論文　AFRP シート緊張接着曲げ補強 PC 梁の曲げ耐荷性能に及ぼす定着方法の影響

土佐　亮允[*1]・岸　徳光[*2]・三上　浩[*3]・栗橋　祐介[*4]

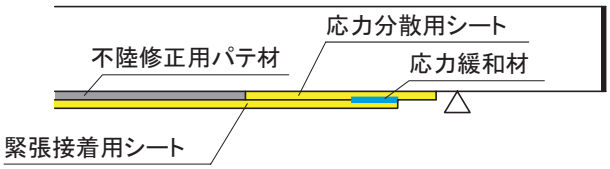
要旨：本研究では，著者らが提案の定着治具を用いない AFRP シート緊張接着曲げ補強工法の実用性を検討することを目的に，純スパン長 5 m の PC 梁を対象に提案の工法および既存の定着治具を用いる工法で緊張接着した場合の静載荷実験を実施した。その結果，1) 提案の緊張接着工法は，純スパン長 5 m 程度の PC 梁に対しても十分適用可能であること，2) 提案工法は，シート両端部を機械的に定着する既往の緊張接着工法を適用する場合とほぼ同等の定着性能，ひび割れ抑制効果および補強効果を有していること，3) 提案の AFRP シート緊張接着曲げ補強法は十分実用的に利用可能であること，等が明らかになった。

キーワード：AFRP シート緊張接着，曲げ補強，定着方法

1. はじめに

近年，既設鉄筋コンクリート (RC) / プレストレストコンクリート (PC) 構造物の劣化対策，耐久性向上および新設計基準への対応等を目的とした補修・補強工事が盛んに行われている。特に，PC 部材は一般的に曲げひび割れの発生を許容しない条件の下に設計されていることより，この種の部材を曲げ補強する場合には，ひび割れ発生荷重や初期の曲げ剛性を改善することが求められるケースが多い。

一方，最近既設 RC/PC 部材の補修・補強工法の 1 つとして，軽量かつ高引張強度を有し耐食性に優れる連続繊維 (FRP) シート接着工法が採用されている。しかしながら，汎用の FRP シートの弾性係数は異形棒鋼や PC 鋼材と同程度かそれ以下であることより，その曲げ補強効果は主に主鉄筋降伏後に発揮される傾向にある。そのため，最近では FRP シートの曲げ補強効果をより低い荷重レベルから発揮させる方法として，FRP シートに緊張力を与えた状態で接着する工法 (以後，緊張接着工法) が提案され，研究開発が進められているとともに一部で実用化されている。ただし，これまで提案されている緊張接着工法の多くは，緊張接着用の FRP シート (以後，緊張接着用シート) 両端部を鋼製治具を用いて定着する工法であるため[1)]，施工費が嵩むことや長期供用に伴い定着用鋼製治具が腐食する可能性も指摘されている。また，治具の劣化が進行するとシート端部の定着機能が喪失し，補強効果が急激に低下することも懸念される。



図－1　提案の緊張接着工法の概要

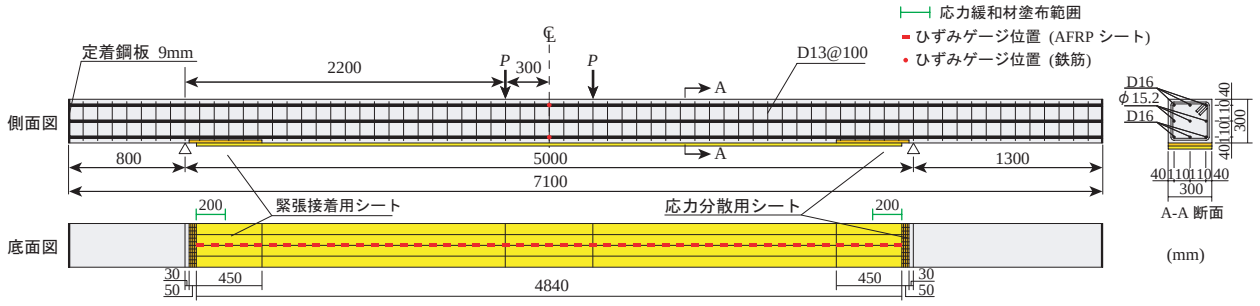
著者らは，既往の緊張接着工法が有する課題を解決するために，緊張接着用シート端部に定着用鋼製治具を用いずに接着樹脂の付着力のみで定着させる工法を提案している[2)]。この工法は，**図－1** に示しているように，i) 緊張接着用シート端部に応力緩和材 (低弾性接着樹脂) を用いて付着せん断応力の応力勾配を緩和し，かつ ii) 2 方向

表－1　試験体一覧

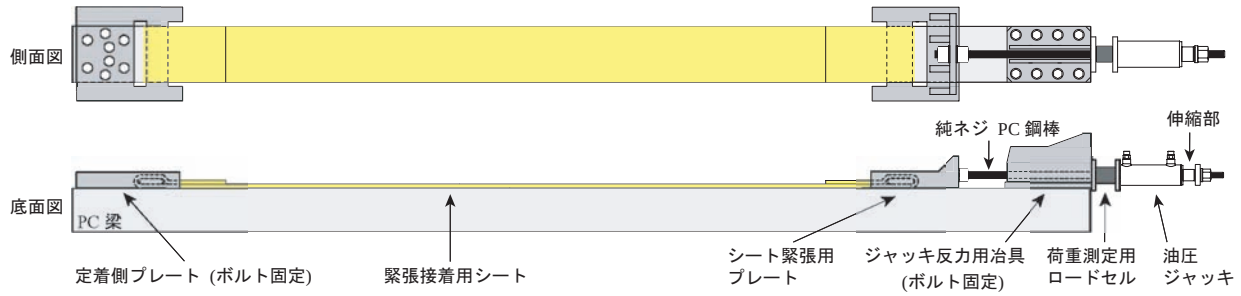
試験体名	補強の有無	緊張接着工法	シート目付量 (g/m^2)	目標導入緊張率 *	実測導入緊張率 *	実測初期導入ひずみ (μ)	計算せん断耐力 (kN)	計算曲げ耐力 (kN)	せん断余裕度
N	無	-	-	-	-	-	642.8	124.8	5.15
S-N	有	(無緊張接着)	1,245	0 %	0 %	0	627.8	183.9	3.41
S-P1		既存工法		27 % (141)	26.4 % (140)	4,620	678.2	206.8	3.28
S-P2		提案工法		27 % (141)	25.5 % (135)	4,463	675.7	203.6	3.32

* ( ) 内は導入緊張力 (kN)

*1　室蘭工業大学大学院　博士前期課程　建築社会基盤系専攻　(正会員)
*2　室蘭工業大学大学院　くらし環境系領域　社会基盤ユニット　教授　工博　(正会員)
*3　三井住友建設 (株) 技術研究開発本部　技術開発センター　副センター長　博 (工)　(正会員)
*4　室蘭工業大学大学院　くらし環境系領域　社会基盤ユニット　講師　博 (工)　(正会員)



図－2　試験体の配筋状況および補強概要 (S-P2)



図－3　緊張接着方法の概要 (S-P1/P2 共通)

表－2　AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

目付量 (g/m^2)	保証耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	破断ひずみ (%)
1,245*	1,764	0.858	2.06	118	1.75
435/435**	588/588	0.286			

*: 緊張接着用シート，**: 応力分散用シート

FRP シートを用いて付着せん断応力を部材軸方向のみならず軸直角方向にも分散させるプレテンション方式の緊張力導入工法である。なお，緊張接着用および応力分散用シートには，いずれもアラミド繊維 (AFRP) 製シートを用いている。

これまでの研究から，提案工法による RC/PC 梁の曲げ耐力向上効果を確認している [3]。しかしながら，実構造物を想定した比較的規模の大きい部材を対象とした場合や，既存の定着用鋼製治具を用いる工法 (以後，既存工法) との性能比較は，実施するに至っていない。

このような観点から，本研究では，提案の定着治具を用いない AFRP シート緊張接着曲げ補強工法の実用性を検討することを目的に，純スパン長 5 m の PC 梁を対象に提案の工法および既存の定着治具を用いる工法で緊張接着した場合の曲げ補強効果を実験的に検討した。なお，ここでは，短期的な耐荷性能に着目して比較検討を行った。

2. 実験概要

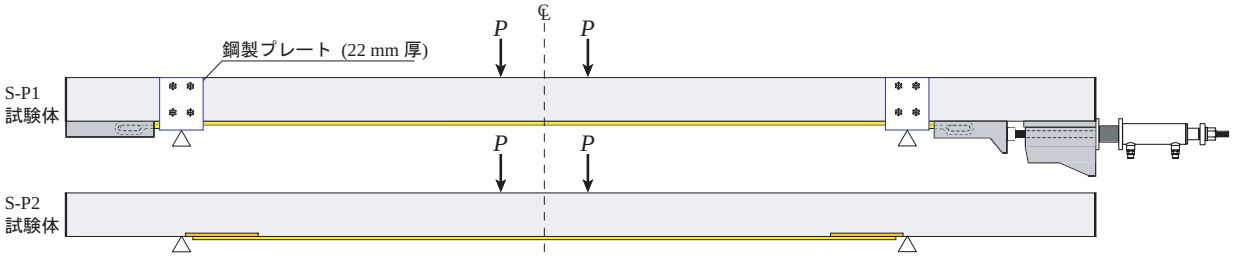
2.1 試験体概要

表－1 には，本実験で用いた試験体一覧を示している。表中，試験体名の第 1 項目は，補強の有無を示している。また，第 2 項目は補強方法を示しており，N は無緊張接着補強，P1 は既存のシート定着治具を用いる補強法，P2 は提案のシート定着治具を用いない補強法による補強である。緊張接着する場合における AFRP シートの目標導入緊張率 (導入緊張力/引張耐力) は 27 % とした。表より，実測導入緊張率は S-P1/P2 試験体ともに目標値とほぼ対応していることが分かる。

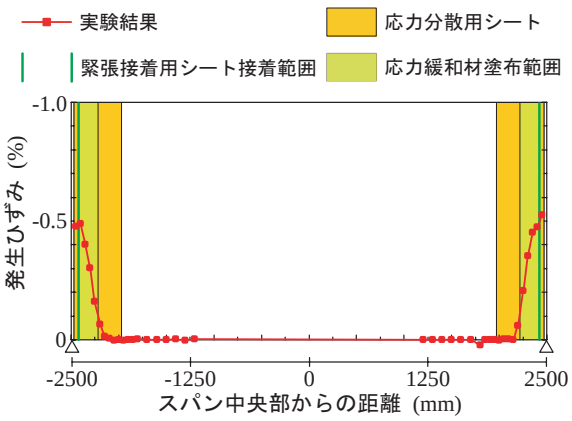
また，表には計算せん断耐力，計算曲げ耐力およびせん断余裕度 (計算せん断耐力/計算曲げ耐力) も併せて示している。試験体は，緊張接着補強後においてもせん断余裕度が 1.0 よりも十分に大きくなるように断面設計を行った。なお，計算曲げ耐力は，土木学会コンクリート標準示方書 [4] (以後，示方書) に準拠して各材料の応力－ひずみ関係を設定し，コンクリートとシートの完全付着を仮定して断面分割法により算出した。また，計算せん断耐力は示方書に準拠し，PC 鋼より線およびシートの緊張接着に伴い作用するデコンプレッションモーメントによるせん断耐力向上効果を考慮して算出した。

2.2 補強概要

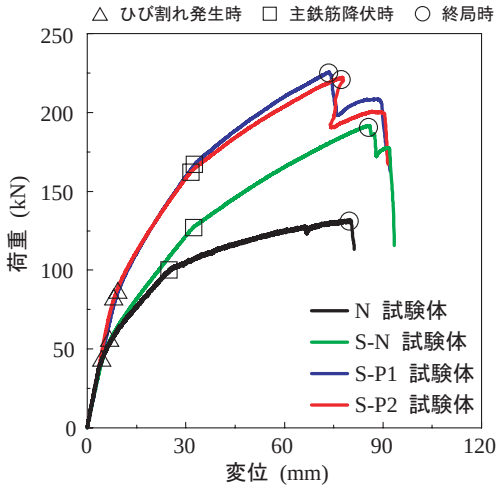
図－2 には，本実験に用いた試験体の配筋状況および補強概要を示している。試験体は，断面寸法が 30 × 30 cm，純スパン長 5 m のプレテンション式で製作した PC 梁である。また，載荷点間隔は 60 cm と設定しており，せん断スパン比は 8.46 である。上端鉄筋および下端鉄筋には D16 を 3 本ずつ用い，中央部には ϕ 15.2 mm の PC 鋼より線を 3 本配置した。なお，PC 鋼より線の導入緊張率は引



図－4　S-P1/P2 試験体の実験概要図



図－5　S-P2 試験体の緊張力解放時における緊張接着用シートの実測軸方向ひずみ分布



図－6　荷重－変位関係の比較

張強度の 60 % としている。せん断補強筋には D13 を用い，100 mm 間隔で配置している。また，PC 梁両端部には緊張力導入装置を設置できるように，左右にそれぞれ 800 および 1300 mm の張り出し部を設けている。緊張接着用シート (以後，本論文では無緊張接着の場合においても緊張接着用シートと呼ぶこととする) には，幅 300 mm の AFRP シートを用い，梁中央部から両支点の 80 mm 手前までの範囲に接着することとした。

表－2 には，本実験で用いた AFRP シートの力学的特性値を一覧にして示している。実験時のコンクリートの圧縮強度は 80 MPa，主鉄筋の降伏強度は 369 MPa であった。

図－3 には緊張接着方法の概要図を示している。緊張接着は，反転させた PC 梁の両端部に緊張力導入装置を設置し，一方を定着側，他方を緊張力導入側として油圧ジャッキを用いて AFRP シートに緊張力を導入している。詳細な試験体施工手順については文献 4) を参考されたい。

図－4 には，緊張接着した S-P1/P2 試験体の実験概要図を示している。S-P1 試験体の場合には，既存工法の定着状況を再現するため，緊張力導入装置を設置した状態下で FRP シートを緊張接着後も油圧ジャッキにより導入緊張力を維持し，載荷実験を行った。なお，支点部には，厚さ 22 mm の鋼製治具を設置して緊張接着用シートと支点治具が接触しないようにしている (**図－4**)。S-P2 試験体の場合には，S-P1 試験体の場合と異なり FRP シートを緊張接着後に油圧ジャッキの緊張力を解放し，かつ緊張力導入装置を撤去して載荷実験を行った。

本実験の測定項目は，載荷荷重，スパン中央点変位 (以後，変位)，緊張接着用シート各点の軸方向ひずみおよび等曲げ区間における梁下縁部のひび割れ幅の分布である。なお，等曲げ区間におけるひび割れ幅の分布は，パイゲージをスパン中央部から両支点方向に 50 mm 間隔で配置して測定した。また，実験時には，PC 梁のひび割れやシートの剥離状況を連続的に撮影している。

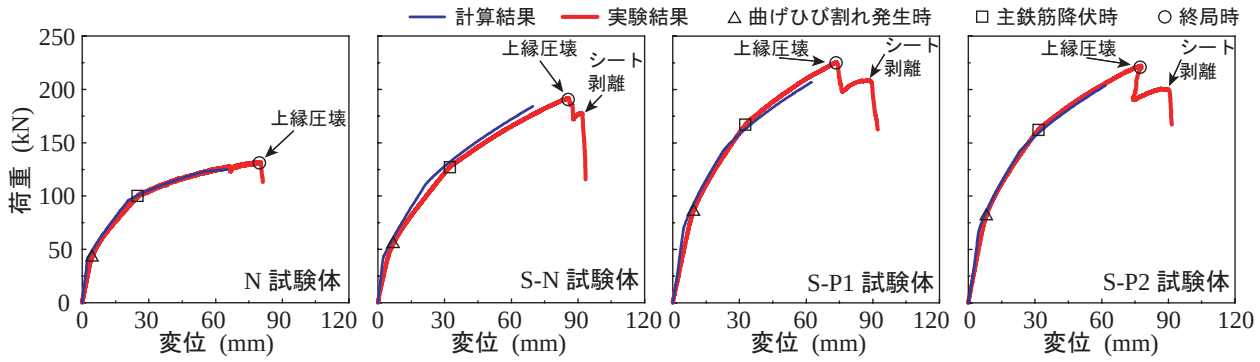
3. 実験結果および考察

3.1 緊張力解放時の緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

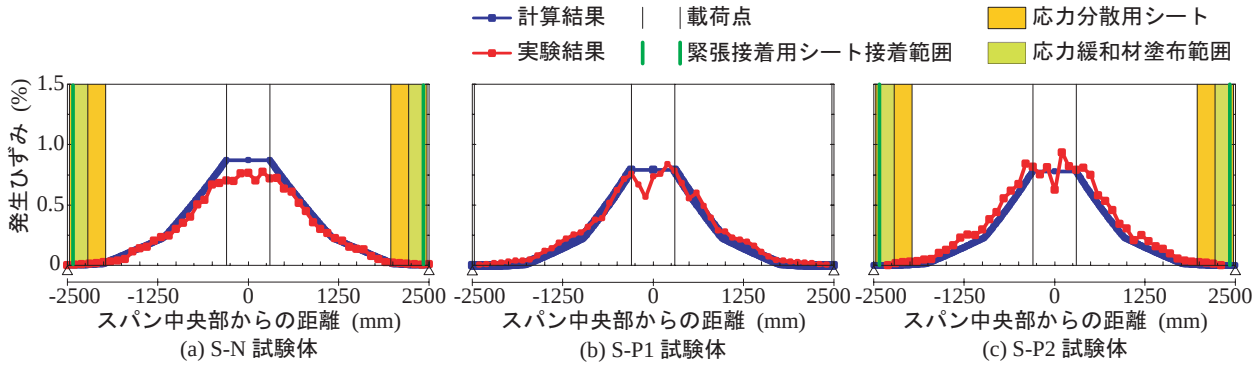
S-P2 試験体は，油圧ジャッキにより所定の緊張力を作用させた緊張接着用シートを PC 梁に接着し，接着樹脂が十分に硬化した後，油圧ジャッキを解放し，かつ緊張力導入装置を撤去して PC 梁にプレストレスを導入している。

図－5 には，ジャッキ解放直前にひずみ測定用増幅器の零バランスを取った状態下での，油圧ジャッキ解放時における緊張接着用シートの実測軸方向ひずみ分布を示している。

図より，緊張力の解放によってシート端部に最も大きな圧縮ひずみが発生していることが分かる。また，そのひずみ勾配は応力緩和材塗布範囲において緩やかとなり，応力分散用シート接着範囲において零レベルに至っている。



図－7　各試験体の荷重-変位関係



図－8　計算終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

以上のことより，緊張力解放に伴うシート端部に発生する応力集中は応力緩和材塗布範囲において低減され，応力分散用シート接着範囲内で緊張接着用シートとコンクリートの定着が十分確保されていることが分かる。

3.2 荷重－変位関係

図－6 には，各試験体の実験結果を比較して示している。図より，N および S-N 試験体の結果を比較すると，無緊張接着の場合においても主鉄筋降伏荷重が 20 kN 程度向上し，その後の曲げ剛性および最大荷重が増大していることが分かる。ただし，曲げひび割れ発生荷重は補強の有無によらず大差がない。また，S-N 試験体と S-P1/P2 試験体を比較すると，後者は曲げひび割れ発生荷重，主鉄筋降伏荷重および終局荷重が 75 ～ 100 kN 程度向上していることが分かる。また，S-P1/P2 試験体間で曲げ耐荷性状を比較すると，最大荷重時までは，両者はほぼ同様であることが分かる。

これらのことから，1) 無緊張接着によって，曲げ耐力向上効果は認められるものの，曲げひび割れ発生荷重の向上効果は小さい，2) 緊張接着することにより，曲げひび割れ発生荷重が増大し，その後の耐荷性能もそれに対応して向上する，3) 緊張接着補強を行う場合には，定着方法の違いによらず最大荷重時までほぼ同様の曲げ耐荷性状を示すこと，が明らかとなった。

図－7 には，各試験体に関する荷重－変位関係の実験結果を計算結果と比較して示している。なお，計算結果は，示方書に準拠してコンクリートと緊張接着用シートの完全付着を仮定し，断面分割法により算出している。

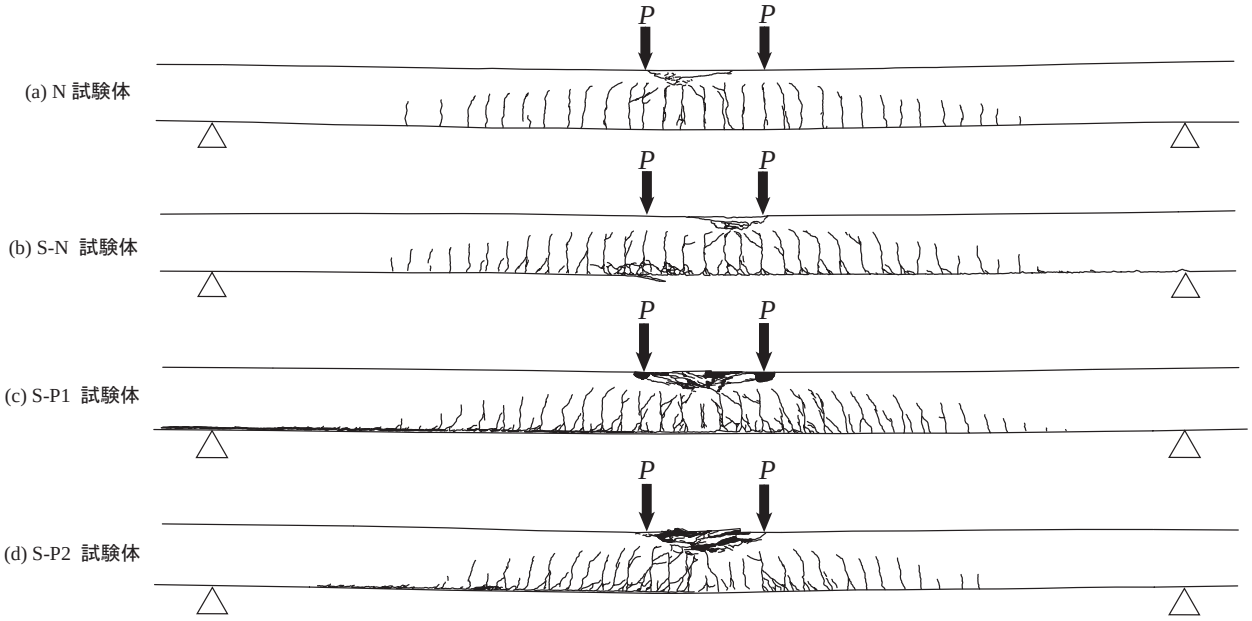
図より，実験結果はいずれの試験体も上縁コンクリートの圧壊により終局に至っていることが分かる。従って，緊張接着用 FRP シートとコンクリートの付着は計算終局時まで十分確保されていると判断される。

3.3 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布

図－8 には，S 試験体に関する計算終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状に関する実験結果を計算結果と比較して示している。なお，計算結果は緊張接着用シートとコンクリートの完全付着を仮定した断面分割法の結果に基づいて算出している。また，緊張接着用シートのひずみには初期導入ひずみは考慮していない。

図より，いずれの試験体においても等せん断力区間において実験結果と計算結果が一致していることが分かる。また，S-N 試験体は等曲げ区間において実験結果が計算結果を下回る傾向にあるが，S-P1/P2 試験体では等曲げ区間においても一部の実測ひずみに，曲げひび割れに起因する変動が認められるものの実験結果と計算結果は大略対応している。

以上より，純スパン長 5 m 程度の PC 梁に対してシートを緊張接着した場合においても，計算終局変位時点まで



図－9　変形性状およびひび割れ分布性状

緊張接着用シートとコンクリートの完全付着が確保されていることが明らかとなった。

3.4 変形性状およびひび割れ分布性状

図－9 には，各試験体の実験終了後における変形性状およびひび割れ分布性状を示している。図より，いずれの試験体も曲げ変形が卓越し，ほぼ左右対称のひび割れ分布となっていることが分かる。また，等曲げ区間では上縁コンクリートが圧壊している。

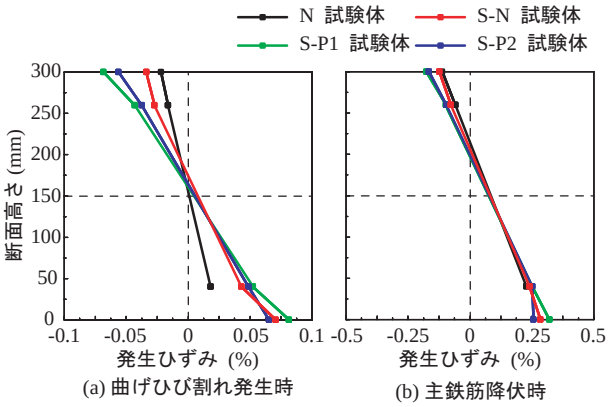
N 試験体の場合には，曲げひび割れが多く発生している。一方，S-N, S-P1/P2 試験体の場合には，曲げひび割れの他，載荷点近傍の梁下縁かぶりコンクリート部に斜めひび割れが発生している。この斜めひび割れは，上縁コンクリート圧壊後に発生したものであり，実験時には斜めひび割れの先端部がシートを下方に押し出して引き剥がすピーリング作用により緊張接着用シートが剥離したことを確認している。

3.5 断面高さ方向のひずみ分布性状

図－10 には，スパン中央部断面高さ方向のひずみ分布を曲げひび割れ発生時および主鉄筋降伏時について示している。図より，いずれの試験体においても，断面高さ方向のひずみ分布は主鉄筋降伏時まで直線的に分布していることが分かる。従って，いずれの場合においても平面保持の仮定がほぼ成立していることが分かる。また，補強試験体に関しては，断面高さ方向のひずみ分布性状からもシートの部分剥離が一切生じていないことが確認できる。

3.6 等曲げ区間におけるひび割れ幅

図－11 には，等曲げ区間における梁下縁部のひび割れ幅の分布を載荷荷重 P = 50, 100, 150 kN の場合について示

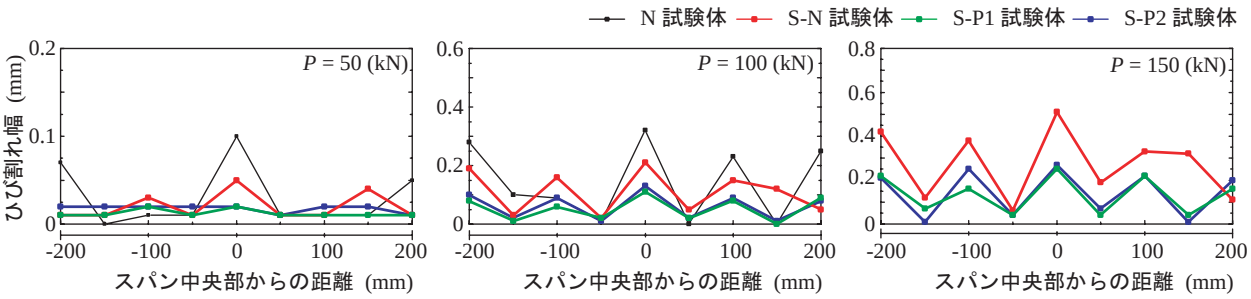


図－10　断面高さ方向におけるひずみ分布

している。なお，実験では等曲げ区間における曲げひび割れの発生間隔は 100 mm 程度であることを確認している。従って，曲げひび割れ間隔が，パイゲージの設置間隔 (50mm) よりも十分に大きいことから，各測定値は大略 1 本のひび割れの幅であるものと判断される。

P = 50 kN の場合の結果より，N および S-N 試験体では，それぞれひび割れ幅 w が最大で 0.05 ～ 0.1 mm および 0.03 ～ 0.05 mm 程度となっていることが分かる。一方，S-P1/P2 試験体の場合には，未だひび割れは発生していないことが分かる。

P = 100 kN の場合の結果を見ると，N 試験体では 0.2 ～ 0.3 mm 程度のひび割れが発生している。また，S-N 試験体および S-P1/P2 試験体の場合には，ひび割れ幅 w が 0.2 および 0.1 mm 程度となっている。さらに，P = 150 kN の場合には，S-N 試験体および S-P1/P2 試験体で，ひび割れ幅 w がそれぞれ 0.5 および 0.25 mm 程度に拡大している



図－11　等曲げ区間におけるひび割れ幅

ことが分かる。これより，PC 梁を AFRP シートを用いて緊張接着補強することにより，ひび割れ幅 w を緊張接着しない場合に比較して 1/2 程度に低減できるものと判断される。

以上のことから，i) AFRP シート接着補強することによって曲げひび割れ幅を抑制することができる。その効果は緊張接着することでより効果的に現れること，ii) 緊張接着する場合には，ひび割れ幅抑制効果は定着方法によらず同程度であること，が明らかになった。

4. まとめ

本研究では，著者らが提案したシートの定着治具を用いない AFRP シート緊張接着曲げ補強工法の PC 梁への適用性を検討することを目的に，純スパン長 5 m の PC 梁を対象に，提案工法および既存の定着治具を用いる工法で緊張接着補強した場合における曲げ補強効果を実験的に検討した。本実験により得られた知見を示すと，以下の通りである。

1) 提案の緊張接着工法は，純スパン長 5 m 程度の PC 梁に対しても十分適用可能である。
2) 提案工法は，シート両端部を機械的に定着する既往の緊張接着工法を適用する場合とほぼ同等の定着性能，ひび割れ抑制効果および補強効果を有している。
3) 以上より，提案の AFRP シート緊張接着曲げ補強法は十分実用的に利用可能であることが明らかになった。なお，本研究では，提案工法により曲げ補強した PC 梁の短期的な耐荷性能に着目して検討しているが，今後はその長期的な耐荷性能についても既存工法と比較する形で，検討する必要があるものと考えられる。

参考文献

1) 濱田　譲，井上真澄，小林　朗，高木宣章，児島孝之：緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究，土木学会論文集，No.771/V-56, pp.27-44, 2002.
2) 澤田純之，岸　徳光，三上　浩，藤田　学：AFRP シート緊張接着による RC 梁の曲げ補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, pp.1543-1548, 2008.
3) 栗橋祐介，岸　徳光，三上　浩，A. M. Ali：シート厚および導入緊張率を変化させた AFRP シート緊張接着曲げ補強 PC 梁の静載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.1297-1302, 2011.
4) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），2007.