

論文 熱可塑性エポキシ樹脂を用いた AFRP ロッドで補強した梁のせん断耐力に関する研究

有川 直貴*1・松原 澄行*2・小林 宣博*3・篠崎 裕生*4

要旨: 連続繊維をエポキシ樹脂で固めた FRP ロッドは、通常、樹脂が硬化した後の再加工ができないが、硬化後でも熱を与えることで再度加工が可能となる熱可塑性エポキシ樹脂が近年開発された。本研究では、この樹脂を用いた AFRP ロッドをせん断補強材として用いた梁のせん断実験を実施し、補強材料としての適用性を確認した。実験の結果、梁のせん断耐力は従来樹脂と同様曲げ成形部のロッドの破断で決まること、樹脂の違いがせん断耐力へ与える影響は小さいことなどを確認した。

キーワード: AFRP ロッド, 熱可塑性エポキシ樹脂, せん断補強材

1. はじめに

現在、FRP ロッドの製作および曲げ加工は専用の設備を整えた工場で行われるのが一般的である。連続繊維に一定の張力を与えながら、樹脂の含浸と曲げ加工を同時に行う必要があるため、比較的大規模な装置を用いることとなる。また、曲げ加工では、回転テーブル上に間隔をあけて立てた鋼管の外側に樹脂含浸した連続繊維を、テーブルを回転させることで巻き付けるなどの方法が用いられており、曲げ内半径や曲げ角度の変更が容易とは言えない。鉄筋の場合は専用の加工台があれば、現場での曲げ加工が可能であり、再加工も容易であるが、FRP ロッドではこのような背景から、現場での成形や曲げ加工が難しく、また、樹脂は一度硬化すると再加工が困難であった。

熱可塑性エポキシ樹脂は、このような FRP ロッド曲げ加工上の課題を解決するため、一定の温度を与えると溶融して再加工が可能となるように工夫した樹脂である^{1)~2)}。これにより、工場にて直線形状の FRP ロッドを製作すれば、現場にて自由に曲げ加工することが可能となり、現場の施工条件に合わせたロッドの組立てが容易となる。

本論文では、曲げ加工部の引張耐力が部材の耐力に大きく影響する梁のせん断補強を取り上げ、補強材に本樹脂により再溶融して曲げ加工した AFRP ロッドを用いた梁の載荷実験を実施して構造材料としての適用性を確認した。

2. 熱可塑性エポキシ樹脂の概要

FRP ロッドの成形で用いられるエポキシ樹脂は熱硬化性樹脂(以下、従来型樹脂とする)と呼ばれ、常温あるいは一定の熱を与えると硬化する性質を示す。通常、エポ

キシ樹脂は一度硬化すると熱を与えても軟化してゴム状を示すことはあっても溶融することはなく再加工ができない。これに対し、熱可塑性エポキシ樹脂は、ポリエチレンや ABS, ナイロンと同様な熱可塑性を付与したエポキシ樹脂であり、加熱することにより溶融し 2 次加工や再利用が可能になる樹脂である。

エポキシ樹脂の分子の結合方法は、分子同士が架橋して網目構造になるのに対し、熱可塑性エポキシ樹脂は架橋せず直鎖状であるのが大きな特徴である。表-1 に示すように、分子構造が直鎖状であるため、樹脂自体の引張強度や弾性係数は従来型樹脂の 90%程度に留まるが、硫酸塩やアルカリに対する耐薬品性は同等である。また、再加工後のこれらの性能の低下もほとんどない^{1)~3)}。

本樹脂を用いた AFRP ロッドの実際の再加工は、電熱

表-1 従来型エポキシ樹脂との材料特性値の比較³⁾

項目	熱可塑性 エポキシ樹脂	従来型 エポキシ樹脂
曲げ強度 (N/mm ²)	106	110
曲げ弾性係数 (N/mm ²)	2600	2900
引張強度 (N/mm ²)	62	72
引張弾性係数 (N/mm ²)	2510	2860
ガラス転移点 Tg (°C)	95	90

*1 三井住友建設(株) 技術開発センター (正会員)

*2 ファイベックス(株) 名古屋工場 工場長

*3 (株)竹入製作所 アラミド複合材料事業部

*4 三井住友建設(株) 技術開発センター 主任研究員 工博 (正会員)

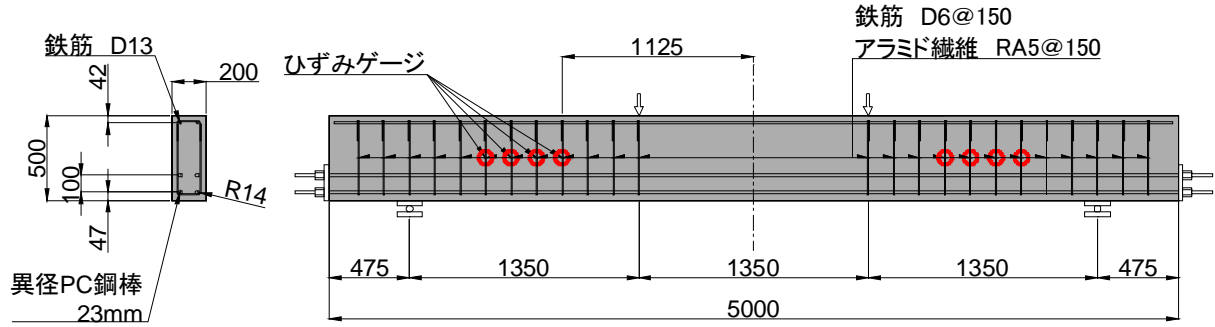


図-1 試験体形状

線による箱形のヒーターおよび円筒部材による加工台を用いた。あらかじめ工場にて熱可塑性エポキシ樹脂で直線状に固めたAFRPロッドを、十分な時間養生した後、箱形のヒーター内に曲げ加工したいロッドの部位を挿入して一定温度に暖め円筒部材に押し当てて加工した。暖める部位は、実際に曲げ加工する区間よりも長い区間とすることで、局所的な応力のばらつきを緩和した。ロッドを暖める温度や温める区間は、施工の条件等により左右される。

3. 実験概要

図-1 に試験体寸法を表-2 に試験体の一覧を表-3 に使用材料諸元を示す。

試験体は断面の寸法が高さ 500mm、幅 200mm、長さ 5000mm の RC 梁である。引張鉄筋に $\phi 23\text{mm}$ の異径 PC 鋼棒を 4 本、圧縮鉄筋に D13 (SD345) を 2 本配置した。PC 鋼棒は端面でナット固定した。試験体は合計 4 体である。せん断補強材に AFRP ロッドを用いた試験体は従来型樹脂を用いた AF1 と熱可塑性エポキシ樹脂を用いた AF2 の 2 体である。AF2 のロッドは、2. に示した方法にしたがって直線材を再溶融して曲げ加工を行った。S0, S1 はそれぞれせん断補強材のない試験体、せん断補強材に鉄筋(D6)を用いた試験体である。せん断補強材の配置間隔は有効高さの 1/3 となる 150mm 間隔とし S1, AF1, AF2 で計算せん断耐力が同等となるようにせん断補強材の径や規格を選定した。なお、計算せん断耐力は、S1 はコンクリート標準示方書⁴⁾を、AF1, AF2 は、連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)⁵⁾を用いて計算した。せん断補強材の加工方法については、AFRP ロッドの加工の容易さ等を考慮し写真-1 に示すような曲げ加工部と継手部を組み合わせたものとした。そして、比較のため、鉄筋と AFRP ロッドで加工形状を合わせた。なお、せん断補強材の定着長はコンクリート標準示方書⁴⁾にしたがって 12ϕ 以上の 100mm とし、曲げ内半径は 2.5ϕ とした。

載荷方法は載荷スパン 1350mm、せん断スパン 1350mm

表-2 試験体一覧

No.	せん断補強材				a/d	せん断補強材配置間隔 (mm)
	名称	公称断面面積 (mm ²)	樹脂	引張耐力 (kN)		
S0	—	—	—	—	3	—
S1	鉄筋 (D6)	31.7	—	17.7		150(d/3)
AF1	AFRP	25.5	従来型	40.2		
AF2	AFRP	25.5	熱可塑性エポキシ	37.0		

表-3 材料諸元

(a) AFRP

種類	樹脂	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	破断伸度 (%)
AFRP1	従来型	1210	48.5	2.46
AFRP2	熱可塑性エポキシ	1257	53.2	2.38

(b) コンクリート

圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
43.0	2.79	28.1	0.20

(c) 鋼材

種類	規格	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D6	SD345	392	560	191
D13	SD345	385	546	193
異径 PC 鋼棒 $\phi 23\text{mm}$	B 種 1 号	1088	1147	203

の2点曲げ載荷とした。せん断スパン比(a/d)は3.0とした。測定項目は、載荷荷重、支間中央変位、せん断補強材ひずみである。せん断補強材ひずみはせん断スパン中央付近のせん断補強材4本の試験体中央高さでせん断スパン両側において測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 荷重－変位関係および破壊状況

図-2 に荷重－はり中央変位曲線、図-3 に破壊後のひび割れ図と S1・AF1・AF2 の破壊側を拡大したひび割れ図を示す。破壊側を拡大したひび割れ図の赤線はせん断補強材の配置位置を、青四角はせん断補強材のひずみ計測位置を、緑丸は斜めひび割れとせん断補強材が交わる点である。

せん断補強材のない S0 は 50kN で曲げひび割れが発生し、剛性が低下した。200kN で左側のせん断スパン中央付近の曲げひび割れが載荷点へと大きく増加し荷重の増加が見られなくなり、203kN で右側のせん断スパンで斜めひび割れが発生し荷重が低下した。せん断補強材に鉄筋を用いた S1 は 45kN で曲げひび割れが発生し、剛性が低下した。250kN で左側のせん断スパンに斜めひび割れが発生し、荷重の増加とともにひび割れが進展した。488kN で左側の斜めひび割れが載荷点に向かって進展し急激に荷重が低下した。左側載荷点付近において上縁の

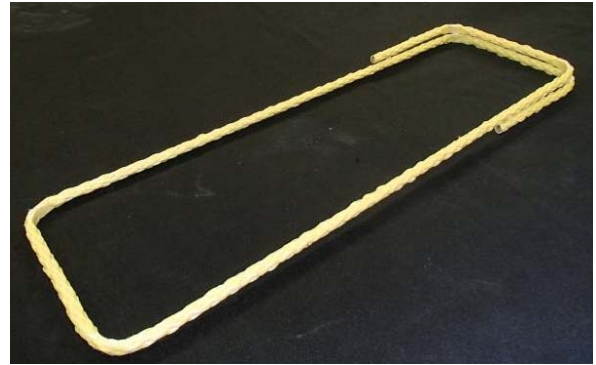


写真-1 AFRP せん断補強材

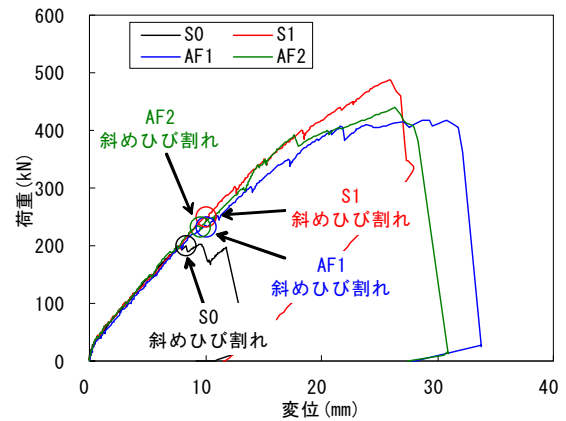


図-2 荷重－はり中央変位関係

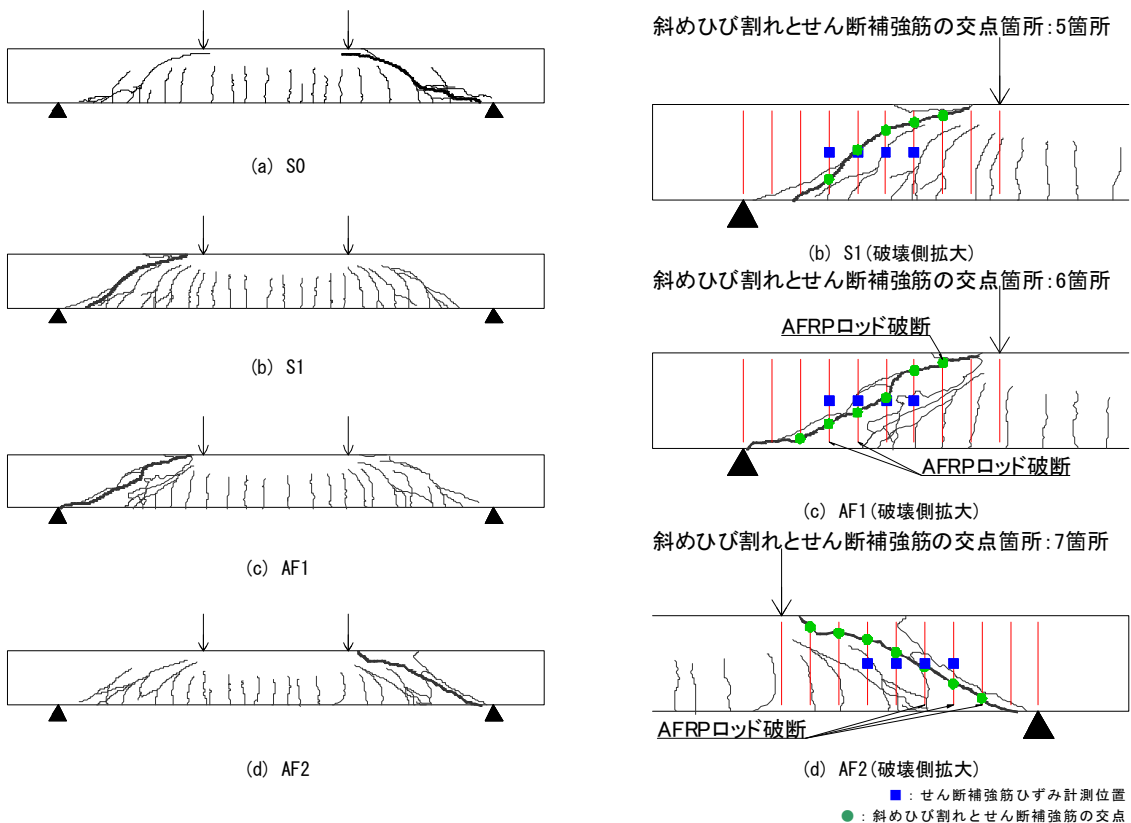


図-3 ひび割れ図

コンクリートが圧縮破壊していた。

せん断補強材に従来型樹脂 AFRP ロッドを用いた AF1 は 34.1kN で曲げひび割れが発生し、剛性が低下した。233kN で左側のせん断スパンに斜めひび割れが発生し、約 400kN 付近で剛性が大きく低下した。418kN で斜めひび割れが荷点に向かって進展し急激に荷重が低下した。図-3(c)に示す位置において AFRP ロッドの曲げ加工部が破断していた (写真-2)。せん断補強材に熱可塑性エポキシ樹脂 AFRP ロッドを用いた AF2 は 43kN で曲げひび割れが発生し、232kN で右側のせん断スパンに斜めひび割れが発生した。390kN で右側の荷点付近の上縁のコンクリートが剥離し荷重が若干低下し剛性が低下した。439kN で右側の斜めひび割れが荷点に向かって進展し荷重が低下した。図-3(d)に示す位置において AFRP ロッドの曲げ加工部が破断していた (写真-3)。

せん断耐力計算値、実験値および実験による破壊性状を表-4 に示す。斜めひび割れの発生荷重に大きな差はみられなかった。S1 と AF1, 2 を比較すると斜めひび割れが発生するまでは同様な挙動を示している。斜めひび割れ発生後 AF1 は剛性が低下し AF1, 2 ともに 400kN 付近で荷重が低下した。斜めひび割れ発生後から AF1, 2 の剛性が低下したことは、AFRP ロッドは鉄筋と比較するとヤング係数が小さいためと考えられる。AF1 と AF2 を比較すると最大荷重は AF1 が 418kN に対して AF2 が 439kN であり AF2 が若干大きく、最大荷重時の変位は AF1 が 28.9mm に対して AF2 は 25.0mm と小さい。この要因として、図-3(c), (d)からせん断補強材が斜めひび割れを跨いでいる本数が荷点付近で 1 本多いことが影響していると思われる。AF1 と AF2 の耐荷挙動や破壊性状を総合的に比較すると、樹脂の違いがせん断補強の効果に与える影響は小さいと考えられる。

4.2 せん断耐力に関する考察

S0 は補強材のない試験体であり、せん断耐力はコンクリートのみが負担する。実験値と計算値はほぼ一致している。各試験体の最大荷重から S0 の最大荷重を引いた値をせん断補強材の負担荷重とした。S1 は補強材負担荷

表-4 計算値および実験結果

名称	斜めひび割れ荷重 (kN)	実験値		計算値		破壊状況
		最大荷重 (kN)	補強材負担 (kN)	せん断耐力 (kN)	補強材負担 (kN)	
S0	200	203	—	184	—	せん断
S1	250	488	285	307	122	せん断
AF1	233	417	214	313	128	せん断
AF2	232	439	236	318	134	せん断



写真-2 AFRP 破断状況(AF1)

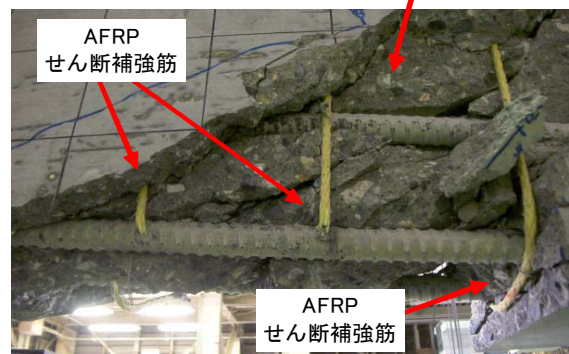


写真-3 AFRP 破断状況(AF2)

重が計算値に対して 2.3 倍大きな値となっている。AF1, 2 の補強材負担荷重は計算値に対して AF1 は 1.7 倍, AF2 は 1.8 倍大きな値となっている。このような差が生じた理由についてせん断耐力の算定式をもとに考察する。

せん断耐力計算値は連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針 (案) ⁵⁾ に基づく式(1)から算出した。

$$V_{ud} = V_{cd} + V_{sd} \quad (1)$$

せん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力 V_{cd} を式(2)に示す。

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (2)$$

ここに, $\beta_p = \sqrt[3]{100 p_w E_{fu} / E_0}$ ただし $\beta_p > 1.5$ となる場

合は 1.5 とする, E_{fu} : 引張補強筋のヤング係数, E_0 : 基準ヤング係数(=200kN/mm²)

せん断補強筋により受け持たれる設計せん断耐力 V_{sd} を式(3)に示す。

$$V_{sd} = A_w \cdot E_w \cdot \varepsilon_{fvd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) \cdot z / s_s \quad (3)$$

ここに, E_w : せん断補強筋のヤング係数, ε_{fvd} : 終局限界状態におけるせん断補強筋のひずみの設計用値で, 式(4)により求める。ただし, $E_w \varepsilon_{fvd}$ が曲げ成形部強度の設計用値 f_{fbd} より小さい場合は, $E_w \varepsilon_{fvd}$ を f_{fbd} に置換する。

$$\varepsilon_{fvd} = \sqrt{f'_{mcd} \frac{p_w E_{fu}}{p_{wed} E_w} \left[1 + 2 \left(\frac{\sigma'_n}{f'_{mcd}} \right) \right]} \times 10^{-4} \quad (4)$$

連続繊維補強材の曲げ成形部設計強度 f_{fbd} は, 式(5)により求める。

$$f_{fbd} = (0.05r / h + 0.3) f_{fuk} \quad (5)$$

ただし, 式(5)の右辺の値が f_{fuk} より大きくなる場合は, $f_{fbd} = f_{fuk}$ とする。 f_{fuk} : せん断補強筋の引張強度, r : 曲げ内半径, h : 連続繊維補強材の断面高さ, α_s : せん断補強筋が部材軸となす角度, ss : せん断補強筋の配置間隔, $p_{web}: A_w / (b_w \cdot ss)$, σ'_n : 平均軸圧縮応力, $\sigma'_n = (N'_d + p_{ed}) / A_g$, ただし, $\sigma'_n > 0.4f'_{mcd}$ となる場合には $\sigma'_n = 0.4f'_{mcd}$ とする。 p_{ed} : 軸方向緊張材の有効引張力, A_g : 全断面の面積, f'_{mcd} : 寸法効果を考慮したコンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²), $f'_{mcd} = (h/0.3)^{-1/10} \cdot f'_{cd}$, h : 部材の高さ(m)

式(3)では, 圧縮力の作用位置から引張鉄筋の図心位置までの距離を, せん断補強材の配置間隔で除して, せん断力を負担する補強材の本数を算出している。本実験の場合, 式(3)で仮定しているせん断力を負担する補強材本数は片側で約 2.5 本である。一方, 実験では, AF1・AF2 において, せん断補強材が載荷点や支点に近い斜めひび割れの端部付近でも破断していたことから, 斜めひび割れ全長にわたって相当の負担が生じていることが明らかとなった。これを考慮し, 図-3 から斜めひび割れがせん断補強材を跨いだ本数を調べると S1 で 5 本, AF1

で 6 本, AF2 で 7 本となる。これは計算値の 2.0~2.8 倍となっており, 表-4 におけるせん断補強材負担の計算値と実験値との差とほぼ一致している。

4.3 せん断補強材ひずみ

図-4 にせん断補強材のひずみ分布を示す。補強材ひずみは図-1 に示すように両側のせん断スパン中央付近の 4 本のせん断補強材のひずみである。載荷荷重 100kN ごとのひずみ分布を示した。斜めひび割れ発生前の 200kN まではせん断補強材ひずみはほとんど発生していない。せん断補強材ひずみは全ての試験体で支間中央側から 2, 3 本目の補強材ひずみが大きい。このことは, 2, 3 本目のひずみ測定位置が斜めひび割れの近傍であるか

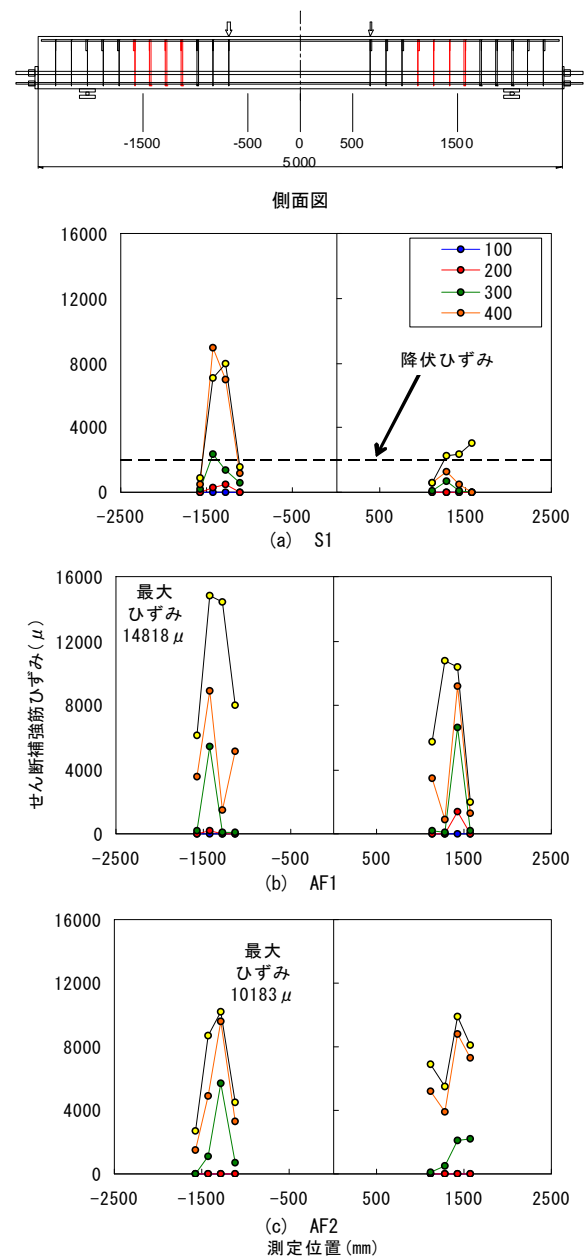


図-4 せん断補強材ひずみ分布

らと考えられる。同じ荷重でひずみ分布を比較すると、S1は左側のひずみが大きい。AF1, AF2は両側で同程度のひずみが発生している。図-5に荷重-せん断補強材負担荷重曲線を示す。せん断補強材負担荷重は左右の最も大きいせん断補強材ひずみから表-3のヤング係数と補強材の公称断面積を用いて算出した。鉄筋の降伏荷重は表-3の降伏強度から算出した。S1は200kN付近から左側の負担荷重が増加し300kN付近で降伏荷重に達した。その後350kN付近で右側の負担荷重が増加し、最大荷重時には降伏荷重に達した。AF1, AF2は同程度の荷重で左右の負担荷重が増加しその後、最大荷重まで同様な挙動を示した。ひずみの増加傾向が異なるのはヤング係数や表面付着などの違いが影響していると考えられる。

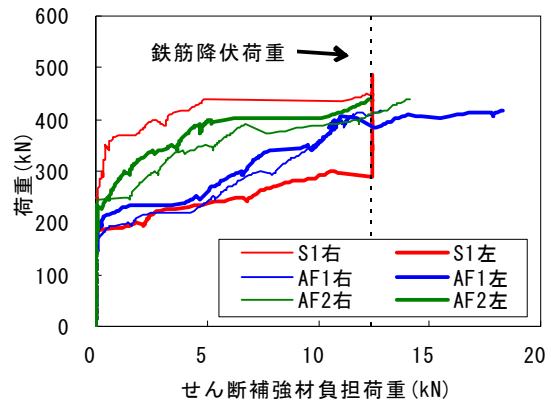


図-5 荷重-せん断補強材負担荷重関係

4.4 曲げ成形部強度の検討

AFRP ロッドをせん断補強材に用いた試験体は一般的に曲げ成形部が破断して破壊する。これは、曲げ成形部の耐力が直線部に対し小さいためである。そこで、曲げ成形部引張強度算定式(5)による計算値と実験から得られた曲げ成形部引張強度を比較した。表-5に曲げ成形部引張強度の計算値と実験値を示す。実験値(a)は図-4の最大荷重時の最大ひずみと表-2(a)の弾性係数から引張強度を算出した。実験値(b)は実験から得られたせん断補強材のせん断力負担荷重と斜めひび割れとせん断補強材が交差した本数から式(6)を用いて算出した。

$$f_{fbd} = V_{sd} / (n \cdot A_w) \quad (6)$$

ここに、 f_{fbd} : せん断補強材の曲げ成形部引張強度(N/mm²)、 V_{sd} : 実験から得られたせん断補強材のせん断耐力負担荷重(kN)、 n : 斜めひび割れとせん断補強材が交差した本数(本)、 A_w : せん断補強筋の断面積(mm²)
本実験ではせん断補強材の曲げ内半径はAFRP ロッド直径の2.5倍であり、曲げ成形部の引張強度は直線部引張強度の43%となる。AF1, AF2の実験値(a)、実験値(b)ともに計算値よりも大きいことから算定式(5)によって曲げ成形部引張強度は安全に評価できると考えられる。

5. まとめ

FRP ロッドの再加工が可能となる熱可塑性エポキシ樹脂が近年開発された。その樹脂を用いたAFRP ロッドでせん断補強した梁の載荷実験を行い以下の知見を得た。

- (1) AFRP ロッドを用いた試験体は、従来型樹脂、熱可塑性エポキシ樹脂ともにロッドの曲げ成形部の破断によって破壊した。両者のせん断耐力に明確な差異は見られなかったため、樹脂の違いが耐荷挙動に与える影響は小さいと考えられる。

表-5 曲げ成形部引張強度

	直線部 引張強度 (N/mm ²)	曲げ成形部引張強度		
		計算値 (N/mm ²)	実験値(a)	実験値(b)
			最大ひずみ × ヤング係数 (N/mm ²)	せん断補強材 負担荷重 ÷ 総断面積 (N/mm ²)
AF1	1209.6	511.4	718.7	701.2
AF2	1257.0	531.5	541.7	661.4

- (2) 補強材が負担するせん断力は、トラス理論による計算値の2倍程度となる。これは、実験において斜めひび割れを跨ぐ補強材の数が、計算で仮定している本数の2倍程度であることと対応する。
- (3) 樹脂の違いに関わらず、土木学会指針⁵⁾の曲げ成形部引張強度の仮定により、ロッドのせん断力負担を安全に評価できることが分かった。

参考文献

- 1) 西田裕文：新しいコンポジットの創製を目指して、日本接着学会誌，vol.47, No.9, pp.27-34, 2011
- 2) 平山紀夫，友光直樹，西田裕文，菅克司：熱溶融エポキシ樹脂を使用したFRPの開発，強化プラスチック，vol.50, No.12, pp.519-524, 2004
- 3) J. Park, J. Cho, J. Kim, T. Park, Y. Tsujimura, H. Suzuki: Characteristics and Application of an epoxy resin having thermoplastic behaviors, 18TH international conference on composite materials
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書，設計編，2012
- 5) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案），1996