

論文 断面図心にプレストレスを導入した PC 梁の AFRP シート緊張接着による曲げ補強効果

岸 徳光^{*1}・三上 浩^{*2}・栗橋 祐介^{*3}・AbdelAziz Mohamed Ali^{*4}

要旨: 本研究では, AFRP シート緊張接着工法の PC 梁に対する曲げ補強効果を検討することを目的に, 断面重心位置に PC 鋼材を配置した PC 梁を対象に本工法の曲げ補強効果を実験的に検討した。その結果, 1) 提案の緊張接着工法を用いることにより, PC 梁に AFRP シートからのプレストレス力を適切に導入可能である, 2) AFRP シートを緊張接着した PC 梁の耐荷性状は, 断面分割法により大略評価可能であり, 終局耐力については 2 割程度以上の安全余裕度をもって評価可能であること, が明らかになった。

キーワード: PC 梁, AFRP シート, 曲げ補強, 緊張接着

1. はじめに

著者らは, これまで, 連続繊維 (FRP) シート接着による鉄筋コンクリート (RC) およびプレストレスコンクリート (PC) 部材の曲げ補強効果をより効率的に発揮させる方法として, アラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを緊張して接着する方法を提案し, その補強効果を把握すべく RC/PC 梁を対象とした実験研究を行ってきた。この工法は, 過去に提案されている炭素繊維 (CFRP) プレートに関する緊張接着工法¹⁾とは異なり, 機械式定着具を用いずに, 緊張力を導入したシートをエポキシ系接着剤のみでコンクリート部材に接着するものである。具体的には, 緊張力導入時にシートの両端部に発生する集中定着応力を分散し, かつその応力勾配を緩和するために, 2 方向 AFRP シートおよび応力緩和材を用いる方法である (図-1 参照)。その結果, 1) 提案の AFRP シート緊張接着工法により RC/PC 梁の曲げ補強効果を効率的に向上可能であり, その曲げ耐荷性状は断面分割法により大略推定可能であること, 2) 緊張接着用シートの付着は RC/PC 梁の最大荷重時まで十分に確保されていること, などを明

らかにしている^{2),3)}。

なお, 一般的な PC 梁の場合には, 緊張材が下縁に配置されており梁が上反りしているため, 緊張接着用シートを梁下面に確実に密着させるためには, 接着面をパテ材等により水平に調整する必要がある。特に, 室内実験レベルの小型 PC 梁の場合には, 橋梁等で供用されている実 PC 梁の場合よりも大きな曲率で変形しているため, 断面高さに対するパテ材の厚さの割合も大きなものとなる傾向にある。過去の実験では, 上記パテ材を使用することでひび割れが集中しシート破断が助長される場合や, 曲げ耐荷性状が計算結果と対応しない場合も見られる等, 本工法の PC 梁に対する補強効果を適切に評価するに至っていないのが現状である。AFRP シート緊張接着工法の合理的な補強設計法を確立するためには, 上記の要因を排除し, より単純化された状態で検討することが重要であるものと考えられる。

このような背景より, 本研究では, パテ材等の影響を排除した形で AFRP シート緊張接着工法の PC 梁への適用性に関する検討を実施するために, PC 鋼より線を高さ方

表-1 試験体一覧

試験体名	断面寸法 (mm)	PC 鋼材の有効緊張率 (%)	シートの導入緊張率 * (%)	実測初期導入ひずみ (μ)	初期断面内応力 (MPa)		計算曲げ耐力 (kN)	計算せん断耐力 (kN)
					上縁	下縁		
P1-N	梁幅:300 梁高:180	49	-	-	-4.9	-4.9	67.4	289
P1-T0			0 (0)	0	-4.9	-4.9	97.5	289
P1-T20			20 (21.2)	3521	-2.4	-10.2	109	302
P1-T40			40 (36.8)	6215	0.2	-15.8	121	312
P2-N	梁幅:300 梁高:220	60	-	-	-5.0	-5.0	87	297
P2-T0			0 (0)	0	-5.0	-5.0	135	297
P2-T20			20 (20.5)	3387	-2.9	-9.3	150	313
P2-T40			40 (36.1)	6346	-0.8	-13.8	164	325

* () 内は実測導入緊張率

*1 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)

*2 三井住友建設(株)技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院講師 工学研究科 暮らし環境系領域 博(工) (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (非会員)

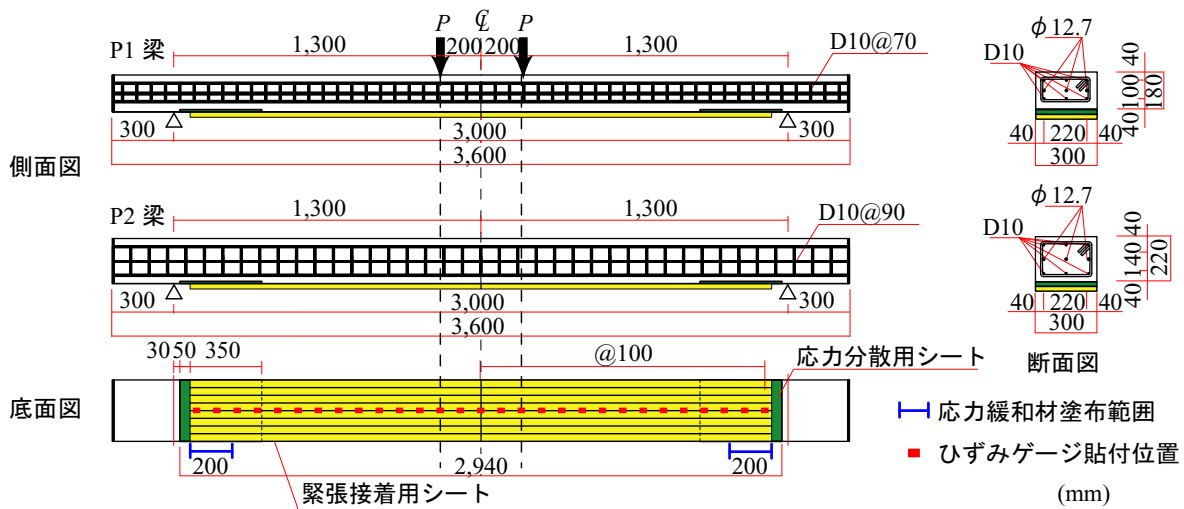


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

向断面重心位置に配置して上反りをなくしたPC梁を対象に曲げ補強効果に関する静載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、梁高を2種類とし、それぞれ無補強の他、シート緊張率を0、20、40%の3種類とした4種全8体である。なお、P1およびP2梁において、PC鋼より線の有効緊張率はそれぞれ49%、60%である。これは、PC鋼より線の緊張力により断面に作用する圧縮応力レベルをP1およびP2梁で同等となるようにするためである。表-1より、AFRPシート無補強・無緊張の場合には両梁ともに初期の断面内応力が5MPa程度であることが分かる。

表中、試験体名の第1項目は梁高の種類(P1:180mm, P2:220mm)、第2項目は曲げ補強の有無(N:無補強, T:補強)を示し、Tに付随する数値はシートの目標導入緊張率(%)を示している。なお、導入緊張率とはシートの保証引張耐力に対する導入緊張力の割合である。また、表には、目標導入緊張率の他、ロードセルより得られた緊張力を基にした各試験体の実測導入緊張率も併せて示している。なお、曲げ補強シートには目付量830g/m²で保証耐力1,176kN/mのAFRPシートを用いた。以後、本論文では緊張力導入の有無に関わらず曲げ補強シートを緊張接着用シートと呼ぶことにする。

ここで、表-1中の計算結果は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾に準拠して算定したものである。表より、AFRPシート緊張接着によってPC梁の計算曲げ耐力のみならず、計算せん断耐力も向上していることが分かる。この計算せん断耐力の増分は、AFRPシート緊張接着により増加したデコンプレッションモーメントによるものである。

図-1には、本実験に用いた試験体の形状寸法、配筋状

表-2 AFRPシートの力学的特性値(公称値)

シートの種類	繊維目付量(g/m ²)	保証耐力(kN/m)	厚さ(mm)	引張強度(GPa)	弾性係数(GPa)	破断ひずみ(%)
緊張接着用シート	830	1,176	0.572	2.06	118	1.75
応力分散用シート	435/435	588/588	0.286/0.286			

表-3 鋼材の力学的特性値

鋼材名称	材質	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)	弾性係数(GPa)
D10	SD345	356	523	206
φ12.7	SWPR7BN	1783*	1965	194

*0.2%永久伸びに対する応力

況および補強概要を示している。試験体は、純スパン長3.0mの複鉄筋矩形PC梁である。上端鉄筋及び下端鉄筋には、D10を3本ずつ用い、中央部にはφ12.7のPC鋼より線を3本配置し、所定の緊張力を導入している。緊張接着用シートには、幅300mmのAFRPシートを用い、梁中央部から両支点の80mm手前までの範囲に接着した。なお、緊張接着用シートの両端部には、前述のとおり応力分散用の2方向AFRPシート(一方向の目付量が435g/m²)および応力緩和材を使用している。

2.2 補強方法

緊張接着用シートの接着は、1)PC梁を接着面を上側にし、緊張接着用治具に設置して、接着面の下地処理を行う、2)樹脂含浸してプレキャスト化したAFRPシートに油圧ジャッキを用いて緊張力を導入し、3)接着樹脂を用いてPC梁に接着している。その後、1週間程度養生し、接着樹脂の硬化を確認した後、油圧ジャッキを解放してシートの緊張力をPC梁に伝達させている。

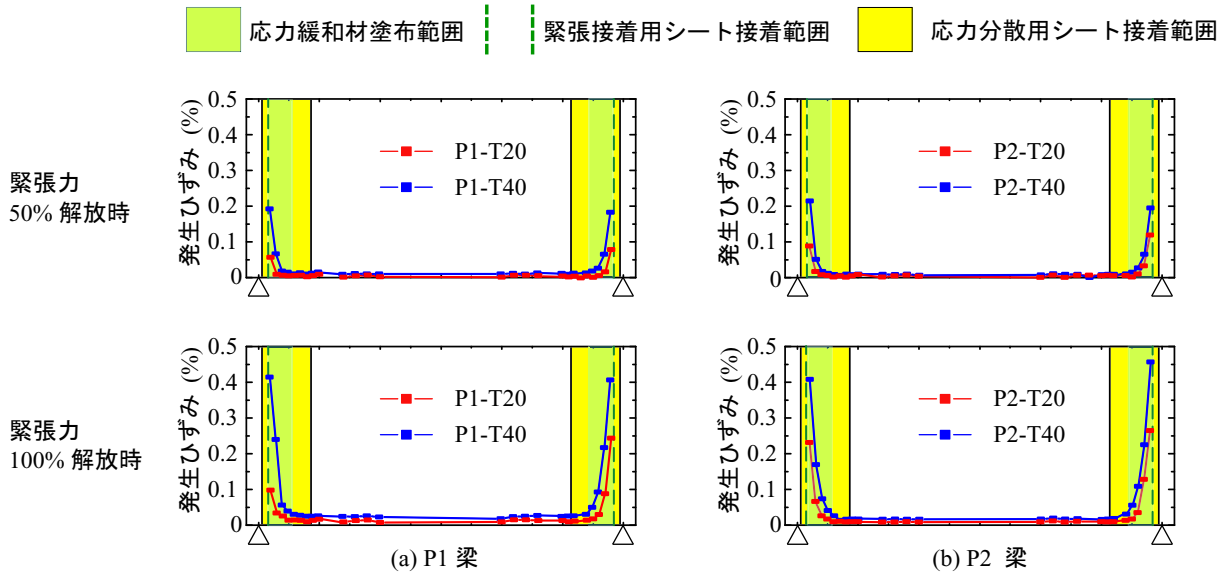


図-2 ジャッキ解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

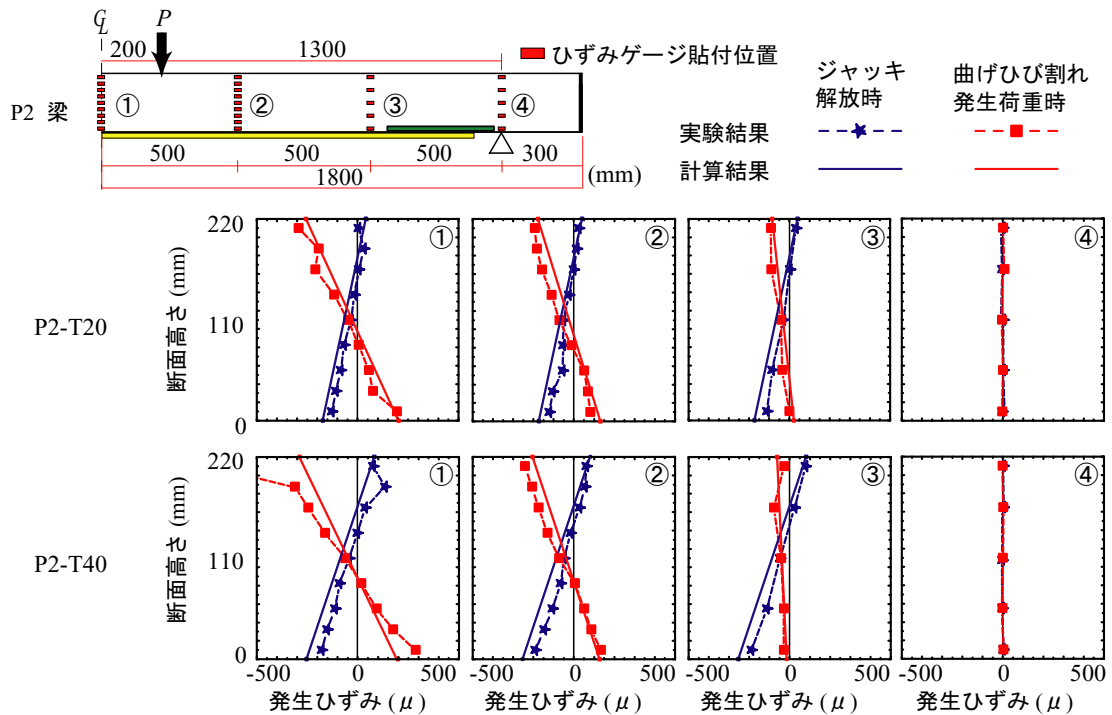


図-3 ジャッキ解放時および曲げひび割れ発生荷重時におけるPC梁側面の軸方向ひずみ分布の推移

また、ジャッキ解放時には、緊張接着用シート両端部の接着界面に、面内せん断応力が発生するため、シートもしくはかぶりコンクリートの剥離が予想される。そのため、面内せん断応力を梁軸方向のみならず梁幅方向にも分散させ、かつこれらの応力勾配を緩和するために、両緊張接着用シート端部近傍には、あらかじめ400mm長さの2方向AFRPシートをPC梁に接着し、その上に応力緩和材(伸び率150%で弾性係数はFRPシート接着用樹脂の1/60程度)を介して緊張接着用シートを接着している。

なお、本実験では、試験体を反転させて接着面を上側に向けてAFRPシートを緊張接着しているが、実施工を

想定した上向きの実施工が可能であることも別途実験で確認している。

2.3 実験方法および材料特性値

実験は、容量500kNの油圧ジャッキを用いて4点曲げ荷重により行った。測定項目は、荷重荷重、スパン中央部変位(以後、変位)、緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布である。また、実験時にはPC梁のひび割れおよびシートの剥離・破断状況をデジタルカメラにより逐次撮影している。なお、AFRPシートの緊張力を解放する際には、AFRPシートおよび梁側面の軸方向ひずみも測定している。表-2,3には、それぞれAFRPシートおよび鋼材の

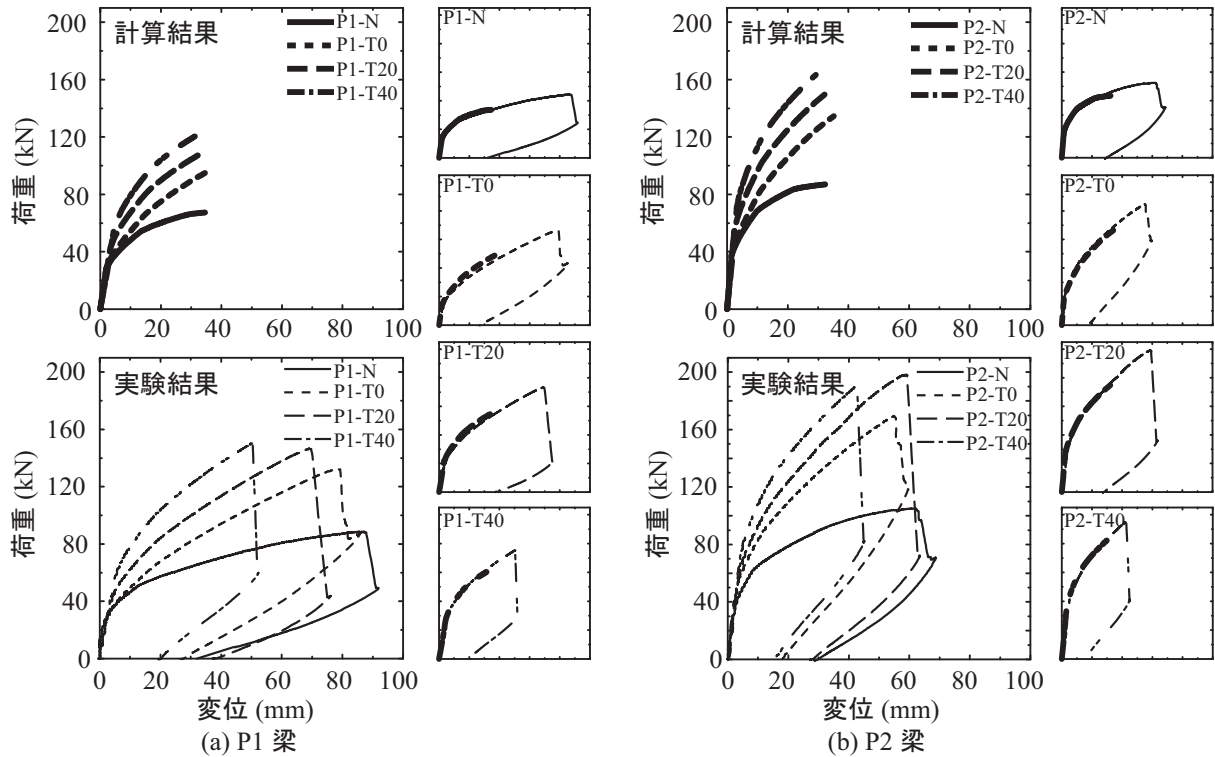


図-4 荷重-変位関係

力学的特性値を一覧にして示している。また、実験時のコンクリートの圧縮強度は、P1 および P2 梁の場合において、それぞれ 75.8、72.5 MPa であった。

3. 実験結果および考察

3.1 ジャッキ解放時における緊張接着用シートおよび梁側面のひずみ分布

図-2には、ジャッキ解放時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布を50および100%解放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、ジャッキ解放率の増加に伴って緊張接着用シートのひずみが増大しており、またシート両端部近傍において最大ひずみが発生していることが分かる。これらのひずみは応力緩和材の塗布範囲内において低下し一定値にすりついている。なお、本実験では、ジャッキ解放後においてもシートやかぶりコンクリートの引き剥がれが生じていないことを確認している。これらのことから、提案の工法により緊張接着用シートはその両端部において確実に定着されているものと判断される。

図-3には、1)ジャッキ解放時および2)静載荷実験の曲げひび割れ発生時におけるPC梁側面の軸方向ひずみ分布の推移を示している。なお、ここでは、P2-T20/40試験体に関する実験結果を断面分割法による計算結果と比較する形で示している。計算結果は、後述するシートとコンクリートとの完全付着を仮定した断面分割法により算出したものである。

図より、ジャッキ解放時における実測ひずみ分布は、シートの導入緊張率にかかわらず、計算結果と良く対応していることが分かる。なお、支点部は補強範囲外であるためひずみが発生していない。このことより、本実験においては、提案のAFRPシート緊張接着工法により、PC梁の補強範囲にプレストレス力が適切に導入されていることが分かる。

一方、曲げひび割れ発生時の実測ひずみ分布はスパン中央部において最も大きな勾配を生じており、支点側に向かうほど傾きが小さくなる傾向にあることがわかる。また、これらの実験結果は計算結果とほぼ対応している。

以上のことから、提案のAFRPシート緊張接着工法によって、PC梁の各断面、各点には計算値と同様なひずみが発生し、プレストレス力が適切に導入されていることが明らかとなった。

3.2 荷重-変位関係

図-4には、荷重-変位関係に関する実験および計算結果と、各試験体に関する両結果の比較図をP1およびP2梁について示している。計算結果は、表-1の実測導入緊張率を用いて、土木学会コンクリート標準示方書(以後、示方書)⁴⁾に準拠し、平面保持を仮定した断面分割法により算出している。また、計算では、コンクリートと緊張接着用シートの完全付着を仮定し、梁上縁コンクリートの圧縮ひずみが終局圧縮ひずみに至った時点を終局としている。なお、P1およびP2梁のコンクリートの終局圧縮ひずみは、示方書に準拠し圧縮強度に対応して、そ

表-4 計算結果および実験結果の一覧

試験体名	曲げひび割れ発生時					PC 鋼材降伏時					終局時					実験時の破壊性状
	計算結果		実験結果		荷重比	計算結果		実験結果		荷重比	計算結果		実験結果		荷重比	
	荷重	変位	荷重	変位		荷重	変位	荷重	変位		荷重	変位	荷重	変位		
	P_{cc}	δ_{cc}	P_{ce}	δ_{ce}	P_{ce} / P_{cc}	P_{yc}	δ_{yc}	P_{ye}	δ_{ye}	P_{ye} / P_{yc}	P_{uc}	δ_{uc}	P_{ue}	δ_{ue}	P_{ue} / P_{uc}	
(kN)	(mm)	(kN)	(mm)		(kN)	(mm)	(kN)	(mm)		(kN)	(mm)	(kN)	(mm)			
P1-N	23.8	1.32	23.8	3.00	1.00	54.3	13.5	52.7	14.3	0.97	67.4	34.6	80.6	85.5	1.20	コンクリート圧壊
P1-T0	29.5	1.88	30.7	3.04	1.04	66.3	14.9	66.1	18.6	1.00	97.5	36.8	132	78.2	1.36	コンクリート圧壊
P1-T20	37.6	2.32	44.4	4.35	1.18	82.2	15.8	80.4	17.8	0.98	109	33.8	146	69.0	1.34	圧壊後シート破断
P1-T40	50.9	3.13	51.5	4.51	1.01	98.1	16.8	103	19.8	1.05	121	31.5	150	50.4	1.25	圧壊後シート破断
P2-N	38.5	1.49	41.0	3.07	1.06	68.2	9.8	66.7	11.0	0.98	87.0	32.4	105	61.6	1.21	コンクリート圧壊
P2-T0	39.4	1.48	44.7	2.70	1.13	81.9	10.8	84.7	10.3	1.03	135	35.2	170	54.9	1.26	コンクリート圧壊
P2-T20	53.3	2.49	58.1	4.05	1.09	101.7	11.3	105.2	13.1	1.03	150	32.2	198	58.7	1.32	圧壊後シート破断
P2-T40	68.6	3.14	75.6	4.51	1.10	121.3	12.0	127.5	15.0	1.05	164	29.8	191	42.7	1.16	圧壊後シート破断

計算結果の破壊性状は全てコンクリート圧壊

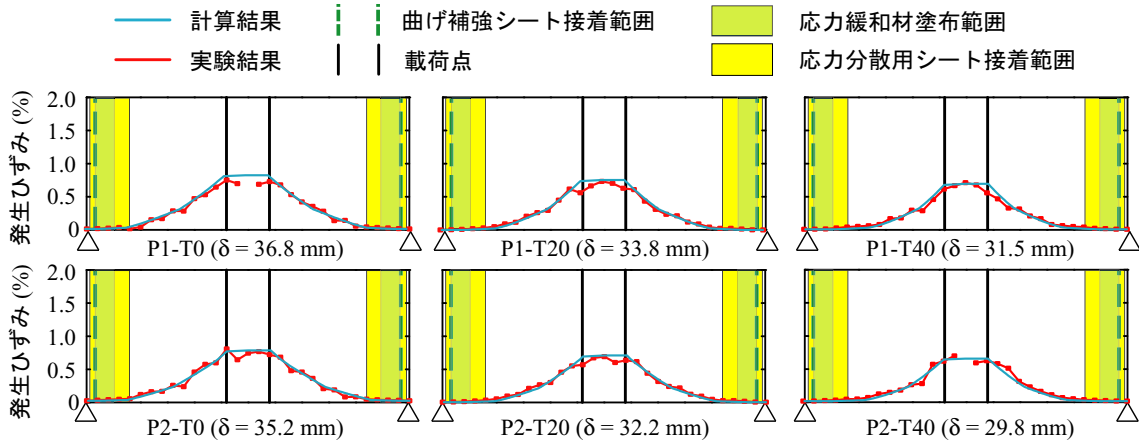


図-5 計算終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状

れぞれ $2,640 \mu$ および $2,756 \mu$ としている。

図より、P1, P2 梁ともに AFRP シート緊張接着により曲げ耐荷性能が向上し、シートの導入緊張率が高いほど補強効果が効率的に発揮される傾向にあることが分かる。また、このような傾向は、計算結果においても同様である。各試験体の実験および計算結果の比較図を見ると、実験結果は計算結果とほぼ同様の曲げ耐荷性状を示し、かつ実測耐力は計算耐力を上回っていることが分かる。

表-4 には、曲げひび割れ発生時、PC 鋼材降伏時および終局時における実験および計算結果を一覧にして示している。また、実験時における破壊性状も併せて示している。表より、曲げひび割れ発生時、PC 鋼材降伏時の実験および計算結果は極めて良く対応しており、かつ終局時においては実測耐力 P_{ue} が計算耐力 P_{uc} を 2 割程度以上上回っていることが分かる。

これらのことより、提案の AFRP シート緊張接着工法により曲げ補強した PC 梁の曲げ耐荷性状は、断面分割法により計算終局時まで精度良く推定可能であり、終局耐力については 2 割程度以上の安全余裕度をもって評価可

能であることが明らかになった。

3.3 緊張接着用シートのひずみ分布性状

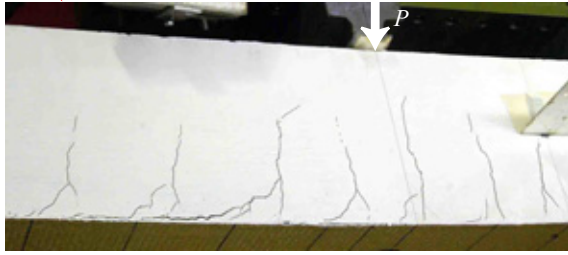
図-5 には、曲げ補強試験体の計算終局変位時における緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状を計算結果と比較して示している。計算結果は、前述の断面分割法結果を用いて算出したものである。

図より、いずれの試験体においても、実験結果は計算結果と極めて良く対応していることが分かる。このことより、導入緊張率によらず、緊張接着用シートとコンクリートとの付着は計算終局変位時まで十分に確保されているものと判断される。また、このことが前述の荷重-変位関係において実験および計算結果が極めて良く対応していることを裏付けているものと考えられる。

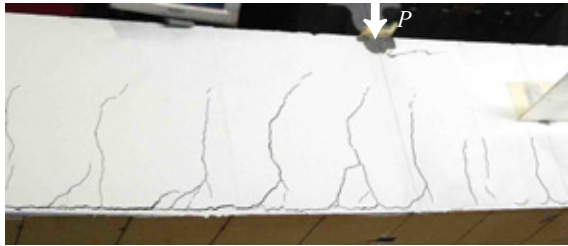
3.4 ひび割れ分布性状

写真-1 には、P2-T0/20/40 試験体に関する終局時近傍のひび割れ進展状況を示している。写真より、P2-T0/20 試験体では、載荷点近傍の下縁かぶりコンクリートに発生した斜めひび割れの先端部がシートを押し下げて引き剥がすピーリング作用による部分剥離が発生しているこ

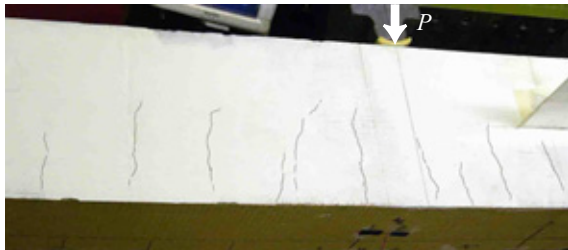
← 支点方向



P2-T0 試験体 ($P_{ue} = 170 \text{ kN}$)



P2-T20 試験体 ($P_{ue} = 198 \text{ kN}$)



P2-T40 試験体 ($P_{ue} = 191 \text{ kN}$)

写真-1 終局時近傍における PC 梁側面のひび割れ性状

と分かる。実験時には、P2-T0 試験体は、上縁コンクリートの圧壊に伴って耐力が低下し、P2-T20 試験体は上縁コンクリート圧壊後シート破断に至った。

一方、P2-T40 試験体の場合には、曲げひび割れの発生が見られるものの、P2-T0/20 試験体に見られたピーリング作用によるシートの部分剥離はほとんど見られず、この直後にシート破断により終局に至っている。これは、表-1 に示しているように、AFRP シート緊張接着によるデコンプレッションモーメントの増加によってせん断耐力が向上し斜めひび割れの発生が抑制されたことが、ピーリング作用によるシートの引き剥がれが抑制されたこと

の要因であるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、AFRP シート緊張接着工法の PC 梁に対する曲げ補強効果を検討することを目的に、断面重心位置に PC 鋼より線を配置した PC 梁を対象に本工法の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結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) ジャッキ解放時における PC 梁側面の軸方向ひずみ分布は、シートとコンクリートとの完全付着を仮定した計算値と良く対応する。すなわち、提案の緊張接着工法を用いることにより、PC 梁に AFRP シートからのプレストレス力を適切に導入可能である。
- 2) 提案の AFRP シート緊張接着工法により曲げ補強した PC 梁の曲げ耐荷性状は、断面分割法により精度良く推定可能であり、終局耐力については 2 割程度以上の安全余裕度をもって評価可能である。
- 3) AFRP シートの緊張接着工法は PC 梁の曲げ耐力のみならずせん断耐力も向上可能であることから、ピーリング作用によるシート剥離の抑制に対しても有効である。

参考文献

- 1) 呉 智深, 松崎 智優, 福沢 公夫, 神口 建: CFRP シート緊張接着した鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000.
- 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, 澤田 純之: AFRP シートを緊張接着した PC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告書, Vol.8, pp.257-264, 2008.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書【設計編】, 土木学会, 2007.