

## 論文 2 定点逆位相載荷した 2 方向 AFRP シート補強 RC 梁の疲労性状

中島 規道\*1・三上 浩\*2・鍋島 益弘\*3・柑本哲哉\*4

**要旨：**2 方向に配列されたアラミド繊維シートにより補強した部材の繰返し荷重に対する耐久性を検討するため、コンクリート面の下地処理方法およびシート補強量を変化させた RC 梁の疲労試験を実施した。疲労試験は、2 台のアクチュエーターにより 180° の位相差をつけた加力とし、移動荷重による劣化現象を簡便に表現することを試みた。その結果、1) 下縁かぶりの曲げひびわれと斜めひびわれの交点を起点とするコンクリートのブロック化により疲労劣化が進行すること、2) ブロック化の抑制には、補強量の増加および接着力の向上が有効であること、等を明らかにした。

**キーワード：**2 方向アラミド繊維シート、逆位相載荷、付着性状、疲労耐久性

### 1. はじめに

近年、構造物の経年劣化や、荷重条件の変化により補修を要する社会基盤構造物が増加しつつあり、各種連続繊維シートによる鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の補強工法も様々な構造形式に適用されつつある。

筆者らは、これまでアラミド繊維を 2 方向に織上げて布状に配列した 2 方向アラミド繊維シート（以下、AFRP シート）を用いて補強した各種 RC 部材の荷重試験を行って補強効果を検討し、静的な荷重条件では良好な補強効果を有すること<sup>1)</sup>、移動荷重による繰返し荷重を受ける床版構造物には界面の接着性状の違いが疲労耐久性の違いに与える影響が大きいこと<sup>2)</sup>などを明らかにしてきている。

現在、連続繊維シート補強工法の基本的性質である付着性状は、土木学会基準に規定された試験方法<sup>3)</sup>により評価されているが、動的な荷重条件における付着性状は十分に解明にされておらず解明が求められている。

本研究では、2 方向 AFRP シートの動的な荷重条件における付着性状を明らかにすることを目的とし、コンクリートの下地処理方法と補

強層数を変化させた RC 梁の疲労試験を行った。特に、載荷方法として 2 定点の逆位相載荷を考案し、せん断力が正負に交番する荷重条件での付着性状の検討を試みている。

### 2. 実験概要

本実験に用いた試験体の一覧を表 1 に示す。コンクリート表面の下地処理方法をディスクサンダーによる表面研磨、サンドブラストによる粗面処理の 2 種、AFRP シートの層数を 1 層および 2 層の 2 種、基準となる無補強試験体を含めて試験体総数を 5 体とした。

試験体形状寸法を図 1 に示す。試験体断面は、幅 450mm、高さ 190mm の扁平な矩形断面とした。形状寸法は、補強材料の 2 方向性および既往の研究との比較検討を考慮して設定した。

補強材は、引張側に SD295-D16 を 3 本、圧縮側に SD295-D19 を 1 本配置した。スターラップは、D6 を 10cm 間隔で試験体全長にわたって配置した。コンクリートは、早強セメントを使用し、最大骨材径を 20mm とした。疲労試験は、材令 70 日から 120 日の 50 日間で行い、期間中の圧縮強度の平均は 36.3N/mm<sup>2</sup>であった。

\*1 三井住友建設（株） 技術研究所 工修（正会員）

\*2 三井住友建設（株） 技術研究所 工博（正会員）

\*3 大成ロテック（株）

\*4 住友ゴム工業（株）

AFRPシートの補強範囲は、試験体下面の幅450mm、長さ2200mmの範囲とした。AFRPシートは、高弾性タイプのアラミド繊維を布状に織り上げ2方向に配列した製品を使用した。含浸・接着樹脂は常温硬化型の標準的なエポキシ樹脂を使用した。AFRPシートの機械的性質を表-2に示す。直交する2方向の特性は、何れも等しい値となっている。なお、AFRPシートの貼付作業は、コンクリートとの界面の樹脂量を確保するために、繊維シート内に予め樹脂を含浸した後にコンクリート面に貼付する事前含浸法により実施した。

試験機は、容量500kNのアクチュエーター2台を荷重制御で使用した。載荷点は、それぞれに分配桁を取付け400mm間隔の4点とした。支点は単純なピン構造とし、試験体の支点部への拘束は行っていない。

逆位相荷重の概要を図-2に、主要なステージにおける荷重の設定値を表-3に示す。2台のアクチュエーターの荷重波形は、下限値および荷重振幅の等しい正弦波とし、位相差を180度に設定した。これにより2台の荷重の合計は一定となり、試験体中央部における応力状態は、曲げモーメントが一定、せん断力が正負に反転する状態となる。荷重振幅は、1ステージ目を14kNに設定し、4万回ごとに7kN増加させる階段載荷とした。下限値は、全ステージで7kNの一定値とした。以降、荷重レベルは2台のアクチュエーターの合計値を用いて呼称するものとする。なお、載荷ルールは文献1)および2)の試験結果を基に算定した。

さらに、各ステージの開始時には、位相差を付けず2台の荷重が等しい状態で荷重2kNまでの除荷、および次ステージの目標荷重までの再載荷を行い、各荷重レベルの挙動の静的な計測も実施した。

計測は、ロードセルにより荷重を、レーザー変位計により変位を測定した。さらに、断面中央部の主鉄筋、アラミド繊維シート、およびコンクリートにひずみゲージを貼付して、ひずみを

表-1 試験水準

試験体	表面処理	アラミド
FN	-	無し
FS1	表面研磨	1層
FT1	粗面処理	1層
FS2	表面研磨	2層
FT2	粗面処理	2層

表-2 2方向アラミド繊維シート

方向	目付け g/m <sup>2</sup>	耐力 kN/m N	f <sub>u</sub> /mm <sup>2</sup>	E <sub>a</sub> kN/mm <sup>2</sup>
縦	435	490	2060	118
横	435	490	2060	118

表-3 アクチュエーターの設定

STAGE	累計回数 ×10 <sup>3</sup>	設定値		梁中央部の状態	
		振幅 kN	合計 kN	V kN	M kN・m
1	40	14	28	±4.8	11.9
2	80	21	35	±7.1	14.9
7	280	56	70	±19.0	29.8
15	600	112	126	±38.1	53.6

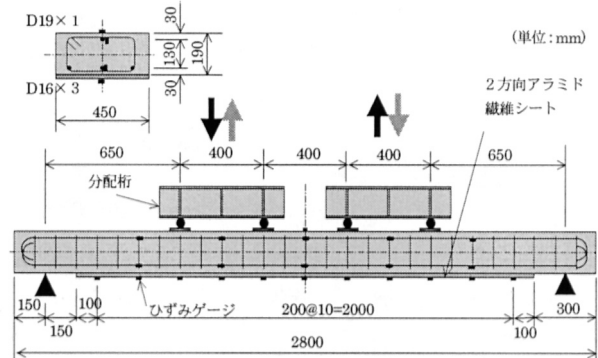


図-1 試験体形状・寸法

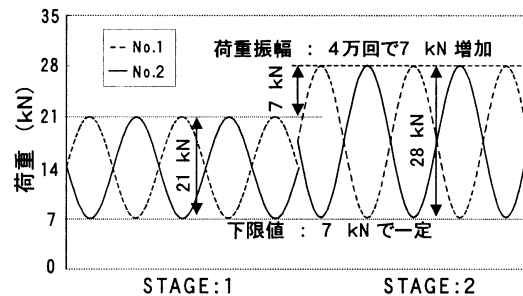


図-2 逆位相載荷

測定した。なお、本実験では2方向の繊維シートを使用しているが、軸直角方向は応力勾配が生じないためひずみの測定を省略した。

### 3. 試験結果

#### 3.1 破壊状況

表-4 に試験結果の一覧を示す。無補強の FN 試験体は、荷重 56kN の終了時に引張鉄筋が降伏し、コンクリートの圧壊により耐力を喪失した。AFRP シートで補強した試験体は、何れも主鉄筋の降伏後も耐力を保持し、荷重が大きく増加した後に終局に至っている。降伏荷重の増加量は、表面研磨よりは粗面処理が大きく、1 層補強よりも 2 層補強が大きくなる傾向が認められた。

表面研磨+1 層補強の FS1 試験体は、119kN ステージでコンクリートが圧壊した後に変形が急激に進行してシートが剥離した。粗面処理+1 層の FT1 試験体および表面研磨+2 層補強を行った FS2 試験体は、126kN ステージでシートの剥離により終局となった。粗面処理+AFRP シート 2 層の FT2 試験体はシート端部よりせん断ひび割れが発生して耐力を喪失し、剥離は認められなかった。AFRP シートで補強した試験体の破壊形式は様々であるが、終局ステージがほぼ等しいため、変位およびアラミドひずみに着目して検討を進めるものとする。

#### 3.2 変位

載荷回数と試験体中央変位の関係を図-3 に示す。AFRP シート 1 層で補強した試験体は、鉄筋が降伏ひずみに達した後に変位の増加速度が大きくなる傾向が示されている。しかしながら、2 層補強の試験体では降伏直後の顕著な増加は認められず、表面研磨の FS2 試験体が荷重 112kN ステージで増加を示したのみであった。終局変位は、表面研磨よりも粗面処理の試験体が小さくなる傾向が認められ、下地処理の差が変形に影響を与えることが示唆されている。

載荷回数と活荷重変位の関係を図-4 に示す。活荷重変位は、静的計測の結果から荷重 4kN 時の変位との差分として算出した。活荷重変位の変化は、図-3 に示される絶対変位の挙動に比して主鉄筋降伏前後の変化が滑らかな傾向とな

表-4 試験結果一覧

試験体	降伏		破壊			形式
	STAGE	荷重 kN	STAGE	荷重 kN	回数 $\times 10^4$	
FN	5	56	5	59	20.0	曲げ
FS1	7	70	14	119	542.0	曲/剥
FT1	8	77	15	126	560.5	剥離
FS2	8	77	15	126	592.0	剥離
FT2	9	84	15	126	560.2	せん断

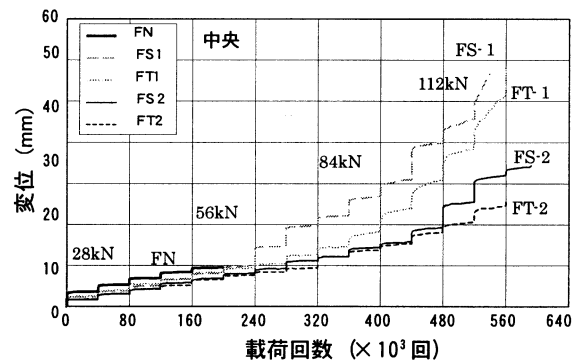


図-3 載荷回数と変位の関係

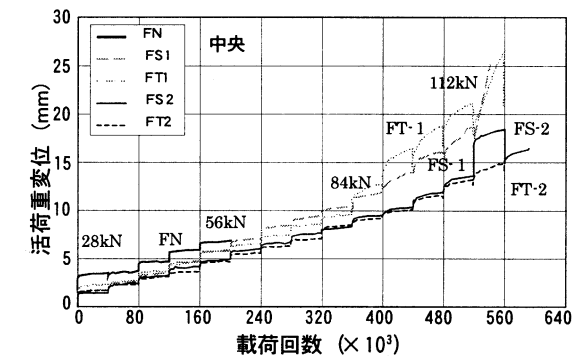


図-4 載荷回数と活荷重変位

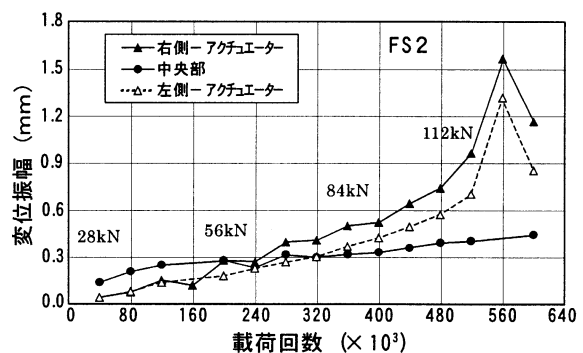


図-5 梁の変形状態

っており、変位の増加は鉄筋の塑性化およびシート剥離領域の拡大による残留変形の蓄積に起因することが推測される。

荷重回数と変位振幅の関係の一例をFS2試験体について図-5に示す。試験体中央の変位振幅は、初期の段階では左右のアクチュエーター位置の振幅よりも大きいものの、最終段階まで緩やかな増加を示している。一方、左右のアクチュエーター位置の変位振幅は、荷重回数の増加とともに増加勾配が大きくなり、最終ステージ近傍では、特にその値が大きくなっている。

目視観察によると、試験体中央部の状態は、曲げひびわれの進展、およびその幅の拡大と共に梁軸直角方向に交番するせん断変形が顕著となり、曲げひびわれ部のシートは、接着面の直角方向へピーリング作用を受けていることが認められた。目的とした変形状態が再現できていることから、逆位相荷重による試験方法は連続繊維補強材料の付着性状を動的に試験する方法として有効であることが示唆されている。

### 3.3 AFRPシートひずみ

荷重回数とAFRPシートひずみの関係を図-6に示す。図中のシートひずみは、試験体中央部の3計測点の平均値として表示した。変位の変化と同様に荷重の増加によりAFRPひずみも階段状に増大していくことが認められる。しかしながら、表面研磨+1層補強のFS1試験体は、各ステージの開始時にはひずみが増大するものの、繰返し荷重によってひずみが減少していくことが認められる。他の試験体においては、この傾向は終局近傍のステージで僅かに認められるのみであった。

このひずみの変化量を各荷重ステージ内での荷重開始時と終了時のひずみの差分として図-7に示す。FS1試験体を除いた他の試験体は、AFRPひずみが微増しているが、FS1試験体は、荷重49kNステージ以降常にひずみの減少傾向を示していることが認められる。これはひびわれ近傍のAFRPシートがコンクリート面からの剥離してひずみが平均化したことを示しているものと推測される。なお、FT2試験体で認められるひずみの急増は、ひずみゲージ近

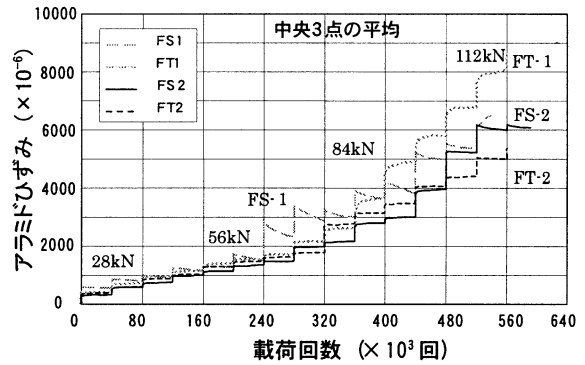


図-6 荷重回数とシートひずみの関係

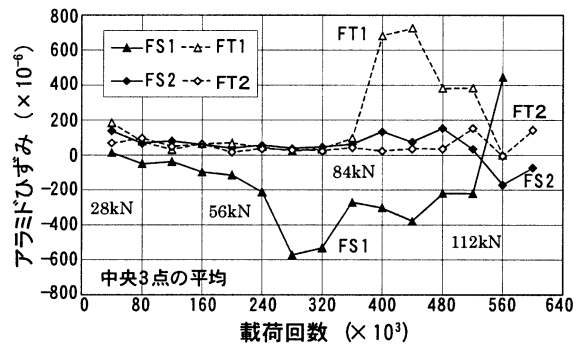


図-7 AFRPシートのひずみ変化

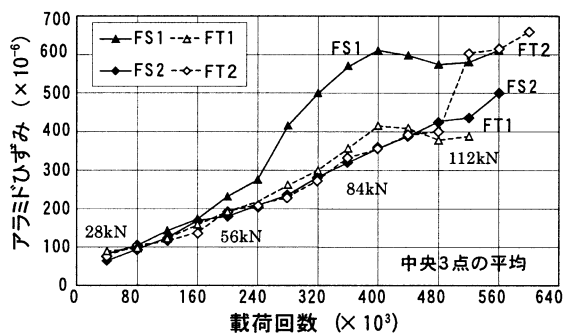


図-8 AFRPシートのひずみ振幅

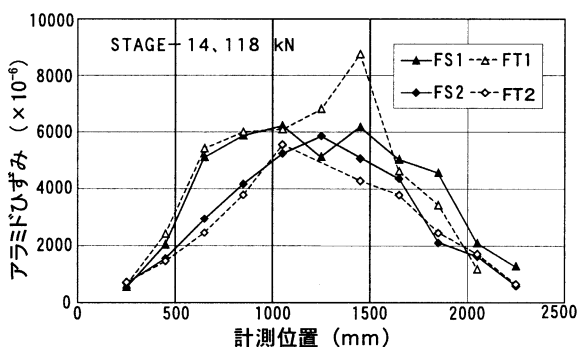


図-9 AFRPシートのひずみ分布

傍に新たな曲げひびわれが開いたためである。

同様に各荷重ステージのAFRPのひずみ振幅の平均を図-8に示す。FS1試験体のひずみ

振幅は、ひずみの平均化に対応して増加していることが認められる。ひずみ振幅の増加は、ひびわれ部のせん断変形が顕著になったためと推測され、後述するひびわれ部のブロック化により剥離領域が拡大したことが F T 1 試験体の変位増加の主因となっていると判断される。

A F R P シートひずみの梁軸方向分布の一例を図-9に示す。荷重レベルは、終局に近い 118kN ステージの開始時を代表させた。A F R P シート 1 層の F S 1 試験体および F T 1 試験体ひずみは、剥離の進展により中央部の 1000mm 程度の区間で平均化していることが認められ、さらに、F S 1 試験体はシート端部から 100mm の位置の計測ひずみに関しても増加が認められ全面剥離直前の状態であったことが示されている。本試験においては、低荷重レベルにおける剥離の進行が直ちに耐荷力の低下に結びついてはいないが、これは十分な端部定着長を有していたためと推測される。

総じて、表面研磨の試験体の疲労劣化が大きい、これは動的な荷重条件における付着性能が粗面処理に比べて低下しているためと推測される。さらに、2層補強の F S 2 試験体に比して、1層補強の F S 1 試験体の疲労劣化が大きく、界面の接着性状は、補強量の小さい場合において特に留意する必要があると思われる。

### 3.4 曲げひびわれ部の挙動

ひびわれの発生状況の一例を写真-1および写真-2に示す。A F R P シートで補強した試験体の曲げひびわれの間隔は、100mm 程度であった。A F R P 1層補強の試験体は、曲げひびわれの発生後、両側部に付加的なひびわれが順次発生してかぶりコンクリートが、ブロック化する現象が認められた。表-5にブロック化発生時の荷重を示す。特に F S 1 試験体においては、荷重レベル 43kN ステージでブロック化が発生し、主鉄筋の降伏に先行する結果となっている。F T 1 試験体も同様に荷重 84kN ステージでかぶりコンクリートがブロック化してい

表-5 コンクリートのブロック化

試験体	片側		両側	
	STAGE	荷重 kN	STAGE	荷重 kN
FN	---	---	---	---
FS1	4	49	6	63
FT1	9	84	11	98
FS2	10	91	---	---
FT2	9	84	---	---

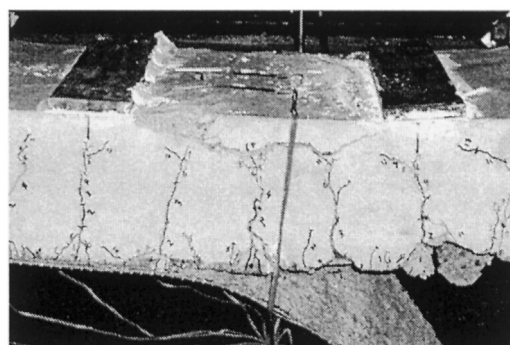


写真-1 ひびわれ状況 (FS1)

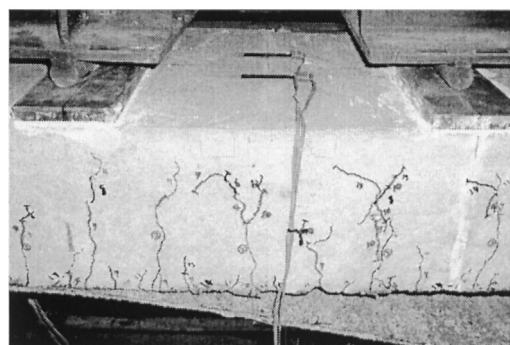


写真-2 ひびわれ状況 (FS2)

る。ブロック化は、前述の変位の急増点、および A F R P ひずみの平均化とほぼ等しい荷重レベルであることから、両現象と密接に関連していると判断される。

補強量が多い F S 2 試験体および F T 2 試験体においては、曲げひびわれブロック化は片側のみであり、補強効果が維持されている。これらの試験体は A F R P シートの補強量が大きく、引張剛性が大きいため、ひびわれ開口時のひずみ増加が小さな値となり、コンクリートのブロック化が抑制されたものと推測される。

測定結果および観察結果から、かぶりコンクリートのブロック化の過程は、概ね以下のように整理される (図-10 参照)。

- 1) 曲げひびわれ発生により，A F R P のひずみが増加する。
- 2) A F R P シートからの伝達力により左右のかぶりコンクリートに斜めひびわれが発生してブロック化する。
- 3) せん断変形によりコンクリートブロックがシートを面外に押し出すピーリング作用が発生して剥離領域が進行する。
- 4) 剥離領域の拡大によるせん断変形量の増加により，ピーリング作用が増大する。
- 5) 隣接するひびわれからの剥離と一体化して剥離領域が全体化した後，端部定着部の剥離により耐力を喪失する。

これらにより，移動荷重が作用する部材のようにせん断力が正負に交番する場合には，片側振幅を受ける部材と異なり，剥離進行方向が2方向となるためコンクリートのブロック化により急速に補強効果が減少する可能性が示唆されている。せん断力の振幅と曲げモーメントの比の影響などについてさらに解明していく必要があると思われる。

## 5. まとめ

2方向アラミド繊維シートで補強したRC梁のシートとコンクリート間の付着挙動を検討するため，2定点逆位相載荷による疲労試験を実施した。本試験で得られた知見を以下に示す。

- (1) 繊維シート補強を行ったRC梁において，正負のせん断力が作用することにより，曲げひびわれ両側面のかぶりコンクリートがブロック化する挙動を示す。
- (2) かぶりコンクリートのブロック化は，連続繊維シートとコンクリート面の剥離領域の拡大，および部材の変形増大と関連して部材の耐久性を低下させる。
- (3) 動的な荷重が作用する場合，下地処理方法によって付着性状が異なる。粗面処理は，動的付着力が大きく疲労耐久性を向上させる。
- (3) 2方向アラミド繊維シートの2層補強は，1層補強に比べてひびわれ開口量が小さな

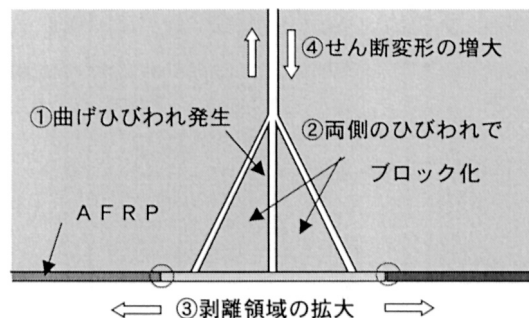


図-10 ブロック化の模式図

値となるため，かぶりコンクリートのブロック化が抑制され疲労耐久性が向上する。

- (4) 逆位相載荷は，せん断変形下での連続繊維補強材料の動的付着性状の試験方法として有効である。

## 謝辞

本研究の実施にあたり，東レ・デュポン(株)，(株)ポー他，2方向アラミドシート工法研究会の諸氏にご協力いただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 中島規道ほか：二方向アラミド繊維シートによるRCスラブの押し抜きせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，VOL.21,NO.3，pp.1465-1470，1999.6
- 2) 中島規道ほか：二方向アラミド繊維シートの補強効果に与える貼付け方法の影響，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，・-386,2002.9
- 3) 土木学会編：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101
- 4) 岸徳光ほか：FRPシートで補強したRC梁の曲げ付着特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1399-1410，1999.3
- 5) 栗橋祐介ほか：引張剛性の等しい各種FRPシートを装着したRC梁の曲げ耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，VOL.24,NO.2，pp.1465-1470，1999.6