

AFRP シートに緊張力を導入して曲げ補強した PC 梁の静載荷実験

Experimental study of flexural reinforced PC beams with pre-tensioned AFRP sheet

三井住友建設 (株)
室蘭工業大学
三井住友建設 (株)
(株) ケイジーエンジニアリング
室蘭工業大学

フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正会員 藤田 学 (Manabu Fujita)
正会員 巽 治 (Osamu Tatsumi)
○ 学生員 池田 聡 (Satoshi Ikeda)

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法として連続繊維 (FRP) シートを接着する方法が多く採用されている。しかしながら、FRP シートを RC 部材の引張り作用面に接着して曲げ補強を行う場合、シートの補強効果は主として主鉄筋降伏後に発揮されることが明らかになっている。従って、ひび割れが発生しにくく主鋼材が降伏しにくいプレストレストコンクリート (PC) 部材に FRP シートを接着しても、補強効果の出現は主鋼材降伏後に限定されるものと考えられる。

そのため、最近では、FRP シートの補強効果を初期段階より発揮させる方法としてシートに緊張力を導入して接着 (以後、緊張接着) する工法^{1),2)}が提案されており、一部で実用化されている。しかしながら、FRP シートを緊張接着して曲げ補強した PC 梁の耐荷性状やシートの剥離性状については研究例が少なく、未解明な部分も残されているのが現状である。

このような背景より、本研究では、アラミド繊維製 FRP (AFRP) シート緊張接着による PC 梁の曲げ耐荷性状やシートの剥離性状の検討を目的に、AFRP シートを緊張接着して曲げ補強した PC 梁の 4 点曲げ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、曲げ補強シートのシート幅を 3 種類、シートの導入緊張力を 3 種類に変化させた全 8 体である。ここで、緊張率は曲げ補強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。表中、試験体名の第 1 項目は英文字 T に導入緊張率 (%) を付して示しており、第 2 項目は英文

字 S にシート幅 (cm) を付して示している。なお、N は無補強の試験体である。

図-1 には、本実験に用いた試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。試験体は、断面寸法 (梁幅 × 梁高) が 30 × 19 cm、純スパン長 2.8 m の PC 梁であ

表-1 試験体一覧

試験体名	シートへの 導入緊張率 *	実測 導入緊張率 *	シート幅 (mm)
N	-	-	-
T0-S10	0 %	0 %	100
T0-S20	0 %	0 %	200
T0-S30	0 %	0 %	300
T30-S20	30 % (70.6)	28.1 % (66.2)	200
T30-S30	30 % (105.8)	24.3 % (85.7)	300
T60-S10	60 % (70.6)	55.3 % (65.0)	100
T60-S20	60 % (141.1)	54.7 % (128.7)	200

* () 内は導入緊張力 (kN)

表-2 AFRP シートの力学的特性値 (公称値)

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 (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75
435/435	588/588	0.286/0.286			

表-3 鋼材の力学的特性値

鋼材種類	線径	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
SWPR7AN	φ 9.3	1,647	1,879	192.8

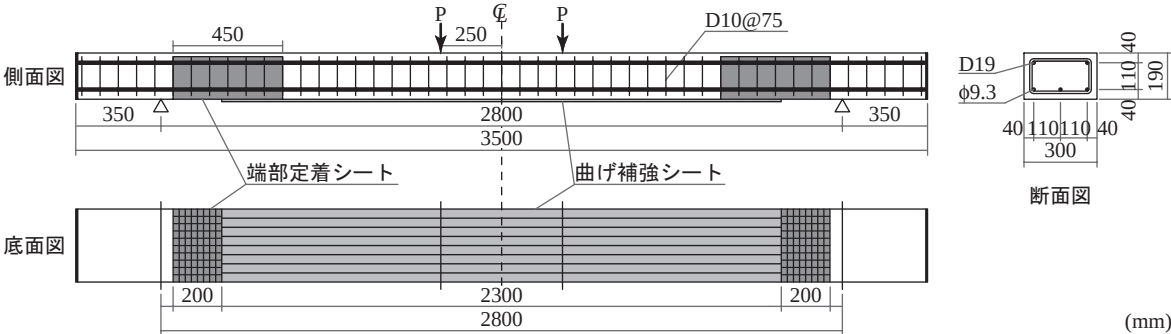


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況 (-S30 試験体)

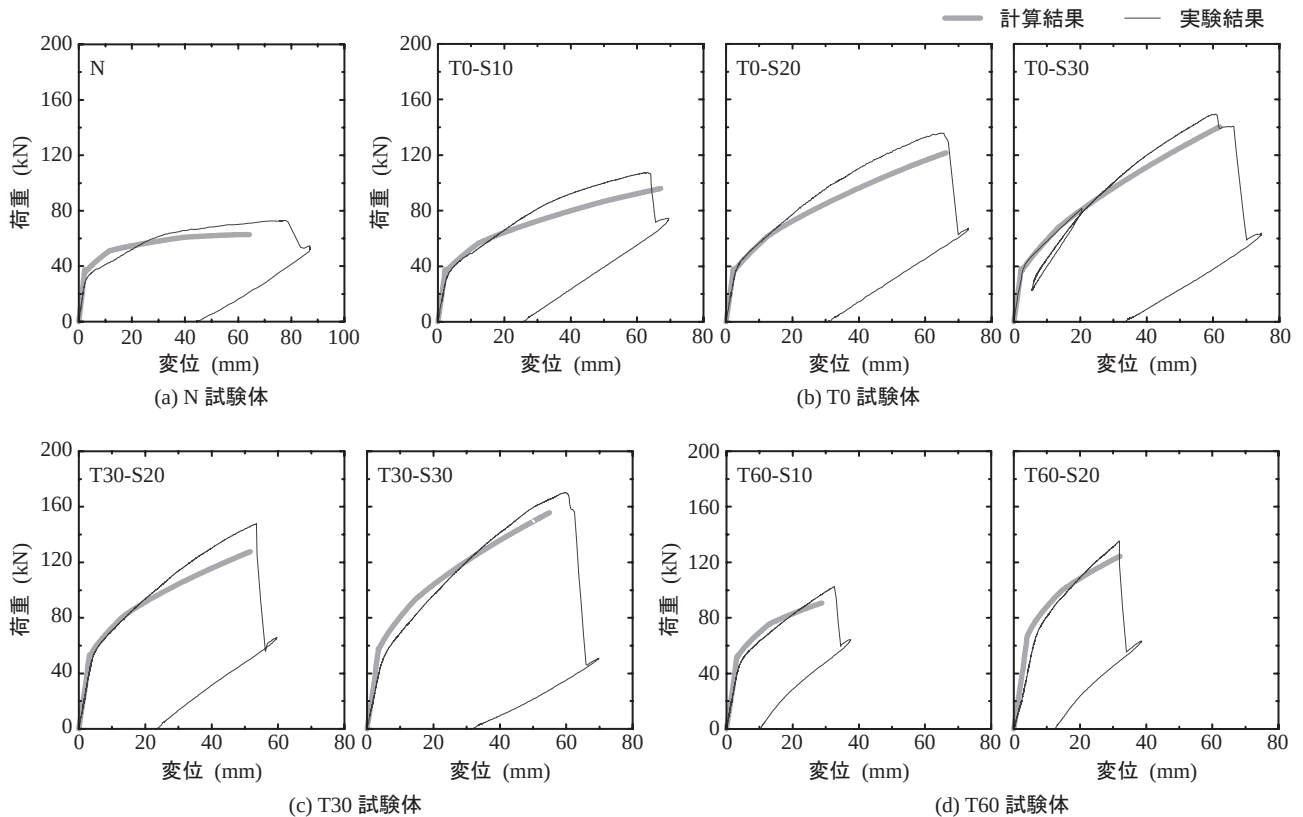


図-2 荷重-変位関係

る。下端鋼材には、PC 鋼より線 $\phi 9.3$ を 3 本、上端筋には D19 を 2 本配置している。なお、PC 鋼より線の緊張力は、有効緊張力が降伏強度の 60 % となるようにプレテンション方式で導入した。

曲げ補強シートは、所定の幅の AFRP シートを梁中央部から両支点の 250 mm 手前までの範囲に接着している。なお、本実験では、緊張力を導入したシートを接着する場合、シートの接着端部よりかぶりコンクリートごと引き剥がされる恐れがあるため、あらかじめ両支点から 50 ~ 500 mm の範囲に二方向 AFRP シートを接着させ、曲げ補強シート端部に発生する応力集中を緩和させることとした。なお、表-2、表-3 にはそれぞれ本実験に用いた曲げ補強用 AFRP シートおよび二方向 AFRP シートと PC 鋼より線の材料特性値を示している。また、コンクリートの圧縮強度は 66.3 MPa であった。

2.2 シート緊張力の導入方法

本実験では、油圧式の緊張力導入装置を製作し、シート緊張力を以下の手順で導入した。すなわち、

- (1) 所定の幅の曲げ補強シートに含浸接着樹脂(以後、単に樹脂)を塗布し、補強範囲よりも広いプレキャスト板を製作する、
- (2) あらかじめ、引き剥がれ防止用の二方向 AFRP シートを接着・硬化させた後その表面に樹脂を塗布し、曲げ補強シートを所定の位置にセットした後、緊張力導入装置によりシートを緊張する、
- (3) 所定の緊張力で緊張したことを確認後、曲げ補強シートの浮き上がりを防止するため、エアーコンプレッサーを用いた加圧装置によってシート上面より圧力を

加えた状態で養生を行う、

- (4) 樹脂の硬化を確認した後、緊張力を導入し曲げ補強範囲外のシートを切断・除去する、

である。

本実験ではシートの緊張時から緊張力導入時までロードセルを用いて緊張力を測定し、緊張力導入直前の値を実測導入緊張力としている。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

図-2 には、各試験体の荷重-変位関係を計算結果と比較して示している。図中の計算結果は、表-1 の実測導入緊張率を用いて、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、計算の終局は上縁コンクリートのひずみが $3,500 \mu$ となるまで、もしくは下縁のひずみが曲げ補強シートの破断ひずみである $17,500 \mu$ になるまでとしている。表-4 には、図-2 より得られる実験、計算結果を一覧にして示している。なお、表には、曲げひび割れ発生時、1 次降伏点、最大荷重時の荷重および変位と破壊性状を示している。なお、2 次降伏点は実験結果において荷重-変位関係の勾配変化が小さく判断できないため記載していない。

図-2(a) より、N 試験体の計算結果を見ると、曲げひび割れ発生荷重時および PC 鋼より線の 1 次降伏点において、剛性勾配の変化が大きいたことが分かる。しかしながら、2 次降伏点が剛性勾配の変化に与える影響は顕著ではない。一方、実験結果は曲げひび割れ発生後に剛性勾配が大きく低下し、その後 1 次降伏点でさらに剛性勾配が低下してい

表-4 計算結果および実験結果の一覧

試験体名	計算結果							実験結果						
	ひび割れ荷重		1次降伏荷重		最大荷重		破壊性状	ひび割れ荷重		1次降伏荷重		最大荷重		破壊性状
	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} (kN)	δ_{cc} (mm)	P_{y1c} (kN)	δ_{y1c} (mm)	P_{uc} (kN)	δ_{uc} (mm)		P_{ce} (kN)	δ_{ce} (mm)	P_{yle} (kN)	δ_{yle} (mm)	P_{ue} (kN)	δ_{ue} (mm)	
N	37.5	2.2	51.0	11.5	52.4	14.3	コンクリート圧壊	30.2	2.7	60.6	29.1	73.1	77.6	コンクリート圧壊
T0-S10	37.8	2.2	56.7	12.4	96.0	67.1	コンクリート圧壊	31.6	2.7	61.6	17.5	107.5	63.1	シート剥離
T0-S20	38.0	2.2	62.9	13.3	121.7	66.2	コンクリート圧壊	36.5	2.9	72.7	17.8	135.9	64.7	シート剥離
T0-S30	38.2	2.2	68.4	13.7	140.4	62.0	コンクリート圧壊	36.6	2.7	77.4	18.4	149.5	60.7	シート剥離
T30-S20	52.5	3.2	81.6	13.7	127.7	51.6	シート破断	49.2	3.9	112.7	29.3	148.0	53.5	シート破断
T30-S30	57.7	3.4	93.0	14.4	155.7	54.9	コンクリート圧壊	50.6	4.9	121.6	30.4	170.3	59.7	コンクリート圧壊
T60-S10	52.2	3.2	75.6	13.0	90.7	28.8	シート破断	42.1	3.5	82.6	20.2	102.6	32.6	シート破断
T60-S20	66.8	4.1	99.5	14.5	124.4	32.1	シート破断	61.5	6.1	99.6	16.3	135.4	31.9	シート破断

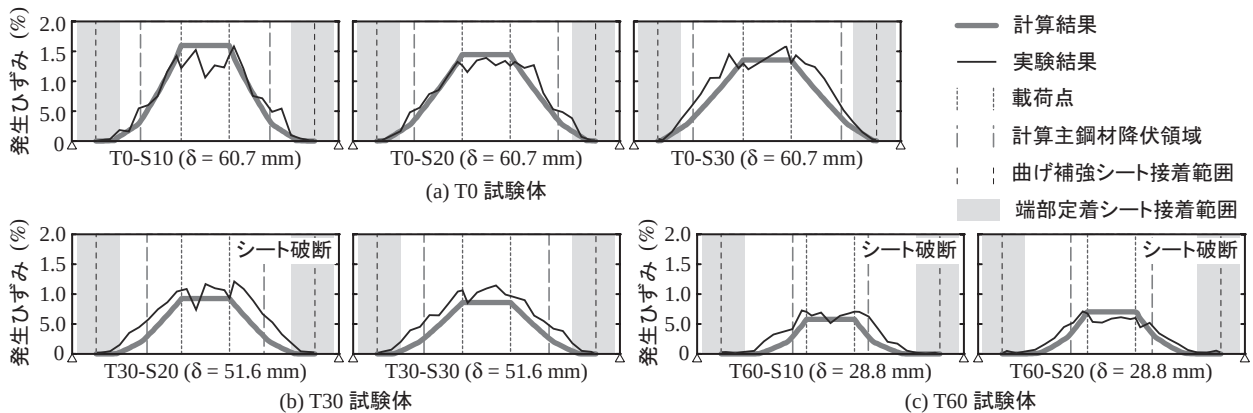


図-3 同一変位時における曲げ補強シートの軸方向ひずみ分布性状

る。しかしながら、計算結果と同様に実験結果においても明確な2次降伏点を確認することはできない。

図-2(b)より、緊張力を導入しないT0試験体の計算結果から、シート幅にかかわらず、ひび割れ発生荷重はほぼ同等であることが分かる。その後、1次降伏点、2次降伏点と変位が大きくなるとともにシートの補強効果が発揮され、シート幅が広く補強量が多いほど荷重が大きく示されている。なお、計算結果はいずれも上縁コンクリートの圧壊により終局に至っている。実験結果を見ると、ひび割れ発生荷重から1次降伏点までは計算結果と良く対応していることが分かる。しかしながら、計算結果の1次降伏点以降では、剛性勾配の変化が小さく計算荷重を上回った状態で荷重、変位が増大している。最終的には計算終局変位到達前にシート剥離により終局に至っている。

図-2(c)より、導入緊張率が約30%のT30-S20/S30試験体の計算結果は、初期勾配は同等であるものの、ひび割れ発生荷重以降にシート幅の影響が出現し、変位が1次降伏点、2次降伏点と大きくなるとともに両者の差異が拡大する傾向にある。また、計算の終局はT30-S20試験体でシート破断、T30-S30試験体でコンクリートの圧壊となっている。実験結果では、ひび割れ発生荷重は計算結果と同程度を示し、その後1次降伏点までの勾配を維持した状態で荷重、変位が増大し、計算結果を上回った後に剛性勾配が低下して終局に至っている。なお、終局はT30-S20試験体でシート破断、T30-S30試験体で計算結果を超えた後にシー

ト剥離しており、計算結果の破壊性状と対応している。

図-2(d)より、T60-S10/S20試験体の計算結果は、ひび割れ発生荷重時までの勾配はほぼ同じであるものの、ひび割れ発生荷重および変位は大きく異なっている。また、第2勾配、第3勾配はシート幅の増加とともに増大し、両者の差が拡大する傾向にあることが分かる。なお、計算の終局はいずれもシート破断である。実験結果は、計算結果よりもひび割れ発生荷重および剛性勾配が若干小さいものの、1次降伏点はほぼ対応し、第2勾配を保持したままシート破断により終局に至っている。

以上のことから、実験結果は載荷初期から1次降伏点まで計算値とほぼ対応するものの、計算値の1次降伏後も勾配は低下せず荷重、変位が増大する傾向にある。しかしながら、断面分割法を用いることで緊張接着試験体の実験の破壊性状を予測することが可能であることが明らかとなった。

3.2 シートのひずみ分布性状

図-3には、各試験体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。

図中、T0試験体はT0-S30試験体の最大荷重時変位(60.7 mm)、T30/T60試験体はそれぞれT30-S20、T60-S10試験体の計算シート破断時変位(51.6 mm、28.8 mm)における分布を示している。

図-3(a)より、同一変位時の計算ひずみはシート幅の増加に伴い、小さくなる傾向にあるのに対して、実験結果は

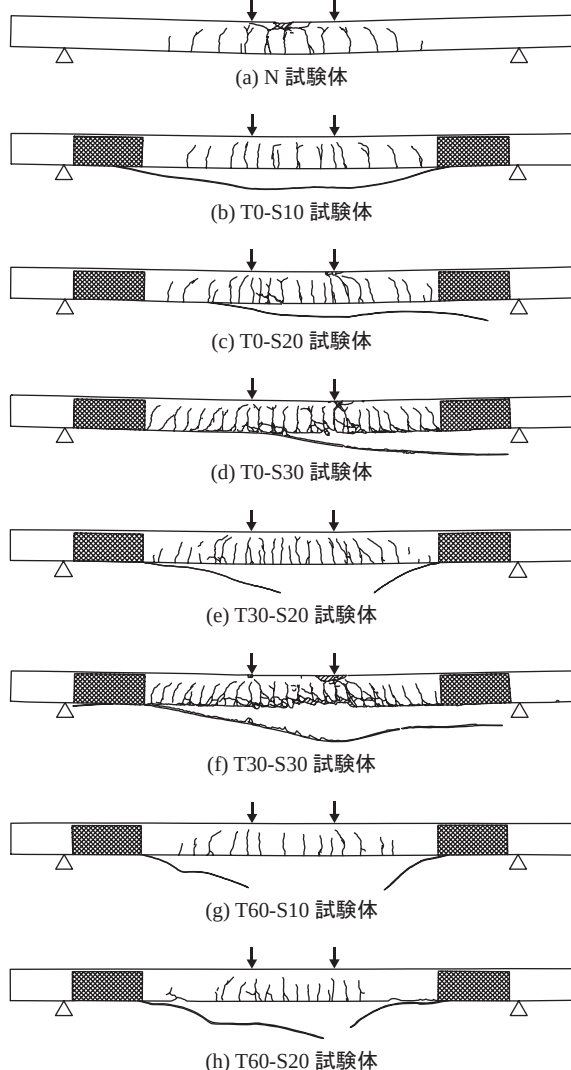


図-4 実験終了後におけるひび割れ分布状況

ほぼ同等の値を示している。また、主鋼材降伏領域内で計算結果を上回るひずみが発生していることから、ピーリングによるシート剥離が進展していることが推察される。また、その傾向はシート幅が大きいほど顕著である。

図-3(b), (c)より、シート幅が異なり、シート緊張率が同程度の場合を比較すると、実験結果と計算結果は大略対応するものの、いずれも主鋼材降伏領域内で計算結果を上回る実測ひずみが発生し、部分的にシート剥離が進行していることが伺われる。また、実験結果も計算結果と同様に緊張率が大きいほど発生ひずみが小さくなる傾向にある。なお、T30/T60試験体ともにシート幅に関わらず発生ひずみに大きな差異はなく、この傾向は特に実験結果で明瞭である。これは、上述したように実験ではシートの部分剥離が進行し、ひずみの均等化が生じたためと考えられる。

ここで、シート破断した試験体に着目すると、T30-S20試験体は緊張時に約 $5,000\mu$ 、荷重により約 $12,000\mu$ が発生し、T60-S10/S20試験体では初期導入ひずみが約 $10,000\mu$ 、荷重による発生ひずみが $7,000\mu$ 程度であることから、両者ともに破断ひずみにほぼ相当するひずみがシートに生じたことが分かる。

3.3 ひび割れ分布性状

図-4には、実験終了後における各試験体のひび割れ分

布性状を示している。図-4(a)より、N試験体では、等曲げ区間および荷重点近傍で曲げひび割れが発生しているものの、支点近傍では曲げひび割れが見られない。なお、上縁コンクリートの圧壊により終局に至っている。

図-4(b), (c), (d)より、T0-S10試験体では、N試験体と同様に支点近傍では曲げひび割れの発生が見られない。これに対して、T0-S30試験体では、曲げひび割れが梁全体に分散して多数発生していることが分かる。また、下縁かぶり部の状況からシート幅の大きい試験体ほどピーリング作用が顕在化していることが分かる。

図-4(e), (f)より、T30-S20/S30試験体では、曲げひび割れに着目するといずれも同様のひび割れ分布性状を示していることが分かる。しかしながら、下縁かぶり部の状況は両者で大きく異なることが分かる。これは、T30-S20試験体でシート破断、T30-S30試験体ではコンクリートの圧壊を伴うシート剥離で終局に至ったためである。なお、T30-S20試験体がシート破断したのは、実測導入緊張率がT30-S30試験体よりも大きく、シートが破断ひずみに到達したためと考えられる。

図-4(e), (g), (h)より、T30-S20, T60-S10/S20試験体ではいずれも荷重点近傍においてシート破断で終局に至っていることが確認できる。また、T60-S10/S20試験体では、他の試験体と比較して曲げひび割れの発生が極端に少ない。これは前述した通り、初期導入ひずみが大きく、小さな変位でシート破断に至ったためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、AFRPシート緊張接着時におけるPC梁の曲げ耐力性状やシートの剥離性状を検討することを目的として、AFRPシートを緊張接着したPC梁の静荷重実験を実施した。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) AFRPシートの接着端部に、引き剥がれ防止用の二方向AFRPシートを接着しておくことで、AFRPシートを緊張率60%程度までの範囲で緊張接着可能である。
- 2) 緊張接着することで、ひび割れ発生荷重を大幅に増加させることが可能である。また、緊張率やシート幅を増加させることでひび割れ発生荷重は増大する。
- 3) 同じ緊張率の場合、シート幅が大きいほどひび割れ発生荷重や最大荷重が増加する傾向にあるが、緊張率が大きくなると初期導入ひずみが大きくなるため、小さな変位でシート破断しやすくなる。
- 4) AFRPシートを緊張して接着したPC梁の耐力性状は、断面分割法で大略評価可能である。

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
- 2) 中島 規道, 三上 浩, 藤田 学, 田村 富雄: アラミド繊維シートを緊張接着したRC梁の曲げ耐力性状, 土木学会第59回年次学術講演会, pp.619-620, 2004.9