

論文

[2138] アラミド繊維緊張材を用いた PC はりの疲労特性

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

1. はじめに

耐腐食性コンクリート補強用材料として、連続繊維補強材（以下繊維棒材と呼ぶ）が開発され、新しい構造材料のひとつとなってきた。繊維棒材をコンクリート構造物に適用するには、高強度、非腐食性、非磁性等の特徴を有効に利用することが必要である。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る。繊維棒材を用いたPCはりの静的曲げ挙動については、従来のPC鋼材を用いたはりに劣らない性状を示し、はりの曲げ耐力は従来の計算方法で推定できることが明らかとなっている。

一方、アラミド繊維棒材を緊張材としたPCはりの疲労性状は、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荷重でも200万回の繰返し载荷に耐えることを確認している[1]。また、繊維棒材の繰返し荷重下における引張疲労性状については、PC鋼より線に劣らないことが確認されている[2]。しかし、PCはり中の繊維棒材の初期緊張力と、はりの疲労寿命との関係については研究例が少なく、この方面での検討が望まれている。

そこで本研究では、プレテンション部材の緊張材としてアラミド繊維棒材を用い、緊張材の初期緊張力および繰返し载荷における上限荷重が、疲労特性におよぼす影響について検討した。

2. 実験概要

供試体の断面寸法は図-1に示すように、15cm×15cmの正方形であり、かぶり（緊張材中心までの距離）2.5cmの位置に上下各2本ずつ緊張材を配置した。はりの長さは210cmである。緊張材として用いたアラミド繊維棒材は組紐状で、公称直径が6mmと8mmの2種類とした。それらの物性値を表-1に示す。下側棒材の初期緊張力は棒材引張耐力（ $P_u$ ）の約40%、60%そして70%とし、上側棒材の緊張力は下側棒材の約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、総て径2mmのアラミド繊維棒材で、ピッチ35mmのフープ状とした。

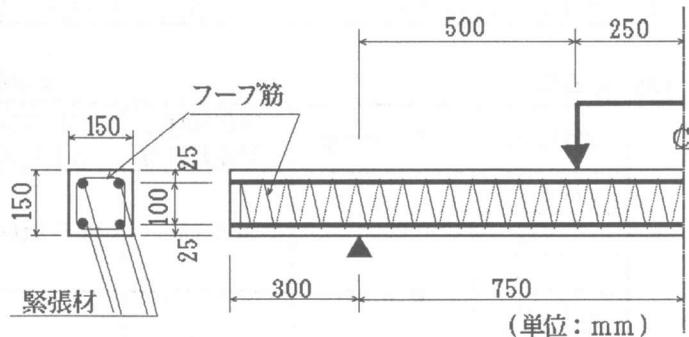


図-1 供試体の形状寸法

- \*1 近畿コンクリート工業（株）開発部主任（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

コンクリートは早強ポルトランドセメントを用い、 $W/C = 4.4\%$ 、粗骨材の最大寸法は13mmで、細骨材率は49%とした。プレストレス導入時の（材令5日）コンクリートの圧縮強度は約600 kgf/cm<sup>2</sup>、弾性係数は約 $3.5 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>で、疲労試験実施時（材令2~4ヶ月）の圧縮強度は約750 kgf/cm<sup>2</sup>、弾性係数は約 $4.0 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>であった。

表-1 繊維棒材の物性値

種類	アラミド繊維棒材	
公称直径 (mm)	6	8
弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	$6.4 \times 10^5$	$6.6 \times 10^5$
引張耐力 (tf)	3.8	6.4
破断伸び (%)	2.4	1.9

載荷は支持スパン150cm、曲げスパン50cmの3等分点載荷で、能力50tfの油圧式疲労試験機を用いた。せん断スパン有効高さ比 ( $a/d$ ) は4.0である。疲労試験に先立って、直径6mmと8mmの繊維棒材を用いたはりを各1体 (KB6-7-SはりとKB8-4-Sはり) 静的載荷試験を実施し、ひびわれ発生荷重、静的破壊荷重等を確認した。繰返し載荷では上限荷重を表-2に示すように、そのはりの静的耐力の45~80%とし、下限荷重は何れも0.5tfとした。

ここで各シリーズNo. 1供試体の上限荷重はひびわれ発生荷重を少し上回る荷重で、No. 2~4供試体では上限荷重比でそれよりも5~30%大きな荷重とした。繰返し載荷速度は4Hzとし、途中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、コンクリートおよび棒材のひずみを測定し、ひびわれの進展状況を観察した。なお200万回繰返し載荷しても破壊しなかったはりは、200万回繰返し載荷後静的載荷により破壊させ、残存静的強度を測定した。

表-2 供試体の一覧

「静的載荷」

Pu : 棒材引張耐力

供試体名	緊張材の径	下側棒材の初期緊張力	ひびわれ発生荷重	静的耐力	破壊形式
KB6-7-S	φ6 mm	0.7 Pu	2.54 tf	4.1 tf	棒材破断
KB8-4-S	φ8 mm	0.41 Pu	2.72 tf	6.4 tf	せん断圧縮破壊

「繰返し載荷」

上限荷重比 : 静的耐力に対する比

供試体名	緊張材の径	下側棒材の初期緊張力	下縁プレストレス量	繰返し載荷における上限荷重比
KB6-6-1	φ6 mm	0.6 Pu	46.5 kgf/cm <sup>2</sup>	60 %
-2				70 %
-3				80 %
KB6-7-1	φ6 mm	0.7 Pu	56.5 kgf/cm <sup>2</sup>	70 %
-2				75 %
-3				80 %
KB8-4-1	φ8 mm	0.41 Pu	56.5 kgf/cm <sup>2</sup>	45 %
-2				55 %
-3				65 %
-4				75 %

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 疲労寿命

疲労試験の結果を表-3に示す。ここで破壊荷重(比)とは、200万回繰返し载荷しても破壊しなかった場合の、残存静的強度(比)である。

初期緊張力が棒材引張強度の60%と70%で、ひびわれ発生荷重付近で繰返し载荷を受けたKB6-6-1はりとKB6-7-1はりは、200万回の繰返し载荷に耐え、200万回繰返し载荷後における残存静的強度比は、0.9~0.98となった。また初期緊張力が40%のKB8シリーズでは、No.1~No.3の3体が200万回の繰返し载荷に耐え、残存静的強度比は0.98~1.08となった。KB8シリーズで、静的強度よりも200万回繰返し载荷後の残存強度の方が大きくなった。この理由として、疲労試験中に付着性状が劣化することにより、見かけ上せん断耐力が増加するので、曲げ破壊へ移行したことによるものと考えられる。このようにアラミド繊維棒材を緊張材としたPCはりでは、ひびわれが発生した状態でひびわれ発生荷重に近い繰返し载荷を受けても健全な疲労性状を示した。これより、アラミド繊維棒材は、ひびわれを許容するPC部材の緊張材への適用が可能であると思われる。

上限荷重比と破壊までの繰返し回数との関係を図-2に示す。図より、疲労寿命は繰返し载荷における上限荷重比が大きくなるに従って小さくなる。疲労強度を上限荷重比で表すと、200万回疲労強度は約70%となる。この値は、昨年度実施したPC鋼線を用いたはりでは約60%弱となったので、その値よりも10%程度大きな値となった。棒材の初期緊張力が大きいと、疲労寿命が若干大きくなる傾向が見受けられるものの、初期緊張力が疲労寿命におよぼす影響は小さいように思われる。このことは、初期緊張力を低めに抑えて、はりのひびわれ発生から破壊まで余裕のある設計をしても、あるいは緊張材の初期緊張力を高めて、ひびわれ発生荷重をできるだけ高く設計しても、作用荷重が同一であるなら疲労寿命は変わらないことを意味する。つまり、棒材の初期緊張力の大きさにより、はりのひびわれ幅やたわみ性状は異なるが、はりの静的強度が等しければ疲労強度もほぼ等しくなる。繊維棒材を用いたはりでは、PC鋼材を用いたはりのように腐食によるひびわれ幅の制限を受けないとすれば、たわみ等による使用状態の制限だけで、プレストレスレベルを選んで良いように思われる。

表-3 疲労試験結果

供試体名	上限荷重(比)	ひびわれ荷重	破壊回数	破壊荷重(比)	破壊形式
KB6-6-1	2.44tf (0.6)	2.42 tf	2,000,000*	3.7 tf(0.90)	棒材破断
-2	2.84tf (0.7)	2.46 tf	1,553,440	—	棒材疲労破断
-3	3.25tf (0.8)	2.54 tf	46,000	—	棒材疲労破断
KB6-7-1	2.84tf (0.7)	2.84 tf	2,000,000*	4.0 tf(0.98)	棒材破断
-2	3.05tf(0.75)	2.82 tf	596,300	—	棒材疲労破断
-3	3.25tf (0.8)	2.76 tf	6,950	—	棒材疲労破断
KB8-4-1	2.88tf(0.45)	2.70 tf	2,000,000*	6.9 tf(1.08)	棒材破断、付着破壊
-2	3.52tf(0.55)	2.90 tf	2,000,000*	6.8 tf(1.06)	棒材破断、付着破壊
-3	4.16tf(0.65)	2.75 tf	2,000,000*	6.3 tf(0.98)	棒材破断
-4	4.80tf(0.75)	2.74 tf	23,630	—	棒材疲労破断

\*: 200万回で破壊しなかったはり

### 3.2 疲労性状

図-3に各シリーズ中200万回で破壊しなかったはりのうち、最も大きな上限荷重を載荷したはりの荷重-たわみ曲線を示す。縦軸は静的強度に対する載荷荷重の比で表わした。何れのはりも、ひびわれは下側棒材の初期緊張力比付近の荷重で発生している。

棒材の初期緊張力が、はりの変形性状におよぼす影響は大きく、初期緊張力が小さい

程たわみは増加する。例えば、最も初期緊張力の小さなKB8-4-3はりでは、ひびわれ発生荷重の約1.5倍の上限荷重を与えても200万回の繰返し載荷に耐えた。しかし、上限荷重時のたわみは、図中の3体のうちでは最も大きく、初期載荷時でも約10mm、200万回繰返し載荷後では約17mmに増加した。これは「たわみ/スパン」で示すと、0.0067~0.011となる。一方、初期緊張力が棒材引張強度の60%と70%のKB6-6-1はりとはりとはりでは、両者の荷重-たわみ性状に明確な差はなかった。しかし、両者とも初期載荷時のたわみは2mm以下と小さく、200万回繰返し載荷後でも5mm程度に増加しただけである。

はりの疲労強度に対しては、棒材の初期緊張力の影響は小さく、繰返し載荷における上限荷重比の影響が大きい。はりの変形性状(たわみやひびわれ幅)から考察すると、棒材の初期緊張力は大きくした方が得策である。ただし初期緊張力を大きくすればするほど、ひびわれ発生から破壊までの遷移領域が短くなり、靱性のない急激な破壊へと進むので、構造物に作用する外力が不明確な時には注意が必要となる。

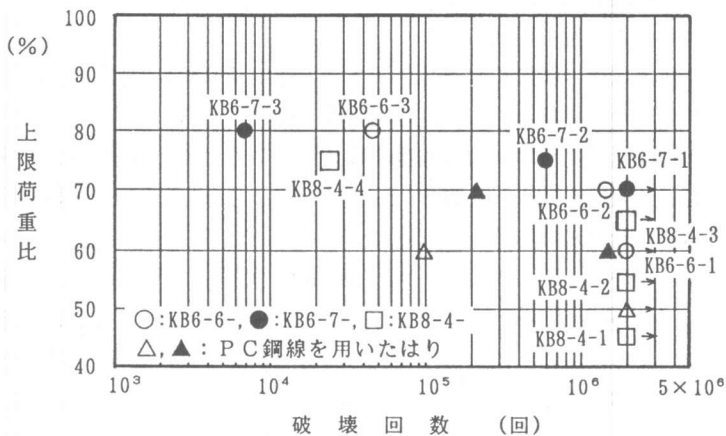


図-2 PCはりの上限荷重比と破壊回数との関係

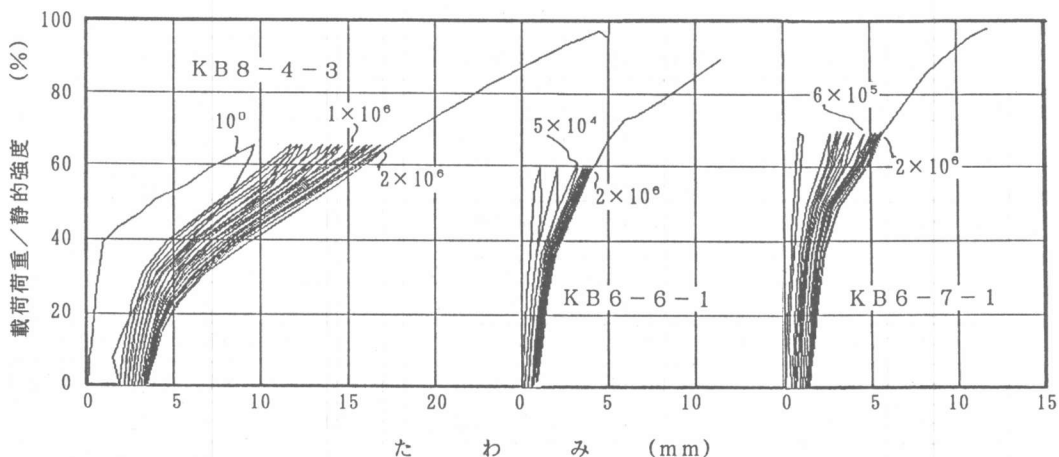


図-3 荷重-たわみ曲線

### 3.3 棒材の引張応力

PCはり中の下側棒材に貼付したひずみゲージから求めた応力振幅と、破壊までの繰返し回数との関係を図-4に示す。測定された棒材の引張ひずみは、概ね繰返し回数の増加とともに増加し、測定精度上の問題点はあるものの、ここでは破壊回数の1/2付近の測定ひずみ振幅に弾性係数を乗じて、応力振幅とした。

同図には、直径6mmのアラミド繊維棒材の引張疲労試験結果[2]を合わせて示した

(図中△、▲印)。アラミド繊維棒材単独の引張疲労試験は、下限荷重を棒材引張強度の50%と70%に固定し上限荷重を変化させた結果である。棒材単独の応力振幅と対数で表した破壊回数との間には、ほぼ直線関係が認められる。棒材単独の疲労強度は下限荷重の影響を受けて、下限荷重が大きい方が疲労強度が小さくなった。下限荷重が棒材引張強度の50%の場合の200万回疲労強度は、応力

振幅で約4,000kgf/cm<sup>2</sup>であるのに対して、70%の場合には約2,900kgf/cm<sup>2</sup>となった。

はりの試験結果では、全体としてみると棒材単独と同様に、初期緊張力(下限荷重)の影響を受けて、初期緊張力が小さい方が疲労強度が大きくなった。棒材の初期緊張力が引張強度の40%であるKB8シリーズの200万回疲労強度は、同じく60%あるいは70%であるKB6シリーズの疲労強度よりも大きくなった。これは、疲労強度を上限荷重比で表した場合とは異なった傾向となった。

図-4の縦軸の応力振幅を上限荷重比(=繰返し载荷における上限荷重/静的強度)で書き直したものが図-5である。縦軸を応力振幅で表しても、上限荷重比で表しても、はりの疲労強度は棒材単独の疲労強度よりも低下した。この理由として、PCはり中の棒材はひびわれ付近においては応力集中と、コンクリートと棒材との摩擦による擦り切れ現象が発生することも考えられる。特にひびわれ付近における棒材の応力は測定が困難であるが、平均応力から比較するとかな

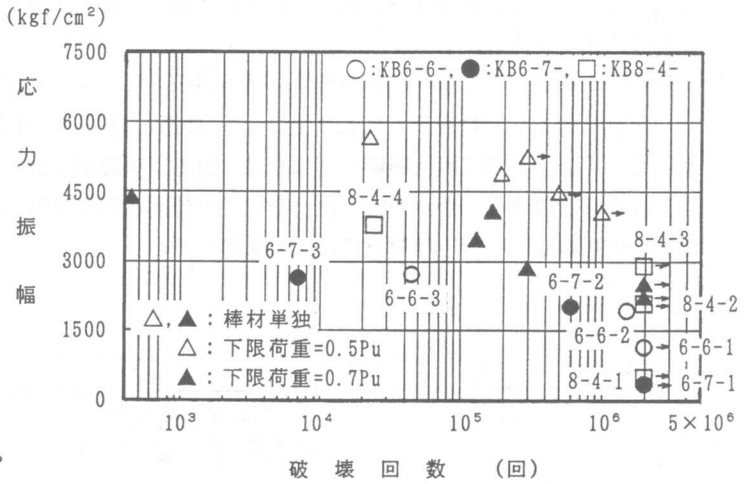


図-4 応力振幅と破壊回数との関係

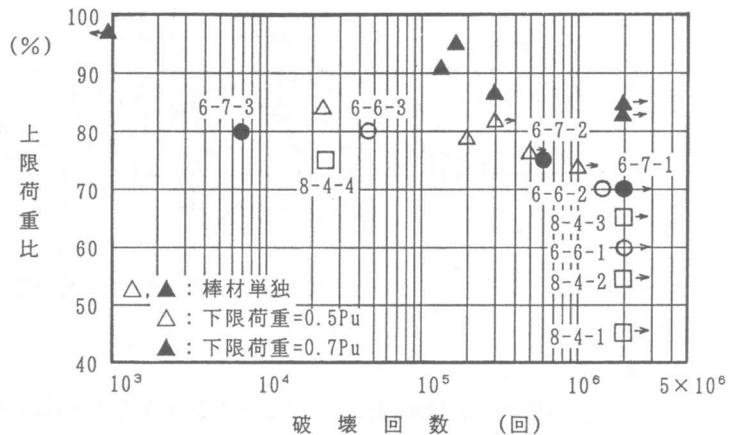


図-5 上限荷重比と破壊回数との関係

り高くなっている事も考えられる。ちなみに、はりの疲労試験における棒材の疲労破断は殆どひびわれ近傍で発生した。

破壊状況を図-6に示す。図中破線（荷重表示：tf）は、処女載荷時に発生したひびわれであり、実線（繰返し回数表示： $\times 10^4$ 回）は、繰返し載荷により発生したひびわれである。本研究では200万回までに疲労破壊したはりは、総て下側棒材の疲労破断で破壊した。そして、200万回で疲労破壊しなかったはりも、その後の静的載荷により、棒材破断またはコンクリートと棒材との付着破壊を伴う棒材破断により破壊した。

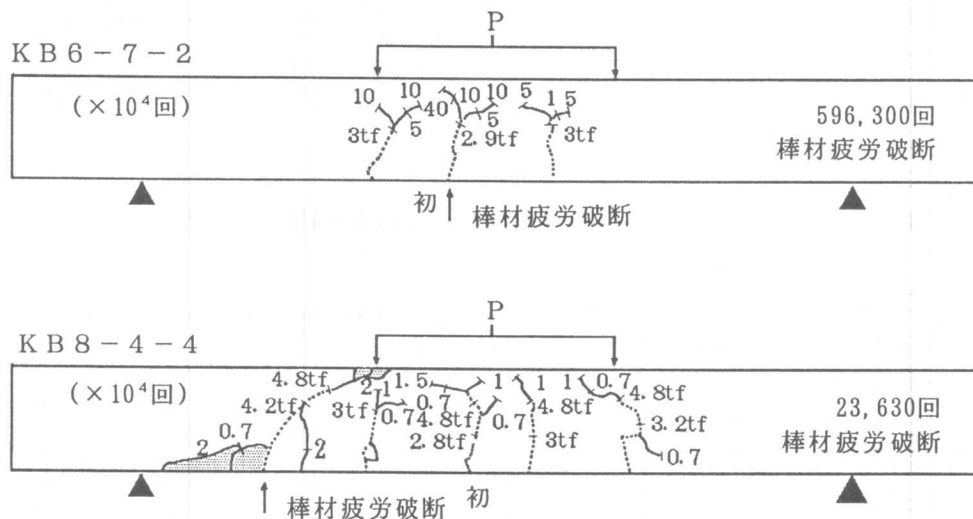


図-6 破壊状況図

#### 4. まとめ

アラミド繊維棒材を緊張材としたプレテンション方式PCはりの曲げ疲労特性に関して、本研究で得られた結果を要約すると次のとおりである。

1. はりの疲労寿命は繰返し載荷における上限荷重比が大きくなるに従って小さくなり、200万回疲労強度は上限荷重比で約70%となった。
2. 棒材の初期緊張力がはりの疲労寿命におよぼす影響は小さいが、疲労性状（たわみ、ひびわれ幅）に影響をおよぼす
3. 付着のあるPCはり中の繊維棒材の疲労強度は、繊維棒材単独の疲労強度よりも低下する傾向が見られるが、これははりのひびわれ付近における応力集中の影響が大きいと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 岩本勲・打田靖夫・高木宣章・児島孝之：アラミド繊維棒材を緊張材としたPC梁の曲げ疲労性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.667~672、1992
- 2) 岩本勲・阿河俊夫・打田靖夫・吉川太：コンクリート補強用繊維棒材の諸特性、平成2年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、V-28、1990