# 論文 2 定点逆位相載荷した 2 方向 A F R P 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部材の載荷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載荷を受 ける床版構造物にで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, D 6 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。AFR P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 の拘束は行なっていない。

逆位相載荷の概要を図 - 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	2層
FS2	表面研磨	1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	耐力	fu	Ea
	g/m²	kN/m	N/mm²	kN/mm²
縦	435	490	2060	118
横	435	490	2060	118

表 -	3	ア	ク	チ	ュエ-	-ター	の設定
-----	---	---	---	---	-----	-----	-----

累計		設定値		梁中央部の状態	
STAGE	回数	振幅	合計	V	М
	× 10 <sup>3</sup>	kN	kN	kN	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



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F N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+A FRP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	降伏		破壊			
験	STAGE 荷重		STAGE	荷重	回数	形式
体		kΝ		kΝ	<b>×</b> 10 <sup>4</sup>	
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-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。 載荷回数と変位振幅の関係の一例を FS 2 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,載荷回数の 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,逆位相載荷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

載荷回数と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,繰返し載荷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載荷ステージ内での 載荷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



傍に新たな曲げひびわれが開口したためである。 同様に各載荷ステ - 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FT1試験体の変 位増加の主因となっていると判断される。

AFRP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。AFR Pシート1層のFS1試験体およびFT1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,FS1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 いが,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FS2試験体に比し て、1層補強のFS1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。AFRP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。AFRP1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FS1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。FT1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	片側		両側	
験	STAGE	荷重	STAGE	荷重
体		kN		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AFRP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FS2試験体およびFT2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AFRP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,AFRPのひず みが増加する。
- AFRP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 してプロック化する。
- 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おいては, 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



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)ボー他,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