

論 文

[1189] CFRPおよびAFRPロッドを用いたPCはりの曲げ疲労特性

正会員 丸山武彦 (日本コンクリート工業)

正会員○伊東幸雄 (日本コンクリート工業)

西山啓伸 (日本コンクリート工業)

1. はじめに

炭素繊維を中心とする新素材FRPロッドの建設分野への応用研究は盛んに行なわれており¹⁾ PC橋梁としてはすでに実用化されている^{2) 3)}。FRPロッドを補強材として利用した場合のはりの静的曲げ挙動に関する報告は多くあり、ひび割れ後の曲げ剛性が劣ること、ひび割れおよび破壊曲げモーメントは従来の弾性理論によって推定できることなどが明らかにされつつある。コンクリート構造物のなかには繰返し荷重を受けるものは多いが、FRPロッドを用いたPCはりの曲げ疲労に関する性状を検討した報告は少なく、現状ではまだ不十分といわざるを得ない。本報告は、現時点で最も実用化に適すると思われる製造方法による、炭素繊維およびアラミド繊維FRPロッドを使用したPCはりを製作し、ひび割れ荷重を超える上限荷重で100万回以上の繰返し載荷を行い、その疲労性状について検討したものである。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

緊張材として用いたFRPロッドは、7本より線型炭素繊維ロッド12.5φおよび組紐型アラミド繊維ロッド12φである。樹脂マトリクスは両者ともエポキシ系であり、CFRPロッドは7本の素線表面にポリエステル繊維を密に巻きつけたものであり、AFRPロッドはアラミド繊維の束を組紐状に編んで凹凸

表-1 緊張材の基本的性質

種 類	炭素繊維ロッド	アラミド繊維ロッド	PC鋼材
形 状	7本より線型	組紐型	7本より線型
公称径 (mm)	12.5	12	12.4
断面積 (mm ²)	76.0	100.0	93.9
破断荷重 (kgf)	16,400	13,560	17,300
引張強度 (kgf/mm ²)	216	136	184
弾性係数 (kgf/mm ²)	14,000	6,550	19,800
破断伸び (%)	1.57	2.07	7.5

を構成したもので、これらのロッドの基本的性質は表-1に示すとおりである。また、比較のために従来のPC鋼より線12.4φも使用した。コンクリ

ートには早強セメントを用い、はり試験体と同一養生の圧縮強度は468kgf/cm²~596kgf/cm²、弾性係数は3.04×10⁵~3.57×10⁵kgf/cm²であった。

2.2 試験体および試験方法

試験体の形状寸法は図-1に示すように、幅20cm、高さ25cm、長さ250cmのプレテンション方式のPCはりとした。初期緊張量はコンクリート下縁の有効プレストレスがほぼ80kgf/cm²となるようにした。試験体の種類は表-2に示すように4種類7本とし、ロッドの引張疲労の検討を含めて引張破壊型のPCはりを主とし、CCS、CCFの試験体ではCFRPロッドを緊張材および主筋に使用して、圧縮破壊型のPCはりとした。曲げ試験はスパン長さ220cm、等曲げモーメント区間40cmとする単純ばり対称2点載荷とし、せん断スパン有効高さ比(a/d)は4.5として曲げ破壊が先行するようにした。静的

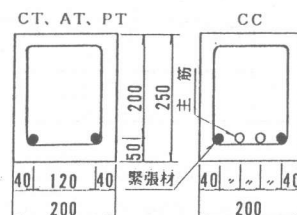


図-1 試験体の形状寸法

曲げ試験は数回の繰返しを行う単調荷重とし、曲げ疲労試験においては上限荷重の大きさによって、第一および第二ステージの2段階荷重とした。第一ステージではひび割れ荷重周辺(6~8tf)を上限荷重として50~60万回の繰返しを行い、引続いて第二ステージでは上限荷重を破壊

表-2 試験体の種類

記号		ロッドの種類		破壊形式	荷重方法	
静的	疲労	緊張材	主筋		静的	疲労
CTS	CTF	炭素より線型	-	曲げ引張	○	○
CCS	CCF	〃	炭素より線型	曲げ圧縮	○	○
-	ATF	アラミト組紐型	-	曲げ引張	-	○
PTS	PTF	PC鋼より線	-	曲げ引張	○	○

計算値の70%程度(9~11tf)まで上げて、60~100万回の繰返し荷重を行った。所定の繰返し回数においてパルセーターを止めて静的荷重を行い、合計100万回以上の繰返しを終了してから静的に破壊に至らせた。なお、荷重速度は毎秒1~2回とした。測定は、はりのたわみ、ロッドおよびコンクリートのひずみ、曲げひび割れ幅などとし、ひび割れ幅はロッド重心位置にひび割れ計をセットして測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 ひび割れおよび破壊状況

表-3に静的および動的曲げ試験の結果を示す。ひび割れ荷重の実測値とPCの曲げ理論による計算値の比は0.85~1.17であり、多少のばらつきは見られるがほぼ従来の弾性計算によって推定できると考えられる。はりの破壊は全て等曲げモーメント区間で生じ、CT、AT、PTシリーズは緊張材の切断による曲げ引張破壊であり、CCシリーズはコンクリートの圧壊と同時に緊張ロッドが切断する圧縮破壊であり計算上の破壊の形式と一致した。圧縮破壊型のPCはりにおいてコンクリートの圧壊が瞬間的に起こると、その衝撃で緊張FRPロッドも同時に切断してはりが2分する極めて脆性的な破壊となることが観察されたので、圧縮コンクリートのじん性を改善する方法を採用することが望ましいと思われる。静的試験における破壊荷重の実測値と計算値の比は1.0~1.14の間でよく一致したのに対し、100万回以上の繰返し曲げを受けたFRPロッドを使用した場合は1.12~1.18と大きくなり、PC鋼より線を用いたはりでは0.64に低下した。

表-3 曲げ試験の結果

荷重方法	記号	上限~下限荷重 (tf)	荷重回数 (10 ⁴)	ひびわれ荷重 (tf)			破壊荷重 (tf)			破壊形式
				計算値	実験値	実/計	計算値	実験値	実/計	
静的	CTS	/	/	5.9	6.5	1.10	13.1	14.9	1.14	引張
	CCS			6.6	5.6	0.85	17.0	18.8	1.10	圧縮
	PTS			7.0	6.8	0.97	13.8	13.8	1.00	引張
疲労	CTF	6~2	60	6.0	6.0	1.00	13.2	14.8	1.12	引張
		9~2	62							
	ATF	6~2	60	5.8	5.0	0.86	11.0	13.0	1.18	引張
		9~2	60							
	CCF	8~3	50	6.7	6.0	0.90	17.0	20.0	1.18	圧縮
		11~5	98							
	PTF	8~2	57	6.4	7.5	1.17	13.7	8.8	0.64	引張
10~2		6.5								

図-2にひび割れ発生状況を示すが、曲げ疲労を受けたPCはりのひび割れ状況は静曲げの場合とほとんど同様であり、FRPロッドを用いた場合はロッド位置に添って水平ひび割れが発生した。この水平ひび割れははりの破壊直後に生じたものであり、ロッドの切断によって引張力が

瞬間的に開放されて弾性収縮し、割裂破壊を生じたものと思われる。平均ひび割れ間隔はロッドの種類によって相違し、CFRPロッドの場合は12~15cm、AFRPロッドの場合は約20cm、PC鋼より線の場合は約16cmであった。これらの引抜き付着強度は、それぞれ約90kgf/cm²、約50kgf/cm²、約60kgf/cm²であり平均ひび割れ間隔と相関関係にあることが分かる。

3.2 PCはりの変形

図-3は静的荷重試験を行った場合の荷重と中央点のたわみとの関係を示し、土木学会標準示方書による計算値も併記した。ひび割れ発生前のたわみは全断面有効とした計算値とよく一致し、ひび割れ後はCFRPロッドを緊張材および主筋として用いた試験体(CCS)では計算値とよく一致するが、鉄筋量の少ないCTSの場合の実測値がやや大きめであった。この理由は、荷重が大きくなるにしたがって斜めひび割れ幅が大きく発達する影響によるものと考えられる。PC鋼より線を用いた試験体も計算値とよく一致するが、高荷重になるにしたがって計算値とかが離する傾向となる。

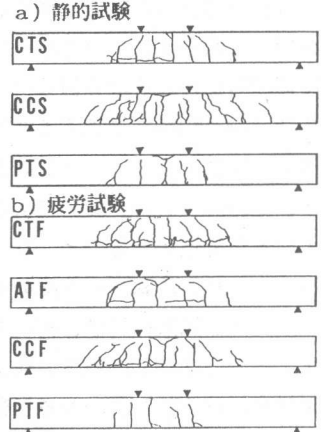


図-2 ひび割れ状況

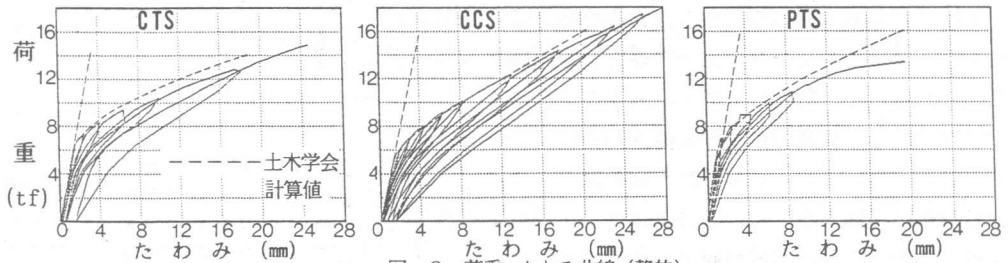


図-3 荷重～たわみ曲線(静的)

図-4は、曲げ疲労載荷を行ったはりの各繰返し回数時の荷重と中央点のたわみとの関係を示す。同図から、使用する緊張材の種類によってはりの変形の増加、残留変形の蓄積、たわみ曲線の形等において差があることが分かる。CTF試験体の場合は、第一ステージでの曲げ剛性の変化はほとんどなく、残留たわみがかさねていく程度である。上限荷重を9

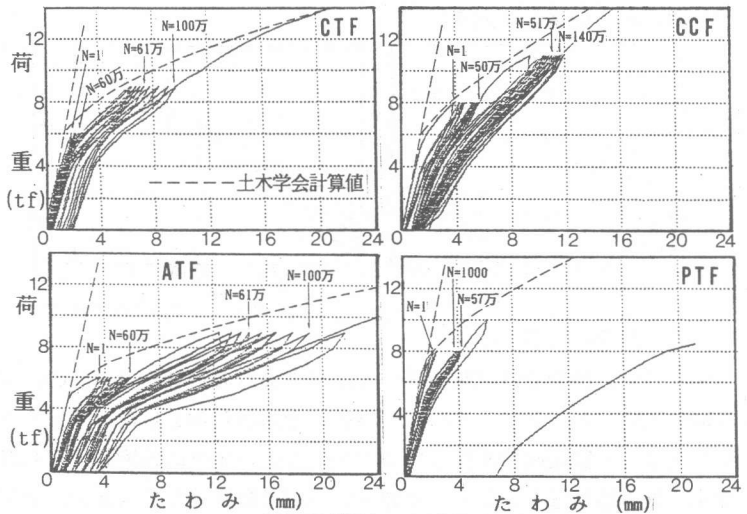


図-4 たわみ履歴曲線(疲労)

tfとした第二ステージの場合でもたわみ曲線のヒステリシスはほとんど変化がなく、残留たわみが2mm程度増加する結果となった。CCF試験体の場合の上限荷重はCTF試験体よりも大きい、第一ステージにおけるたわみの増加傾向はCTFの場合とほぼ同様である。しかし、第二

テージでは繰返し回数が多くなるにしたがってたわみ曲線が直線的傾向を示すようになるが、この理由は明らかにできなかった。これらに対してAFRPロッドを用いた試験体(ATF)の上限荷重時における計算値は1.7mmであるが、第一ステージ60万回の繰返し後のたわみは、3.4mmから5.8mmと約80%増加すると同時に残留たわみも約1mm生じ、第二ステージにおいてはこの傾向はより顕著となり、ロッドの引張剛性が小さいために中立軸が上昇すること、斜めひび割れの影響が現われること、疲労による付着の劣化およびロッドの引張疲労によるクリープが大きくなっている可能性があること、などが原因として考えられる。また、デコンプレッションモーメントを示すたわみ曲線のこう配の変化点が、繰返し回数の増加とともに下降していることも特徴である。PTF試験体では、第一ステージの繰返し初期でははりの剛性変化は生じていないが、第二ステージでは1000回程度の繰返しによってたわみは約2倍の4mmとなり、繰返し载荷によるPC鋼材の付着切れと思われる影響が徐々に表われている。第二ステージの上限荷重は破壊計算値の約90%にも達しているために鋼材の疲労による塑性伸びの増加が激しく、約6万回程度の繰返しによって残留たわみは著しく増加した。

図-5は、中央点たわみと繰返し回数(logN)との関係を示す。CTFの場合は、第一ステージでのたわみの増加量は極めて少なく、第二ステージでは1万回の繰返し周辺からたわみの増加は大きくなるが、せん断ひび割れの発達などが原因と考えられる。これに対して同一载荷条件であるATFの場合は、初期の数千回の繰返しからたわみが急増し、第二ステージでも数千回の繰返し周辺から極端に増加する。CCSの場合は、第一および第二ステージ共に同様な傾向で漸増する。PC鋼材を用いたPTFはりのたわみは、数百回の繰返し周辺からの増加が大きい。

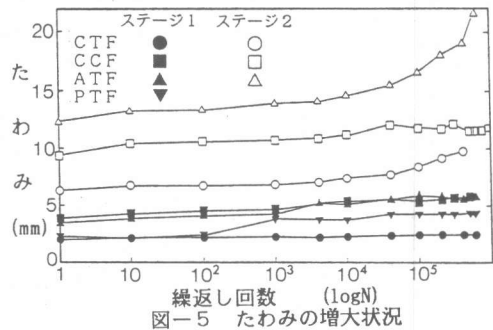


図-5 たわみの増大状況

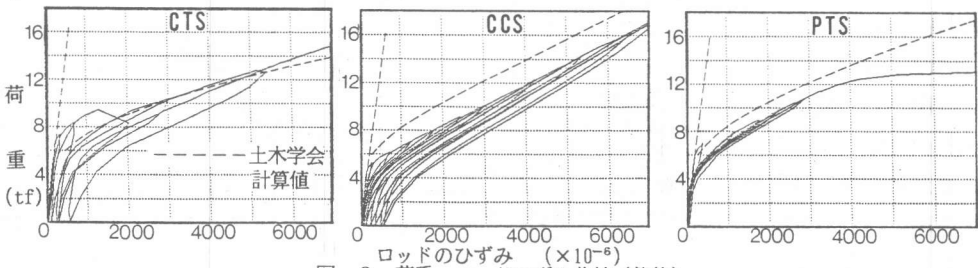


図-6 荷重～ロッドひずみ曲線(静的)

3. 3 緊張材のひずみ

図-6は、静的曲げ試験の場合のはり中央点のFRPロッドのひずみと荷重の関係を示す。ひび割れ前のCFRPロッドのひずみは、全断面有効とした計算値とよく一致している。ひび割れが発生すると緊張材量が少ないCTSはりのひずみは急増し、CCSはりのひずみの包絡線はほぼ完全な直線状態を示し、その傾きはCTSに比較して大きい。PTSの場合はひび割れ発生後から緩やかな曲線状態でひずみが増加し、鋼材が降伏状態に達した12tf以後において急増して終局状態に達する。図-7は、繰返し载荷を行った場合のロッドのひずみヒステリシスを示す。CTFの場合、第一ステージの60万回の繰返し载荷においても、ロッドのひずみの増加は非常に小さく、第二ステージでは繰返しと共にひずみが増加することが分かる。ATFの場合は

第一ステージにおいてロッドのひずみの増加が著しく、第二ステージでは繰返し回数1万回までであるがCTFとほぼ同等である。CCFの場合は、ロッドが受け持つ引張力が小さいのでひずみの増加は少ない。PTFはりの場合は、最初の57万回の繰返しで鋼材の付着疲労および引張疲労が徐々に生じている兆候が観察され、第二ステージの上限荷重時では引張疲労が急激に進行したことを示して

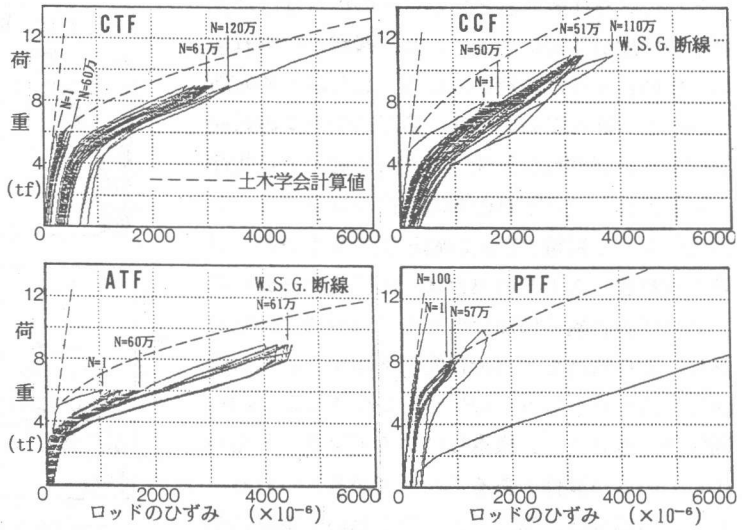


図-7 ロッドひずみ履歴曲線 (疲労)

いる。図-8は、上限荷重作用時の緊張材の引張ひずみと繰返し回数(logN)の関係を示しており、上述した傾向がより明瞭に示されている。

3.4 コンクリートの圧縮ひずみ

図-9は、繰返し载荷による圧縮縁コンクリートのひずみヒステリシスを示す。CTFの場合は、第一ステージでの圧縮ひずみは $450 \sim 550 \times 10^{-6}$ 程度、第二ステージでは繰返し回数1万回までであるが $1300 \sim 1400 \times 10^{-6}$ 程度の変化である。これに対して、ほぼ同一の鉄筋比で弾性係数が約

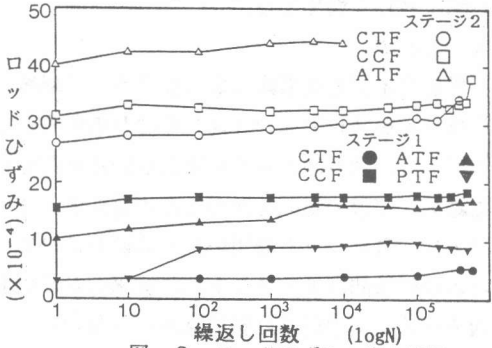


図-8 ロッドひずみの増大状況

1/2であるAFRPロッドを用いたATFはりにおいては、第一ステージでは $900 \sim 1100 \times 10^{-6}$ 程度、第二ステージでは1万回の载荷により $1750 \sim 2100 \times 10^{-6}$ 程度となり、コンクリートの疲労が進行している傾向を示している。これは、CCFの場合の第二ステージでの $1550 \sim 1950 \times 10^{-6}$ 以上の値である。したがって、引張剛性の小さいFRPロッドを補強材として使用する場合は、コンクリートの圧縮疲労についても十分な検討を行うことが重要である。

3.5 ひび割れ幅

図-10は、繰返し载荷を行った場合のひび割れ幅のヒステリシスを示す。CT

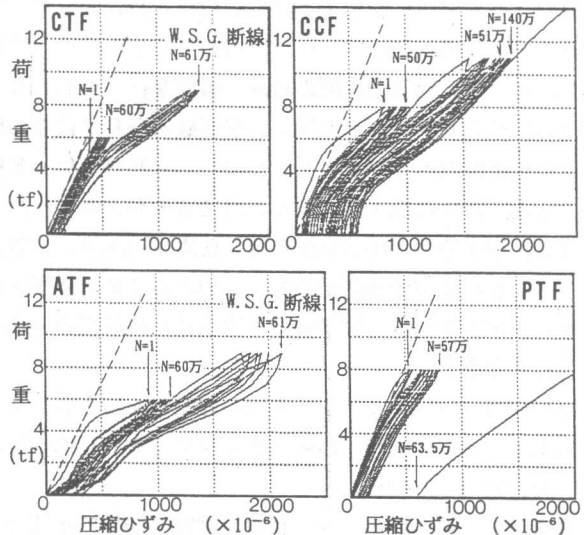


図-9 圧縮ひずみ履歴曲線 (疲労)

FとCCFを比較すると、CCFの場合はひび割れ幅の増加が非常に小さいこと、残留ひび割れ幅の少ないことなどが特徴である。したがって鉄筋比が小さいはりにおいては、第二ステージの繰返しによりひび割れ直近部分の付着の劣化の可能性のあること、ひび割れの開閉に伴うコンクリート劣化によって残留ひび割れ幅が生じやすいことが考えられる。ATFの場合は、第二ステージにおいてひび割れ幅の増加は大きく1.2～3.3mmにも達し、また残留も0.4mm程度に増加する。この原因は、AFRPロッドの付着力が小さくひび割れ間隔が大きいこと、繰返しによるアンボンド化が生じている可能性のあることなどが考えられる。PTFの場合は、第二ステージにおいて鋼材の塑性伸びの進行や付着切れの発生等によってひび割れ幅は著しく増加する。

4. まとめ

異形タイプの炭素繊維およびアラミド繊維FRPロッドをプレテンションPCはりの緊張材として使用し、100万回を超える繰返し曲げ载荷を行った結果、実験の範囲で次のことが言える。

- (1) FRPロッドを用いたPCはりのひび割れおよび破壊曲げモーメントは、従来のPCの曲げ理論によって推定でき、120万回の繰返し後の破壊モーメントの低下は特に認められない。
 - (2) 圧縮破壊型のPCはりでコンクリートが瞬間的に圧壊する場合、その衝撃によってCFRPロッドも同時に破断する現象が観察され、圧縮靱性の改善が必要であると思われる。
 - (3) 引張破壊型のPCはりにおいて、上限荷重をひび割れ荷重および破壊計算値の約70%として、それぞれ60万回程度の繰返し载荷を行ってもFRPロッドの疲労破断はなかった。
 - (4) CFRPロッドを用いた引張破壊型PCはりの場合は、繰返しによる曲げ剛性の低下は小さく残留変形も少なかった。しかし、AFRPロッドを用いた場合には、高荷重域での繰返しによる曲げ剛性の低下は大きく、残留変形も大きかった。
 - (5) 引張剛性が小さい緊張材を使用する場合、引張破壊型であるにもかかわらず繰返し载荷によって圧縮疲労破壊に至るおそれのあることが観察されたので、十分な検討が必要である。
- なお、本実験はFRP緊張材研究会の共同研究の一部であることを付記する。

[参考文献]

- 1) 日経ニューマテリアル：未来の建築物を担う新コンクリート補強材料，日経BP社，No. 75, 1990
- 2) 山下，木内，犬飼，岩崎：新素材によるPC橋（新宮橋の設計，プレストレストコンクリート vol. 31, No. 2, 1989
- 3) 半沢，小林，丸山，西山：炭素繊維FRP材料を使用したノンメタルPC人道橋，(701)(702)(703)，第44回土木学会年次学術講演会，平成元年10月

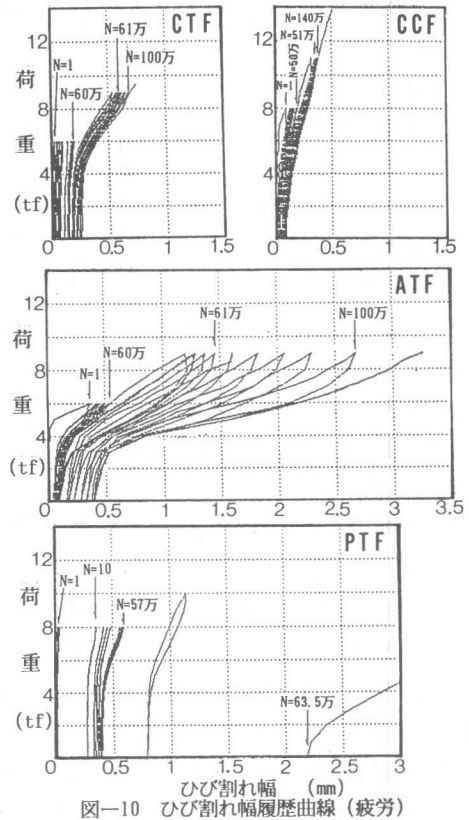


図-10 ひび割れ幅履歴曲線(疲労)