

T 型 RC 梁に接着した AFRP シートの剥離性状

Debonding Behavior of AFRP Sheet on Flexural Strengthened T-Shaped RC Beam

三井建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 正 員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学 学生員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
室蘭工業大学 ○学生員 一瀬 将吾 (Syogo Ichinose)

1. はじめに

近年、既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強工法として軽量かつ高引張強度を有する連続繊維シート (以後、FRP シート) を用いた接着工法が数多く採用されるようになってきた。著者らは、これまで FRP シートを用いた RC 部材の合理的な曲げ補強設計手法の確立を目的として、FRPシート曲げ補強 RC 梁を用いた静載荷実験を多数実施し、シートの曲げ耐力向上効果やその剝離挙動に関する検討を行ってきた。その結果、FRP シートで曲げ補強した矩形 RC 梁の破壊は、断面分割法に基づいて算出した計算終局耐力や変位を下回る状態でシートが剝離し終局に至る場合 (以後、剝離破壊型) と、計算終局耐力を上回った後上縁コンクリートが圧壊し、計算終局耐力とほぼ同等の荷重レベルでシートが剝離する場合 (以後、曲げ圧壊型) に分類されることなどを明らかにしている。

本研究では、FRP シートで曲げ補強した矩形 RC 梁に関する既往の実験結果^{1),2)}を参考に、より実構造に近い RC 構造部材を曲げ補強した場合のシートの曲げ補強効果やシートの剝離性状を検討することを目的として、T 型 RC 梁を FRP シートで曲げ補強する場合に着目し実験的に検討を行なっている。

2. 実験概要

本実験に用いた試験体は、主鉄筋比を 4 種類、せん断スパン比を 2 種類、シート補強量を 2 種類に変化させた全 6 体の T 型 RC 梁である。表-1 には試験体の一覧を示している。試験体名の第一項目は主鉄筋比の小さい順に数字を付記することで試験体を区別している。第二項目はせん断スパン比の概略値、第三項目は FRP シートの補強層数を示している。なお、本実験に用いた FRP

表-1 試験体の一覧

試験体名	主鉄筋比 p_w (%)	せん断 スパン比 r	シート 補強層数	せん断 余裕度
T1-R5-2	0.80	5.0	2層	2.28
T2-R5-2	1.26			2.14
T3-R5-2	1.82			1.98
T4-R5-2	2.46			1.82
T2-R7-2	1.26	6.9	1層	2.14
T2-R5-1		5.0		2.62

表-2 鉄筋の降伏強度 (単位: MPa)

材質	SD295A		SD345		
呼び径	D10	D13	D16	D19	D22
降伏強度	381	396	386	389	380

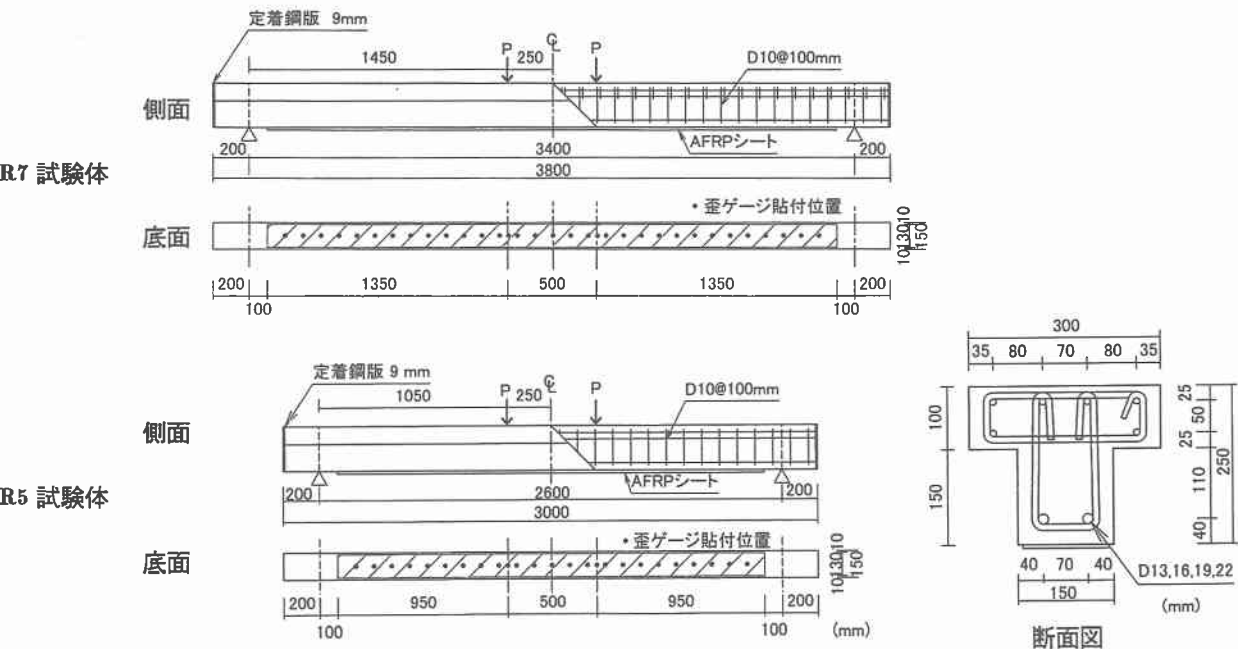
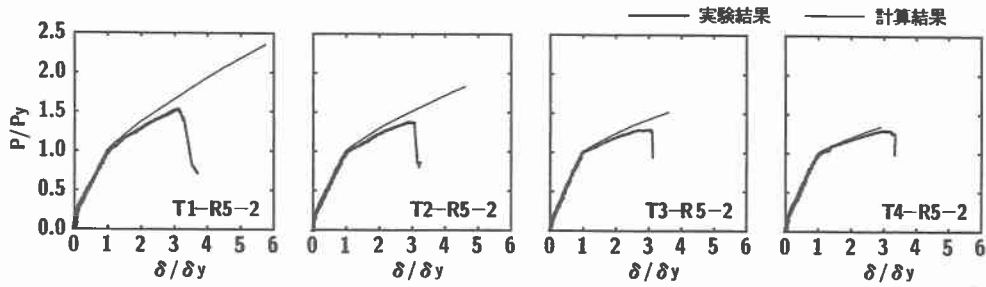
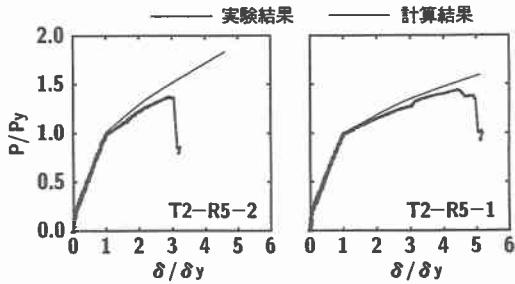


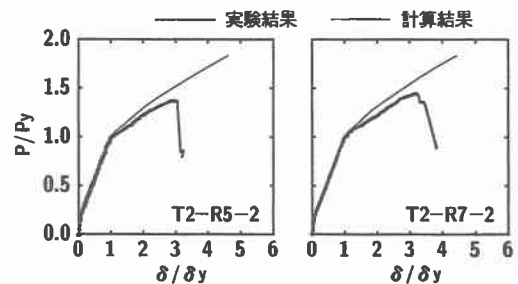
図-1 試験体の概要



(a) 主鉄筋比の影響



(b) シート補強量の影響



(c) セン断スパン比の影響

図-2 無次元荷重-変位曲線に関する実験および計算結果の比較

表-3 降伏荷重および降伏変位の一覧

試験体名	実験結果		計算結果	
	降伏荷重 P_{ye} (kN)	降伏変位 δ_{ye} (cm)	降伏荷重 P_{yc} (kN)	降伏変位 δ_{yc} (cm)
T1-R5-2	49.5	0.85	46.7	0.80
T2-R5-2	72.3	1.01	65.5	0.86
T3-R5-2	95.3	1.12	89.0	0.94
T4-R5-2	114.5	1.02	111.5	0.98
T2-R7-2	51.3	1.55	47.4	1.42
T2-R5-1	66.5	0.97	61.7	0.86

シートは目付量 415 g/m^2 、厚さ 0.286 mm のアラミド繊維製 FRP (以下, AFRP) シートであり, 各試験体に 1 層もしくは 2 層貼り付けている. 試験体の設計は曲げ補強後においても梁のせん断耐力が曲げ耐力よりも十分大きく, 終局時にせん断破壊を生じないように配慮して行った. 表には設計時のせん断余裕度 (せん断耐力 / 曲げ耐力) を併記している.

図-1 には試験体の概要を示している. 試験体はフランジ幅 30 cm , フランジ厚さ 10 cm , ウェブ幅 15 cm の T 型 RC 梁であり, 主鉄筋には D13, D16, D19 もしくは D22 (SD345) を用いている. セン断補強筋には D10 (SD295A) を用い 10 cm 間隔で配筋している. 実験は等曲げ区間を 50 cm とした静的二点載荷で行い, T 型 RC 梁のせん断スパン比 r が 5, 7 程度となるように純スパン長を設定している. 試験体の底面には幅 13 cm の AFRP シートを梁中央部から両側支点の 10 cm 手前までの範囲に貼り付けている. また, シート上にはゲージ長 10 mm の歪ゲージを 10 cm 間隔および載荷点直下に貼り付けている. シート接着部のコンクリート表面には両者の付着特性を向上させるため, ショットブラスト処理を施すこととした. 実験時のコンクリートは材

齢が 40 日, 平均圧縮強度 $f'_c = 23.9 \text{ MPa}$ であった. また, AFRP シートの力学的特性は引張試験結果より, 引張強度 $f_f = 2.48 \text{ GPa}$, 弾性係数 $E_f = 131 \text{ GPa}$, 破断歪 $\epsilon_f = 1.89 \%$ であった. 表-2 には引張試験により得られた各鉄筋の降伏強度を示している. 本実験における測定項目は載荷荷重, スパン中央部変位および AFRP シート各点の歪である.

3. 実験結果および考察

3.1 無次元荷重-変位関係

図-2 には, 各試験体に関する荷重-変位曲線の実験結果および計算結果を示している. ここでは, (a) 主鉄筋比, (b) シート補強量, (c) セン断スパン比が荷重-変位曲線の実験および計算結果に与える影響に着目し, T2-R5-2 試験体の結果を基準にして比較検討を行う. 図中, 縦軸には荷重, 横軸にはスパン中央部変位を取って整理しているが, 実験結果, 計算結果ともに各々の主鉄筋降伏荷重 P_{ye}, P_{yc} および降伏変位 δ_{ye}, δ_{yc} で無次元化し整理することとしている. これは, 各試験体の主鉄筋降伏後における AFRP シートの曲げ補強効果を同一の尺度で比較検討するためである. 表-3 には各試験体の降伏荷重, 降伏変位の実験および計算結果を一覧にして示している. なお, 計算結果は各材料の力学的特性を考慮して断面分割法により算出したものである. 計算はシートとコンクリートの完全付着を仮定し, 梁上縁コンクリートの歪が $3,500 \mu$ に達する状態を終局と仮定して実施している.

図-2 (a) には主鉄筋比を変化させた 4 試験体の結果を示している. 図より, 計算結果は主鉄筋比の小さい場合ほど無次元最大荷重および最大荷重時変位が大きく示されていることがわかる. 一方, 実験結果は主鉄筋比の

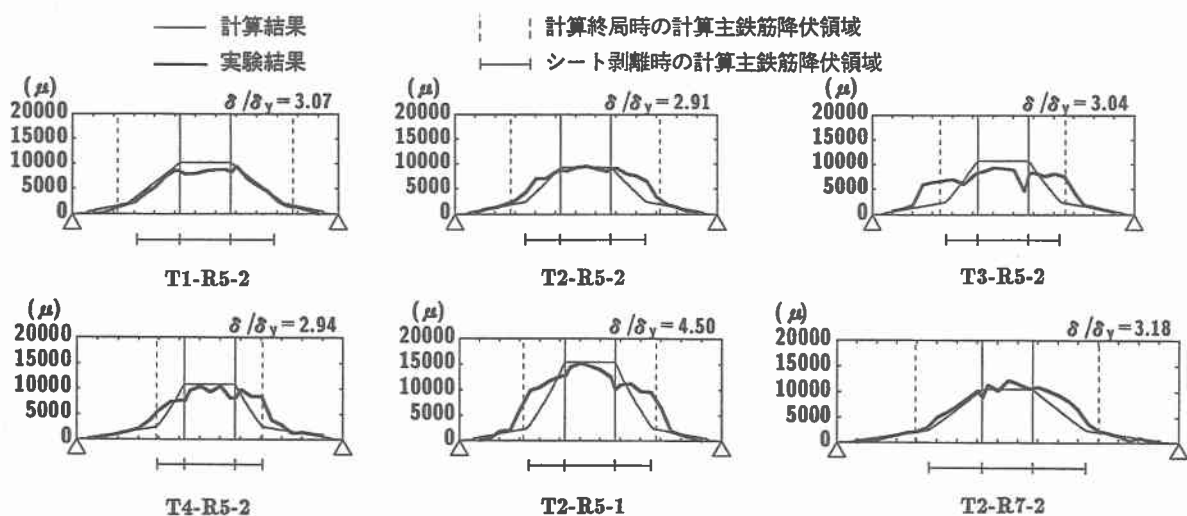


図-3 AFRP シートの剥離発生変位時における軸方向歪分布

小さい場合ほど無次元最大荷重が大きくなるものの、いずれの場合も無次元変位が $\delta/\delta_y \approx 3.0$ 前後でシートが剥離し終局となっている。ここで、主鉄筋比の最も大きい T4-R5-2 試験体の実験結果は計算終局変位を上回り計算終局耐力と同程度の耐力を示した後終局に至っている。これは、曲げ圧壊型で終局に至っていることを暗示している。一方、他の主鉄筋比の小さい T1 ~ T3 の試験体に関する実験結果はいずれの場合も主鉄筋降伏後に荷重-変位関係のなす勾配が低下し、計算終局点に到達する前に終局に至っていることがわかる。これより、これらの試験体は全て剥離破壊型に属するものと考えられる。

図-2 (b) にはシート補強量の異なる 2 試験体の結果を示している。図より、計算結果の無次元最大荷重はシート補強量に対応して大きく示されていることがわかる。また、実験結果の無次元最大荷重および無次元最大荷重時変位はシート補強量の多い場合が計算結果を大きく下回る傾向にある。従って、シート補強量の多い場合ほど剥離破壊型の傾向が強くなるものと考えられる。

図-2 (c) にはせん断スパン比の異なる 2 試験体 (T2-R5/R7-2) の結果を示している。図より、せん断スパン比の大きい T2-R7-2 試験体の方が T2-R5-2 試験体に比べて無次元実測最大荷重、最大荷重時変位ともに若干大きく示されているものの、せん断スパン比にかかわらず両試験体は剥離破壊型の性状を示し、実験および計算結果はほぼ同様であることがわかる。

以上より、シート補強量が同等の場合には主鉄筋比が小さいほど、主鉄筋比が同等の場合にはシート補強量が多いほど剥離破壊型の傾向が顕著になることが明らかとなった。また、せん断スパン比が無次元荷重-変位曲線に与える影響は小さいことが明らかとなった。これらのことは、主鉄筋の分担引張力に対する AFRP シートの分担引張力の割合が大きい場合ほど剥離破壊型となる傾向にあることを示している。同時に、AFRP シート補強後の主鉄筋降伏荷重に対する終局耐力の比率が大きいほど剥離破壊型の傾向が強くなることを意味している。なお、著者らによる過去の研究成果^{1),2)}より、このよう

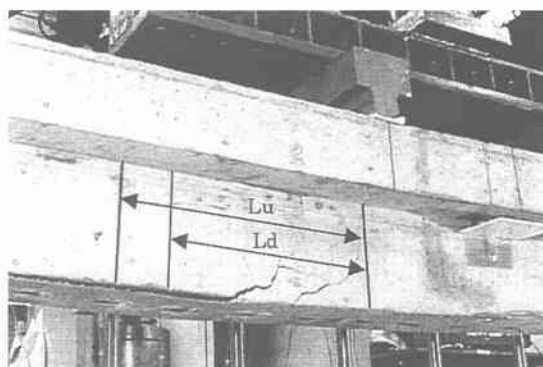


写真-1 ビーリング現象によるシートの引き剥がれ状況 (T3-R5-2 試験体)

な傾向は矩形 RC 梁の場合においても同様であることが明らかとなっている。

3.2 AFRP シートの歪分布性状

図-3 には、各試験体に関する AFRP シートの剥離発生変位時における軸方向歪分布を計算結果と比較して示している。なお、T4-R5-2 試験体は計算終局変位を上回った後シートの剥離を生じていることより、計算終局変位時の結果を示している。図中、左右の破線間の領域は計算終局時における計算主鉄筋降伏領域を示している。また、図の下部にはシート剥離時における計算主鉄筋降伏領域を示している。以後、本論文では等せん断力区間における計算終局時の計算主鉄筋降伏領域を L_u 、同区間におけるシート剥離時の計算主鉄筋降伏領域を L_d と呼ぶこととする。

図より、等曲げ区間の実験結果の歪分布は計算結果と比較的よく対応しているが、等せん断力区間の実験結果は計算結果よりも大きく示される傾向があることがわかる。また、このような傾向は、主鉄筋降伏領域 (L_d) の最外点で最も顕著である。これは、写真-1 に示しているように、等せん断力区間におけるシート剥離時の主鉄筋降伏領域 L_d 内の下縁かぶり部に発生した曲げおよび斜めひび割れにより形成されたコンクリートブロックがシートを押し下げて引き剥がすビーリング現象の作用に

起因するものと考えられる。

歪分布図を概観すると、せん断スパン比が同等の場合には、計算終局時における主鉄筋降伏領域 (L_u) は主鉄筋比が小さく剥離破壊型の傾向が強い場合ほど大きく示されていることがわかる。また、剥離破壊型の場合はいずれの梁も L_d が L_u に到達する前にシートが剥離し終局に至っていることが分かる。これに対して、曲げ圧壊型の T4-R5-2 試験体の場合には、 L_d が L_u に到達する時点においてもシートが剥離せず、計算終局変位を上回った後終局に至っている。前述したようにシートの剥離は L_d 内におけるピーリング作用に起因して生じていることより、 L_u が大きい場合ほど計算終局時に至る前にシートが剥離する傾向にあるものと考えられる。従って、AFRP シート曲げ補強 T 型 RC 梁の破壊形式は L_u に着目して検討することにより推定可能である。

4. 破壊形式推定法の検討

3章の検討結果より、ここでは等せん断力区間における L_u に着目して AFRP シート曲げ補強 T 型 RC 梁の破壊形式推定法に関する検討を行うこととする。本研究では、破壊形式を種々の RC 梁の特性を表す無次元量で推定評価するため、主鉄筋降伏領域 L_u を有効高さ d で除した L_u/d とせん断スパン比 r に着目し、これらの変数を 図-4 のように整理して検討する。なお、本検討では著者らが過去に行った矩形 RC 梁を FRP シートで曲げ補強した場合の結果^{1),2)}も含めて検討を行う。図中、剥離破壊型試験体の結果は黒塗り印、曲げ圧壊型試験体の結果は白抜き印で表している。

図より、 r が同一の場合 L_u/d が大きいほど剥離破壊型になる傾向にあることがわかる。また、両破壊形式は大きく2つの領域に分離して示されていることがわかる。図には両破壊形式を2分する原点通過の直線を示している。直線の傾きは、図中のデータに基づき上限と下限の場合について決定している。これらの直線より、破壊形式の推移する領域はせん断スパン比 r を a/d (a : せん断スパン長、 d : 梁断面の有効高さ) に置き換えて以下のように表すことができる。

$$L_u/d = (0.30 \sim 0.35) a/d \quad (1)$$

また、上式より、

$$L_u/a = 0.30 \sim 0.35 \quad (2)$$

従って、AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の破壊形式は断面形状にかかわらず $L_u/a < 0.30$ の場合には曲げ圧壊型、 $L_u/a > 0.35$ の場合には剥離破壊型と推定される。また、式 (2) の L_u/a は断面分割法による計算結果より得られる AFRP シート曲げ補強後の降伏曲げモーメント M_y および終局曲げモーメント M_u を用いて以下のように表すことができる。すなわち、

$$L_u/a = 1 - M_y/M_u \quad (3)$$

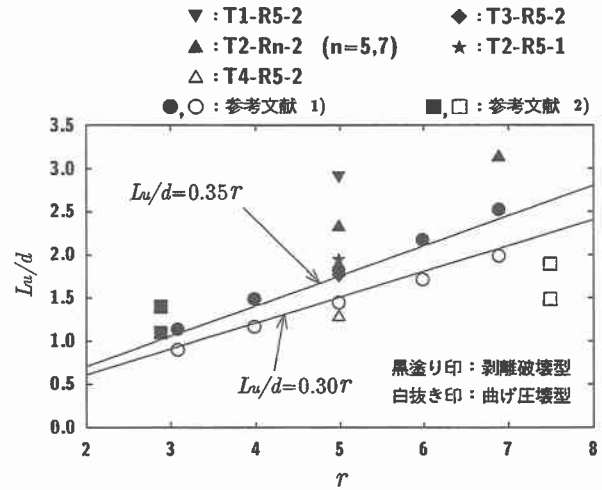


図-4 $L_u/d - r$ 関係

式 (2), (3) より、

$$M_y/M_u = 0.65 \sim 0.70 \quad (4)$$

これより、破壊形式は断面分割法によって得られる降伏および終局曲げモーメントによっても推定可能であり、 $M_y/M_u < 0.65$ の場合には剥離破壊型、 $M_y/M_u > 0.70$ の場合には曲げ圧壊型と推定される。

5. まとめ

本研究では、AFRPシートで曲げ補強した T 型 RC 梁におけるシートの曲げ補強効果や剥離性状を把握するために、主鉄筋比、せん断スパン比、シート補強量を変化させて静載荷実験を行った。本実験より得られた結論は以下の通りである。

- 1) シート補強後の主鉄筋降伏荷重に対する終局曲げ耐力の比率が大きいほど剥離破壊型の傾向が強い。
- 2) 剥離破壊型の梁はシート剥離時の主鉄筋降伏領域 L_d が計算終局時の主鉄筋降伏領域 L_u に到達する前に終局に至る。
- 3) FRP シート曲げ補強 T 型 RC 梁の破壊形式は計算終局時の主鉄筋降伏領域 L_u とせん断スパン長 a により推定可能である。また、断面分割法により算出される降伏曲げモーメント M_y および終局曲げモーメント M_u によっても推定可能である。

参考文献

- 1) 栗橋 祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一: RC 梁に接着した FRP シートの曲げ付着特性に与えるシート補強量の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp. 481-486, 2000.
- 2) 三上 浩, 岸 徳光, 池田 憲二, 栗橋 祐介: FRP シート補強 RC 梁の梁高や補強量がシートの剥離性状に与える影響, 第55回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), V-580, 1999.