

論文

[2173] アラミド繊維棒材を緊張材としたPCはりの疲労性状に及ぼす水の影響

崎山義之<sup>\*1</sup>・児島孝之<sup>\*2</sup>・高木宣章<sup>\*3</sup>・水田崇志<sup>\*4</sup>

1. はじめに

連続繊維補強材は高強度、軽量、非磁性であり、耐腐食性に優れているのが特徴であり、この特徴を有効に利用することが重要である。その一例として、繊維棒材をPC緊張材として使用することが考えられ、これを用いたコンクリート構造物は橋梁、海洋構造物など広範囲な環境下に建造されることが予想される。特に、海洋構造物においては、常時湿潤状態において繰り返し荷重を受けることになる。

アラミド繊維棒材を緊張材としたPCはりの気中疲労性状は、PC鋼線を用いたはりと大差なく、ひびわれ発生荷重を少し上回る上限荷重においては200万回の繰り返し載荷に耐えることが確認されている[1]。また、繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの場合、気中では鉄筋の疲労破断で破壊するはりであっても、水中ではコンクリートのせん断圧縮破壊あるいは圧壊により破壊するなど、破壊形式が異なる場合もあり、そのような場合には水中疲労寿命が大幅に低下することが報告されている[2][3]。しかし、繊維棒材を緊張材としたコンクリートはりについての研究例は少なく、この方面の検討が望まれている。

本研究は、アラミド繊維棒材を緊張材としたPCはりの水中疲労試験を行い、疲労性状に及ぼす水の影響について検討した。また、引抜き試験による付着性状の検討も行った。

2. 実験概要

2.1 疲労試験

疲労試験の実験計画を表-1に示す。緊張材として用いたアラミド繊維棒材は組紐状で、呼び径6mm、8mm（以下φ6、φ8）の2種類とした。比較用緊張材として用いたPC鋼線の呼び径は7.0mmであり、これらの棒材の機械的性質を表-2に示す。下側棒材の初期緊張力は、アラミド繊維棒材では棒材の引張耐力Puの60%（φ6）と40%（φ8）、PC鋼線では引張耐力Puの40%とし、上側棒材の緊張力は下側棒材の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のアラミド繊維棒材で、ピッチ35mmのフープ状とした。

表-1 実験計画

環境	供試体名	配合	緊張材種類	下側棒材の初期緊張力	下縁プレストレス量	上限荷重比	
気中	KB6-6-60A	I	アラミド6mm	0.60Pu	46kgf/cm <sup>2</sup>	60%	
	-70A	I				70%	
	-80A	I				80%	
	水中	KB8-4-45A	I	アラミド8mm	0.41Pu	56kgf/cm <sup>2</sup>	45%
		-55A	I				55%
		-65A	I				65%
		-75A	I	75%			
		-60A	II	0.4Pu	59kgf/cm <sup>2</sup>	60%	
		PC7-4-52A	I	PC鋼線7mm	0.44Pu	56kgf/cm <sup>2</sup>	52%
-60A	I	60%					
水中	KB6-6-70W	II	アラミド6mm	0.6Pu	45kgf/cm <sup>2</sup>	70%	
	-92W	II				92%	
	KB8-4-40W	II	アラミド8mm	0.4Pu	59kgf/cm <sup>2</sup>	40%	
	-52W	II				52%	
	-60W	II				60%	
	-70W	II	70%				
	PC7-4-50W	II	PC鋼線7mm	0.43Pu	57kgf/cm <sup>2</sup>	50%	
	-60W	II				60%	

Pu: 引張耐力      上限荷重比: 静的耐力に対する比

\*1 (株)ピー・エス

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 立命館大学助手

理工学部土木工学科、工修 (正会員)

\*4 立命館大学大学院

理工学研究科土木工学専攻

表-2 棒材の機械的性質

種類	アラミド (配合Ⅰ)		アラミド (配合Ⅱ)		P C 鋼線
	呼び径 (mm)				
呼び径 (mm)	6	8	6	8	7
弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	6.4×10 <sup>5</sup>	6.6×10 <sup>5</sup>	7.4×10 <sup>5</sup>	7.4×10 <sup>5</sup>	20.0×10 <sup>5</sup>
引張耐力 (tf)	3.80	6.40	3.62	7.06	6.10
伸び率 (%)	2.40	1.90	2.24	2.33	8.0

表-3 コンクリートの示方配合

配合の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量				混和剤
			W	C	S	G	
配合Ⅰ	44	49	176	400	856	925	C×1.2%
配合Ⅱ	40	46	176	440	788	954	C×2.0%

混和剤：高性能減水剤

配合Ⅰでは、早強ポルトランドセメントを用い、配合Ⅱでは超早強ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの示方配合を表-3に示す。プレストレス導入時（配合Ⅰ：材令5日、配合Ⅱ：材令2日）のコンクリート強度は約600kgf/cm<sup>2</sup>、弾性係数は約3.5×10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>、試験時（配合Ⅰ：材令2~4ヶ月、配合Ⅱ：材令1ヶ月）のコンクリート強度は700~800kgf/cm<sup>2</sup>、弾性係数は約4.0×10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>であった。また、水中疲労試験用はりは試験前に1週間水槽内で水中養生した後、疲労試験を実施した。また、使用セメント、配合、養生が異なったため、配合Ⅱにおけるコンクリートの曲げおよび引張強度は配合Ⅰより大きかった。

供試体寸法および荷重条件を図-1に示す。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等分点荷重で、せん断スパン有効高さ比（a/d）は4.0である。

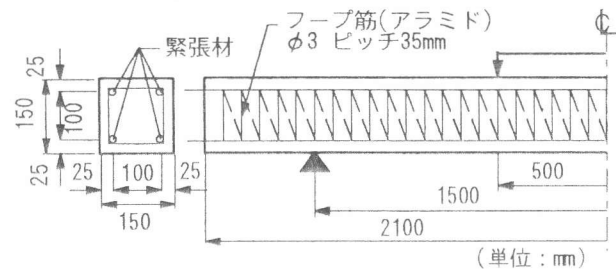


図-1 供試体の形状寸法および荷重条件

疲労試験は油圧式疲労試験機（能力50tf）を、静的試験は圧縮試験機（能力200tf）を使用した。疲労試験前に静的荷重試験を実施し、ひびわれ発生荷重、静的破壊荷重を確認した。静的試験結果を表-4に示す。疲労試験における下限荷重はいずれも0.5tfとした。荷重速度は2~4Hzとし、所定回数ごとに試験機を止め、上限荷重まで静的に荷重して供試体のたわみ、コンクリートおよび棒材のひずみを測定し、ひびわれ進展状況を観察した。なお、200万回繰返し荷重しても破壊しなかったはりは、その後静的荷重により破壊させ、残存静的強度を測定した。

表-4 静的試験結果

供試体名	径	初期緊張力	ひびわれ発生荷重	静的耐力	破壊形式
KB6-7A	6mm	0.7Pu	2.54tf	4.06tf	棒材破断
KB8-4A	8mm	0.4Pu	2.72tf	6.43tf	せん断圧縮
KB6-6W	6mm	0.6Pu	2.50tf	3.60tf	棒材破断
KB8-4W	8mm	0.4Pu	2.93tf	7.29tf	棒材破断
PC7-4A	7mm	0.4Pu	2.64tf	5.82tf	棒材破断

## 2.2 引抜き試験

引抜き試験では、疲労試験に用いたφ8の組紐状アラミド繊維棒材とφ7のP C 鋼線を使用し、配合は、疲労試験と同様に配合Ⅰ、Ⅱの2種類を用いた。供試体作製法および荷重条件を図-2に示す。供試体は、型枠の上下に一本ずつ試験材を水平に配置し、横打で

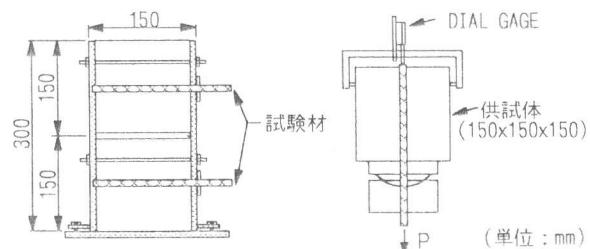


図-2 供試体作製法および荷重条件

作製した。供試体の寸法は一辺15cmの無筋の立方体で、付着長は15cmとした。供試体は打設翌日脱型し、一週間水中養生を行い、その後は気中に放置し、材令1ヶ月で試験を行った。コンクリート強度は約650kgf/cm<sup>2</sup>（配合Ⅰ）および約800kgf/cm<sup>2</sup>（配合Ⅱ）であった。引抜き試験はJIS「引抜き試験による鉄筋コンクリートとの付着試験方法（案）」に準じて行った。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 引抜き試験結果

付着応力度とすべり量の関係の一例を図-3に示す。すべり量が0.025mmおよび2.5mm時のアラミド繊維棒材（配合Ⅰ）の平均付着応力度は31kgf/cm<sup>2</sup>および140kgf/cm<sup>2</sup>であるのに対し、PC鋼線（配合Ⅰ）は28kgf/cm<sup>2</sup>および82kgf/cm<sup>2</sup>であった。アラミド繊維棒材の付着応力度は初期段階ではPC鋼線と同等であるが、すべり量が増加するに伴い、アラミド棒材の付着性状が良好となり、最大付着応力度は大きく、

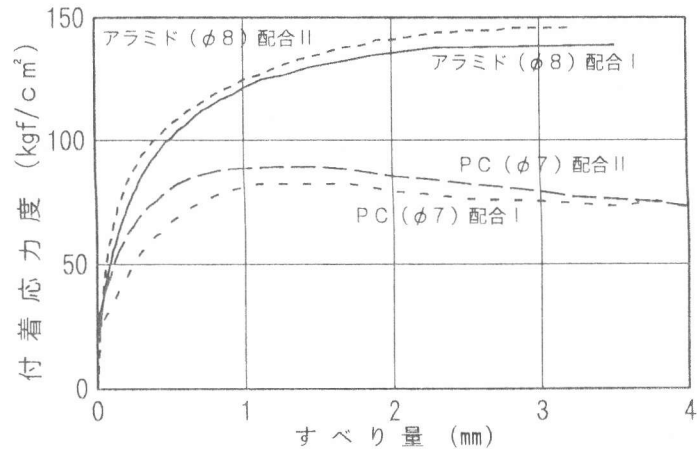


図-3 付着応力度とすべり量の関係

しかも大きなすべり量で最大付着応力度に達した。これは、組紐状アラミド繊維棒材の凹凸がコンクリートと棒材の界面で引張力に対して有効に作用したものと考えられる。本実験において、アラミド繊維棒材の付着性状は、同じ寸法のPC鋼線より同等以上の性能を有しているものと考えられる。また、配合Ⅱのコンクリートは配合Ⅰより圧縮強度が大きいために、付着応力度は大きくなるものの、配合の違いによる付着性状への著しい影響は観察されなかった。

#### 3.2 疲労試験結果

##### (1) 変形状

疲労試験結果を表-5に、たわみと繰り返し回数との関係を図-4に示す。たわみは上限荷重時におけるスパン中央の値である。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われ幅や曲率に試験環境の顕著な影響は見られないが、せん断ひびわれは水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[2][3]。本実験において、水中疲労試験のひびわれは、すべて曲げスパンのみに発生しており、鉄筋コンクリートはりの水中疲労試験時の曲げスパン内のひびわれ幅

表-5 疲労試験結果

環境	供試体名	上限荷重	Pcr	破壊回数	Pu(比)	破壊形式
気中	KB6-6-60A	2.44tf	2.43tf	2,000,000	3.7tf(0.91)	S(B)
	KB6-6-70A	2.84tf	2.41tf	1,553,440		F(B)
	KB6-6-80A	3.25tf	2.54tf	46,000		F(B)
水中	KB6-6-70W	2.52tf	3.42tf	569,230		F(B)
	KB6-6-92W	3.40tf	3.40tf	1,080		F(B)
気中	KB8-4-45A	2.89tf	2.70tf	2,000,000	6.9tf(1.08)	S(B)
	KB8-4-55A	3.54tf	2.75tf	2,000,000	6.9tf(1.08)	S(B)
	KB8-4-65A	4.18tf	2.75tf	2,000,000	6.3tf(0.98)	S(B)
	KB8-4-75A	4.82tf	2.75tf	23,630		F(B)
	KB8-4-60A	4.37tf	3.45tf	2,000,000		F(B)
水中	KB8-4-40W	2.92tf	3.60tf	2,000,000	6.7tf(0.92)	S(B)
	KB8-4-52W	3.80tf	3.78tf	261,770		F(C)
	KB8-4-60W	4.37tf	3.65tf	12,800		F(C)
	KB8-4-70W	5.10tf	3.65tf	1,670		F(B)
気中	PC7-4-52A	3.00tf	3.00tf	2,000,000	6.2tf(1.07)	S(B)
	PC7-4-60A	3.50tf	3.00tf	434,250		F(B)
水中	PC7-4-50W	2.91tf	3.78tf	2,000,000	3.8tf(0.64)	F(B)
	PC7-4-60W	3.50tf	3.88tf	337,400		F(B)

Pcr: ひびわれ発生荷重  
Pu: 残存静的強度  
( ): 静的耐力に対する比

F: 疲労破壊  
S: 200万回後の静的破壊  
B: 棒材破断  
C: コンクリートの剥離による破壊

や曲率と同様に試験環境の変化による変形状の大きな変化は観察されなかった。なお、水中疲労試験のすべての供試体において、圧縮棒材に沿うひびわれの進展が水により加速されたが、このひびわれの進展がはりの変形状に及ぼす影響は見られなかった。コンクリートの剥離により破壊したKB8-4シリーズ（緊張材の径が $\phi 8$ で緊張力が $0.4P_u$ ）のはりにおいても、変形状からは何の前兆もなく破壊に至った。また、PC7-4-50Wのたわみが200万回時に急激に増加したのは、P C鋼線が降伏していたためである。

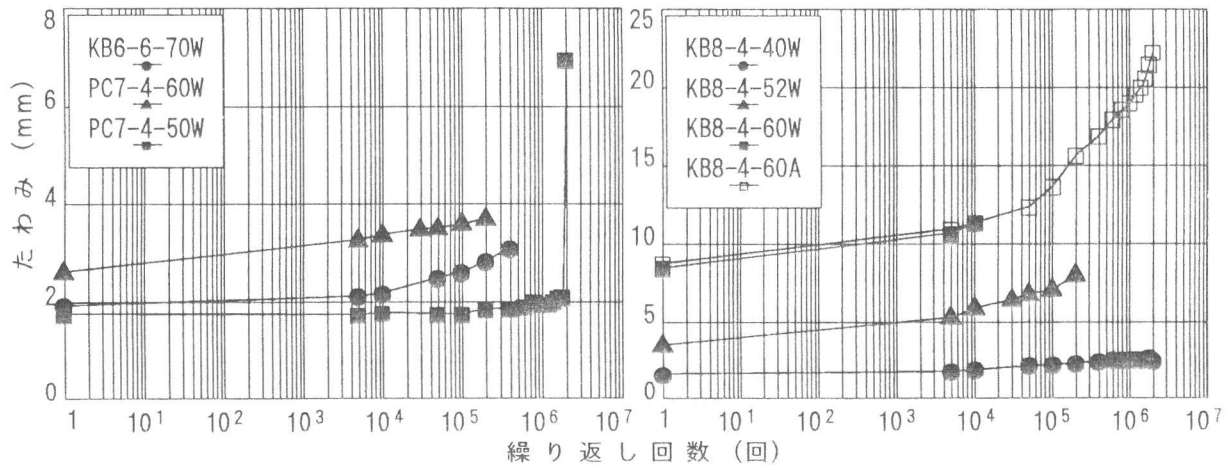


図-4 たわみと繰返し回数の関係

## (2) 破壊状況および破壊形式

代表的なひびわれ状況を図-5に示す。水中疲労試験におけるひびわれは、すべて曲げスパン内で発生した。処女荷重時に曲げひびわれは圧縮棒材付近まで達し、その後、水平方向に向きを変え、圧縮棒材に沿ってはり軸方向に発達した。この軸方向のひびわれの発達は気中においても見られたが、水中の方が著しく進展した。繰返し荷重の初期の段階（数千回程度）では、ひびわ

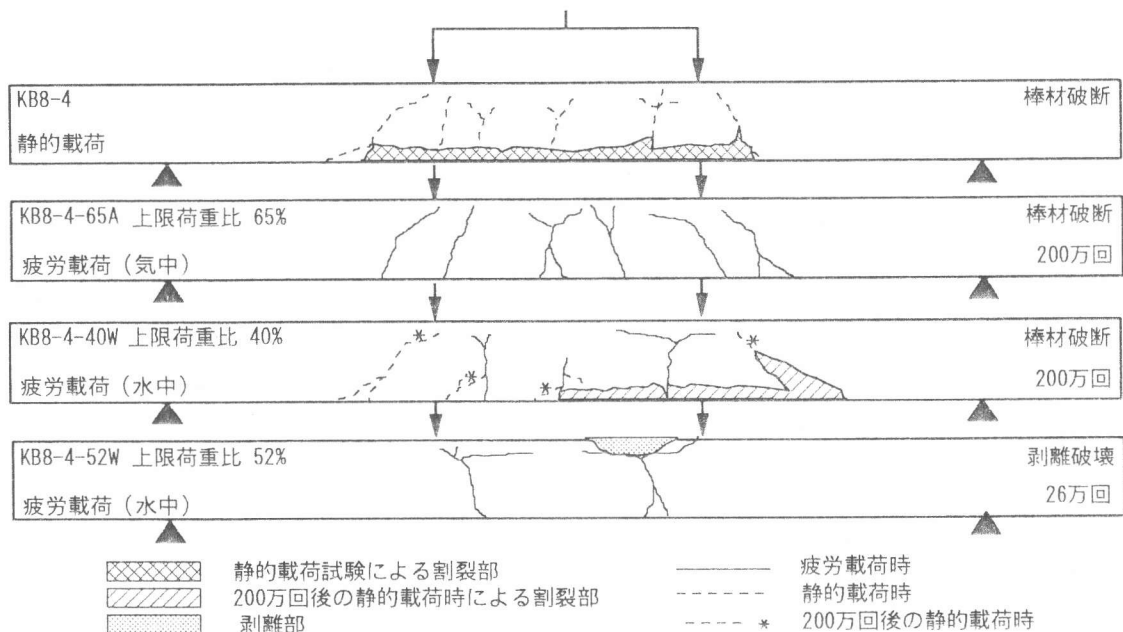


図-5 ひびわれ状況図

れ先端から数cmの範囲で乳白色の微粒子の噴出が見られ、繰り返し载荷につれて、微粒子の噴出範囲が狭くなっていくのが観察された。これは、鉄筋コンクリート部材の水中疲労におけるせん断ひびわれの進展と同様の傾向であった[2][3]。鉛直方向の曲げひびわれは曲げモーメントによる開閉である。しかし、圧縮棒材に沿う軸方向のひびわれは微粒子の噴出を伴っていることから、ひびわれ先端部に何らかの‘ずれ応力’が作用しているものと推察され、ひびわれ面のこすれ合いにより、ひびわれの進展が水の影響で加速されたものと考えられる。また、はりのたわみが大きいKB8-4シリーズほど、圧縮側棒材に沿った軸方向ひびわれが進展する傾向が見られた。

KB8-4シリーズ(緊張材の径が $\phi 8$ で緊張力が $0.4Pu$ )とPC7-4シリーズ(緊張材の径が $\phi 7$ で緊張力が $0.4Pu$ )は、下縁プレストレス導入量が同程度であるが、はりの変形の大きさにより、破壊形式が異なった。たわみの小さいPC7-4シリーズは、気中、水中とも棒材破断で破壊した。しかし、たわみの大きいKB8-4シリーズは、気中ではすべて棒材破断で破壊したが、水中ではコンクリートの剥離で破壊するはりが多く観察された。ここでのコンクリートの剥離による破壊は、圧縮ひずみの増加に伴う通常の圧壊とは異なり、圧縮棒材に沿うひびわれの進展が水的作用により加速されて、コンクリートの圧縮部が剥離して‘浮き上がり’、抵抗力を失う破壊である。コンクリートの剥離部は写真-1に示すようにコンクリートや連続繊維の摩耗が観察され、水による加速的なこすれ合いがうかがえる。



写真-1 コンクリートの剥離部

KB6-6シリーズ(棒材の径が $\phi 6$ で緊張力が $0.6Pu$ )は、気中、水中とも棒材破断で破壊に至った。従って、弾性係数の小さいアラミド繊維棒材を補強材として用いるPCはりの場合、コンクリートの剥離による疲労破壊を防ぐために緊張力を高めに設定し、変形量を小さくすることが有効であると考えられる。また、水中疲労で200万回の繰り返し载荷に耐えたはりや、変形量が小さいKB6-6シリーズの棒材破断型で破壊した場合も、水の影響により圧縮側緊張材に沿うひびわれの進展が水により加速されたが、破壊形式を変えるほどの大きな影響はなかった。

### (3) 疲労寿命

縦軸に上限荷重比、横軸に破壊までの繰り返し回数を対数でとったS-N線図を図-6に示す。気中での残存静的強度比は $0.90 \sim 1.08$ であった。KB8-4-40Wの残存静的強度は $6.48tf$ で、静的载荷試験時の静的強度 $7.29tf$ の $92\%$ であった。水中においても残存静的強度比は気中と同等であり、200万回の繰り返し载荷に耐えるはりは、水中疲労においても静的耐力をほぼ保持し

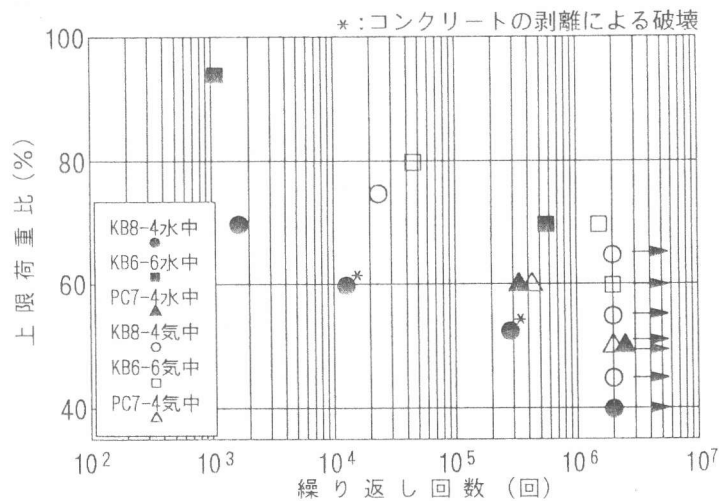


図-6 S-N線図

てるものと考えられる。また、PC7-4-50Wは残存静的強度比が64%となり著しく低下した。これは、200万回時でP C鋼線がすでに降伏していたためである。

気中で疲労試験を行った供試体は、すべて緊張材であるアラミド繊維棒材、P C鋼線の疲労破断による破壊であった。しかし、水中疲労を行った供試体は、緊張材の疲労破断、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。気中では、緊張材の径、緊張力にかかわらず、200万回疲労強度は、はりの静的強度に対する上限荷重の比で表すと、アラミド繊維棒材を用いたはりで約65%、P C鋼線を用いたはりで約55%であった。これより、アラミド繊維棒材を緊張材としたP Cはりでは、ひびわれが発生した状態においても上限荷重比が60%程度の繰り返し载荷を受けても健全な疲労性状を示し、気中において、アラミド繊維棒材はひびわれを許容するP C部材の緊張材としての適用が可能であると考えられる。

KB8-4シリーズ(緊張材の径が $\phi$ 8で緊張力が0.4Pu)の気中および水中での200万回疲労強度は、上限荷重比で表すと約65%、および約40%であった。これは、気中では棒材破断により破壊するはりでも、水中では圧縮棒材に沿うひびわれの進展が水の作用で加速され、コンクリートの剥離により破壊したために、水中の200万回疲労強度が低下した。

KB6-6シリーズ(緊張材の径が $\phi$ 6で緊張力が0.6Pu)の水中疲労試験用はりは、載荷試験前一週間水中養生をしているために、ひびわれ発生荷重が増大した。KB6-6-70Wのはりでは、ひびわれを発生させた後に、上限荷重を下げた疲労試験を行った。上限荷重比70%での気中、水中疲労寿命は、各々約155万回、56万回であり、水中疲労寿命が気中より低下した。しかし、はりは棒材の破断により破壊している。S-N曲線から判断して、KB6-6シリーズでは、破壊形式が同じであれば、疲労寿命に及ぼす試験環境の影響は少なく、同等の疲労性状を有するものと推察される。

#### 4. まとめ

- (1) アラミド繊維棒材を緊張材としたP Cはりは、気中では棒材破断で破壊し、水中では、棒材破断とコンクリートの剥離による破壊に分かれた。
- (2) 水中疲労試験では、はりの変形が大きいほど、コンクリートの剥離で破壊しやすくなる。
- (3) 水中疲労寿命は破壊様式に依存し、コンクリートの剥離で破壊する場合、疲労寿命は著しく低下する。
- (4) 水中においても、棒材破断で破壊するはりは、気中とほぼ同等の疲労性状を有し、200万回水中疲労強度は、気中と同様に、アラミド繊維棒材を用いたはりの方がP C鋼線を用いたはりより大きくなる。

#### 【参考文献】

- [1] 岩本・児島・高木・崎山：アラミド繊維緊張材を用いたP Cはりの疲労特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No2，pp.817-822，1993
- [2] 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
- [3] 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