

# アラミド繊維シートを緊張接着した PC 梁の長期耐荷性状

## Long-Term Loading Performance of Externally Bonded PC Beams with Pre-Tensioned Aramid Fiber Sheet

三加 崇 TAKASHI SANGA  
 中島 規道 NORIMICHI NAKAJIMA  
 浅井 洋 HIROSHI ASAI  
 三上 浩 HIROSHI MIKAMI

本研究では、緊張接着工法で補強した部材の長期耐荷性状を明らかにすることを目的に、PC 梁下面にアラミド繊維シートを緊張接着した試験体を用いて疲労載荷試験および持続荷重載荷試験を行った。検討の結果、緊張接着工法による補強効果、すなわち、変位の抑制効果や鉄筋およびアラミド繊維シートのひずみ増加抑制効果は、200 万回繰り返し後および1年経過後も持続することが明らかとなった。

キーワード：アラミド繊維シート、緊張接着、疲労載荷試験、持続荷重載荷試験

Prestressing of externally bonded aramid fiber sheet for strengthening of existing concrete structure is effective method to utilize the material properties of aramid fiber. In this paper, the long-term performances of prestressed concrete (PC) beams with externally bonded prestressed aramid fiber sheet are discussed. Fatigue loading tests and sustained loading tests on the PC beams were conducted. It was demonstrated that the effect of controlling displacement of beams and strain of reinforcement and aramid fiber sheet due to prestressing kept working beyond two million cycles loading and one year loading.

**Key Words:** Aramid Fiber Sheet, Pre-tensioned Adhesion, Fatigue Loading Test, Sustained Loading Test

### 1. はじめに

建設から長い年月が経過したコンクリート構造物は、経年劣化や設計荷重の増加によって耐久性が損なわれているものも少なくない。構造物を延命化するために、補修や補強といった対策が盛んに行われている。例えば、塩害や中性化に対しては、断面修復や電気防食などによる補修が行われている。また、設計荷重の増加等による耐荷力の向上を目的とした場合には、外ケーブルによって構造物にプレストレスを導入する工法や連続繊維シートを接着する工法などのさまざまな方法が採用されている。

連続繊維シート接着工法は、構造物に連続繊維シートを貼り付けることによって、損傷を受けた部材の耐荷性能を回復させ、供用後の活荷重増加に対応できるように性能向上を図るものである。一方、連続繊維シートを緊張して接着することによって、構造物にプレストレスが導入され、ひび割れ発生荷重や主鋼材降伏荷重が向上す

ることが期待される。これまでに、静的な荷重を受ける RC/PC 部材に対する緊張接着工法の補強効果は種々検討されてきた<sup>1)</sup>。

本研究では、緊張接着した構造物の長期耐荷性状を確認するため、PC 梁下面にアラミド繊維シートを緊張接着して補強した試験体を製作し、繰り返し荷重が作用した場合および持続的に荷重が作用した場合の試験を実施し、長期耐荷性状について検討を行った。

### 2. 試験概要

アラミド繊維シートを緊張接着した PC 梁について、繰り返し荷重を載荷する試験（以下、疲労載荷試験）および荷重を持続的に載荷する試験（以下、持続荷重載荷試験）の2種類を実施した。

#### (1) 補強対象のPC梁

補強を行う PC 梁の形状を図-1に、鉄筋と PC 鋼材の

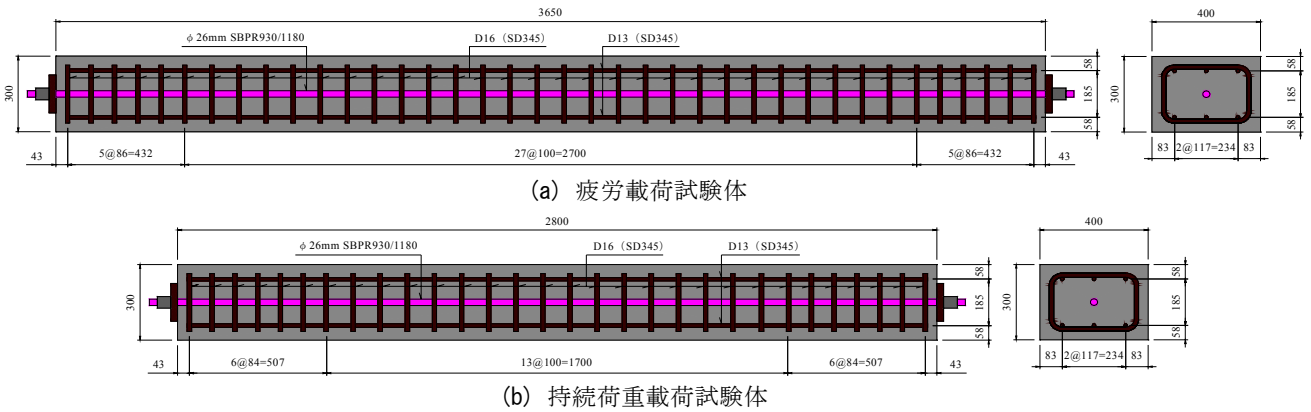


図-1 試験体寸法

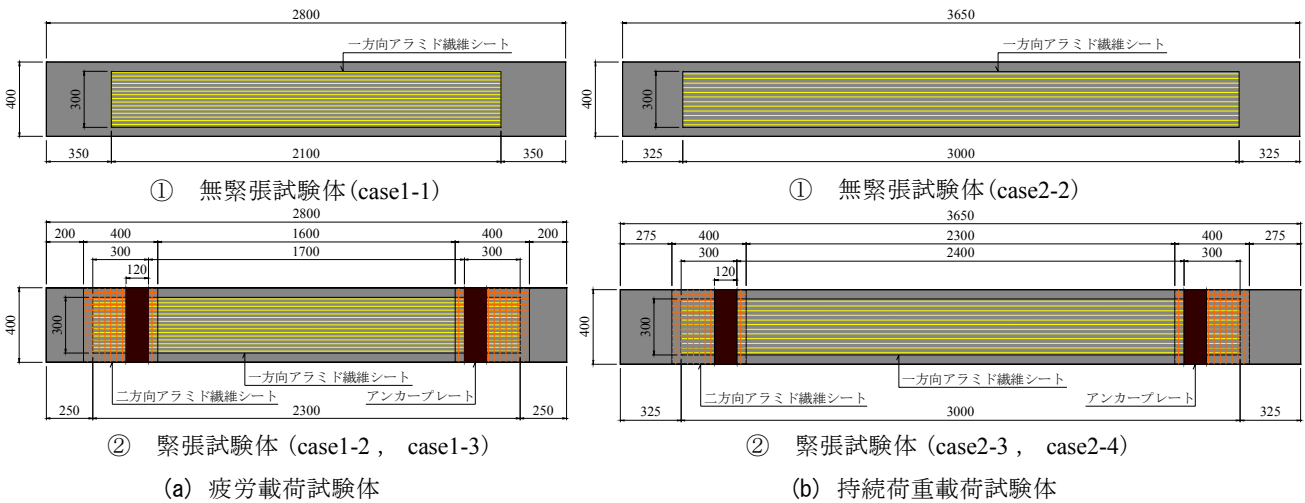


図-2 試験体の補強範囲

材料特性を表-1に示す。また、疲労載荷試験開始時（材齢69日）のコンクリートの材料特性を表-2に示す。疲労載荷試験用の試験体寸法は、全長2,800mm、幅400mm、高さ300mmとし、主鉄筋はD13、帯鉄筋はD16、PC鋼材はφ26mmのPC鋼棒を使用した。PC鋼棒の導入時の緊張力は477kN(0.55Pu)である。持続荷重載荷試験用の試験体寸法は、全長3,650mm、幅400mm、高さ300mmである。鉄筋、PC鋼材およびコンクリートは疲労載荷試験用の試験体と同じ材料を使用した。PC鋼棒の導入時緊張力は347kN(0.40Pu)とした。疲労載荷試験に使用する試験体は約2ヶ月、持続荷重載荷試験に使用する試験体では約1年の養生を行った後に補強を行った。

(2) 試験種類

連続繊維シートの材料特性を表-3に示す。補強に用いる連続繊維シートは、一方向のアラミド繊維シートである。また、緊張して接着する補強方法では、定着部を二方向のアラミド繊維シートによりコンクリート表面の補強を行った<sup>2)</sup>。

アラミド繊維シートによる補強範囲を図-2に、試験ケースを表-4に示す。疲労載荷試験は3種類の補強方法に

表-1 鋼材の材料特性

材料	材質	降伏強度	弾性係数
		N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
鉄筋	SD345	403.3	191.0
PC鋼棒	SBPR930/1180	1102	201.9

表-2 コンクリートの材料特性（材齢69日）

圧縮強度	弾性係数	ポアソン比
N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	
43.4	28.9	0.183

表-3 連続繊維シートの材料特性

	一方向アラミド繊維シート	二方向アラミド繊維シート (定着部補強用)
目付量 g/m <sup>2</sup>	830	650
保証耐力 kN/m	1176	392/392
設計厚 mm	0.572	0.193/0.193
引張強度 N/mm <sup>2</sup>	2060	2060/2060
ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup>	118	118/118

よる試験を実施した。case1-1は無緊張のアラミド繊維シートを貼り付けた試験体として補強範囲は2,100mmとした。case1-2はアラミド繊維シートの引張強度の25%を緊張して貼り付けを行った試験体、case1-3は引張強度の50%を緊張して貼り付けを行った試験体である。補強範囲は、定着部を含めて2,300mmとした。

持続荷重載荷試験では、補強を行わない試験体と3種

表-4 試験ケース

試験体種類		緊張力	
		PC鋼材	アラミド繊維シート
疲労 載荷試験	case1-1	0.55 $\sigma_{pu}$ = 594 N/mm <sup>2</sup>	無緊張
	case1-2		0.25 $\sigma_{pu}$ = 515 N/mm <sup>2</sup>
	case1-3		0.50 $\sigma_{pu}$ = 1030 N/mm <sup>2</sup>
持続荷重 載荷試験	case2-1	0.40 $\sigma_{pu}$ = 432 N/mm <sup>2</sup>	-
	case2-2		無緊張
	case2-3		0.25 $\sigma_{pu}$ = 515 N/mm <sup>2</sup>
	case2-4		0.50 $\sigma_{pu}$ = 1030 N/mm <sup>2</sup>

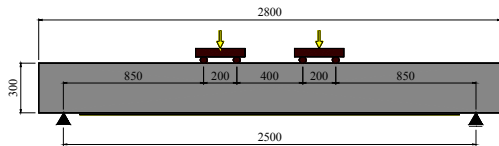


図-3 疲労載荷試験の載荷方法

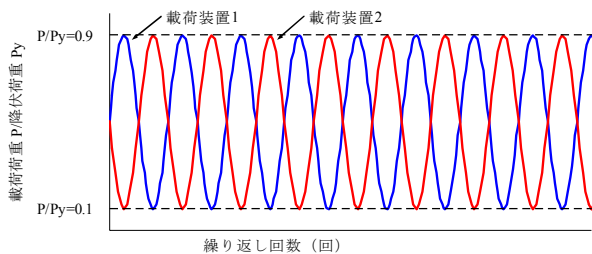


図-4 疲労載荷試験の載荷履歴

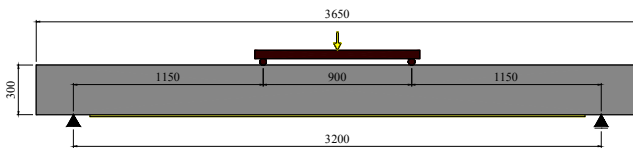


図-5 持続荷重載荷試験の載荷方法

類の補強方法による試験体の4種類の試験を実施した。case2-1は補強を行わない試験体である。case2-2は無緊張のアラミド繊維シートを貼り付けた試験体で補強範囲を3,000mmとした。case2-3はアラミド繊維シートの引張強度の25%を緊張して貼り付けを行った試験体、case2-4は引張強度の50%を緊張して貼り付けを行った試験体である。アラミド繊維シートを緊張した試験体の補強範囲は、定着部を含めて3,000mmとした。

### (3) 施工方法

無緊張のアラミド繊維シートは、梁の下面を研磨し、プライマーを塗布した後にエポキシ樹脂により PC 梁に接着した。

緊張力を導入するアラミド繊維シートは、事前にエポキシ樹脂を含浸硬化させてプレキャスト化を行った。無緊張と同様に、PC梁の下面を研磨してプライマーを塗布した。定着部は引き剥がれを抑制するために二方向アラミド繊維シートを接着してコンクリートの表面を補強し



写真-1 疲労載荷試験

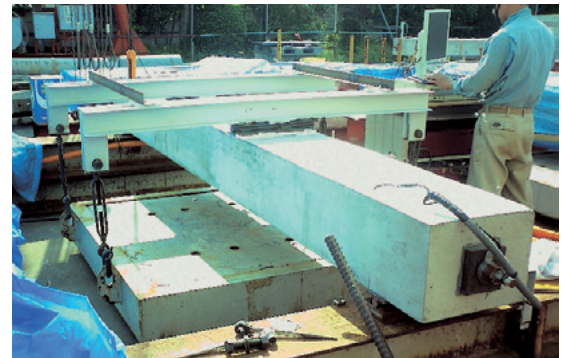


写真-2 持続荷重載荷試験

た<sup>2)</sup>。プレキャスト化したアラミド繊維シートを緊張装置により所定の張力まで緊張を行って接着した。なお、定着部の接着には応力集中を緩和するために応力緩和材<sup>3)</sup>を使用した。また、剥離の防護を目的として、アンカープレートを設置した。養生後、緊張装置を解放して PC 梁にプレストレスを導入した。

### (4) 試験方法

疲労載荷試験は2点逆位相繰り返し試験<sup>4)</sup>とした。図-3に載荷装置と試験体との関係を示す。支間長は2,500mmである。図-4に示すように2台の載荷装置を用いて、互いに180度の位相差を持つ正弦波として載荷を行った。載荷荷重の上限値は降伏荷重の0.9倍、下限値は降伏荷重の0.1倍とした。この試験方法では、試験体中央部でせん断力が正負に交番し、シートが剥離しやすい応力状態となっている。目標とした載荷回数は200万回である。

図-5に持続荷重載荷試験の載荷方法を示す。支間長は3,200mmである。試験に用いる持続荷重は49kNの錘を使用して、2点載荷により実施した。

## 3. 疲労載荷試験

### (1) 静的耐荷挙動

はじめに、2台の載荷装置を同じ荷重にして静的に載

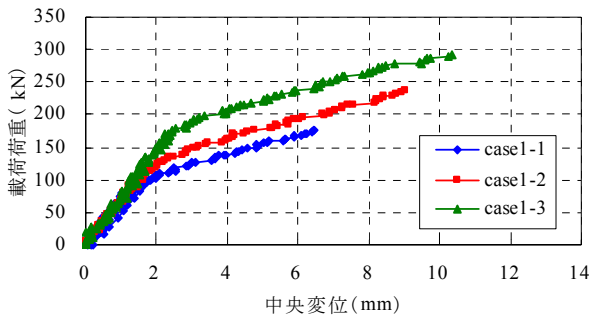


図-6 静的載荷試験結果

表-5 降伏荷重および載荷荷重

	静的載荷試験		疲労載荷試験		
	ひび割れ発生荷重	降伏荷重	降伏荷重 (換算)	上限値	下限値
case1-1	80 kN	178.1 kN	162.0 kN	145.8 kN	16.2 kN
case1-2	100 kN	235.1 kN	216.0 kN	194.4 kN	21.6 kN
case1-3	160 kN	290.0 kN	260.8 kN	234.7 kN	26.1 kN

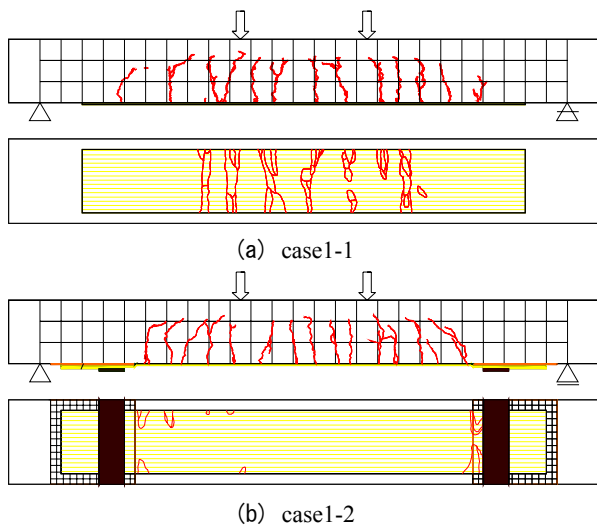


図-7 ひび割れおよびアラミド繊維シート剥離状況 (200万回載荷後)

荷を行った。このときの合計荷重と中央変位の関係を図-6に、ひび割れ発生荷重および下段鉄筋の降伏荷重を表-5に示す。載荷は、下段の鉄筋が降伏ひずみに達するまで実施した。緊張接着することや緊張率をあげることで、ひび割れ発生荷重が増加し、下段鉄筋の降伏荷重および降伏時変位が増加していることがわかる。

(2) 疲労載荷挙動

a) 載荷荷重

疲労載荷試験で制御する荷重を表-5に示す。はじめに、事前解析により2台の載荷装置を同荷重で載荷したときの降伏荷重と1:9の荷重比率で載荷したときの降伏荷重の荷重比を算出した。疲労載荷試験で用いる載荷荷重は、静的載荷試験の降伏荷重を前述の荷重比を基に換算し、かつ、2台の載荷装置の荷重比率が1:9となるように載荷荷重の上限値および下限値を設定した。

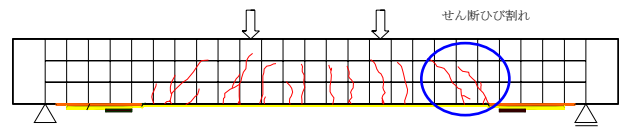


図-8 ひび割れ状況 (case1-3 静的載荷後)

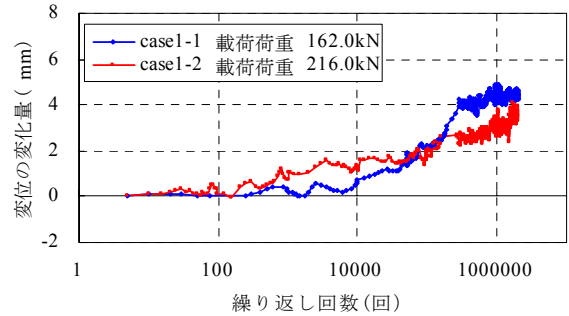


図-9 中央変位の変化量

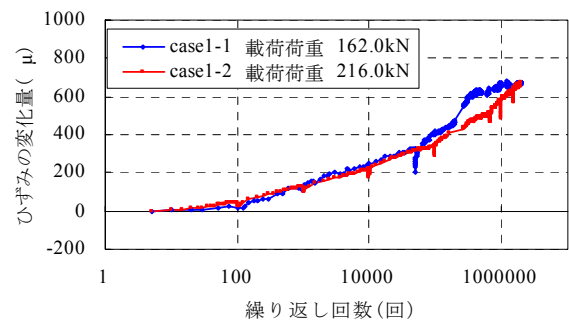


図-10 下段鉄筋ひずみの変化量 (中央断面)

b) ひび割れおよびシート剥離状況

case1-1およびcase1-2の200万回載荷後におけるひび割れおよびアラミド繊維シートの剥離状況を図-7に示す。コンクリートのひび割れ本数、ひび割れ間隔や進行状況には顕著な差異は見られなかった。アラミド繊維シートの剥離は、case1-1では中央から載荷位置付近において集中する傾向が見られた。case1-2では、定着部近傍に若干の剥離が発生したが、載荷点間には顕著な剥離は見られなかった。

case1-3における静的載荷後のひび割れ状況を図-8に示す。case1-3は繰り返し回数が10回においてせん断スパン内のピーリングによりアラミド繊維シートが剥離した。試験体に作用するせん断力がほかの試験体よりも1.2～1.6倍高いため、図-8に示すせん断ひび割れによってアラミド繊維シートが剥離したのと考えられる。以下の検討においてはcase1-1およびcase1-2について述べる。

c) 変位の変化量

中央変位の載荷開始当初を基準とした変化量を図-9に示す。case1-1では1万回を超えると変化量が増加する傾向にあり、200万回での変化量は4.6mmであった。case1-2では、載荷開始当初から変位の増加傾向が見られたものの200万回での変化量は3.9mmであり、case1-1より小さい。

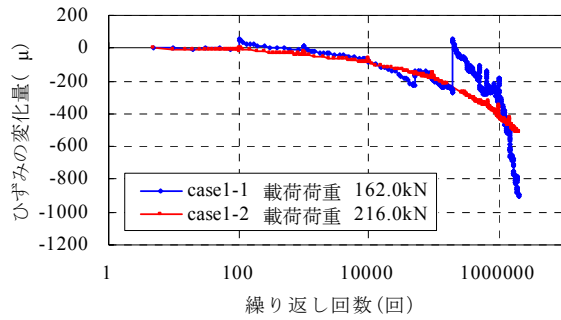


図-11 上縁コンクリートひずみの変化量（中央断面）

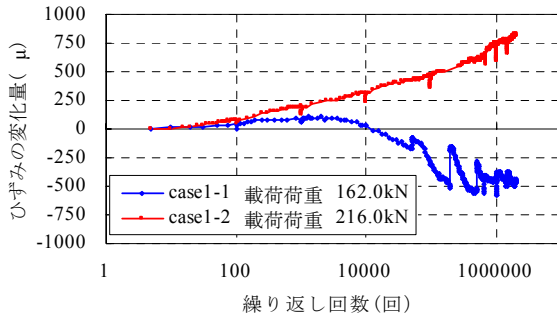


図-12 アラミド繊維シートひずみの変化量（中央断面）

このように、緊張接着することで載荷荷重が 1.3 倍以上大きいかにも関わらず、200 万回繰り返し載荷後における変位の変化量を無緊張試験体よりも小さく抑制できることが明らかになった。

#### d) 鉄筋ひずみの変化量

中央断面における下段鉄筋ひずみの載荷開始当初を基準とした変化量を図-10 に示す。case1-1における 200 万回での変化量は $669\mu$ 、case1-2における 200 万回での変化量は $670\mu$ であり、case1-2の載荷荷重が 50kN 以上大きいものの下段鉄筋ひずみの変化量の増加傾向は両者で同等程度であった。

#### e) コンクリートひずみの変化量

中央断面における上縁コンクリートひずみの載荷開始当初を基準とした変化量を図-11 に示す。case1-1は20万回を超えると変化量が急激に増加する傾向がみられ、200 万回での変化量は $-892\mu$ であった。case1-2の変化量の増加は20万回を超えてもcase1-1と比較して緩やかであり、200 万回での変化量は $-513\mu$ であった。載荷荷重が大きいもののコンクリートひずみの変化量はcase1-1の57%に低減されている。

#### f) アラミド繊維シートひずみの変化量

中央断面におけるアラミド繊維シートひずみの載荷開始当初を基準とした変化量を図-12 に示す。case1-1では1万回以降で変化量の減少傾向が認められる。これは、200 万回載荷後における試験体下面の観察結果から、支間中央から載荷位置の区間において、アラミド繊維シートの部分剥離が集中して発生していることから、ひずみ

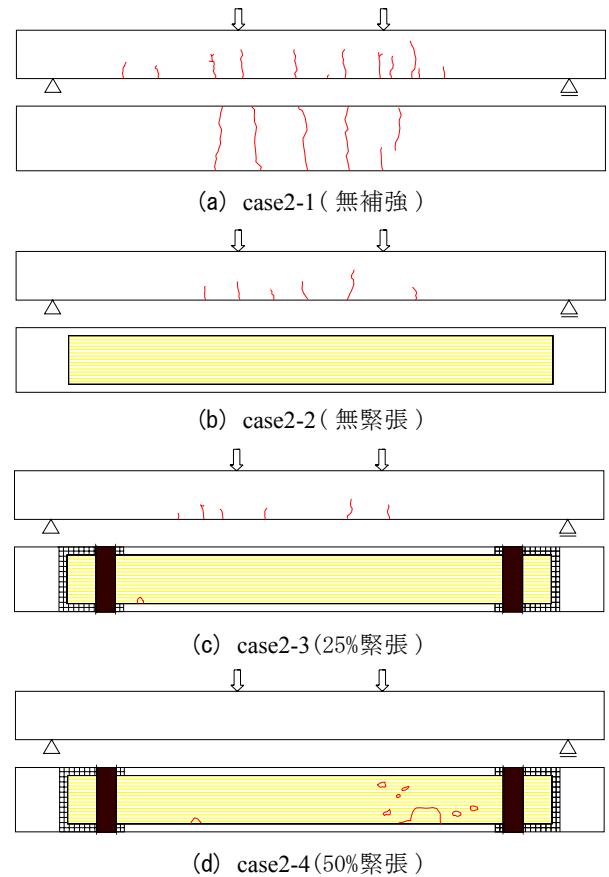


図-13 ひび割れおよびアラミド繊維シート剥離状況

が平滑化されたためと考えられる。200 万回での変化量は $-460\mu$ であった。case1-2におけるシートひずみの変化量には下段鉄筋と同様な増加傾向が見られ、200 万回での変化量は $811\mu$ である。シート剥離の状況も勘案すると、アラミド繊維シートの疲労載荷における付着性能は、緊張力を導入したcase1-2のほうが無緊張のcase1-1よりも優れていることが明らかになった。これは、アラミド繊維シートを緊張して接着することで、ダウエル効果が出現したためと推察される。

## 4. 持続荷重載荷試験

### (1) 持続荷重載荷挙動

#### a) ひび割れおよびシート剥離状況

載荷開始から 360 日経過したひび割れ状況およびアラミド繊維シートの剥離状況を図-13 に示す。コンクリートのひび割れは、case2-1と比較してcase2-2のほうが本数や梁上方への進展が少ないことがわかる。case2-3ではさらにひび割れは小さくなり、case2-4ではひび割れの発生は確認できなかった。梁下面のひび割れはcase2-1で明瞭に認められ、case2-2ではアラミド繊維シートの剥離は全く認められなかった。case2-3の定着部近傍には多少の浮

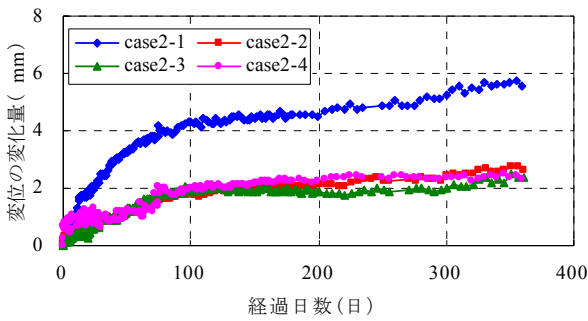


図-14 中央変位の変化量

きが認められ、浮きの範囲はcase2-4でさらに大きくなっている。なお、このアラミド繊維シートの浮きは载荷初期から認められたものであり、緊張接着時に施工を丹念に行うことが肝要であるものと考えられる。

**b) 変位の変化量**

中央変位の载荷開始当初を基準とした変化量を図-14に示す。载荷開始から360日経過したときの変化量はcase2-1では5.6mm、case2-2では2.7mmであり、case2-1と比較して変化量が48%に低減されている。また、case2-3では2.4mm、case2-4では2.3mmであり、case2-2より変化量が小さい。

载荷開始から150日以降における変位の増加勾配は、case2-1と比較してcase2-2のほうが小さい。また、case2-3およびcase2-4の変位量の増加勾配はcase2-2と比較して同等もしくは小さい。このように、持続荷重による変位の変化量および増加勾配は、アラミド繊維シートを接着することで抑制され、緊張接着することによってさらに抑制される傾向にあることが明らかになった。

**c) 鉄筋ひずみの変化量**

中央断面における下段鉄筋ひずみの载荷開始当初を基準とした変化量を図-15に示す。経過日数360日でのcase2-1の変化量は631 $\mu$ であった。case2-2では282 $\mu$ であり、case2-1と比較してcase2-2では下段鉄筋ひずみの変化量が47%に低減されている。また、経過日数360日でのcase2-3のひずみは0 $\mu$ 、case2-4は-13 $\mu$ であり、载荷開始当初からの増加はほとんどみられなかった。

持続荷重载荷における変位および鉄筋ひずみの変化量は、無補強のcase2-1に比べてアラミド繊維シートを接着したcase2-2で小さく、アラミド繊維シートを緊張接着したcase2-3およびcase2-4では、case2-2と同等程度以下となる。以上から、緊張接着することによる変位や鉄筋ひずみの抑制効果は、長期間経過後においても無緊張より優れていることが明らかになった。

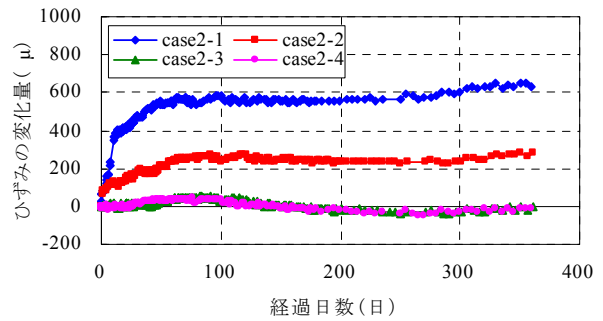


図-15 下段鉄筋ひずみの変化量（中央断面）

**5. まとめ**

本研究では、アラミド繊維シートを緊張接着したPC梁を用いて、疲労载荷試験および持続荷重载荷試験を実施し、PC梁の長期耐荷性状について検討を行った。本試験の範囲内で得られた知見を整理すると以下のとおりである。

- ① 200万回繰り返し载荷後のアラミド繊維シートの剥離状況、変位およびひずみの挙動から、疲労载荷におけるアラミド繊維シートの付着性能は、緊張接着することで無緊張よりも向上し、繰り返し载荷に対して優れた抵抗性を示すことが明らかになった。
- ② 360日間の持続载荷における変位および下段鉄筋ひずみの挙動から、アラミド繊維シートを接着することで変位の変化量や増加勾配および鉄筋ひずみの変化量が抑制され、緊張接着することでさらに抑制効果が向上することが明らかとなった。

**参考文献**

- 1) 例えば、岸 徳光, 三上 浩, 藤田 学, 澤田 純之: AFRPシートを緊張接着して曲げ補強したPC梁の静载荷実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.3, pp.1507-1512, 2007
- 2) 池田 聡, 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: RC部材のAFRPシート緊張接着補強時の定着法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.3, pp.1501-1506, 2007
- 3) 中島 規道, 三上 浩, 藤田 学, 田村 富雄: アラミド繊維シートによる緊張接着工法における定着方法の検討: 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.505-506, 2005
- 4) 中島 規道, 三上 浩, 鍋島 益弘, 柑本 哲哉: 2定点逆位相载荷した2方向AFRPシート補強RC梁の疲労性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.1777-1782, 2003