

論文 梁幅を変化させた AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁のシート剥離性状に及ぼす導入緊張率の影響

栗橋 祐介*1・岸 徳光*2・三上 浩*3・今野久志*4

要旨: 本研究では、著者らが提案した定着治具を用いないタイプの AFRP シート緊張接着工法による RC 梁の合理的な曲げ補強設計手法を確立することを目的に、梁幅やシートの導入緊張率が異なる AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の静載荷実験を行った。特に、本実験では、剥離破壊型の傾向が強く現れる場合について検討した。その結果、剥離破壊型の傾向が強く、かつ梁幅や導入緊張率が異なる場合においても、既提案の AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁を対象とした破壊形式予測式が適用可能であることなどが明らかになった。

キーワード: RC 梁, AFRP シート緊張接着, 曲げ補強, シート剥離, 破壊形式予測式

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補修・補強工法の一つとして、連続繊維 (FRP) シートを用いた補強工法が数多く採用されている。また、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、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、国内外で研究開発が進められている¹⁾。著者らも、これまで緊張接着用シートをアンカー等の機械式定着治具を用いずに定着可能な、アラミド繊維製 FRP (AFRP) シートを用いた緊張接着工法を開発し、その補強効果を確認してきた²⁾。

既往の研究より、1) AFRP シート緊張接着曲げ補強により RC 部材の曲げ耐荷性能を向上可能であること、2) ピーリング作用に伴うシート剥離の抑制効果があること、3) 緊張接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、上縁圧壊により終局に至る「曲げ圧壊型」と、圧壊に先行してシート剥離し終局に至る「剥離破壊型」に分類されること、4) AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式は、計算

主鉄筋降伏曲げモーメント M_y と計算終局曲げモーメント M_u を用いることにより、 $M_y/M_u \geq 0.65$ の場合には曲げ圧壊型、 $M_y/M_u < 0.65$ の場合には剥離破壊型と予測可能であること³⁾、などを明らかにしている。

しかしながら、これまでの研究では、破壊形式が曲げ圧壊型となる場合の実験データは十分に蓄積されているものの、剥離破壊型となる場合の実験データが少ないため、剥離破壊型の緊張接着曲げ補強 RC 梁に関する破壊形式予測式の適用性や緊張力導入によるシート剥離の抑制効果については十分に検討されていない。また、RC 梁の幅が異なる場合に関する補強効果の検討も十分には行われていないのが現状である。提案の緊張接着工法による既設 RC 部材の曲げ補強設計手法を確立するためには、剥離破壊型の傾向が強く現れる場合や RC 梁の幅が異なる場合についても検討する必要があるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、これまでの研究成果に基づき、剥離破壊型の傾向が強く現れる AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁を設計し、その曲げ耐荷性状

表-1 試験体一覧

試験体名	断面寸法 幅×高さ (mm)	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	M_y/M_u
S1-T13	250 × 140	13 % (33)	13.2 % (32.6)	2,310	264.4	90.1	2.93	0.55
S1-T27		27 % (66)	26.5 % (65.5)	4,638	273.1	96.7	2.82	0.62
S2-T13	250 × 220	13 % (52)	12.8 % (49.5)	2,240	431.9	144.2	3.00	0.53
S2-T27		27 % (104)	25.7 % (99.6)	4,498	445.6	154.7	2.88	0.59
S3-T13	250 × 300	13 % (71)	14.4 % (76.3)	2,520	472.8	190.9	2.48	0.54
S3-T27		27 % (141)	26.4 % (139.5)	4,620	489.5	203.3	2.41	0.60

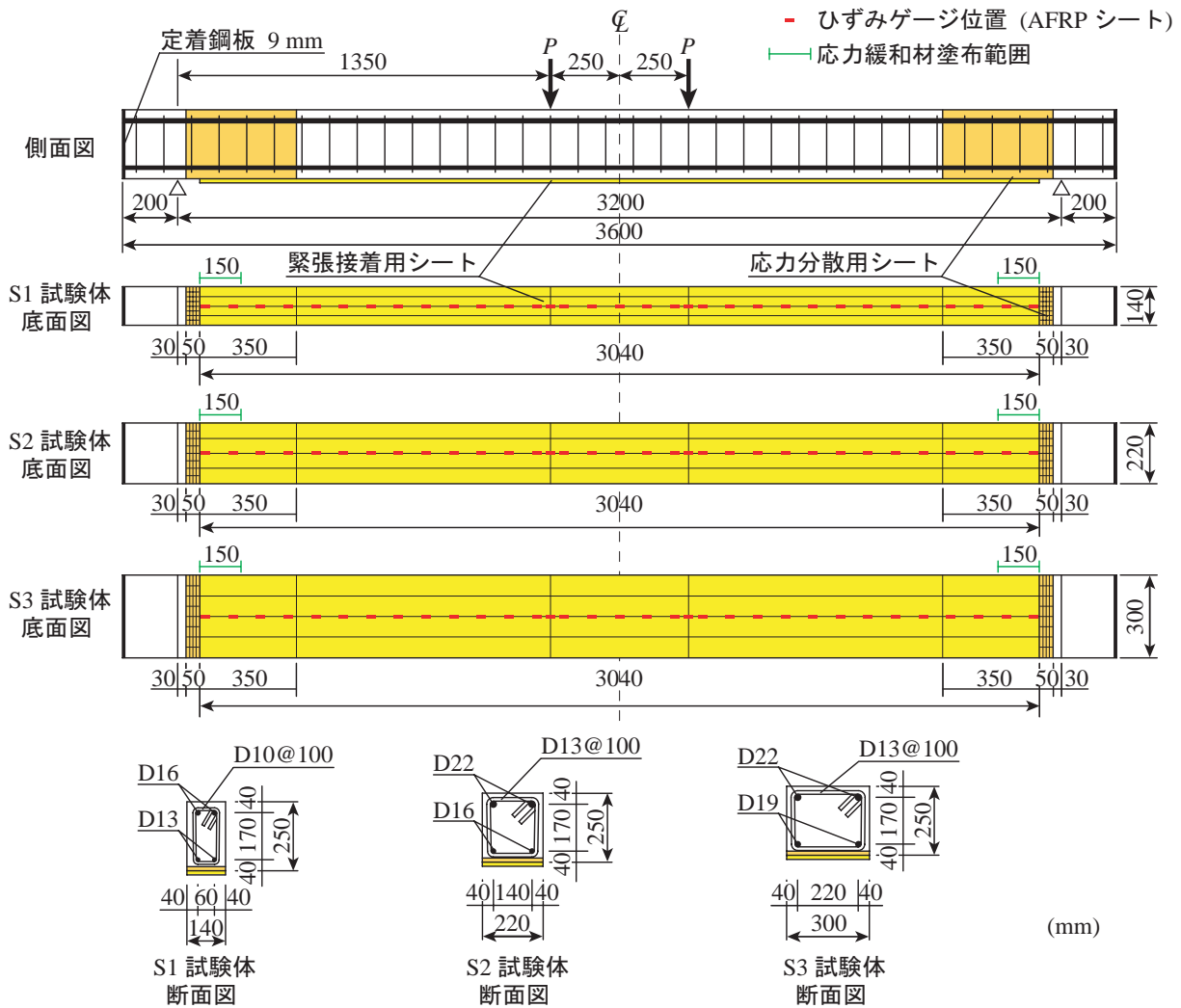
* () 内は導入緊張力 (kN)

*1 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 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 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 総括主任研究員 博(工) (正会員)



図－1 試験体の形状寸法、配筋状況および補強概要

やシートの剥離性状に及ぼす導入緊張率の影響について検討を行った。特に本実験では、剥離破壊型とするためにシート目付量を大きく設定し、RC梁の幅および導入緊張率を変化させて検討することとした。

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Sに付随する数字は試験体の断面の種類(S1: 250 × 140 (mm), S2: 250 × 220 (mm), S3: 250 × 300 (mm)), 第2項目Tに付随する数字は目標導入緊張率(引張耐力に対するシート導入緊張力の割合)を示している。また、荷重測定用ロードセルから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。表より、実測導入緊張率は各試験体共に目標値とよく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。計算せん断耐力は、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、デコンプレッションモーメントによるせん断

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	0.286/0.286			

*: 緊張接着用シート, **: 応力分散用シート

耐力向上効果を考慮して算出している。計算曲げ耐力は示方書に準拠してシートとコンクリートの完全付着を仮定し、断面分割法により算出した。いずれの試験体においても、せん断余裕度が1.0を十分大きく上回るように設計している。また、表中の M_y/M_u を見るといずれも0.65よりも小さい値を示している。従って、既往の緊張接着曲げ補強RC梁に関する破壊形式予測式に準拠すると、いずれも剥離破壊型と予測されることが分かる。

2.2 補強概要

図－1には、本実験で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、梁幅を3種

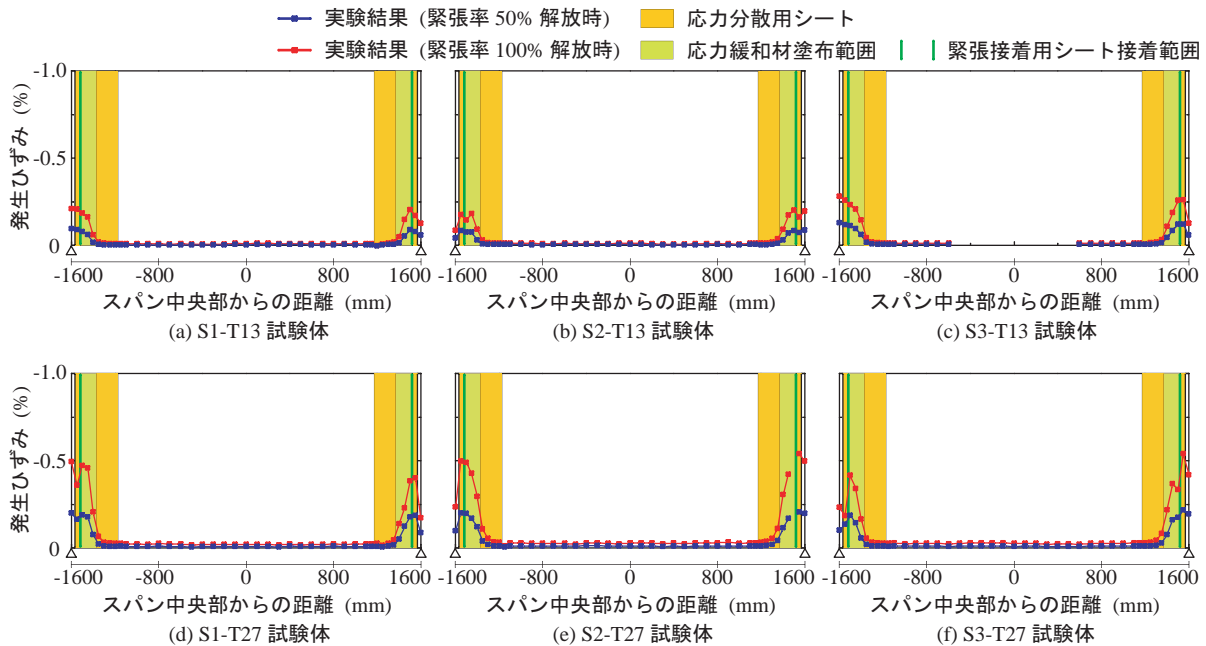


図-2 緊張力解放時における緊張接着用シートの実測軸方向ひずみ分布 (解放前を零レベルに設定)

類 (表-1 参照) に変化させた純スパン長 3.2 m の複鉄筋矩形 RC 梁である。

緊張接着用シートには、目付量 1,245 g/m² の AFRP シートを用い、梁中央部から両支点 80 mm 手前までの範囲に接着した。なお、緊張接着用シート端部に発生する応力集中を緩和させるために、応力分散用の 2 方向 AFRP シートを予め U 字型に接着し、その上に応力緩和材を用いて緊張力を導入したシートを接着することとした。なお、応力緩和材には弾性係数が汎用の含浸接着樹脂の 1/60 程度のエポキシ系接着樹脂を用いている。

AFRP シートの緊張接着は、プレテンション方式によるプレストレストコンクリート (PC) 梁の製作と同様に、梁とは独立したシート緊張用架台を設置し、油圧ジャッキによりシートに緊張力を導入した状態で RC 梁に接着している。接着樹脂の硬化に必要な一週間程度の養生期間が経過した後、油圧ジャッキを解放し、RC 梁にプレストレスを導入している。その他の詳細な緊張接着作業工程については文献 2) を参照されたい。

表-2 には、本実験で用いた AFRP シートの力学的特性値を示している。実験時のコンクリートの圧縮強度は 36 MPa、主鉄筋の降伏強度は S1/S2/S3 試験体でそれぞれ 397、389、356 MPa であった。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) および緊張接着用シート各点の軸方向ひずみである。また、実験時には、RC 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

図-2 には、油圧ジャッキ解放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、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を示している。

図より、いずれの試験体においても油圧ジャッキの解放率の増加に伴い、緊張接着用シート端部の圧縮ひずみが増大していることが分かる。また、梁幅の違いによらず、同一の緊張率においてほぼ同等の圧縮ひずみが発生している。このことより、梁幅の影響を受けずに所定の緊張力が試験体に導入されていることが分かる。また、圧縮ひずみの勾配は、応力緩和材塗布範囲において緩やかになる傾向にある。以上のことより、梁幅や導入緊張率によらず所定の緊張力が試験体に導入され、かつその圧縮応力分布は緊張接着用シート両端部における応力緩和材塗布範囲にて徐々に緩和され、シートの定着が確保されていることが分かる。

3.2 荷重-変位関係

図-3 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た。また、無補強の場合の計算結果も併せて示している。これらの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。

図より、各試験体の実験結果より、導入緊張率の増加に伴って RC 梁の曲げ耐荷性能が向上していることが分かる。また、実験結果を計算結果と比較すると、実験結果は計算終局時近傍まで計算結果と良く対応しているものの、最終的には計算耐力を下回る荷重レベルでシート剥離により終局に至っていることが分かる。このことより、本実験に用いた AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の

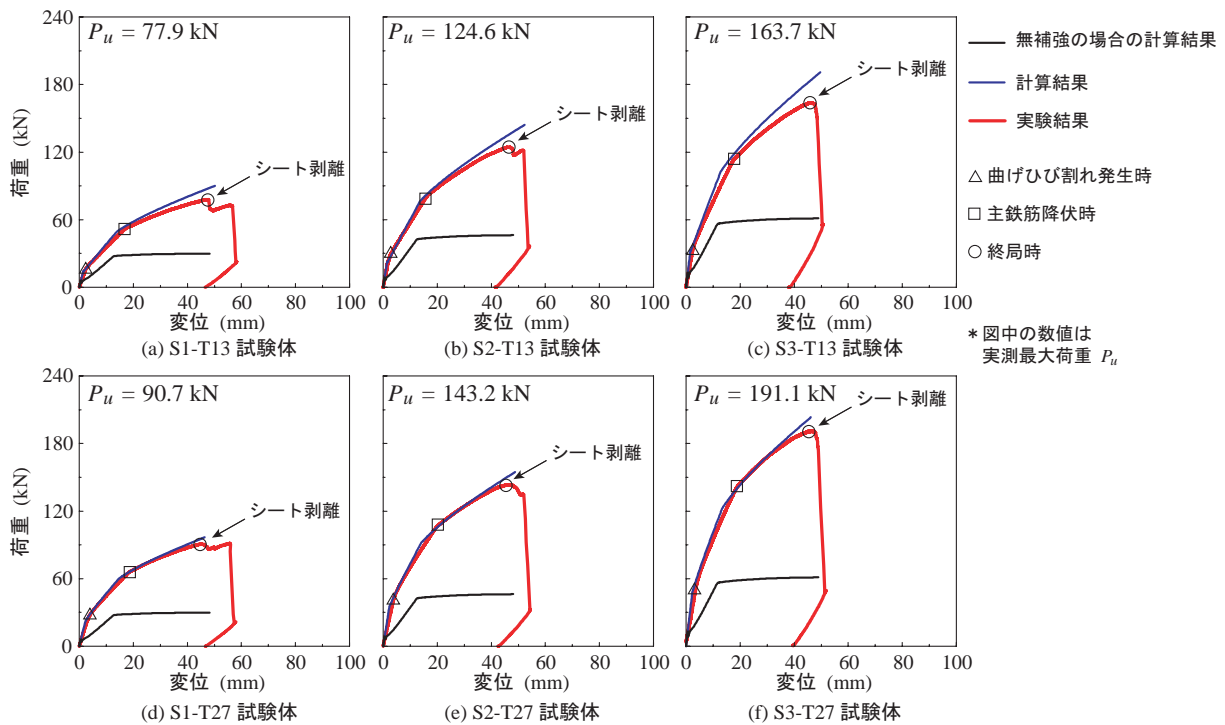


図-3 各試験体の荷重-変位関係

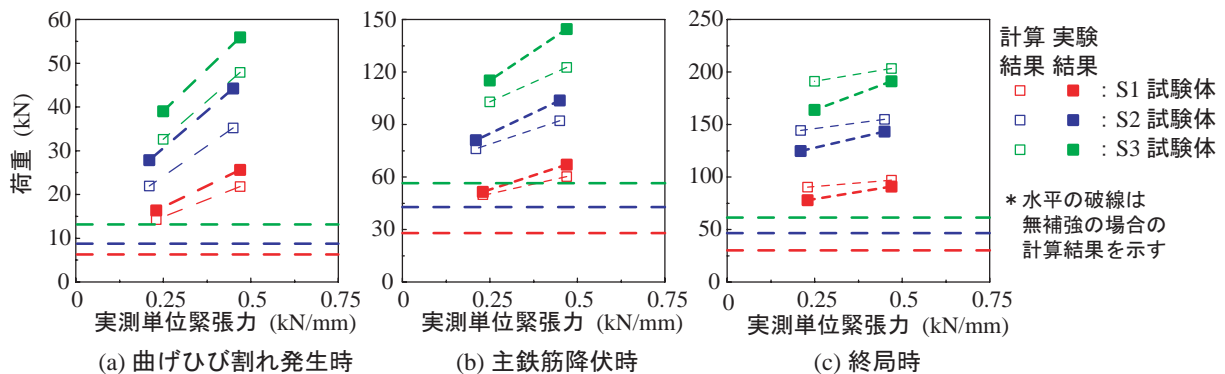


図-4 各時点の荷重とシート導入緊張力との比較

破壊形式は、いずれも剥離破壊型であるものと判断される。なお、梁幅によらず、実測耐力は導入緊張率が大きい場合ほど、計算耐力に近くなる傾向を示している。これは、後述するように、導入緊張率の増加により RC 梁に作用するデコンプレッションモーメントが大きくなるため、ピーリング作用によるシート剥離が抑制されることによるものと考えられる。

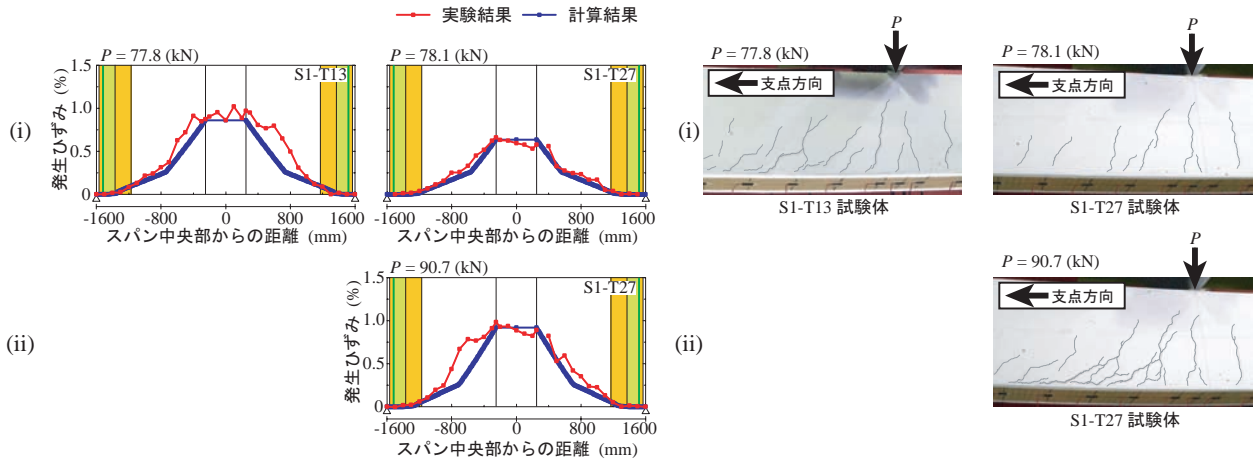
図-4には、図-3の実験結果および計算結果に基づき、曲げひび割れ発生時、主鉄筋降伏時および終局時の荷重と、単位幅当たりの実測導入緊張力 (kN/mm) (以後、実測単位緊張力) との関係を整理して示している。

図より、曲げひび割れ発生時および主鉄筋降伏時には、いずれの試験体においても実験結果が計算結果を上回る傾向にあり、実験結果は、曲げひび割れ発生時および主鉄筋降伏時でそれぞれ最大 10 kN, 30 kN 程度大きい。一方、

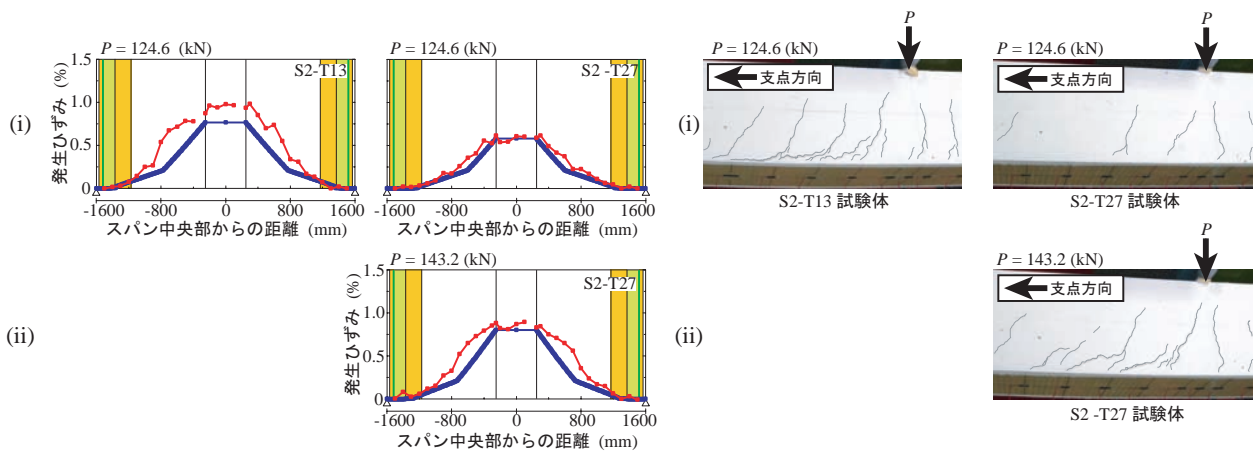
表-3 計算曲げモーメント比

試験体名	M_y (kNm)	M_u (kNm)	M_y / M_u
S1-T13	33.6	60.8	0.55
S1-T27	40.6	65.3	0.62
S2-T13	51.3	97.4	0.53
S2-T27	62.1	104	0.59
S3-T13	69.4	129	0.54
S3-T27	82.7	137	0.60

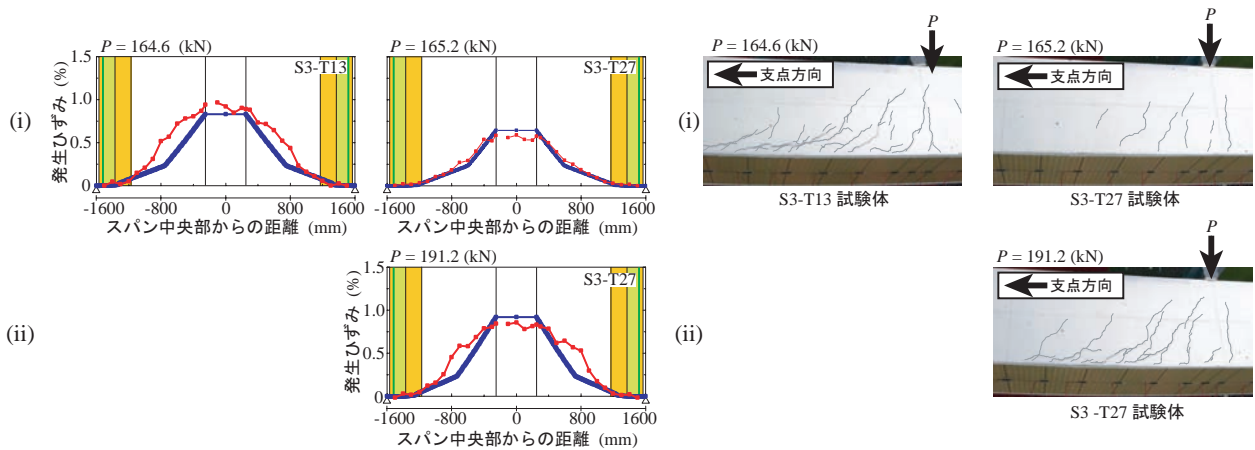
終局時にはいずれの試験体においても実験結果が計算結果を下回る傾向にあり、その差は最大で 20 kN 程度となっている。これは、前述したように、本実験に用いた緊張接着 RC 梁の破壊形式が剥離破壊型であるためである。



(a) S1 試験体 ((i) S1-T13 試験体の最大荷重時, (ii) S1-T27 試験体の最大荷重時)



(b) S2 試験体 ((i) S2-T13 試験体の最大荷重時, (ii) S2-T27 試験体の最大荷重時)



(c) S3 試験体 ((i) S3-T13 試験体の最大荷重時, (ii) S3-T27 試験体の最大荷重時)

図-5 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布性状とひび割れ性状

これらの結果より、緊張接着曲げ補強した RC 梁の曲げひび割れ発生荷重や主鉄筋降伏荷重は、その破壊形式が剥離破壊型である場合においても、断面分割法により安全側に評価可能であることが明らかになった。

3.3 計算曲げモーメント比と破壊形式との関係

表-3には、各試験体の計算降伏曲げモーメント M_y 、計算終局曲げモーメント M_u およびこれらの比である計

算曲げモーメント比 M_y/M_u を一覧にして示している。これらの計算値は、いずれも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の結果に基づいて算出したものである。また、計算曲げモーメント比 M_y/M_u は、破壊形式予測の指標となる値である。著者らは既往の研究³⁾において、比較的計算曲げモーメント比 M_y/M_u の値が大きい ($M_y/M_u = 0.6 \sim 0.75$) AFRP シート緊張接着曲げ補

強 RC 梁の実験結果に基づいて破壊形式予測式を下式のように提案している。

$$\text{曲げ圧壊型} \quad M_y/M_u \geq 0.65 \quad (1)$$

$$\text{剝離破壊型} \quad M_y/M_u < 0.65 \quad (2)$$

表-3 に示しているように、本論文で用いた試験体はいずれも M_y/M_u が 0.65 よりも小さいことから、その破壊形式は剝離破壊型と予測される。一方、実験結果においても、これらの試験体の破壊形式は剝離破壊型である。以上より、上記の破壊形式予測式は M_y/M_u の値が小さい剝離破壊型の場合についても適用可能であることが明らかとなった。

3.4 緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布とひび割れ性状

図-5 には、緊張接着用シートの軸方向ひずみ分布とひび割れ性状に関する実験および計算結果の比較図を S1, S2 および S3 梁について示している。なお、図中の (i) は導入緊張率が小さい S1/S2/S3-T13 試験体の最大荷重点における各試験体の結果であり、(ii) は S1/S2/S3-T27 試験体の最大荷重点における結果を示している。

S1 梁の結果より、(i) の S1-T13 試験体の最大荷重点における軸方向ひずみ分布を見ると、S1-T13/T27 試験体ともに等曲げ区間においては実測ひずみと計算ひずみが良く対応していることが分かる。しかしながら、S1-T13 試験体の等せん断力区間においては、実測ひずみが計算ひずみを大きく上回っている。これは、下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れ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シートが部分的に剝離していることによるものである。これに対し、S1-T27 試験体の場合には、実測ひずみと計算ひずみが良く対応しており、シートの付着が確保されていることが分かる。ただし、(ii) の最大荷重点においては、S1-T13 試験体の場合と同様に実測ひずみが計算ひずみを上回っていることから、ピーリング作用によるシートの部分剝離が発生しているものと考えられる。

また、ひび割れ性状を見ると、(i) の S1-T13 試験体の最大荷重点においては、下縁かぶりコンクリート部に斜めひび割れが発生するとともに鉛直方向に開口しており、シートが部分的に剝離していることが分かる。これに対し、同一荷重点における S1-T27 試験体のひび割れ性状を見ると、斜めひび割れの発生は見受けられるものの、シートの部分剝離には至っていないことが分かる。これは、

S1-T27 試験体は導入緊張力が S1-T13 試験体の場合よりも大きいため、デコンプレッションモーメントの増大により RC 梁のせん断耐力が向上し、斜めひび割れの発生が抑制され、結果的にピーリング作用による部分剝離が抑制されたことによるものと考えられる。ただし、(ii) の最大荷重点においては、S1-T13 試験体の場合と同様にピーリング作用による部分剝離が生じている。

これらの性状は S2/S3 梁の場合においても同様に認められる。従って、梁幅によらず、緊張接着用シートの導入緊張率の増大により、ピーリング作用によるシートの部分剝離を抑制可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、著者らが提案した定着治具を用いないタイプの AFRP シート緊張接着工法による RC 梁の合理的な曲げ補強設計手法を確立することを目的に、梁幅やシートの導入緊張率が異なる AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の静荷実験を行った。

その結果、剝離破壊型の傾向が強く、かつ梁幅が異なる場合においても、シートの導入緊張率を大きくすることによりピーリング作用によるシートの部分剝離を抑制可能であることや、既提案の AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の破壊形式予測式を適用可能であることが明らかになった。

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) 土佐亮允, 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に及ぼすシート目付量および導入緊張率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.1309-1314, 2011.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2007.
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001.