

# 持続荷重を受ける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 by Sustained Loading Test

三加 崇 TAKASHI SANGA  
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持続荷重載荷試験を実施した。持続荷重を載荷して 2 年間 PC 梁の性状を測定した結果、緊張力を与えない試験体ではひび割れの進展が認められたのに対して、緊張力を与えた試験体にはひび割れの発生、鉄筋ひずみの増加、たわみの著しい増加は認められず、緊張力が長期にわたり安定して導入されることを明らかにした。

キーワード：アラミド繊維シート，緊張接着，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 which are externally bonded with prestressed aramid fiber sheets are discussed. The PC beams were subjected to sustained loading for two years and the specimen with prestressed aramid fiber sheets did not showed any crack occurrence, increase of strain of reinforcement and increase of deflection. The test results demonstrated that prestressing force introduced in aramid sheets kept working for long term application.

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

### 1. はじめに

コンクリート構造物の補強を目的として使用される連続繊維シート接着工法は、活荷重や地震による荷重などの補強後に作用する荷重に対して効果を発揮し、耐力やじん性を向上させる工法である。しかしながら、自重などのすでに作用している荷重に対してはほとんど寄与しないため、現在生じているひび割れ幅の低減や鉄筋応力の低減は期待できない。これに対する補強方法として、構造物にプレストレスを導入し、現有荷重に対しても補強効果を期待する緊張接着工法が考えられる。そこで、梁や床版の下面にアラミド繊維シートを緊張接着し、ひび割れ幅の低減や鉄筋応力の低減、曲げ耐力の向上を目的とした工法の開発を行ってきた。静的な荷重を受ける RC 部材や PC 部材に対しては、緊張接着工法の補強効果について、これまで種々の実験によって明らかにしてい

る<sup>1)</sup>。

本稿では、アラミド繊維シートを緊張接着した PC 梁が持続荷重に対して安定した耐荷性状を有することを確認する。

### 2. 試験概要

アラミド繊維シートを緊張して接着した PC 梁試験体に、錘を積載して持続荷重を与えた試験（以下、持続荷重載荷試験）を実施した。持続荷重中の梁のひび割れの進展や増加などを観察し補強効果の持続性を確認する。

#### (1) 試験体

PC 梁の形状は図-1 に示すように、全長 3,650mm、幅 400mm、高さ 300mm である。梁に使用した鉄筋は SD345 であり、主鉄筋に D13、帯鉄筋に D16 を使用した。

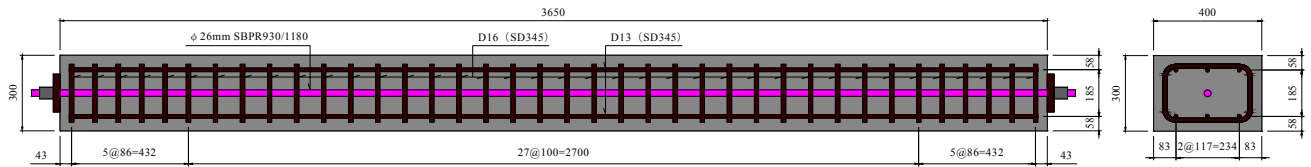


図-1 PC 梁寸法

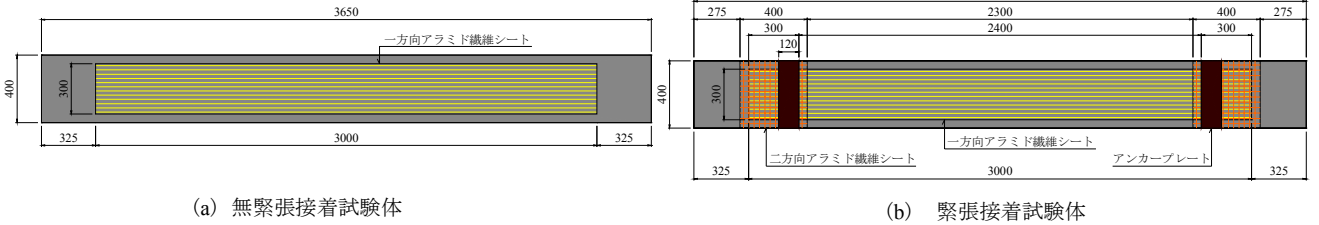


図-2 アラムド繊維シート補強範囲

(a) 無緊張接着試験体

(b) 緊張接着試験体

表-1 鋼材の材料特性

材料	材質	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 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 28 日)

圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	ポアソン比
42.7	27.3	0.202

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

PC 鋼棒 φ26mm を図心に 1 本配置し、229kN (0.4Pu) の緊張力を導入した。鉄筋と PC 鋼材の材料特性を表-1 に示す。PC 梁と同一養生を行ったコンクリートの材齢 28 日における材料特性を表-2 に示す。

曲げ補強に用いるアラミド繊維シートは、幅 300mm の一方向アラミド繊維シートで保証耐力は 353kN である。アラミド繊維シートによる補強は、下縁に生じる引張応力に対するものであり、図-2 に示す PC 梁の下面、幅 300mm、長さ 3,000mm の範囲にエポキシ樹脂で接着している。緊張したアラミド繊維シートは両端 300mm で定着されている。定着部分ではアラミド繊維シートからコンクリートに荷重が伝達されるため、二方向アラミド繊維シートでこの範囲のコンクリートを補強している<sup>2)</sup>。さらに、緊張力がこの範囲で均等に伝達するように定着範囲の接着にはヤング係数の小さいウレタンエポキシ系樹脂を使用している。補強に使用したアラミド繊維シートの材料特性を表-3 に示す。

表-4 試験体の種類

試験体	補強方法
case1	無補強
case2	緊張を行わないアラミド繊維シートの接着
case3	保証耐力の25%で緊張したアラミド繊維シートの接着
case4	保証耐力の50%で緊張したアラミド繊維シートの接着

(2) 試験体の種類

試験体の種類を表-4 に示す。持続荷重載荷試験は、補強を行わない試験体 1 体とアラミド繊維シートの緊張力を変えた試験体 3 体の合計 4 体で行った。case1 は、補強を行わない試験体である。case2 は、アラミド繊維シートに緊張力を与えずエポキシ系の樹脂で接着した試験体である。case3 および case4 は、アラミド繊維シートに保証

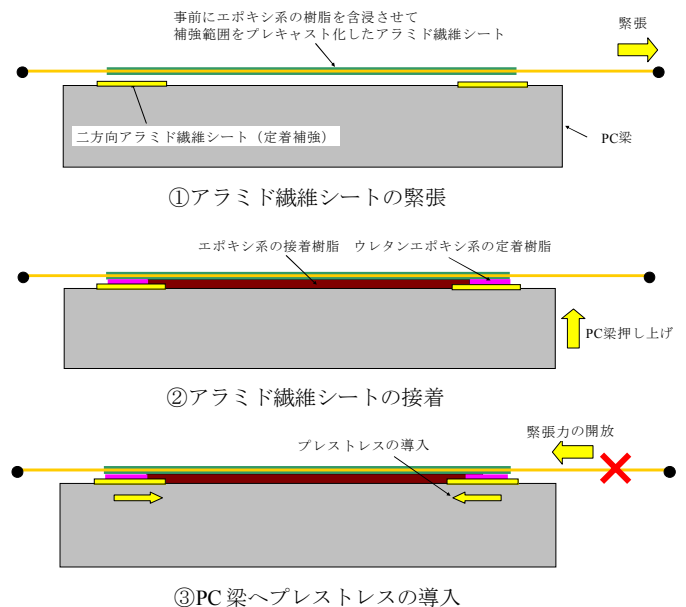


図-3 施工手順

耐力の 25% (88kN), 50% (177kN) の緊張力を与えて接着した試験体である。

### (3) 施工方法

PC 梁は製作から約 1 年間の養生を行い、アラミド繊維シートによる接着を行った。本来であれば、PC 梁の下方からアラミド繊維シートを接着するが、緊張装置の都合により、緊張したアラミド繊維シートに PC 梁を下方から押し上げて接着した。載荷の際には、試験体の上下を反転し、アラミド繊維シートによる補強面を下面にして試験を行った。case2 はアラミド繊維シート接着面を研磨し、プライマーを塗布した後に、緊張しないアラミド繊維シートをエポキシ系の樹脂を含浸させて接着した。case3 および case4 の緊張力を与えた試験体の施工方法を図-3 に示す。アラミド繊維シート接着面を研磨し、プライマーを塗布した。接着面に凹凸がある場合には、パテにより不陸修正を行うが、試験体では不陸修正が必要な凹凸がなかったため、パテの塗布は行っていない。プレストレスを導入すると PC 梁の定着部には、アラミド繊維シートからコンクリートに荷重が伝達される。伝達範囲が短いとコンクリートに過大な引張力が働きプレキャスト化し、アラミド繊維シートの端部がコンクリートともに引き剥がされる場合がある。そこで、定着部に生じる引張力を緩和させるため、定着範囲の接着にはエポキシ樹脂より低弾性なウレタンエポキシ系の樹脂を使用して応力を緩和している。アラミド繊維シートは、緊張のために接着範囲より長く成形し、両端部をループ状に折り返して緊張装置を取付ける部位を形成する。シートの端部は、接着時の定着部まで折り返してエポキシ樹脂で接着する。また、アラミド繊維シートは補強範囲のみを事前にエポキシ系の樹脂で含浸させて、部分的にプレキャスト化した緊張材（以下、アラミド繊維シート緊張材）に成形した。すなわち、アラミド繊維シート緊張材は、補強範囲が事前樹脂含浸したプレキャスト FRP であり、緊張装置が取り付く両端のループ部分は未含浸のアラミド繊維シートである。アラミド繊維シート緊張材のループ部分に緊張装置の引張治具を挿入し、シート幅方向に均等に力が作用するように緊張する。緊張装置は反力フレームに固定され、アラミド繊維シート緊張材に所定の緊張力を与える。緊張装置に取り付けたロードセルにより緊張力を測定した。アラミド繊維シート緊張材と PC 梁の接着面にエポキシ樹脂を、定着面にウレタンエポキシ系樹脂を塗布し、PC 梁を押し上げて上面に接着した。接着後は、7 日間の養生を行った後に、緊張装置を開放して PC 梁にプレストレスを導入した。また、試験中に定着区間の剥離を抑制するためにアンカープレートをアラ

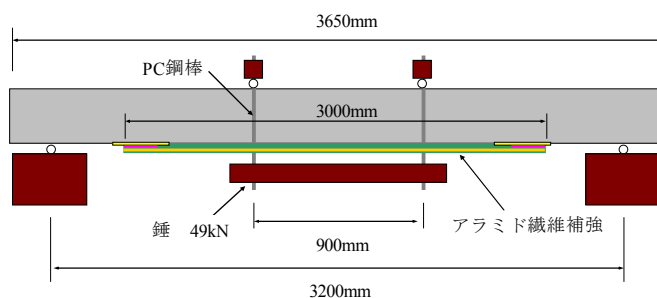


図-4 持続荷重載荷方法



写真-1 載荷状況



写真-2 養生状況

ミド繊維シートの上から PC 梁に固定した。

PC 梁の補強後は、約 2 ヶ月の養生を行った後に持続荷重載荷試験を実施した。

### (4) 試験方法

図-4 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。持続する荷重は 49kN の錘による 2 点載荷とし、載荷点間距離を 900mm とした。

試験体の計算結果による高さ方向の応力状態を図-5 に示す。case1 および case2 では下縁の応力が引張になり、ひび割れが発生する状態である。case3 は、下縁でほぼ 0 N/mm<sup>2</sup>, case4 は全圧縮状態である。

持続荷重載荷試験は case2 および case3 の試験体に持続荷重を載荷し、1 ヶ月後に case1 および case4 の試験体に

持続荷重を載荷した。また、試験場所は直射日光による影響を除くために、試験場所の周りをシートで覆い養生を行った。載荷試験中は、試験体支間中央の変位、PC梁上縁および下縁の鉄筋ひずみを測定した。計測位置を図-6に示す。

### 3. 試験結果

#### (1) 導入緊張力

アラミド繊維シート緊張材の緊張から PC 梁にプレストレスを導入するまでの緊張力の変化を図-7 に示す。緊張時の張力は、case3 で 101kN (保証耐力の 29%)、case4 で 194kN(保証耐力の 55%)である。接着して 7 日間の養生後におけるアラミド繊維シート緊張材の緊張力は、case3 で 87kN (保証耐力の 25%)、case4 で 160kN (保証耐力の 45%) であった。緊張後 7 日間におけるアラミド繊維シート緊張材のリラクゼーションと緊張装置の影響によって case3 で 86%、case4 で 82%に応力が緩和した。緊張力の推移は、気温の変化による影響と思われるわずかな張力変化が認められるが、初期に緩和が進行した後は安定した張力変化を示している。

図-8 にアラミド繊維シート緊張材の緊張時の張力と PC 梁のプレストレス導入時の張力の関係を示す。図にはこれまでに実施されてきた研究<sup>2)</sup>および今回の試験結果の値を示している。アラミド繊維シート緊張材の緊張時の緊張力と養生 7 日後の緊張力との関係にはほぼ直線関係が得られ、式(1)で表すことができ、導入時の張力は緊張時の張力の約 80%である。

$$T_o = 0.808T_i \quad (1)$$

$T_o$ : 導入時の緊張力  
 $T_i$ : 緊張時の緊張力

#### (2) 梁の挙動

##### a) ひび割れおよびシート剥離状況

載荷開始から 702 日経過したひび割れの発生状況およびアラミド繊維シートの剥離状況を図-9 に示す。持続荷重載荷した試験初期におけるコンクリート側面のひび割れは、case1 でひび割れ本数が 6 本であり、曲げモーメントが一定区間である載荷点間での下縁からのひび割れ高さは平均で 35mm である。中立軸の計算値は 30mm であり、ほぼ一致している。case2 で持続荷重載荷時にひび割れはせん断スパン内に 1 本のみであり、ひび割れの高さは下縁から 82mm であった。case3 では、載荷点の片側でひび割れが発生している。case2 および case3 では持続荷

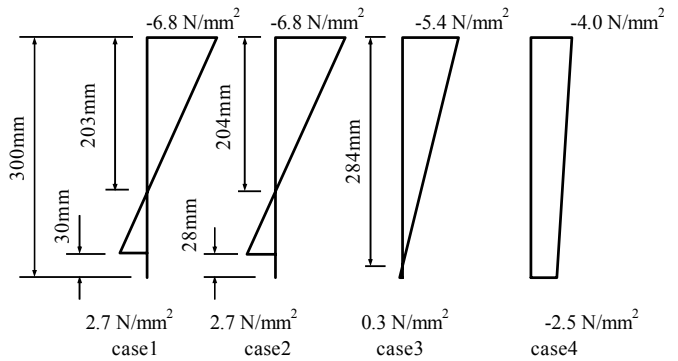


図-5 持続荷重載荷直後の中央断面のコンクリート応力分布 (計算値)

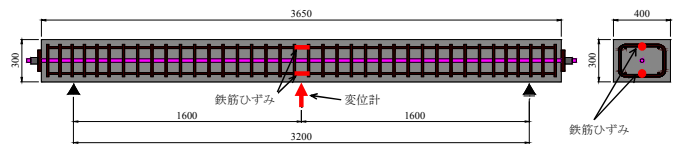


図-6 計測位置図

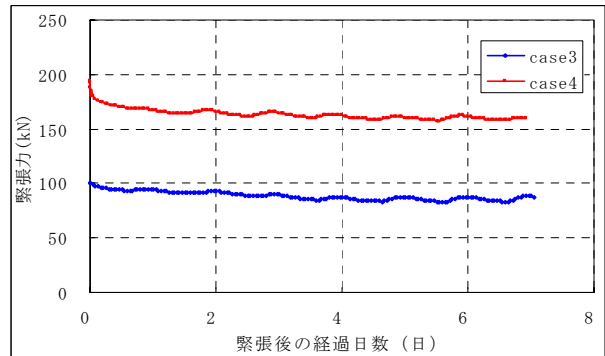


図-7 緊張後の張力変化

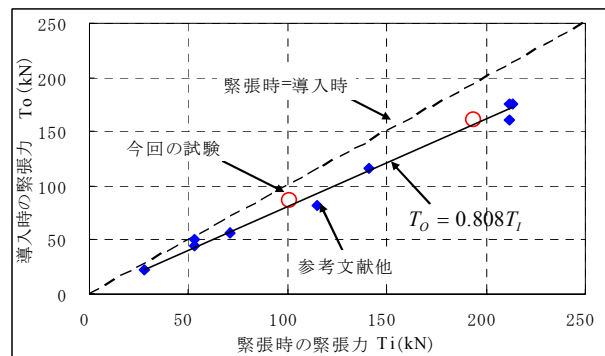


図-8 緊張時と導入時の張力の関係 (養生 7 日間)

重の錘を積載した際に偏心したことが原因であると考えられる。case4 ではひび割れの発生は確認できなかった。いずれの試験体においても載荷によるアラミド繊維シートの剥離は観察されなかった。

702 日後におけるコンクリート側面のひび割れは、case1 でひび割れ本数が 12 本に増加し、下縁からのひび

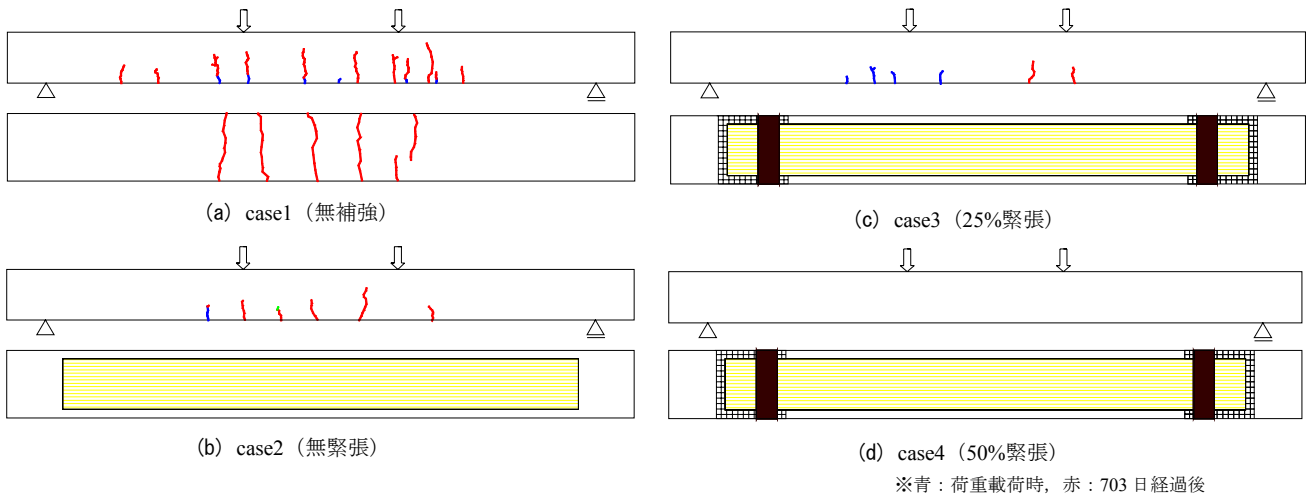


図-9 ひび割れ状況

割れ高さも平均で 180mm に進展している。case2 では、ひび割れ本数が 6 本に増加し、ひび割れ高さは平均で 125mm である。無補強の case1 と比較すると、case2 の無緊張でアラミド繊維シートを接着することでひび割れの進展を抑制することが確認された。case3 では、持続荷重載荷時直後に発生したひび割れと反対の載荷点側でひび割れが発生した。しかし、それ以後のひび割れの発生およびひび割れの進展は認められなかった。case4 では、ひび割れはまったく認められていない。試験体下面では、case1 で新しいひび割れの発生は確認されたが、case2, case3 および case4 では、アラミド繊維シートの剥離は確認できなかった。

アラミド繊維シートを接着することによりひび割れの発生および進展を抑制することが示され、アラミド繊維シートにプレストレスを与えることで、さらに高い抑制効果が得られることが示された。

b) 変位

載荷開始当初を基準とした中央変位の変化量を図-10 に示す。702 日までの中央変位は、case1 では 6.1mm であった。case2 の中央変位は 3.1mm であり、case1 の 48% に低減されている。これは、アラミド繊維シートによってひび割れの発生が抑制されたため、中央変位が大幅に低減されたと考えられる。case3 の中央変位は 2.4mm、case4 は 2.3mm であり、case2 より若干小さい。これは、ひび割れの発生と進展がアラミド繊維シートによりプレストレスを与えた試験体でほとんど生じなかったためと考えられる。

c) 鉄筋ひずみ

載荷開始時を基準とした中央断面における下段鉄筋ひ

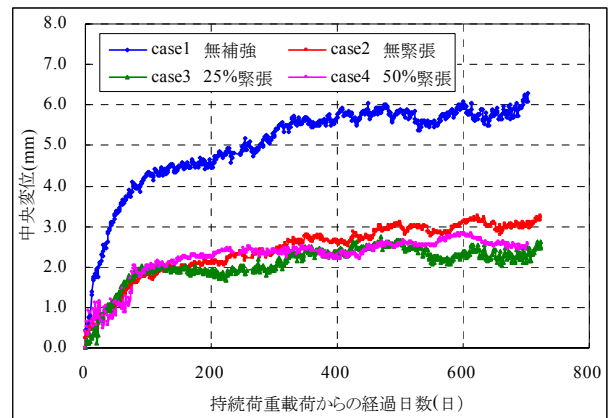


図-10 中央変位の変化量

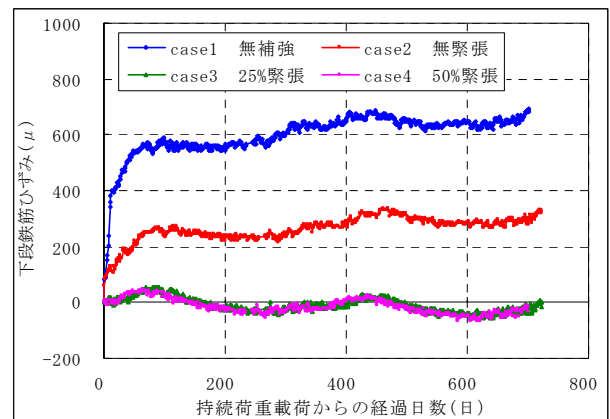


図-11 中央断面の下段鉄筋ひずみ変化量

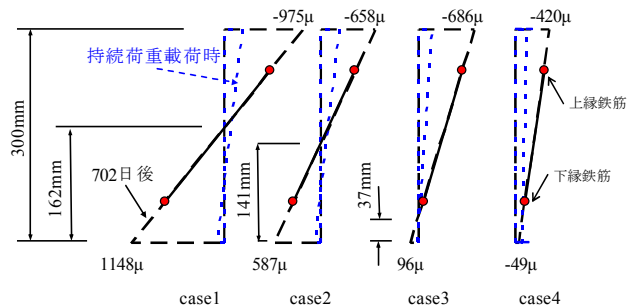


図-12 中央断面の高さ方向ひずみ分布

ずみの変化量を図-11に示す。経過日数702日でのcase1の変化量は $631\mu$ であった。case2では $282\mu$ であり、case1と比較してcase2では下段鉄筋ひずみが47%に低減されている。case3では持続荷重載荷時にひび割れが発生したが、測定した位置のひずみにはその影響はほとんど認められず、全くひび割れが認められなかったcase4と同程度である。また、プレストレスを導入した両試験体の鉄筋ひずみは、持続荷重載荷以降全く増加していないことが明らかである。

図-12に持続荷重載荷時および702日後の中央断面における高さ方向のひずみ分布を示す。702日後のひずみ分布は、持続荷重載荷時のひずみ分布に鉄筋に発生したひずみの実測値を足したものである。中立軸は、case1では下縁から162mm、case2では141mmであり、ひび割れの高さと比較すると、case1ではひび割れが若干高いものの、比較的一致している。case3の中立軸は持続荷重載荷前とほとんど変わらず、case4も全圧縮状態が維持されている。

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から、プレストレスが長期間にわたって作用していることが明らかになった。

#### 4. まとめ

本研究では、アラミド繊維シートで補強したPC梁の持続荷重載荷試験により、PC梁の長期耐荷性状を測定し、アラミド繊維シート緊張材の長期安定性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 アラミド繊維シート緊張材によりプレストレスを導入することで、ひび割れの進展の抑制、またはひび割れ発生の防止が期待できる。
- ② アラミド繊維シートの接着により、持続荷重による中央変位や鉄筋ひずみの増加を抑制することができ、アラミド繊維シート緊張材によりプレストレスを導入することでその効果は大幅に改善される。
- ③ ひび割れの進展抑制効果や中央変位の抑制効果、ひずみの抑制効果が持続することを明らかにし、アラミド繊維シート緊張材によるプレストレスが長期間にわたって安定して作用することが示された。

#### 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梁の静載荷実験, 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