

論 文

[1200] CFRPロッドを用いたPCはりの繰返し載荷による付着性状に関する一実験

正会員 丸山武彦（日本コンクリート工業）

正会員○本間雅人（日本コンクリート工業）

正会員 小沢一雅（東京大学工学部）

1. はじめに

異形化した各種のFRPロッドは、異形鉄筋もしくはPC鋼より線と同等の付着強度を有することが、既に報告されている。^{1), 2)}しかし、繰返し荷重が作用した場合のFRPロッドとコンクリートとの付着力の変化を検討した資料がないこと、ロッドに2次的に繊維束を巻付けて異形化したFRPロッドの付着破壊は異形部とロッドのはく離による場合が多いことなどから、FRPロッドの付着疲労に関して不安が残る。そこで本実験では、CFRPストランドと巻付け型CFRPロッドを緊張材に用いたPCはりの繰返し曲げ試験を行い、FRPロッドとコンクリートとの付着性状の変化、PCはりの曲げ疲労特性などについて検討した。

2. 使用材料および実験方法

2. 1 使用材料

PC梁の緊張材として使用したCFRPロッドは、既に実用に供せられている公称径12.5mmの7本よりのCFRPストランド³⁾、および公称径6mmの繊維巻付け型CFRPロッドの2種類である。その特性値は表1に示すようであり、付着長を14Dとした引抜き試験の結果、CFRPストランドは92kgf/cm²、巻付け型CFRPロッドは123kgf/cm²と、PC鋼より線の2~3倍の静的な付着強度を有する。コンクリートは早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法は20mm、水セメント比は40%、セメント量は410kg/m³で、プレストレス導入時の圧縮強度は370~420kgf/cm²、試験時は540~600kgf/cm²で、弾性係数は約 3.4×10^5 kgf/cm²であった。

2. 2 試験体の形状

試験体の形状を図1に、試験体の一覧表を表2に示す。試験体はすべてプレテンション方式にて製作し、(CA)にはCFRPストランドを2本、(CB)には巻付け型CFRPロッドを4本配置した。初期緊張量は(CA)で4.2tf/本、(CB)で1.5tf/本とした。(CA)のPCはりにおいては中心から両側15cm毎に下縁に切り欠きを設け、それぞれの切り欠きの中央に位置するようにロッドの軸線方向8箇所にひずみゲージを張付けた。また、CA-3は等曲げモ

表1. CFRPロッドの特性

緊張材	CFRPストランド	巻付けCFRPロッド
記号	A	B
公称径 (mm)	12.5	6.0
断面積 (mm ²)	76	28
繊維含有率 (%)	64	65
引張強度 (kgf/mm ²)	216	177
弾性係数 (kgf/mm ²)	14,000	14,700
破断ひずみ (%)	1.57	1.18
異形加工方法	ポリエチレン被覆 よりピッチ150mm	炭素繊維6K巻付け ピッチ6mm
付着強度 (kgf/cm ²)	92	123

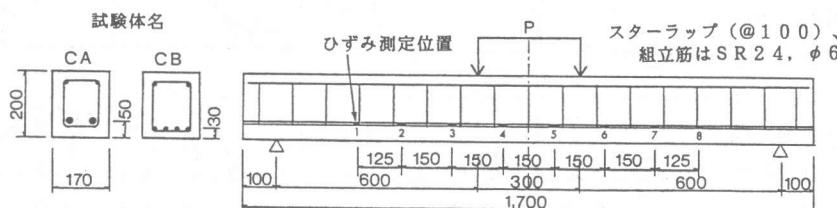


図1. 試験体の形状および緊張材のひずみ測定位置

表2. 試験体一覧

試験体名	下限プレストレス量 (kgf/cm ²) *1	荷重範囲(tf)		繰返し回数(10 ⁴)		M _{u test} (tfm)	M _{u cal} (tfm)	破壊形式
		1次	2次	1次	2次			
CA-1	53.4	1~4	1.5~7	—	—	3.66	3.64	コンクリート圧壊
CA-2	"	"	"	117	115	3.83	3.71	"
CA-3	"	"	"	118	71	3.14	3.21 *2	"
CB-1	47.5	"	1.5~6	118	22	3.30	3.14	ロッド破断

*1 計算値、*2 付着ありで計算したものから15%減じたもの。

一メント区間にロッドに一液性常温硬化型のシリコーンゴムを塗布し、アンボンド区間を設けてある。コンクリートの打設後3日で、ロッドを定着したナットを徐々に緩めてプレストレスを導入した。

2.3 実験方法

PCはりの載荷方法は曲げスパン長さ120cm、等曲げモーメント区間30cmの単純ばかり対称2点載荷とした。第一段階の繰返し載荷は、上限荷重を曲げひびわれ発生荷重より若干大きい4tf、下限荷重を1tfとし、約120万回の繰返しを行った。引き続いて第二段階においては、上限荷重を設計破壊荷重の約60%（6tfまたは7tf）、下限荷重を1.5tfとして、20~115万回の繰返し載荷を行った。まず上限荷重まで静的に10サイクル載荷し、以後下限荷重との間で、毎分200回の速度で繰返し載荷を行い、測定は装置を適時止め、静的に載荷して行った。等曲げモーメント区間のロッド位置におけるコンクリートの平均ひずみはピゲージによって、ひびわれ幅はコンクリート下縁に取り付けたひびわれ計によって測定した。

3. 実験結果

FRPロッドを用いたPCはりの第一および第二段階の合計繰返し載荷、約140~230万回後の静的破壊曲げモーメントの実測値および計算値を表2に示す。計算値はFRPロッドの応力とひずみの関係が引張強度まで完全弾性体と仮定したほかは、PCの弾性理論によって求めたものである。破壊曲げモーメントの実測値と計算値の比は0.98~1.05で、ほとんど低下はみられない。

3.1 ひびわれの発生状況およびひびわれ幅

第一および第二段階の繰返し載荷におけるひびわれの発生状況を図2に示す。CA-2のひびわれは切り欠きに沿って約15cmの間隔で入り、第一段階のひびわれは千回の繰返しまで発達するが、それ以後の発達は極めて少ない。第二段階では、主としてせん断スパン内の曲げひびわれが発達して斜めひびわれとなり、約一万回の繰返しで上縁水平方向のひびわれまで進展し、以後の新たなひびわれの発生は少ない。等曲げモーメント区間をアンボンドとしたCA-3では、第一段階で曲げひびわれははり中央にのみ発達し、第二段階では中央のひ

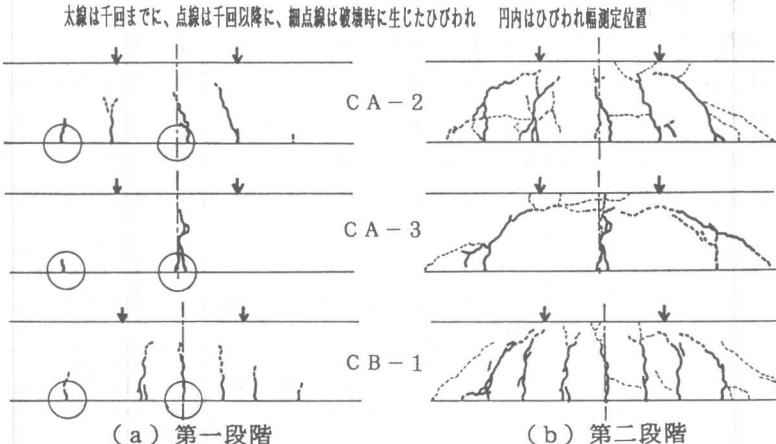


図2. 試験体のひびわれ発生状況

びわれは上縁近くまで進展し、せん断スパンの斜めひびわれの発達が著しく、その角度も45°以下となり、アンボンドはりの特徴が現れている。CFRPストランドに比べて付着強度の大きい巻付け型CFRPロッドを用いたCB-1の平均ひびわれ間隔は約10cmと小さく、第一段階でのひびわれは垂直に順次進展し、第二段階では、やはりせん断スパン内のひびわれが発達し、数万回の繰返し以後の発達は少ない。

以上の各試験体のひびわれの発達状況は、図3に示す等曲げモーメント区間およびせん断区間の代表的ひびわれ幅の増加傾向とも一致する。すなわち、第一段階においては、主に等曲げ区間内のひびわれ幅が増加し、特にCA-3では、ひびわれ本

数が一本のため、ひびわれ幅は繰返し回数に比例する傾きで、約3倍の0.57mmまで拡大した。CA-2においては、千回の繰返し以降は安定し、コンクリート標準示方書による計算値をこえるものの、117万回後のひびわれ幅は約2倍の0.27mmである。CB-1においては、等曲げ区間およびせん断スパンのひびわれ幅は共に漸増する。第二段階においては、CA-2、CB-1でせん断スパンのひびわれ幅が等曲げ区間のそれを上回るようになり、CA-3においても、せん断スパンのひびわれ幅は増大している。これは、CFRPロッドは鉄筋に比較して剛性が小さく斜めひびわれが生じやすいこと、せん断ずれが繰返されその部分のコンクリートが劣化したことほか、せん断スパン内におけるロッドの付着応力度が大きくなつたため、ロッドの付着力の劣化が進んだことなどが考えられる。

3.2 曲げ剛性の変化

図4に上限荷重時の曲率の繰返し回数による変化を片対数グラフで示す。曲率は中央断面コンクリート上縁の圧縮ひずみと、等曲げ区間のロッド位置の平均引張りひずみから求めた。繰返し回数に伴う曲率の変化は、ひびわれ幅の増加とほぼ同様の傾向を示しており、したがって上縁コンクリートの圧縮ひずみの変化とも連動している。これは、新たなひびわれの発生がないことによるものと考えられる。第一段階のCA-2の曲率は、千回の繰返しの間に直線的に増加して、その後の変化は少ない。CA-3、CB-1は初期の数十回の繰返しによる変化が大きく、その後は漸増し、10万回以後再び急増する傾向を示す。これらの相違が生じた理由は明らかではないが、CA-2ではコンクリートの剛性の低下やFRPロッドのひびわれ付近の付着が少しづつ切

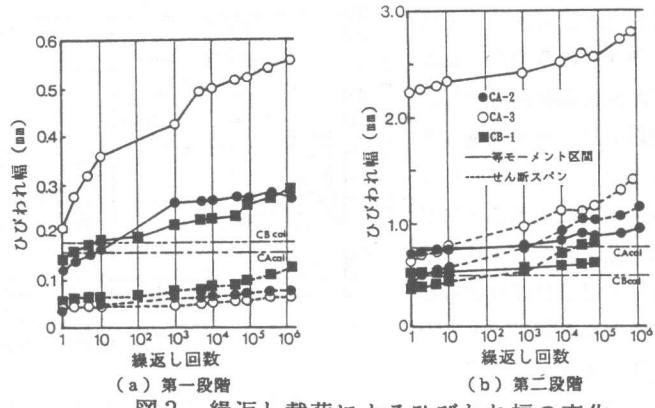


図3. 繰返し載荷によるひびわれ幅の変化

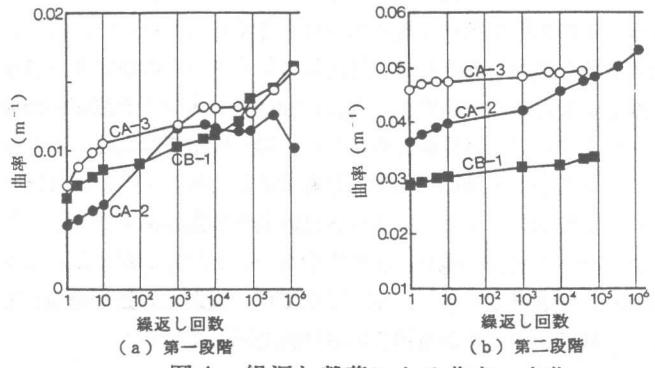


図4. 繰返し載荷による曲率の変化

れること、CA-3では1か所にのみ発生したひびわれは初期に進行し、繰返しによる中立軸の上昇とコンクリートのひずみの増加によることなどが考えられる。また、CB-1は、ひびわれの発達と共にFRPロッドの付着が順次失われていく

ためではないかと考えられる。第二段階においては、CA-3およびCB-1の変化は比較的小さいが、CA-2の曲率は急増している。これは、CA-3は最初から等曲げ区間の付着がなく、CB-1の曲率は第一段階で相当に大きくなっているのに対し、CA-2では安定していた付着力が次第に失われると共に、圧縮側コンクリートのひずみも増加しているためと考えられる。

図5は繰返し回数の異なる場合の曲げモーメントと曲率の関係を示す。また、換算断面2次モーメントを用いた計算値も併記した。第一段階では繰返しによる影響を初期に大きく受けるため、モーメント～曲率曲線の勾配は初載荷時に比較してコンプレッションモーメント付近から緩やかになり、特にCB-1で顕著である。CA-3は除荷時の残留曲率が生じており、ひびわれ幅が大きいためコンクリートの破片が残り、戻りの少ないことがうかがえる。しかし、上限荷重を上げると再び曲線は計算値とほぼ一致し、第二段階では、繰返し回数が増加しても曲線の形にはほとんど変化はなく、残留する曲率が蓄積される傾向を示している。

3.3 たわみの変化

図6は繰返し回数の異なる荷重～はり中央たわみの関係を示す。CA-2のたわみは、等価断面2次モーメントを用いた弾性計算値にほぼ等しいが、CA-3はCA-2よりも1

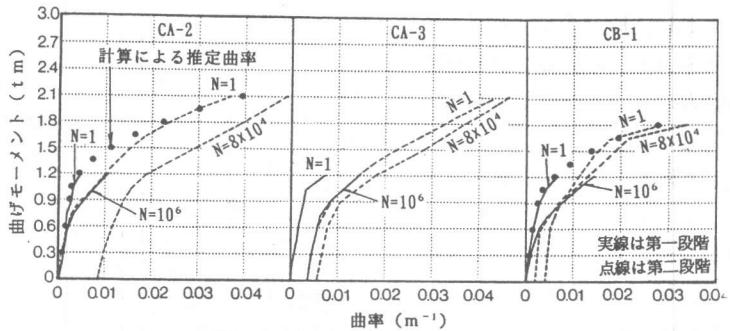


図5. 曲げモーメントと曲率の関係

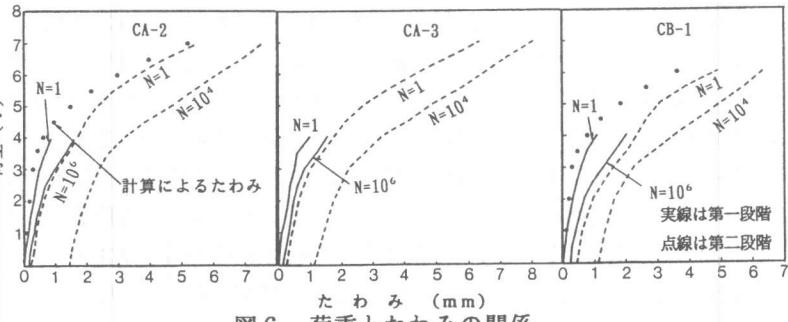


図6. 荷重とたわみの関係

程度大きく、アンボンド区間を有するためと考えられる。CB-1のたわみも計算値に比べて大きいが、この理由は計算値がせん断変形を考慮しておらず、またせん断スパン内のひびわれが発達したためと考えられる。

3.4 コンクリートおよびFRPロッドのひずみ変化

図7は上限荷重作用時の圧縮縁コンクリートひずみの変化を片対数グラフで示したものである。第一段階の初載荷時の圧縮縁コンクリートの計算応力度は圧縮強度の31～32%に相当する。第一段階の繰返し載荷によって、CA-2のひずみは 350×10^{-6} から 600×10^{-6} へ約60%増加し、CA-3で約70%、CB-1では約50%の増加となっている。第二段階においては、CA-2のひずみが 1400×10^{-6} から 2300×10^{-6} へと約60%増加しているのが顕著で、他の試験体における増加

量はさほど大きくはない。これは、斜めひびわれの発達の大きいことから等曲げ区間がタイドアーチ的構造に近づいて応力度が大きくなること、圧縮疲労の影響があることのほか、FRPロッドの付着切れが進行していることが考えられる。

図8はFRPロッドのひずみと繰返し回数の関係を、図9は代表的な繰返し回数におけるFRPロッドの軸線方向のひずみ分布を示す。第一段階におけるロッドのひずみは、図8(a)に示すように、等曲げモーメント区間の増加が著しく、せん断スパンでの変化は小さい。この時、せん断スパン内のロッドに働く付着応力度は計算上CA-2で21kgf/cm²、CB-1で18kgf/cm²

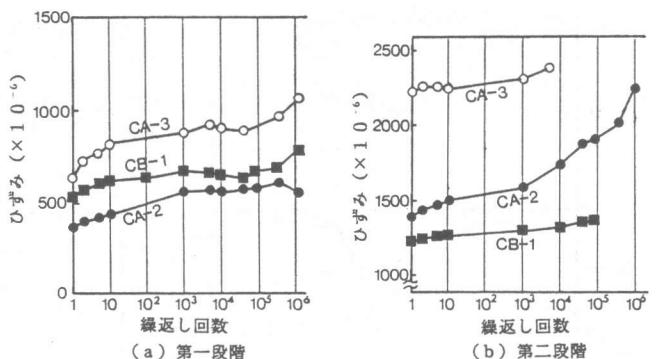


図7. 繰返し載荷による圧縮縁コンクリートひずみの変化

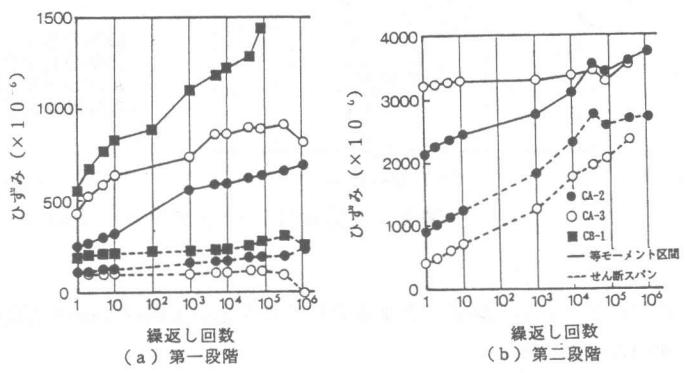


図8. 繰返し載荷によるFRPロッドひずみの変化

である。付着のあるPCはりCA-2の等曲げ区間の付着切れが進行すると仮定すれば、2つのひびわれの中央に位置するロッドのひずみは、アンボンド区間を設けたCA-3のひずみに近づき、せん断スパン内の付着切れが進行すれば、ロッドのひずみは一様化すると考えられる。しかし、両者のひずみ差は100万回の繰返し後も大きな変化ではなく、また図9(a)に示すように、ひずみ分布は繰返しに伴い計算値に近づく。これは、PCはりのロッドおよび圧縮側コンクリートの応力中心距離が繰返しに伴って長くなり、ひびわれ発生後はRCと仮定したときの距離に近づくためであり、ひびわれ近くの付着の劣化は若干生じても、ロッド全体がアンボンド化する方向ではないと考えられる。CB-1の場合もほぼ同様の傾向を示しており、このレベルの応力では付着劣化のおそれは少ないと考えられる。しかし、第二段階になるとCA-2のロッドに働く付着応力度は計算上34kgf/cm²になり、応力振幅も増すことから、CA-2のひずみは等曲げ区間およびせん断スパンとともに増大し、図9(b)に示されるように、せん断スパン内のひずみは等モーメント区間のひずみに近づく。この理由として、FRPロッドの付着切れ、圧縮側コンクリートのひずみの増加および斜めひびわれが生じたことによる引張力のシフトなどが考えられるが、それぞれの区別はできなかった。一方、アンボンドはりCA-3の場合、第一段階においてはアンボンド区間のひずみだけが増加し、第二段階ではアンボンド区間のひずみはほとんど変わらず、せん断スパン内のひずみが増加している。この理由として、せん断スパン内に生じた斜めひびわれの角度が小さくロッドに沿った形で発達したため、コンクリートによるロッドの付着が失われたこと、引張力のシフトなどが考えられる。

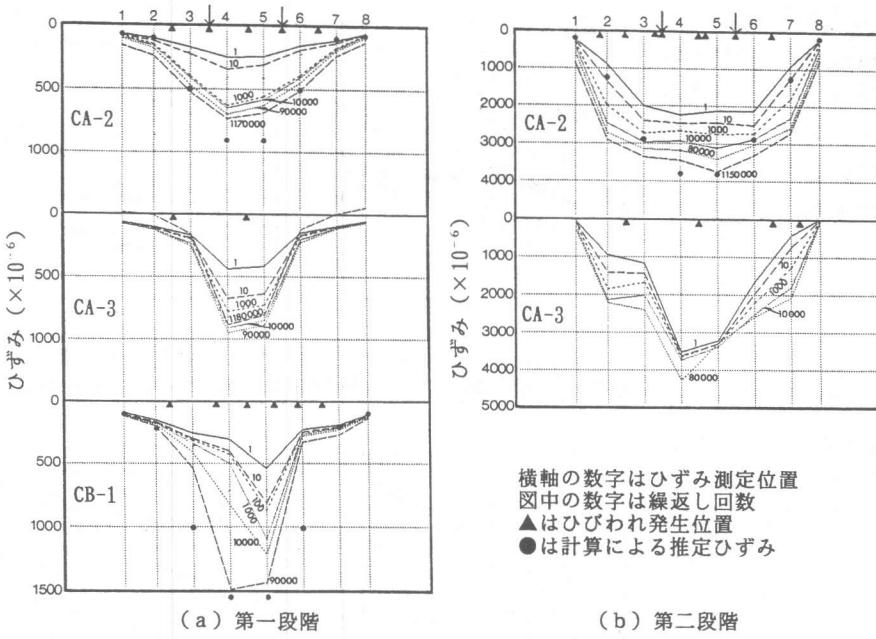


図9. 上限荷重時のFRPロッドのひずみ分布

4. まとめ

CFRPロッドを緊張材とするPCはりを用いて繰返し曲げ試験を行った結果、実験の範囲内で次のことがいえる。

- 1) 上限荷重をひびわれ発生荷重として120万回程度、さらに上限荷重を設計破壊荷重の約60%として20～115万回の繰返し載荷を行った後のPCはりの静的曲げ強度は計算値とほぼ一致した。
 - 2) 上限荷重をひびわれ発生荷重とする場合は、等曲げ区間のひびわれが主に増大し、破壊荷重の約60%を上限荷重とする場合は、せん断スパン内の斜めひびわれの発達が卓越した。
 - 3) ひびわれ発生荷重をこえる合計約140～230万回の繰返し載荷を行った後、PCはりの剛性は若干低下したが、曲げ性状に大きな変化は見られなかった。
 - 4) CFRPストランドおよび巻付け型CFRPロッドを用いた場合、ひびわれ荷重を上限とする繰返し約120万回において、ロッドの付着力が低下したと考えられる明確な徴候は見られなかった。しかし、破壊荷重の約60%を上限とする場合はストランドのひずみ分布が一様化する傾向が見られたが、その原因は明確にできなかった。
 - 5) 以上からは、繰返し載荷によってFRPロッドの付着疲労が生じる可能性は否定できないが、部分的に付着の劣化が生じたとしても部材の耐力が大きく低下するとは考えられない。しかし、アンボンド化が進むと変形が増加し、コンクリートの圧縮域が小さくなるため、付着の劣化に関する資料が十分蓄積されるまでの間はフルプレストレスで設計することが望ましいと考えられる。
- <参考文献> 1) 岡本、田村、松原、谷垣：アラミド繊維による組紐状棒材の基本的特性、コンクリート工学年次論文報告集、1988 2) 丸山、伊東、西山：異形加工したFRPロッドの付着特性、コンクリート工学年次論文報告集、1989 3) 山下、木内、犬飼、岩崎：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, 1989 4) 鈴木、大野、宮丸：PCRはりの繰返し荷重下における曲げ性状について、セメント技術年報、No. 38、昭和59年

横軸の数字はひずみ測定位置
図中の数字は繰返し回数
▲はひびわれ発生位置
●は計算による推定ひずみ