-70	5.32tf(70%)	4.50	2,000,000	S(B)	—	
	75	5.70tf(75%)	3.75	443,300	F(B)	7.10	
	CT8-5-80	5.95tf(80%)	4.25	2,000,000	S(B)	7.50	
	85	6.32tf(85%)	4.50	2,000,000	S(B)	8.00	
	90	6.70tf(90%)	4.25	1,400,000	F(B)	—	
	T形断面 水中疲労	AT8-5-50W	3.80tf(50%)	4.50	2,000,000	S(B)	8.70
		55W	4.18tf(55%)	4.50	1,249,700	F(C)	—
		60W	4.56tf(60%)	4.56	461,200	F(C)	—
		CT8-5-60W	4.46tf(60%)	4.50	1,920,000	F(C)	—
		65W	4.84tf(65%)	4.75	2,000,000	S(B)	9.00
		70W	5.20tf(70%)	4.25	399,180	F(C)	—
		80W	5.95tf(80%)	4.50	45,420	F(C)	—
85W		6.32tf(85%)	4.50	40,000	F(C)	—	

Pcr: ひびわれ発生荷重 F: 疲労破壊
Pu: 残存静的強度 S: 200万回後の静的破壊
(): 静的耐力に対する比 B: 棒材破断
C: 剥離破壊

*: 今回載荷試験を行った供試体

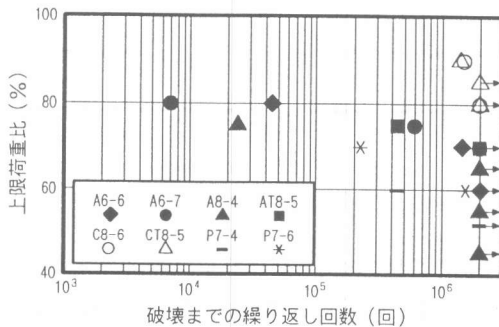


図-5 上限荷重比と繰返し回数の関係(気中)

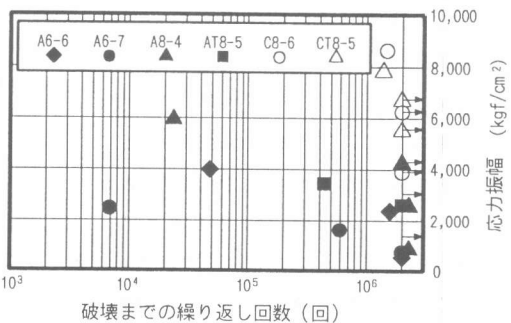


図-6 応力振幅と繰返し回数の関係(気中)

度は大きくなった。この200万回疲労強度を応力振幅で表すと、各々7000kgf/cm² (CT8-5シリーズ)、3000kgf/cm² (AT8-5シリーズ)となり、下限応力の差はあるものの上限荷重比で表す場合と同様にCFRPを緊張材として用いたほうが大きい結果となった。矩形断面のシリーズも同様の傾向にあるのでCFRPの方がAFRPよりも棒材自体の疲労限が高いものと考えられる。AFRPを用いたA6-6、A6-7シリーズの初期緊張力は、それぞれ棒材引張耐力の60%と70%である。上限荷重比で表した場合の200万回疲労強度は、2つのシリーズとも約70%であり同程度であった。しかし、応力振幅で表した場合には、それぞれ約2000kgf/cm²、1500kgf/cm²となった。応力振幅で表す場合には、初期緊張力が大きいほど疲労強度が低下する傾向にあり、他のシリーズにおいても同様の傾向が見られた。また、アラミド繊維棒材の引張疲労強度は下限応力の影響を受け、下限応力が大きくなるにつれて疲労強度が低下するという報告がある[2]。これより、連続繊維棒材を緊張材として使用する場合、初期緊張力の決定には十分な配慮が必要であると考えられる。

3.3 水中疲労性状

水中疲労における上限荷重比と破壊までの繰返し回数との関係を図-7に示す。矩形断面はりは気中ではすべて曲げスパン内の棒材破断で破壊した。しかし、水中では、棒材破断と圧縮部コンクリートの剥離による破壊に分かれた。はりの変形が大きくなるほどコンクリートの剥離によって破壊(剥離破壊)する傾向がある。水中においても棒材破断で破壊するはりの疲労寿命は、試験環境の影響が少なく、気中・水中疲労寿命は同程度である。剥離破壊するはりは、疲労寿命が気中と比べると著しく低下する[1]。T形断面はりは、気中ではすべて曲げスパン内の棒材破断によって破壊したが、水中で200万回繰返し載荷に耐えなかつたはりは、すべて剥離破壊であり、気中・水中の破壊形式が異なった。矩形断面と同様、水中疲労で剥離破壊するはりは、気中疲労寿命と比べると著しく低下する結果となり、たわみが大きくなるほど剥離破壊するはりの疲労寿命は低下する傾向にあった。

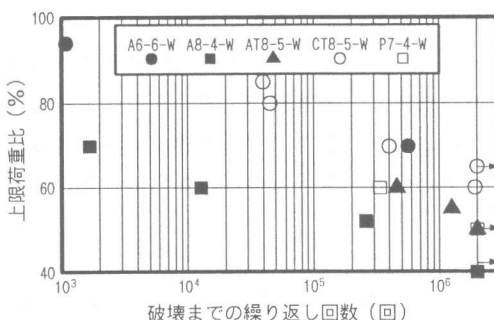


図-7 上限荷重比と繰返し回数の関係(水中)

3.4 変形性状および破壊状況

矩形断面はりの剥離破壊とは、曲げひび割れが繰返し載荷に伴って、圧縮棒材に沿うように進展し、この軸方向のひび割れが水の作用によって加速され、最終的にコンクリートの圧縮部が浮き上がるように破壊したものである。

T形断面はりの水中疲労においては、曲げひび割れがフランジに達するあたりから、多数のひび割れに分岐して進展する傾向があった。特に、載荷点付近の曲げひび割れが、水の作用により著しく分岐して進展するが、プレストレスの効果によりその後数万回の繰返し載荷に耐えるものの、最終的に圧縮部コンクリートが粉碎もしくは剥離して破壊に至った。

T形断面はりの気中・水中のたわみと破壊までの繰返し回数の関係を図-8に示す。鉄筋コンクリートはりの水中疲労試験では、曲げスパン内のひび割れ幅や曲率に試験環境の顕著な影響は見られないが、せん断ひび割れは水の作用によって急激に進展し、変形が大きくなり、水中疲労寿命が著しく低下することが知られている[3][4]。

T形断面はりの水中疲労で上限荷重が大きい場合に、せん断スパンにもひび割れが発生したが、

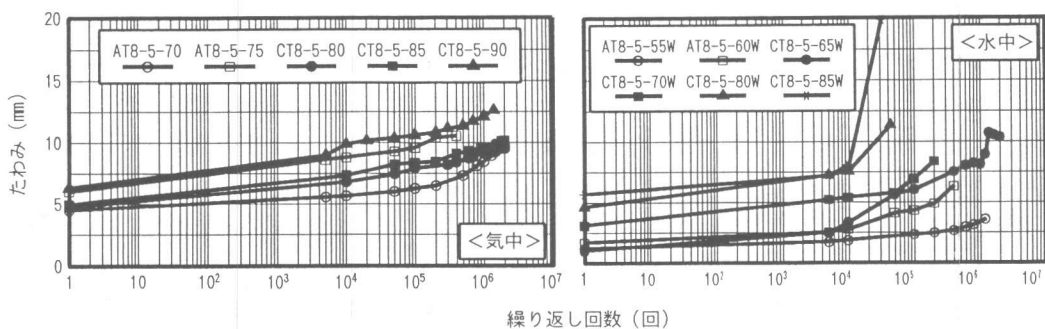


図-8 たわみと破壊までの繰り返し回数の関係

せん断ひび割れは、水の作用により著しく進展する状況は観察されず、プレストレスがせん断ひび割れの進展防止に有効に作用しているものと推察される。水中疲労でたわみが急激に上昇する傾向が見られ、これは水の作用による曲げひび割れの進展によりコンクリートの圧縮に対する抵抗力が低下し、中立軸が上昇したものと考えられる。また、水中疲労でせん断ひび割れおよび曲げひび割れから新たに引張側棒材に沿うようにしてひび割れが進展した供試体があった。コンクリートと軸方向緊張材の付着が水の作用により低下し、付着劣化が生じているものと考えられる。

4. まとめ

- (1)連続繊維棒材を緊張材としたプレテンションPCはりの静的荷重下の変形性状および終局耐力は、従来の曲げ理論を用いて算定することが可能である。
- (2)CFRPを緊張材として用いたはりの疲労寿命は、気中、水中とも、AFRPを緊張材として用いたはりより大きくなった。
- (3)気中ではすべて棒材破断により破壊したが、水中では多くのはりがコンクリートの剥離によって破壊に至った。コンクリートの剥離によって破壊するはりは、疲労寿命が著しく低下した。
- (4)T形はりで、剥離破壊するはりは水の作用で曲げひび割れが急激に進展し、コンクリートの圧縮に対する抵抗力が低下する。そのため、中立軸が上昇し、たわみが急激に増加する。

謝辞：本実験の供試体作製にあたり、ピーシー橋梁(株)竹内正喜氏に多大な協力を頂きましたことを付記し、御礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] 崎山・児島・高木：アラミド繊維を緊張材としたPCはりの疲労性状に及ぼす水の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.1039-1044，1994
- [2] 岩本・児島・崎山：アラミド繊維棒材の引張疲労特性，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集，1993
- [3] 前岡・今井・児島：鉄筋コンクリートはりの疲労寿命に及ぼす水の影響に関する研究，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，1983
- [4] N.Takagi・M.Ikeda・T.Kojima：Fatigue of Reinforced Silica Fume Concrete Beam under the Environment of Water or Chloride Solution，ACI SP-123，Vol.2，pp.1229-1249，1992