

連続繊維補強材を緊張材としたPC梁の 気中と水中における疲労特性

岩本 勲¹・児島孝之²・高木宣章³・松尾真紀⁴

¹正会員 工博 近畿コンクリート工業開発部 (〒530-0047 大阪市北区西天満 5-14-10)

²フェロー会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-0058 草津市野路東 1-1-1)

³正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-0058 草津市野路東 1-1-1)

⁴学生員 工修 立命館大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒525-0058 草津市野路東 1-1-1)

(現在・東京工業大学工学部土木工学科助手/〒152-8852 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

連続繊維補強材は、その耐腐食特性から海洋構造物等の高腐食環境下での緊張材としての利用が期待されており、そのような環境下でもひびわれを許容するPC構造物への適用も可能となる。本研究は、アラミドおよび炭素連続繊維補強材とPC鋼線を緊張材とした、プレテンション方式PC梁の曲げ疲労試験を気中と水中とで実施し、それらの環境が疲労寿命および破壊性状におよぼす影響、ならびにPC梁の構成材料(コンクリートと連続繊維補強材)の疲労強度と梁の疲労強度との関係について検討したものである。

Key Words : aramid fiber tendon, carbon fiber tendon, fatigue, fatigue life, upper load ratio, prestress

1. はじめに

従来、耐久であると考えられていたコンクリート構造物において、海水等に起因する補強鋼材の塩化物腐食が問題となっている。近年、その一対策として、高強度で軽量、耐腐食性にすぐれた連続繊維補強材を緊張材として利用しようという試みがある。我が国でも、連続繊維補強材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、最近では橋梁等の緊張材への適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連続繊維補強材の適用は、いまだに試験施工的な色合いが強く、ことに連続繊維補強材で補強されたコンクリート部材の、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)}。

連続繊維補強材の耐久性のうち、引張疲労強度特性については、魚本らは⁶⁾アラミド、ガラス、炭素連続繊維補強材の載荷応力と、対数で表した破壊までの繰返し回数との間には直線関係があることを示したが、疲労限界は明らかにされていない。また、組み紐状のアラミド連続繊維補強材の200万回疲労強度は、その引張強度の80%という試験結果がある⁷⁾ものの、実用的な疲労強度式の提案までには至っていない。

連続繊維補強材を緊張材としたPC梁の疲労特性に関する研究は、さらに少なく、実用性に主眼をおいた実験が行われているにすぎない。丸山らの実験では⁸⁾アラミド、炭素、PC鋼線を用いたPC梁の疲労試験において、引張破壊型のPC梁は、何れの緊張材でも梁の耐力の70%の上限荷重で、60万回の繰返し載荷に耐えた。そして、炭素連続繊維補強材を緊張材としたPC梁は、繰返し載荷による曲げ剛性の低下は小さいが、アラミド連続繊維補強材を緊張材としたPC梁は曲げ剛性の低下が大きく、引張破壊型でも圧縮疲労破壊型に移行するおそれがあることが指摘されている。また三上らによると⁹⁾、アラミド連続繊維補強材を緊張材としたPC梁が圧縮疲労破壊する場合は、土木学会示方書で示されたコンクリートの疲労強度式で、疲労寿命が安全側に推定されることが示されている。これらの研究は何れも気中での実験結果であり、しかも連続繊維補強材単独の疲労強度と、それを用いたPC梁の疲労強度との関係や、緊張材の疲労破断型以外の破壊形式の疲労特性、水中での疲労性状等に関して、さらなる検討が必要である。

本研究では、連続繊維補強材の特長を活かして、腐食環境下である海洋構造物への適用を想定して、波浪等の繰返し荷重が、連続繊維補強材を緊張材

表-1 緊張材の力学特性

	アラミド			炭素		PC鋼線
直径 (mm)	3	6	8	5	7.5	7
弾性係数 (GPa)	74	63~73	65~73	135	138~139	196
引張強度 (MPa)	1652	1491~1638	1255~1697	1961	1920~2305	1554
破断伸び (%)	2.25	2.24~2.40	1.90~2.33	2.30	1.70	8.0

表-2 コンクリートの配合と強度

種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					圧縮強度 MPa	弾性係数 MPa
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤		
A	44	49	176	400	861	905	5.6	77	4.1 × 10 ⁴
B	44	49	176	400	856	925	4.8	71	4.0 × 10 ⁴
C	40	46	176	440	788	954	8.0	56	3.9 × 10 ⁴
D	40	45	165	413	788	1000	4.1	65	4.0 × 10 ⁴

としたPC梁の疲労特性におよぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

プレテンション方式で制作されたPC梁を、気中と水中とで曲げ疲労試験を実施した。緊張材の種類、緊張材の初期緊張力、せん断スパン有効高さ比、スターラップ、環境(水)がPC梁の疲労性状におよぼす影響について検討した。

(1) 構成材料

緊張材として、直径6mmと8mmの組紐状アラミド連続繊維補強材、直径7.5mmのより線状炭素連続繊維補強材と比較のために、インデント加工された直径7mmのPC鋼線を用いた。直径7.5mmの炭素連続繊維補強材は、本論文の供試体名では「8」と表記する。せん断補強筋は、直径3mmの組紐状アラミド連続繊維補強材、または直径5mmのより線状炭素連続繊維補強材を用いた。これら補強材の力学特性を表-1に示す。連続繊維補強材は、同一メーカーから購入したが、供試体作成時期によって力学特性は変動している。連続繊維補強材の緊張力は、それぞれの供試体作成時の引張強度を基準とした。

コンクリートの配合を表-2に示す。供試体作成時期により若干配合を変更し、配合Cでは超早強セメントを用い、それ以外の配合では早強セメントを用いた。コンクリート強度は、配合Cでは56MPaで、配合Aでは77MPaであった。また、コンクリートの弾性係数は、何れの配合でも約4.0 × 10⁴ MPaであった。コンクリート強度のばらつきは、

それぞれの強度で梁の静的耐力を求めることによって考慮した。用いたコンクリートの配合は、実験結果を示した表-4、5に記した。

(2) 供試体

供試体の形状寸法は、図-1に示すように、断面が15 × 15cmの正方形で長さが2.1mの矩形梁と、フランジ幅が20cm、ウェブ幅が12cmで高さが24cm、長さが2.4mのT形梁である。何れの供試体も、上下各2本の緊張材を配置したプレテンション方式PC梁であり、静的には連続繊維補強材の引張破断型、PC鋼線の場合は緊張材降伏型で設計した。使用した緊張材のプレストレス伝達率は、アラミド連続繊維補強材が約30φ、炭素連続繊維補強材が約35φ、PC鋼線が約50φ(φ:緊張材の直径)であったので、載荷時の支持点は端部から30cmとした。

矩形梁では、緊張材の初期緊張力が梁の疲労特性におよぼす影響について検討するために、アラミド連続繊維補強材について、引張側緊張材の初期緊張力を、用いた連続繊維補強材引張強度の40%、60%と70%の3水準とし、供試体打設時期によって緊張力を変えた。炭素連続繊維補強材は、アラミド連続繊維補強材の疲労特性と比較検討するために、引張側緊張材の初期緊張力は、緊張材引張強度の60%の1水準とした。PC鋼線もアラミド連続繊維補強材の疲労特性と比較検討するために、引張側緊張材の初期緊張力は、一般に用いられる緊張材引張強度の60%と、プレストレス量をアラミド連続繊維補強材のそれと同等とするために40%の2水準とした。圧縮側緊張材の緊張力は、梁上縁が無載荷時に引張状態とならないようにするために、何れの

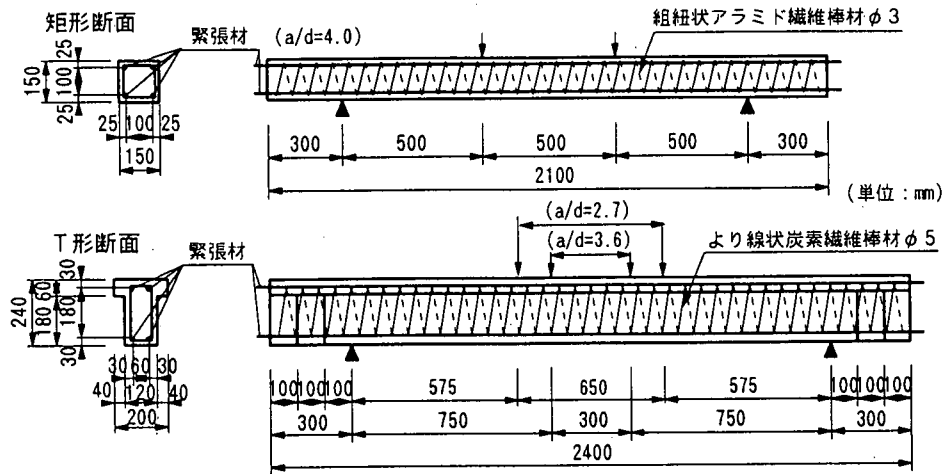


図-1 供試体の形状寸法および荷重方法

供試体も引張側緊張力の 60%とした。矩形梁供試体のせん断補強筋には、 $\phi 3$ mmのアラミド連続繊維補強材を 35mmのピッチで配置した。

T形梁では、アラミド、炭素連続繊維補強材とも引張側緊張材の初期緊張力は、緊張材引張強度の 50%の 1 水準とした。圧縮側緊張材の緊張力は、矩形梁と同様に引張側緊張力の 60%とした。T形梁供試体のせん断補強筋には、 $\phi 5$ mmの炭素連続繊維補強材を 35mmのピッチで配置した。せん断補強筋の補強効果を確認するために、緊張材がアラミドと炭素連続繊維補強材のうち各 1 体（水中疲労試験の ATT8-5-70WS と CTT8-5-85WS 供試体の 2 体）は、せん断補強筋のない供試体を作成した。

(3) 荷重方法

矩形梁の荷重は、支持スパンが 1.5m、せん断スパンと曲げスパンが 0.5m の 3 等分点 2 点荷重とした。この時のせん断スパン/有効高さ比 (a/d) は、4.0 である。T形梁では支持スパンが 1.8m、せん断スパンが 0.75m、曲げスパンが 0.3m の 2 点荷重と、支持スパンは同じでせん断スパンが 0.575m、曲げスパンが 0.65m の 2 点荷重の 2 通りとした。それぞれのせん断スパン/有効高さ比 (a/d) は、3.6 と 2.7 である。

疲労試験に先だって、ひびわれ発生荷重や静的破壊荷重、破壊性状等を確認するために、それぞれの供試体について、静的曲げ試験を実施した。繰り返し荷重では、上限荷重をその静的破壊荷重の 45 ~ 90%とし、下限荷重は何れの供試体も、試験中に供試体が移動しない最小荷重である 4.9kN とした。水中での疲労試験における上限荷重も、気中での静的破壊荷重を基準とした。

表-3 試験時の緊張材とコンクリートの応力 (気中・計算値)

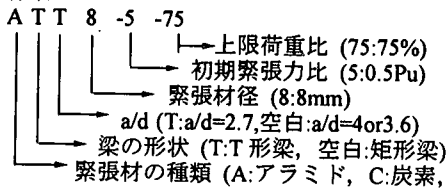
供試体名	緊張材応力(MPa)		コンクリート応力(MPa)	
	下限荷重時	上限荷重時	下限荷重時	上限荷重時
A 6-6-60	924	975	3.8	16.5
-70	〃	1038	〃	26.4
-80	〃	1213	〃	40.1
A 6-7-70	1083	1151	4.1	20.1
-75	〃	1179	〃	24.3
-80	〃	1233	〃	30.8
A 8-4-45	543	599	4.0	19.4
-55	〃	691	〃	32.1
-65	〃	856	〃	43.1
-75	〃	1046	〃	55.2
AT8-5-70	801	953	1.7	35.3
-75	〃	1045	〃	40.5
ATT8-5-75	800	1045	1.6	40.5
C 8-6-70	1007	1362	4.8	35.3
-80	〃	1512	〃	44.0
-90	〃	1721	〃	54.6
CT8-5-80	909	1555	1.6	41.3
-85	〃	1692	〃	43.9
-90	〃	1871	〃	48.4
CTT8-5-90	908	1871	1.5	48.4
P 7-4-52	633	771	3.7	20.5
-60	〃	901	〃	28.5
P 7-6-60	945	1053	4.5	21.3
-70	〃	1153	〃	29.3

荷重速度は、試験機的能力から 2 ~ 6Hz とし、正弦波による繰返し荷重とした。この程度の荷重速度の変化は、疲労試験結果に影響しないと考えた。所定回数ごとに試験機を止めて上限荷重まで静的に荷重し、供試体のたわみ、コンクリートおよび緊張材のひずみを測定し、ひびわれの進展状況を観察した。200 万回繰返し荷重しても破壊しなかった供試体は、200 万回繰返し荷重後静的荷重によって破壊させ、残存静的耐力を測定した。気中での疲労試験は全部で 24 体、水中での疲労試験は 20 体実施

表-4 気中疲労試験結果

供試体名	配合	上限荷重 (比)	ひびわれ荷重	破壊回数	残存耐力 (比)	破壊形式
A 6-6-60	A	23.9 kN (0.6)	23.8 kN	2,000,000*1	36.3 kN (0.90)	S(B)
	-70	27.9 kN (0.7)	23.6 kN	1,553,440	—	F(B)
	-80	31.9 kN (0.8)	24.9 kN	46,000	—	F(B)
A 6-7-70	A	27.9 kN (0.7)	27.9 kN	2,000,000*1	39.2 kN (0.98)	S(B)
	-75	29.9 kN (0.75)	27.9 kN	596,330	—	F(B)
	-80	31.9 kN (0.8)	27.0 kN	6,950	—	F(B)
A 6-7-S	A	39.8 kN (終局)	24.9 kN	静的載荷	—	(B)
A 8-4-45	A	28.3 kN (0.45)	26.5 kN	2,000,000*1	67.7 kN (1.08)	S(B)*2
	-55	34.7 kN (0.55)	27.0 kN	2,000,000*1	66.6 kN (1.06)	S(B)
	-65	41.0 kN (0.65)	27.0 kN	2,000,000*1	61.8 kN (0.98)	S(B)
	-75	47.3 kN (0.75)	27.0 kN	23,630	—	F(B)*2
A 8-4-S	A	63.0 kN (終局)	26.7 kN	静的載荷	—	(C)*2
AT 8-5-70	D	52.2 kN (0.7)	44.1 kN	2,000,000*1	69.6 kN (0.95)	S(B)
	-75	55.9 kN (0.75)	36.8 kN	443,300	—	F(B)
AT 8-5-S	D	74.5 kN (終局)	39.2 kN	静的載荷	—	(B)
ATT 8-5-75	D	72.6 kN (0.75)	51.5 kN	153,440	—	F(B)
C 8-6-70	B	46.7 kN (0.7)	31.9 kN	2,000,000*1	66.7 kN (1.00)	S(B)
	-80	53.3 kN (0.8)	34.7 kN	2,000,000*1	65.7 kN (0.99)	S(B)
	-90	60.0 kN (0.9)	36.5 kN	1,497,860	—	F(B)
C 8-6-S	B	66.7 kN (終局)	36.3 kN	静的載荷	—	(B)
CT 8-5-80	D	58.3 kN (0.8)	41.7 kN	2,000,000*1	78.5 kN (1.07)	S(B)
	-85	62.0 kN (0.85)	44.1 kN	2,000,000*1	73.5 kN (1.00)	S(B)
	-90	65.7 kN (0.9)	41.7 kN	1,400,000	—	F(B)
CT 8-5-S	D	72.9 kN (終局)	38.4 kN	静的載荷	—	(B)
CTT 8-5-90	D	85.3 kN (0.9)	51.5 kN	2,000,000*1	95.1 kN (0.99)	S(B)
P 7-4-52	A	29.4 kN (0.52)	29.4 kN	2,000,000*1	60.8 kN (1.07)	S(B)
	-60	34.3 kN (0.6)	29.4 kN	434,250	—	F(B)
P 7-4-S	A	57.0 kN (終局)	25.9 kN	静的載荷	—	(C)
P 7-6-60	A	34.3 kN (0.6)	31.9 kN	1,547,300	—	F(B)
	-70	39.9 kN (0.7)	31.8 kN	225,460	—	F(B)

供試体名



破壊形式

- F : 疲労破壊
- S : 200 万回繰り返し載荷後静的載荷で破壊
- *1 : 200 万回で破壊しなかった
- (B) : 緊張材の破断
- (C) : コンクリートの圧縮破壊
- *2 : せん断スパンで破壊

した。水中での疲労試験に際しては、試験前の一週間以上は供試体を水中に浸漬し、疲労試験は水槽の中で供試体が完全に水中に没する状態で実施した。

3. 気中での疲労試験結果と考察

(1) 破壊状況および変形状

疲労試験結果を表-4に示す。表には静的載荷試験結果も併せて示した。また、試験時の下限荷重および上限荷重による引張側緊張材と圧縮側コンクリートの、応力の計算値を表-3に示す。

200 万回の繰り返し載荷に耐えた供試体は、その後の静的載荷時に引張側緊張材の破断により破壊した。繰り返し載荷中に疲労破壊した供試体も、総て引張側緊張材の疲労破断により破壊した。ただし、アラミド A8-4-45 と A8-4-75 供試体の緊張材の破断位置は、せん断スパン内であり、それ以外の供試体

は総て曲げスパン内で破断した。アラミド連続繊維補強材を緊張材とした矩形梁では、終局近くで緊張材に沿う付着割裂ひびわれが発生し、終局時には緊張材の破断と同時にかぶりコンクリートが爆裂する現象が観察された。他の緊張材や、アラミド連続繊維補強材でもかぶりコンクリートを 5mm 厚くした T 形梁では、そのような現象は観察されなかった。このことから、付着割裂ひびわれを防ぐためには、緊張材の種類によって必要なかぶり厚さが異なることが考えられる。ただし、本研究だけでは必要かぶり厚さを規定できないので、別途研究¹⁰⁾が必要であると考えられる。

図-2に、ひびわれ幅と繰返し回数との関係を示す。繰返し載荷に伴うひびわれ幅の増加やたわみの増加も、アラミド連続繊維補強材を緊張材とした供試体は他の緊張材の供試体よりも大きいことから、付着劣化に伴う剛性低下が原因であると思われる。

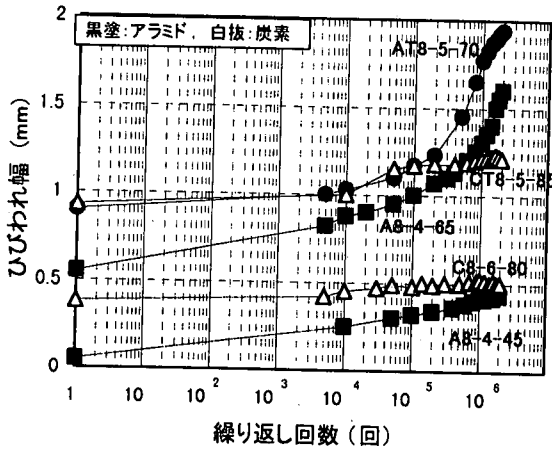


図-2 ひびわれ幅と繰返し回数との関係

アラミド連続繊維補強材は、コンクリートに対して滑りを伴いながら付着力を維持しているが、炭素連続繊維補強材は最大付着力まで殆ど滑りを伴わないことによる¹¹⁾附着性状の差であると考えられる。

(2) 上限荷重比が梁の疲労寿命におよぼす影響

疲労試験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-3に示す。アラミド連続繊維補強材を緊張材とした供試体では、緊張材の径、初期緊張力、プレストレス量、せん断スパン/有効高さ比が疲労強度におよぼす影響は小さく、ほぼ一つのS-N曲線で表される。その200万回疲労強度は、静的強度の約65~70%となった。炭素連続繊維補強材を緊張材とした供試体も、初期緊張力、プレストレス量、せん断スパン/有効高さ比が疲労強度におよぼす影響は小さいが、破壊回数の小さな供試体が少なく、S-N曲線は得られなかった。その200万回疲労強度は、静的強度の85%以上と推定される。PC鋼線を緊張材とした供試体は、連続繊維補強材を緊張材とした供試体よりも低い疲労強度を示し、200万回疲労強度は静的強度の約55%となった。

初期緊張力がその緊張材引張強度の60%以下の供試体、例えばA8-4-65、AT8-5-70、C8-6-80等では、ひびわれ発生荷重を20%以上上回る載荷荷重においても、200万回の繰返し載荷に耐えた。そして、200万回繰返し載荷後の残存静的耐力比も概ね1に近い値となった。しかし、初期緊張力を70%として、ひびわれ発生荷重を7%上回る載荷荷重としたA6-7-75供試体では、約60万回の繰返し載荷で緊張材が疲労破断した。このように、初期緊張力を大きくすると、ひびわれ発生から破壊までの遷移領域が小さくなるため、ひびわれ発生後それを上回る繰返し載荷を受けた場合は、疲労寿命が極

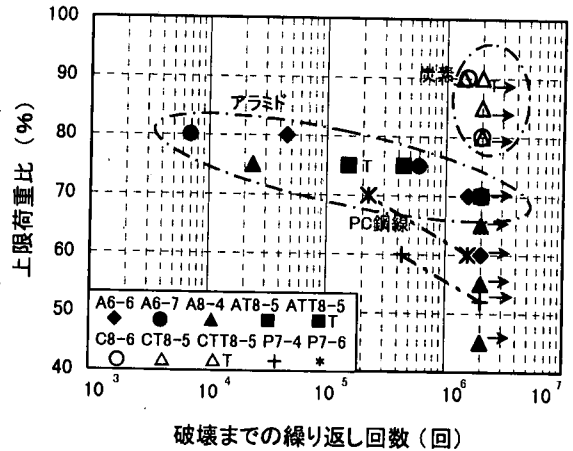


図-3 上限荷重比と破壊回数との関係

端に短くなり危険な状態となることが考えられる。

これらのことから、梁の疲労強度は緊張材の種類によって異なるが、連続繊維補強材を適切な初期緊張力とすることにより、気中環境下でひびわれを許容するPC部材の緊張材として利用可能であると考えられる。本研究では、アラミド連続繊維補強材の初期緊張力は、引張強度の60%以下が適切であると思われる。

(3) 緊張材の応力振幅が梁の疲労寿命におよぼす影響

梁中の引張側緊張材の応力振幅と破壊までの繰返し回数との関係を図-4に示す。図に示した梁中緊張材の応力振幅は、繰返し回数1万回における緊張材のひずみ測定値に、その弾性係数を乗じて求めたものである。同図には、アラミド連続繊維補強材単独の疲労試験結果¹²⁾も示している。アラミド連続繊維補強材を緊張材とした梁供試体は、図-3で示したように、上限荷重比で疲労強度を表すと、初期緊張力の影響はあまり見られなかったが、緊張材の応力振幅で表すと、初期緊張力の影響が認められる。つまり、初期緊張力が大きいほど同一振幅における梁の疲労強度は小さくなった。これは、連続繊維補強材自体の疲労強度が下限荷重の影響を受ける¹²⁾ことによると考えられる。ただし、炭素連続繊維補強材の場合は、初期緊張力の水準が2水準しかなく、かつその差も小さく、S-N曲線も得られていないので、この事に関しては言及できない。

連続繊維補強材単独の疲労試験は、PC梁での初期緊張力を考慮して、下限荷重を引張強度の30、50、70%で実施した。梁の疲労試験では、下限荷重による緊張材の増加応力は、初期緊張力の1%以下であるので、初期緊張力=連続繊維補強材単独の疲

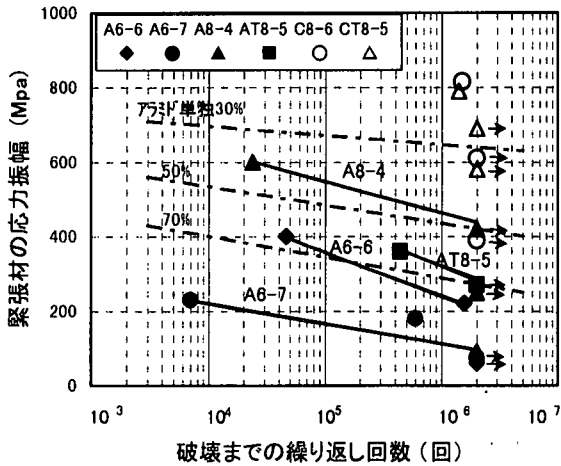


図-4 緊張材の応力振幅と破壊回数との関係

労試験における下限荷重と考えられる。梁のS-N関係は、同一下限荷重で比較すると、連続繊維補強材単独のS-N関係よりも下方にプロットされるものの、全体的な傾向は似通っているといえる。本研究では連続繊維補強材単独、梁の何れの供試体数も少ないが、梁の疲労強度は連続繊維補強材単独のそれよりも約30～50%低下した。

PC梁中の連続繊維補強材の疲労強度が、連続繊維補強材単独の疲労強度よりも低下した理由として、以下のことが考えられる。連続繊維補強材の破断位置でのひずみが測定されていないことと、破断時のひずみが測定されていないこと、つまり疲労破断時の連続繊維補強材の応力が不明であるが、少なくとも測定値よりも大きいと考えられる。また、連続繊維補強材の疲労破断がひびわれ部で生じたことから、ひびわれ付近での応力集中と、ひびわれ付近でのコンクリートと連続繊維補強材とのすり切れ現象も考えられる。従って、コンクリートと連続繊維補強材との付着が良くなると、PC梁の疲労強度は連続繊維補強材単独の疲労強度に近づくことも考えられる。

以上のことから、引張側緊張材破断型のPC梁の疲労強度は、その構成材料である連続繊維補強材単独の疲労強度と付着の疲労性状から推定できるものと思われる。ただし、梁と連続繊維補強材単独の疲労実験データが数多く揃うまでは、十分な安全率を見込む必要があると考える。

(4) コンクリートの圧縮応力振幅が梁の疲労寿命におよぼす影響

図-5に上限荷重時のコンクリート上縁の圧縮ひずみと繰り返し回数との関係を示す。これらの値は、載荷荷重による測定値であり、プレストレスによるひずみは含まれていない。アラミド連続繊維補強材

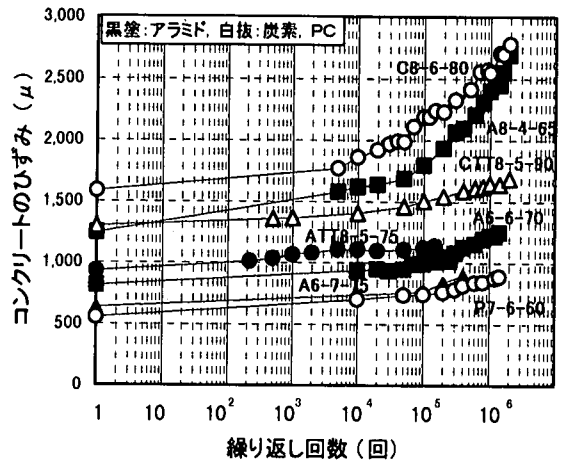


図-5 圧縮ひずみと繰り返し回数との関係

を緊張材としたPC梁では、中立軸が上昇してコンクリートの圧縮域が減少する傾向^{9), 9)}があり、圧縮疲労破壊に移行する可能性があるとの報告がある。本研究での気中疲労試験では、コンクリートの圧縮疲労破壊により破壊した供試体はなかった。また、緊張材の種類によるコンクリートの圧縮ひずみの増加程度に差は認められず、むしろ上限荷重比の影響がみられた。つまり、緊張材の種類を問わず、初載荷時の圧縮ひずみが大きい供試体ほど、その後の繰り返し載荷に伴う増加が大きくなる傾向がある。

梁と同一配合(表-2のB配合)のコンクリートで実施した圧縮疲労試験¹⁰⁾では、気中での200万回疲労強度は、その静的強度の62%となった。通常、PC鋼材降伏型や緊張材破断型で設計されるPC梁では、設計荷重時のコンクリートの圧縮応力はその圧縮強度の35%以下であるので、圧縮側コンクリートの疲労破壊は生じないと考えられる。しかし、連続繊維補強材を緊張材としたPC梁では、緊張材破断の脆性的な破壊形式を改善するために、コンクリート圧縮破壊型とする考え方がある¹⁰⁾。そのような場合には、圧縮側コンクリートの疲労破壊に対する検討が必要であることは勿論、曲げ引張破壊型の設計でも、設計荷重時のコンクリート応力が大きくなる場合には、同様の考慮が必要である。その場合に、緊張材の種類によるコンクリートの圧縮ひずみの増加等の相違による影響は、考慮しなくても良いと思われる。

4. 水中での疲労試験結果と考察

—水中環境が疲労特性におよぼす影響

(1) 破壊状況および変形状

疲労試験結果を表-5に示す。表中、上限荷重比、

表-5 水中疲労試験結果

供試体名	配合	上限荷重 (比)	ひびわれ荷重	破壊回数	残存耐力 (比)	破壊形式	
A 6-6-61W	C	24.7 kN (0.61)	33.5 kN	569,230	—	F(B)	
	C	33.3 kN (0.83)	33.3 kN	1,080	—	F(B)	
A 6-6-SW		B	38.1 kN (終局)	25.5 kN	静的載荷	—	(B)
A 8-4-45W	C	28.6 kN (0.45)	35.3 kN	2,000,000*1	65.7 kN (1.04)	S(B)	
	C	37.3 kN (0.59)	37.1 kN	261,770	—	F(C)	
	C	42.9 kN (0.68)	35.8 kN	12,800	—	F(C)	
	C	50.0 kN (0.79)	35.8 kN	1,670	—	F(B)	
A8-4-SW		B	71.4 kN (終局)	28.7 kN	静的載荷	—	(B)
AT 8-5-50W	D	37.3 kN (0.5)	44.1 kN	2,000,000*1	85.3 kN (1.15)	S(B)	
	D	41.0 kN (0.55)	44.1 kN	1,249,700	—	F(C)	
	D	44.7 kN (0.6)	44.7 kN	461,200	—	F(C)	
ATT 8-5-75W	D	72.6 kN (0.75)	53.9 kN	35,860	—	F(C)	
	D	67.7 kN (0.7)	58.5 kN	120,510	—	F(C)	
CT 8-5-60W	D	43.7 kN (0.6)	44.1 kN	1,920,000	—	F(C)	
	D	47.5 kN (0.65)	46.6 kN	2,000,000*1	88.3 kN (1.20)	S(B)	
	D	51.0 kN (0.7)	41.7 kN	399,180	—	F(C)	
	D	58.3 kN (0.8)	44.1 kN	45,420	—	F(C)	
	D	62.0 kN (0.85)	44.1 kN	40,000	—	F(C)	
CTT 8-5-90W	D	85.3 kN (0.9)	56.4 kN	15,730	—	F(C)	
	D	80.6 kN (0.85)	58.8 kN	136,400	—	F(C)	
P 7-4-50W	C	28.5 kN (0.5)	37.1 kN	2,000,000*1	37.2 kN (0.64)	S(B)	
	C	34.3 kN (0.6)	38.0 kN	337,400	—	F(B)	

供試体名
 A T T 8 -5 -75 W S → せん断補強筋なし
 → 上限荷重比 (75:75%)
 → 初期緊張力比 (5:0.5Pu)
 → 緊張材径 (8:8mm)
 → a/d (T:a/d=2.7, 空白:a/d=4or3.6)
 → 梁の形状 (T:T形梁, 空白:矩形梁)
 → 緊張材の種類 (A:アラミド, C:炭素, P:PC 鋼線)

破壊形式
 F: 疲労破壊
 S: 200 万回繰り返し載荷後静的載荷で破壊
 *1: 200 万回で破壊しなかった
 (B): 緊張材の破断
 (C): コンクリートの圧縮破壊

残存耐力比は、気中での静的強度を基準とした。また、試験時の下限荷重時および上限荷重時における引張側緊張材と圧縮側コンクリートの、応力の計算値を表-6に示す。

矩形梁のうち、200 万回までに破壊した供試体は、気中では総て緊張材の疲労破断による破壊であったが、水中では引張側緊張材の疲労破断と圧縮側コンクリートの疲労破壊の2形式が生じた。T形梁では、200 万回までに破壊した供試体は、水中では総て圧縮側コンクリートの疲労破壊であった。200 万回の繰り返し載荷に耐えた供試体は、矩形梁もT形梁もその後の静的載荷によって、引張側緊張材の破断によって破壊した。

繰り返し載荷中に、せん断スパン内にひびわれが発生した供試体も見られたが、せん断ひびわれが水的作用により伸展が加速される様子は認められなかった。また、気中での疲労試験では、緊張材に沿ったかぶりコンクリートの付着割裂破壊が数体見られたが、水中では CT8-5-60W 供試体の1体だけであった。付着割裂破壊が減少したのは、破壊形式が緊張材の引張疲労破断からコンクリートの圧縮疲労破壊へと変化したことによると考えられる。

200 万回繰り返し載荷後の残存静的耐力比は、4

表-6 試験時の緊張材とコンクリートの応力 (水中・計算値)

供試体名	緊張材応力(MPa)		コンクリート応力(MPa)	
	下限荷重時	上限荷重時	下限荷重時	上限荷重時
A 6-6-61W	924	978	3.8	16.8
	—	1297	—	40.7
A 8-4-45W	543	599	4.0	18.4
	—	747	—	34.7
	—	903	—	41.2
	—	1121	—	47.0
AT8-5-50W	801	844	1.7	15.1
	—	853	—	19.3
	—	869	—	27.3
ATT8-5-75W	800	1045	1.6	40.5
	—	953	—	35.3
CT8-5-60W	909	1045	1.6	28.6
	—	1160	—	32.5
	—	1286	—	35.1
	—	1555	—	41.3
	—	1692	—	43.9
CTT8-5-90W	908	1871	1.5	48.4
	—	1692	—	43.9
P 7-4-50W	633	762	3.7	16.7
	—	901	—	25.5

体中3体で1に近い値を示した。残存静的耐力比が0.64と小さな値を示した P7-4-50W 供試体は、200 万回繰り返し載荷後のたわみが、180 万回でのたわみの4倍にも達していることから、疲労破壊寸前で

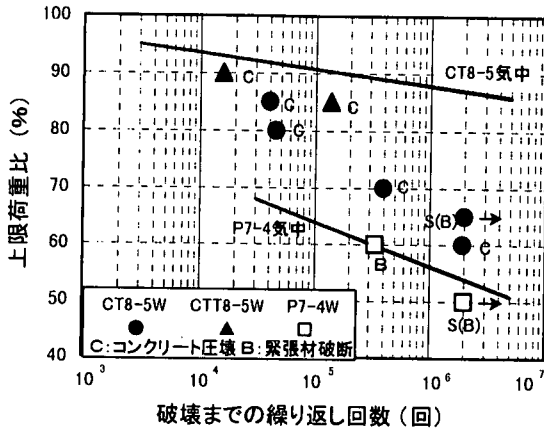


図-6 上限荷重比と破壊回数との関係(炭素, PC)

あったものと思われる。

(2) 上限荷重比が梁の疲労寿命におよぼす影響

疲労試験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-6, 7に示す。図-6中□印のPC鋼線P7-4Wシリーズの供試体は2体と少ないが、1体は200万回の繰返し荷重に耐え、その後の静的荷重によって緊張材が破断した。他の1体は、繰返し荷重中に緊張材の疲労破断により破壊した。その200万回疲労強度は静的強度の約50~60%となり、同じシリーズの気中における疲労試験結果と大差ない値となった。また、S-N曲線の傾きは、気中での疲労試験結果とほぼ一致した。

図-7において、添え字Bで区分した緊張材疲労破断型の供試体は3体あるが、A8-4-79Wを除いて、同じ緊張材破断型の気中疲労強度よりも小さな値を示した。これはアラミド連続繊維補強材の引張疲労強度が、水中では低下する可能性があることを示唆している。繊維自体の疲労強度低下によるものか、あるいは結合材樹脂の劣化によるものなのかは不明であるが、連続繊維補強材の水中での疲労特性を把握する必要があると思われる。

一方、図中に添え字Cで区分した、水中疲労試験においてコンクリートが圧縮疲労破壊した供試体では、水中における200万回疲労強度は、気中におけるそれよりもかなり低い値となった。例えば、アラミドA8-4シリーズにおける気中での200万回疲労強度は静的強度の約65%であるのに対して、水中でのそれは約55%と10%程度低下した。同じく、炭素CT8-5シリーズにおいても、気中疲労強度は静的強度の約85%であるのに対して、水中では約65%と20%程度低下した。これらの事から、水中においてコンクリートの圧縮疲労破壊で破壊する梁は、同シリーズの気中で緊張材が疲労破断する場合の疲

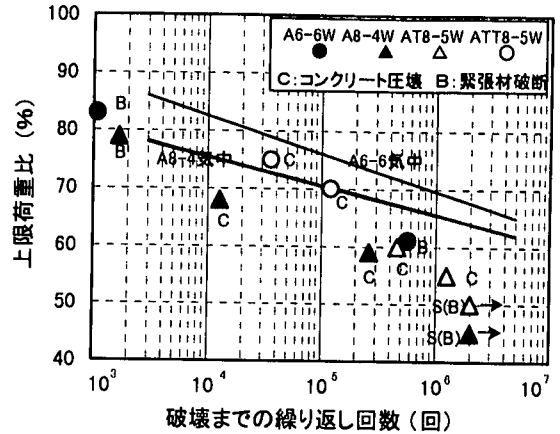


図-7 上限荷重比と破壊回数との関係(アラミド)

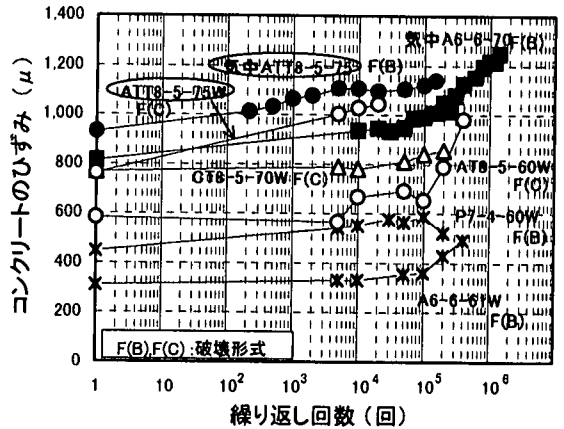


図-8 圧縮ひずみと繰返し回数との関係

疲労強度よりも大きく低下することがわかる。これは、コンクリートの水中圧縮疲労強度が気中での圧縮強度を基準とすると、気中圧縮疲労強度よりも低下する¹³⁾¹⁰⁾ことによると考えられる。

海洋構造物のように常に湿潤状態にある部材においては、緊張材の引張破断型で設計していてもコンクリート圧縮疲労破壊型となり、疲労強度が気中よりも大幅に低下することがあるので注意が必要である。

(3) コンクリートの圧縮応力振幅が梁の疲労寿命におよぼす影響

図-8に上限荷重時におけるコンクリート上縁の圧縮ひずみと繰返し回数との関係を示す。図中「気中」と記したA6-6-70とATT8-5-75供試体の2体は気中での試験結果であり、それ以外は水中での試験結果である。これらの値は、荷重荷重による測定値であり、プレストレスによるひずみは含まれていない。

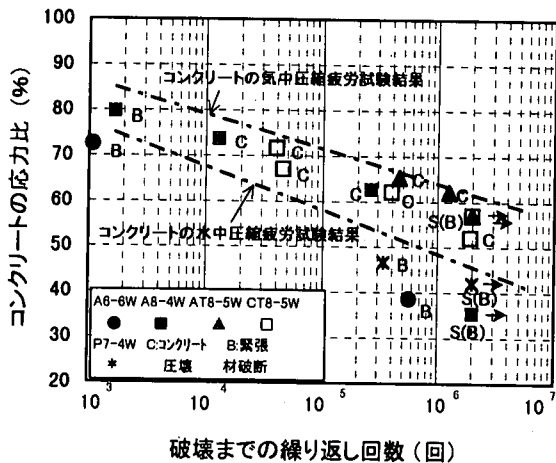


図-9 コンクリートの応力比と破壊回数との関係

図中アラミド ATT8-5-75 と ATT8-5-75W 供試体とは同じ上限荷重であるが、気中では緊張材の疲労破断によって破壊し、水中ではコンクリートの圧縮疲労破断によって破壊した。しかし、両者の圧縮ひずみは初載荷から破壊直前まで大きな差は認められず、繰り返し回数にもなって同程度の増加となっている。それ以外の、白抜き F(C) で表示した、水中でコンクリートが圧縮疲労破断した供試体の圧縮ひずみは、気中で緊張材が疲労破断した A6-6-70 供試体よりも小さかった。それにも関わらず、気中と水中とで破壊形式が変化したことは、コンクリートの疲労強度が水中では低下することに起因していると考えられる。

図中 * F(B) で表示した、水中で緊張材が破断した A6-6-61W と P7-4-60W 供試体においては、コンクリートの圧縮ひずみが小さな範囲で繰り返し載荷されているので、圧縮疲労破断には至らなかったものと考えられる。

図-9 に 1 万回載荷時の上限荷重におけるのコンクリート上縁の圧縮応力度比と破壊までの繰り返し回数との関係を示す。コンクリートの応力は、プレストレスによる応力を考慮している。図中には、梁と同一配合 (表-2 の B 配合) で作成した円柱供試体の、気中と水中の圧縮疲労試験結果¹³⁾ も併せて示した。コンクリートの下限荷重時応力は、梁の疲労試験では下限荷重とプレストレスを加えると、約 1.5 ~ 4.8MPa であり、円柱供試体の圧縮疲労試験では、約 2.3MPa とした。ここで、梁の場合もコンクリート単体の場合も、応力度比は気中強度を基準として表した。

梁の水中疲労試験において、緊張材の疲労破断によって破壊した供試体と、コンクリートの圧縮疲労破断により破壊した供試体とでは、コンクリートの

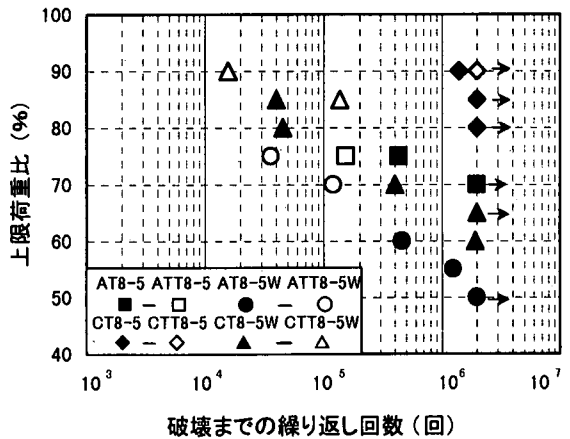


図-10 上限荷重比と破壊回数との関係 (a/d の影響)

応力度比に差異が認められる。緊張材疲労破断型の供試体におけるコンクリートの応力度比は、コンクリート圧縮疲労破断型のそれよりも小さい。つまり、コンクリートがある応力レベル以上となると、緊張材疲労破断型からコンクリート圧縮疲労破断型へと移行する。

コンクリート圧縮疲労破断型の梁の S-N 曲線の勾配は、コンクリート単体の試験から得られた S-N 曲線の勾配とほぼ一致した。梁の場合は、コンクリートの圧縮部に応力勾配を持つので、コンクリート単体の S-N 曲線よりも上昇するものと考えられており¹³⁾、本試験結果でもコンクリート単体の気中の値と水中での値の間にプロットされた。このことから、水中におけるコンクリート圧縮疲労破断型の梁の疲労強度は、その構成材料であるコンクリート単体の疲労強度を用いることによって、かなりの精度で推定できると考えられる。

(4) セン断スパン有効高さ比が疲労寿命におよぼす影響

図-10 に示すように、a/d が異なる AT8-5 と ATT8-5 供試体、CT8-5 と CTT8-5 供試体を気中、水中ごとにそれぞれ一括りとして考えると、上限荷重比で表した疲労寿命は、各々がほぼ 1 本の S-N 曲線で表される。同じ上限荷重比でも、上限荷重時のせん断力は、a/d が小さな ATT と CTT 供試体は AT, CT 供試体よりも約 30% も大きくなるが、破壊形式にも疲労寿命にも大きな影響は与えなかった。a/d が 3.6 と 2.7 の差は、疲労寿命に与える影響は小さいものと考えられる。

せん断スパン内の載荷点から a/4 点 (a: せん断スパン長) において測定した、断面高さ中央部におけるコンクリートの主引張ひずみと繰り返し回数との

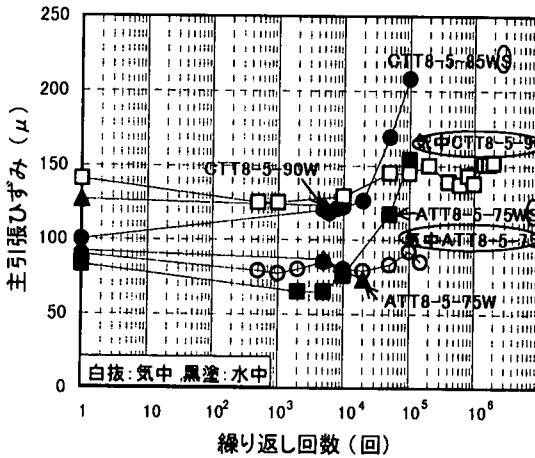


図-11 主引張ひずみと繰り返し回数との関係

関係を図-11に示す。図に示した供試体は a/d が 2.7 のシリーズで、上限荷重比が 75% から 90% であり、計算上では上限荷重比が約 70% でせん断ひびわれが発生する。疲労試験においてもこれらの供試体には、初載荷時においてせん断ひびわれが発生した。図より、せん断補強筋のあるシリーズ（供試体名の最後に S がつかないもの）では、繰り返し回数が増加しても、主引張ひずみの著しい増加は認められない。また、繰り返し載荷に伴ってせん断ひびわれは、それ程進展しなかった。せん断補強筋の無いシリーズ（供試体名の最後に S がつくもの）では、1 万回程度までの繰り返し回数においては、せん断補強筋のあるシリーズとほぼ同程度の主引張ひずみであったが、繰り返し回数が 1 万回を越えると急激にひずみが増加した。このことから、炭素連続繊維補強材 ϕ 5mm は、せん断補強筋としての補強効果があるものと推察される。

気中では曲げ破壊する RC 梁が、水中疲労試験において斜めひびわれが水の作用により著しく進展して、コンクリートのせん断破壊に移行するという報告がある^{18),19)}。しかし、本研究における PC 梁では、プレストレスおよびせん断補強筋がせん断ひびわれの進展防止に有効に作用するので、通常的设计における PC 梁では、水中においてもせん断疲労破壊の可能性は少ないものと思われる。

5. 結 論

本研究では、プレテンション方式で制作された PC 梁を気中と水中とで曲げ疲労試験を実施し、緊張材の種類、緊張材の初期緊張力、せん断スパン有効高さ比、せん断補強筋、環境（水）が PC 梁の疲労性状におよぼす影響について検討した。その結果、

以下のような知見が得られた。

- (1) 静的に緊張材破断型、または PC 鋼線降伏型で設計された PC 梁は、気中での繰り返し載荷によって破壊形式は変わらず、緊張材の疲労破断によって破壊した。
- (2) 気中での疲労強度を上限荷重比で表すと、緊張材の種類によって疲労強度は異なるが、それぞれの緊張材においては緊張材の径、初期緊張力、プレストレス量、せん断スパン/有効高さ比の影響は小さい。梁の 200 万回疲労強度は、アラミド連続繊維補強材で静的強度の約 65 ~ 70%、炭素連続繊維補強材で約 85% 以上、PC 鋼線で約 55% となった。
- (3) 梁中の、連続繊維補強材の疲労強度を応力振幅で表すと下限荷重の影響を受け、連続繊維補強材単独の疲労強度よりは低下するものの、両者の S-N 曲線の形状は似通っている。このことから、引張側緊張材破断型の PC 梁の気中疲労強度は、その構成材料である連続繊維補強材単独の疲労強度から推定できると思われる。
- (4) 梁のコンクリート上縁圧縮ひずみの増加程度に、緊張材の種類による差は認められず、通常緊張材破断型で設計された PC 梁では、気中では圧縮側コンクリートの疲労破壊は生じないと考えられる。
- (5) 水中で繰り返し載荷された梁は、緊張材の疲労破断と圧縮側コンクリートの圧縮疲労破壊の 2 種類の破壊形式となった。
- (6) 水中でコンクリート圧縮疲労破壊型の梁は、緊張材の種類によらず、水中疲労強度は気中での疲労強度よりも低下した。この理由は、コンクリートの水中圧縮疲労強度が気中でのそれよりも低下するためであり、梁の疲労強度はその構成材料であるコンクリート単体の水中圧縮疲労強度から推定できると思われる。
- (7) アラミド連続繊維補強材を緊張材とした PC 梁では、水中で緊張材が疲労破断した供試体は、同じ破壊形式の気中での疲労強度よりも低下した。
- (8) 気中では曲げ破壊する RC 梁が、水中で繰り返し載荷されると、コンクリートのせん断破壊に移行するという報告がある^{18),19)}が、通常的设计における PC 梁では、プレストレスおよびせん断補強筋がせん断ひびわれの防止に有効に作用するので、水中においても、せん断疲労破壊の可能性は少ないものと思われる。

参考文献

- 1) 山下武秋, 木内武夫, 犬飼晴雄, 岩崎達彦: 新素材による PC 橋-新宮橋の建設, プレストレストコンクリート, Vol.31, No.2, pp.71 ~ 78, 1989.
- 2) 関文夫, 細谷学, 田中茂義, 濱田武人: 炭素繊維線材を適用した飛翔橋の設計施工, 橋梁と基礎,

Vol.27, No.10, pp.15 ~ 20, 1993.

- 3) 国近康彦, 村山八州雄, 持田悟, 山本徹: 新素材を用いた吊床版橋の建設とこれに伴う諸試験, プレストレストコンクリート, Vol.33, No.1, pp.18 ~ 26, 1991.
- 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.
- 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.
- 6) 魚本健人, 西村次男: プレストレストコンクリート用FRPロッドの静的および動的疲労特性, 第12回コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.1019 ~ 1024, 1990.
- 7) 岡本直, 田村富雄, 松原澄行, 谷垣正治: アラミド繊維による組紐状棒材の基本特性, 第10回コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, pp.659 ~ 664, 1988.
- 8) 丸山武彦, 伊藤幸雄, 西山啓伸: CFRP およびAFRP ロッドを用いたPCはりの曲げ疲労特性, 第12回コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.1153 ~ 1158, 1990.
- 9) 三上浩, 加藤正利, 田村富雄, 石橋一彦: 組み紐状AFRP ロッドで補強したコンクリート梁の疲労性状, 第12回コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.1153 ~ 1158, 1990.
- 10) 例えば, 末岡英二, 中村亮太, 眞嶋光保, 新屋敷保: FRP 棒材を用いたはりの力学特性に及ぼすかぶりの影響について, 第16回コンクリート工学年次論文報告集, 16-2, pp.1117 ~ 1122, 1994.
- 11) 波田匡司, 児島孝之, 高木宜章, 岩本勲: 連続繊維補強材の付着性状に関する実験的研究, 第18回コンクリート工学年次論文報告集, 18-2, pp.515 ~ 520, 1996.
- 12) 岩本勲, 崎山義之, 児島孝之: 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, pp.310 ~ 311, 1993.
- 13) 林宏信, 児島孝之, 高木宜章, 松尾真紀: 高強度コンクリートの水中疲労寿命について, 平成9年度土木学会関西支部年次学術講演概要, pp.V 41-1 ~ 41-2, 1997.
- 14) 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, 4.設計の考え方, コンクリートライブラリ 72, pp.6 ~ 13, 1992.
- 15) 田政範, 島田静雄: 水で飽和されたモルタルの圧縮破壊および疲労特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第245号, pp.65 ~ 76, 1976.
- 16) 松下博通: 水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第296号, pp.87 ~ 95, 1980.
- 17) Ople, F.S. and Hulsbos, C.L.: Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient, Journal of ACI, No.63-2, pp.59 ~ 80, 1966.
- 18) 前岡隆顕, 今井宏典, 児島孝之: 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, pp.307 ~ 308, 1983.
- 19) 西林新蔵, 井上正一, 大谷公行: 水中における鉄筋コンクリートはりの疲労寿命に関する研究, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集, pp.311 ~ 312, 1986.

(1997.11.12受付)

FLEXURAL FATIGUE BEHAVIOR OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH NON-METALLIC FIBER TENDON UNDER ATMOSPHERE AND WATER

Kaoru IWAMOTO, Takayuki KOJIMA, Nobuaki TAKAGI and Maki MATSUO

It is possible to utilize Continuous Fiber Reinforcing Materials (CFRM) for prestressing tendons of prestressed concrete structures in the ocean because they have non-corrosion properties. This study concerns the flexural fatigue behavior of prestressed concrete beams with aramid, carbon fiber tendons and conventional prestressing wire both in atmosphere and in water. The following factors are investigated as to how they have effects on the behavior of prestressed concrete beams; (1) kind of tendon, (2) initial tension of tendon, (3) shear span effective depth ratio, (4) test environment, (5) fatigue strength of concrete and tendon.