

論文 ポリウレア樹脂を用いた CFRP プレート接着補強のプレハブ工法による付着性能の検討

櫻井 俊太*1・扇 孝洋*1・小林 朗*2・日野 伸一*3

要旨: 既設コンクリート構造物の補強工法の一つとして、CFRP プレート接着補強工法が用いられている。著者らによる既往の研究から、プレート接着にポリウレア樹脂を用いることによって付着性能が改善されることが確認されている。しかし、従来の接着工法では、現場での作業工程が多いという問題がある。そこで、施工の省力化を目的とし、プレハブ工法を開発した。この工法は、工場等の整った環境下でプレートにプライマーとポリウレアパテを塗布し養生を行い、現場へ搬入後エポキシパテを用いてプレートを接着する工法である。本研究では、プレハブ工法の有効性を実験および数値解析を行い、検討を行った。

キーワード: CFRP プレート, ポリウレア樹脂, プレハブ工法, 有効付着長

1. はじめに

高度経済成長期に大量に建設されたわが国の土木構造物の老朽化が深刻化している。例えば道路橋では、一般道路における建設後 50 年を経過した橋梁数は 10 年後に現在の 3 倍になるといわれている¹⁾。また、東日本大震災等による甚大な被害を受け、維持管理は重要な課題となっている。このような中、近年、高強度で耐久性に優れ、かつ軽量である炭素繊維強化プラスチック板材(以下、CFRP プレート)を用いた土木構造物の補強工法がさかんに開発されている。

CFRP プレート接着補強工法は、写真-1 に示す CFRP プレートをエポキシ樹脂接着剤により既設コンクリート構造物の補強部に貼り付けて補強を行うものである。しかし、従来から行われている補強法では、CFRP プレートがプレート自身の引張強度に達する前にコンクリートから早期に剥離破壊してしまうため、CFRP プレートの高い引張強度が十分に発揮されないことが課題であった。そこで、著者らの既往の研究では接着面へのポリウレア樹脂挿入によって付着性能が改善されることを実験により確認した²⁾。ここで、図-1 (a) に既往の研究により確認した従来のポリウレア工法でのプレート接着部詳細を示す。この施工法では現場で同図①~④の示す順序でコンクリートにプライマーを塗布し養生を行い、ポリウレアパテを塗布し養生を行い、その後エポキシパテを用いてプレート接着を行う。そのため、現場での作業工程が多く、また、接着剤の品質管理も難しい。そこで、図-1 (b), (c) に示すプレハブ工法を開発した。この工法は、同図の赤枠内の部分をそれぞれ工場等の整った環境下で作製し、現場へ搬入、現場では図-1 の (b), (c) に示す①のプライマー塗布後、②のエポキシパテを用いてプレートを接着するのみである。これにより、現場施工

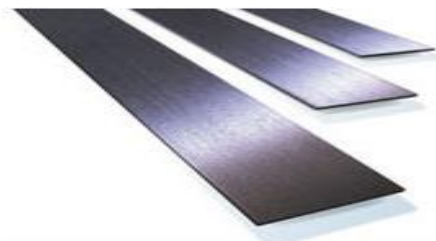
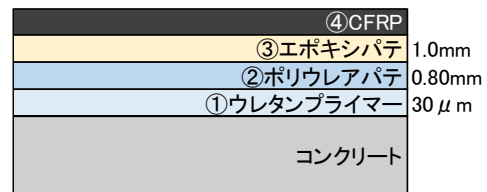
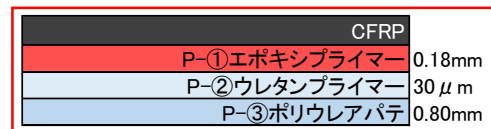


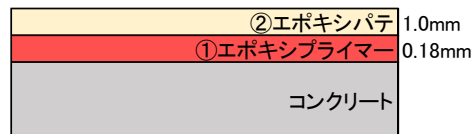
写真-1 CFRP プレート



(a) 従来工法



(b) プレハブ工法 (PP タイプ)



(c) プレハブ工法 (PN タイプ)

図-1 プレート接着部詳細

*1 九州大学大学院 工学府 都市環境システム工学専攻 (学生会員)

*2 新日鉄住金マテリアルズ (株) コンポジットカンパニー開発部長 工修 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 教授 工博 (フェロー会員)

の省力化と接着工の品質管理を大幅に改善することが可能となる。そこで本研究では、提案するプレハブ工法の場合の実用性や接着性能、ならびにポリアウレア樹脂や図-1 (b) に示す P-①、エポキシプライマーの有無をパラメータとして、土木学会が規定する試験法 JSCE-E-543³⁾ 「連続繊維シートとコンクリートの付着試験方法」に準拠する付着実験および数値解析による評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料の材料特性値

本研究に用いた CFRP プレートの材料特性値を表-1 に、表-2 に CFRP プレート接着に用いたエポキシ樹脂およびポリアウレア樹脂の材料特性値を示す。これらは表に示す試験方法により得られた実測値である。また、本研究で用いたコンクリートの圧縮強度は 49.8N/mm²、引張強度は 4.3N/mm²、ヤング係数は 34kN/mm² であった。

2.2 付着試験に用いる試験体概要

本実験で製作した試験体の一覧を表-3 に示す。本研究では、プレートとプライマーの付着性能を確認するため図-1 (b) の P-①に示すエポキシプライマーの有無をパラメータとして、それぞれ 2 体ずつ試験体を製作し、付着性能の検証を行った。エポキシ樹脂プライマーを用いた試験体を 1HTS-PP とし、エポキシ樹脂プライマーを用いない試験体を 1HTS-PN とする。また、試験体の概要および設置したひずみゲージ位置などを図-2 (a) に示す。コンクリート試験体の寸法は 150×150×1200mm、試験に用いた CFRP プレートは幅 51×長さ 1200mm とし、試験体コンクリートの両面に貼付した。また、プレートに発生する応力分布を確認するため、ひずみゲージは CFRP プレート上に 40mm 間隔で貼付した。図-2 (a) の上側は試験部、下側は固定部であり、固定部は、同部での剥離破壊を防ぐため CFRP プレート-コンクリートを、支圧鋼板を介して支圧用鋼板固定用鋼板でボルト圧

表-1 CFRP プレートの材料特性値

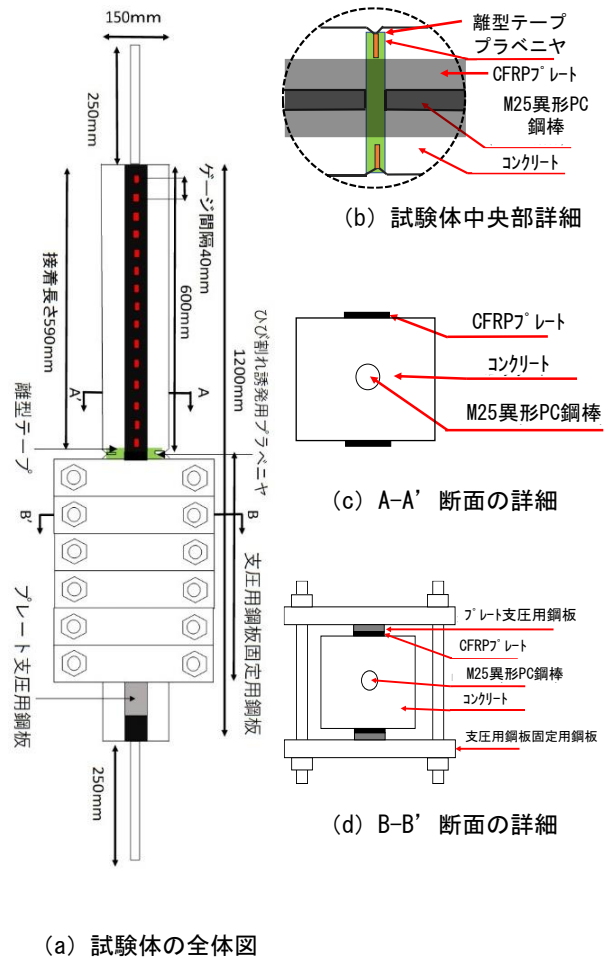
試験項目	単位	実測値	規格値	試験方法
幅	mm	50.6	50±2	実測
厚み	mm	1.1	1.0±0.1	実測
引張強度	N/mm ²	3,229	2400以上	JIS A 1191
引張弾性係数	kN/mm ²	170	167±17	JIS A 1191

表-2 接着樹脂の材料特性値

試験項目	単位	エポキシ樹脂 (パテ)	ポリアウレア樹脂 (パテ)	試験方法
圧縮弾性係数	N/mm ²	7,230	34	JIS K 7181
引張弾性係数		5,300	20	JIS K 7171
圧縮強度		96.0	6.8	JIS K 7181
引張強度		37.0	12	JIS K 7171
曲げ強度		63.0	-	JIS K 7161
引張せん断強度		16.6	5.6	JIS K 6850

表-3 試験体の一覧

試験体名	エポキシプライマー	試験体数
1HTS-PP-1,2	有	2
1HTS-PN-1,2	無	2



(a) 試験体の全体図

図-2 付着試験に用いる試験体

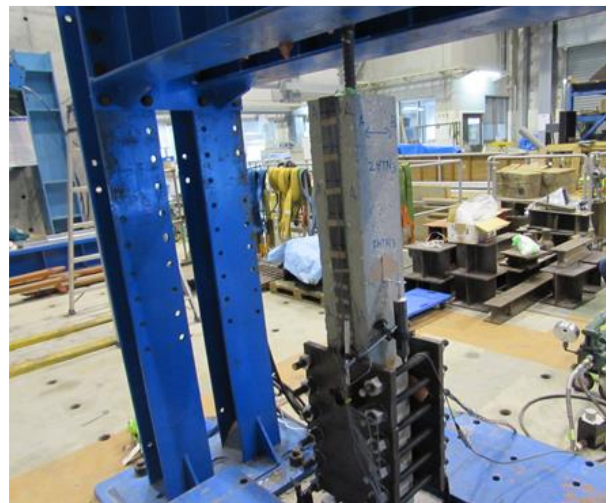


写真-2 実験状況

着した。試験体中央部では図-1 (b) に示すように試験体内部の鋼棒は中央で分断されており、試験体中央部には試験時にひび割れを誘発するため、ノッチおよび幅4mmのプラベニヤ板を埋設した。また、ひび割れ部で容易に剥離が発生するように離型テープ上からプレートを接着させた。接着方法は図-1 (b), (c) に示すプレハブ工法によるものとし、ポリウレア樹脂、エポキシ樹脂の塗布厚はそれぞれ試験時の厚みによる結果のばらつきを考慮し0.8mm, 1.0mmとした。実験は写真-2に示すように門型フレームに試験体を設置し、両端の鋼棒を上下方向に手動式油圧ジャッキによって両引き引張荷重方式で行った。なお、荷重速度は5kN/minとし、荷重の測定はロードセルを用い測定した。

3. 解析概要

本論文では、Pham B.H らの研究例⁴⁾と同様の試験体および試験方法を用いて荷重試験を行ったため、解析においても、同様のモデル化および手法を用いて実施した。なお、解析には2次元非線形有限要素解析プログラムDIANA Ver.10.1を用いた。本解析では、プレートの上に集中荷重を与え、イタレーション手法を制御方法とし、求解法はNewton-Raphson法を採用した。解析モデル概要図を図-3に示す。本解析ではプレート、接着剤、PC鋼棒およびコンクリートはすべて三角形要素を用い、解析効率をあげるため、試験体の対称性を考慮して実際の試験体の試験部の2分の1モデルとし、モデル下端のコンクリートはローラー支持、右端部においてはPC鋼棒の張力に対応してピン支持とした。解析に用いた材料特性値は表-1および表-2に示すとおりである。ここで、解析に用いた部位を図-3 (a), (b)に併記する。ポリウレア樹脂の応力ひずみ関係を図-4に示す。また、既往の研究⁵⁾に従いコンクリートの応力ひずみ関係を図-5に示す。コンクリートには全ひずみひび割れモデルを採用した。ポリウレア樹脂とエポキシ樹脂のヤング係数比は約0.004と非常に小さいため、ポリウレア樹脂のみ柔軟層として仮定し、CFRPプレートとエポキシ樹脂は弾

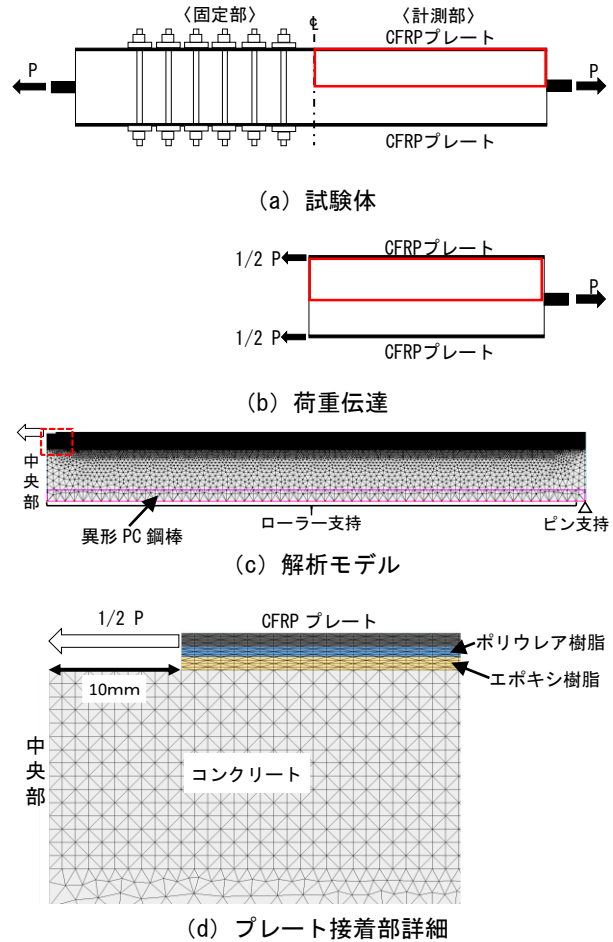


図-3 力のつり合いと解析モデル

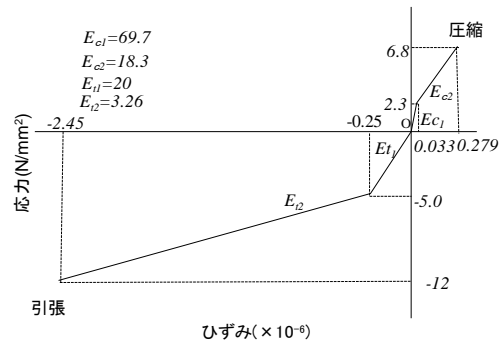


図-4 ポリウレア樹脂応力ひずみ関係

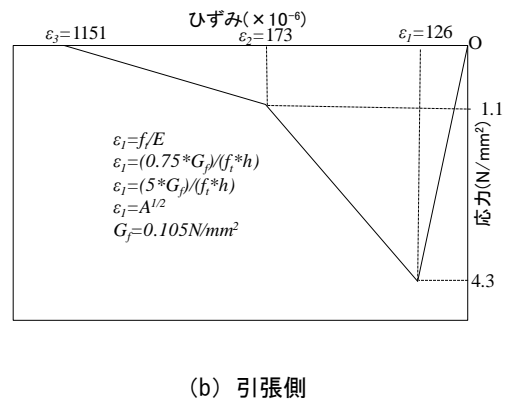
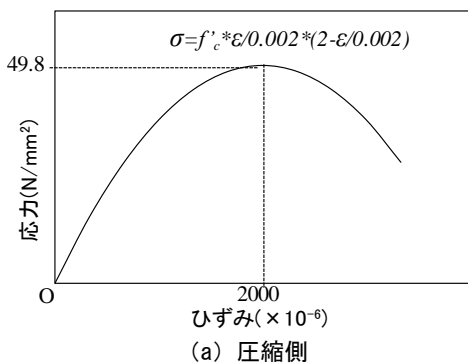


図-5 コンクリート応力ひずみ関係

性、ポリウレアは予め実施したとおりバイリニアに仮定した。実験では、使用材料の層間の剥離あるいは CFRP プレートの破断によって、試験が終局となるが、解析では、定量化された各層間の付着（剥離）性能が現状では不明のため、プレート、樹脂、PC 鋼棒、コンクリートの各層間は完全付着とし、数値解析での破壊モードや最大耐力についての検討は、今回は対象外とした。

4. 結果および考察

4.1 ひずみ分布

最大荷重時における各試験体の CFRP プレートのひずみ分布をそれぞれ図-6 に示す（ここで、各記号の頭数字：プレート厚さ、HT：高強度タイプ、N：ポリウレア無、S：ポリウレア有、PP：プレハブ工法エポキシプライマー有、PN：プレハブ工法エポキシプライマー無、末尾数字：試験体番号を表す）。また、破線で示したものは既往の研究²⁾により得られた従来工法によるポリウレア有試験体とポリウレア無試験体のひずみ分布図の一例である。横軸は試験体中央をゼロ点とした。

今回の試験体を比較すると、PP シリーズの試験体は PN シリーズの試験体と比較して、最大ひずみが増加していることがわかる。また、どちらの試験体も中心から 300mm 付近まではほぼ様なひずみ状態を呈し、それ以降は距離とともにひずみが漸減している。また、既往の研究で評価されたポリウレア有試験体 1HTS と比較すると、従来工法においてはポリウレア樹脂によって応力集中が緩和され、プレート全体に応力が伝達し、最大ひずみの増加も確認されていたが、本研究に用いたプレハブ工法の試験体においても同様に、ひずみがプレート全体に分布しているため、ポリウレア樹脂によって応力集中が緩和され、最大ひずみもポリウレア無試験体と比べ約 2.0~2.5 倍となり付着性能が改善されていることが確認できた。しかし、従来工法のポリウレア有試験体と比較するとエポキシプライマー有りの場合で 85%、同無しの場合で 70%の最大ひずみとなり、プレハブ工法が従来工法よりやや耐荷力の低下を示す結果となった。図-7 に実験値と解析値の比較として最大荷重時と剥離発生前の

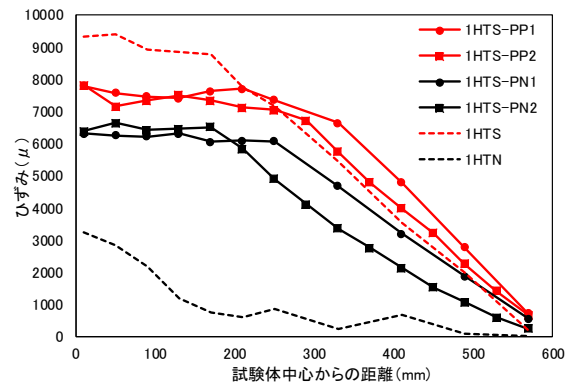


図-6 最大荷重時ひずみ-測定位置関係図

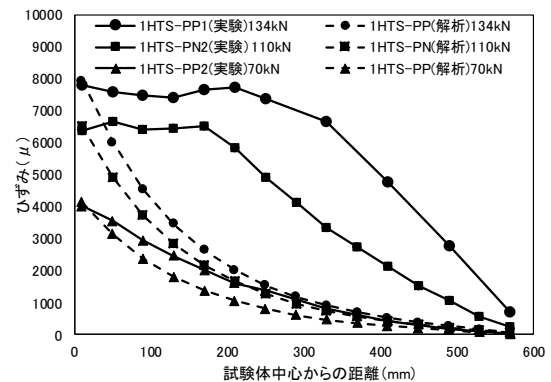


図-7 ひずみ分布（実験値-解析値）

70kN 時のひずみ分布を示す。図-7 より、剥離発生以前の 70kN 時は実験値と解析値のひずみ分布がよく一致することが確認できた。前述したように、解析では、接着剤の界面を完全付着として剥離発生の設定ができていないため、剥離後のひずみの挙動は一致しなかった。今後は異種材料間の付着性能を把握して解析条件に導入することにより、剥離挙動を再現できるようにする必要がある。

4.2 最大荷重および破壊箇所

表-4 に各試験体の最大荷重 P_{max} 、せん断付着応力度 τ_{max} 、界面剥離破壊エネルギー G_f および破壊箇所を示す。また、図-8 に各試験体の実験における最大荷重の比較を示す。1HTS と 1HTN は既往の研究²⁾により得られた

表-4 試験結果一覧

試験体名	最大荷重 (kN)		せん断付着応力度 (N/mm ²)		界面剥離破壊エネルギー (N/mm)		破壊箇所
	実測値	平均値	実測値	平均値	実測値	平均値	
1HTS-PP1	134	128	2.26	2.17	5.34	4.93	エポキシ-ポリウレア間剥離
1HTS-PP2	123		2.08		4.51		エポキシ-ポリウレア間剥離
1HTS-PN1	106	108	1.80	1.83	3.36	3.50	エポキシ-ポリウレア間剥離
1HTS-PN2	110		1.87		3.63		エポキシ-ポリウレア間剥離
1HTS	160		2.71		7.70		エポキシプレート間剥離
1HTN	65		1.1		1.3		エポキシプレート間剥離

従来工法によるポリウレア有試験体とポリウレア無試験体の値である。なお、 τ_{max} 、 G_f は JSCE-E-543³⁾に基づいて式 (1)、式 (2) より算出した。

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{2bt} \quad (1)$$

$$G_f = \frac{(P_{max})^2}{8b^2 E_p t} \quad (2)$$

ここで、

P_{max} : 最大荷重 (kN),

b : プレート幅(mm)

E_p : プレートの弾性係数 (N/mm²),

t : プレートの厚さ (mm),

l : 付着長 (mm) とする。

1HTS-PP 試験体の場合、最大荷重は約 128kN、せん断付着応力度は 2.17N/mm²、界面剥離破壊エネルギーは 4.93N/mm となった。一方、1HTS-PN 試験体の場合の最大荷重は 108kN、 τ_{max} は 1.83N/mm²、 G_f は 3.50N/mm であった。これらのプレハブ工法において、プレートとポリウレア樹脂の間にエポキシプライマーを用いることにより、それぞれの数値は 1.2~1.4 倍向上しており、プレハブ工法においてエポキシプライマーの有効性が確認できた。また、従来工法のポリウレア有試験体と比較すると、 P_{max} 、 τ_{max} で 15~30%、 G_f で 35~55%低下しているものの、従来工法のポリウレア無試験体と比較すると、 P_{max} 、 τ_{max} で 1.7~2.0 倍、 G_f で 2.7~3.8 倍増加し、プレハブ工法においてもポリウレア樹脂の有効性は確認できた。

すべての試験体においてコンクリート側にエポキシパテが残存していたため、破壊箇所として、それぞれ図-1 に示すエポキシ-ポリウレア間剥離と判断した。また、試験体端部においてはコンクリートのかぶり部の破壊やコンクリートの表層破壊も確認できたが、これらは破壊による衝撃で発生した二次的な破壊と考えられるため考察の範囲外とした

4.3 有効付着長

CFRP プレートをコンクリートに接着した場合、実際の付着応力はプレート接着面積全体に一樣に生じておらず、ある限られた領域に生じていることが実験により明らかとなり、この領域はプレートの付着に実質的に有効な区間と考えられる。連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針⁶⁾による平均付着応力の式(3)を用いて、試験体に貼り付けた CFRP プレートの各位置における平均付着応力を算出した。

$$\tau_{b,i} = \frac{(\epsilon_p, i - \epsilon_p, i-1) \cdot t_p \cdot E_p}{\Delta x} \quad (3)$$

ここで

$\tau_{b,i}$: 自由端より i 番目と $i-1$ 番目の位置における平均付着応力 (N/mm²)

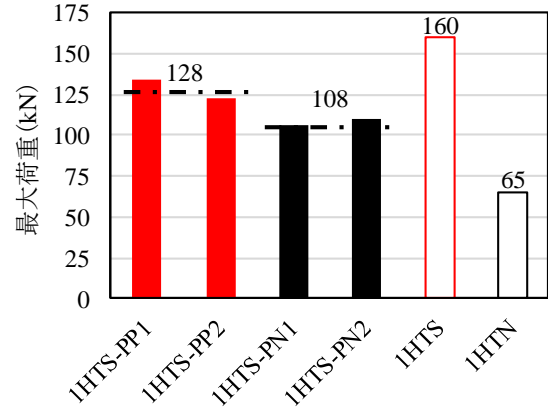


図-8 最大荷重比較

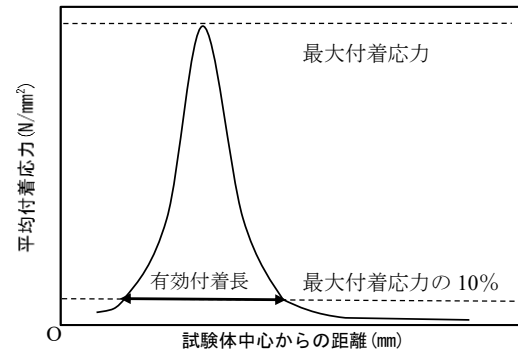
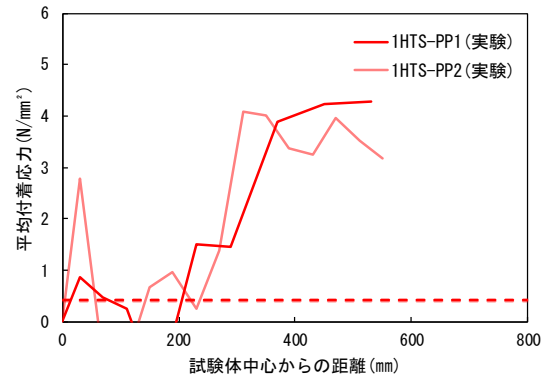
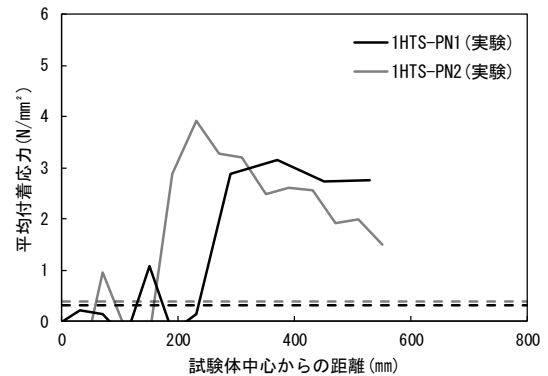


図-9 平均付着応力分布による有効付着長の定義⁷⁾



(a) 1HTS-PP



(b) 1HTS-PN

図-10 実験による平均付着応力分布

$\varepsilon_{p,i}$: 自由端より i 番目の CFRP プレートのひずみ
 T_p : CFRP プレートの厚さ (mm)
 E_p : CFRP プレートの引張弾性係数 (N/mm²)
 Δx : ひずみゲージの間隔(mm) とする。

また、CFRP プレートの有効付着長の定義については、未だ確立されたものがないため、ここでは CFRP シートの有効付着長を論じた J.Dai らの提案⁷⁾に従い、図-9 に示すような平均付着応力が最大付着応力の 10%を上回る区間を有効付着長と定義する。それぞれの試験体の平均付着応力とひずみの測定位置関係の実験値をそれぞれ図-10 (a), (b) に示す。また、最大付着応力の 10%値を破線で示す。図より、1HTS-PP 試験体では、試験体中心部から 200mm 付近まで剥離が発生していたため、平均付着応力が 0 に近い値を示し、1HTS-PP1 では試験体端部で付着応力が最大値となり 1HTS-PP2 では中心から 300mm 付近で最大値となった。また、1HTS-PN 試験体では、試験体中心から 200~400mm 付近で付着応力のピークが生じ、その後、減少する傾向を示している。しかし、どちらの試験体も図-9 に示すような分布を示さず、有効付着長を正しく評価できなかつた。これは、既往の研究²⁾でも同様の結果が得られたように、ポリウレア樹脂挿入の効果により、有効付着長が実際のプレート貼付長 590mm を上回ったためだと考えられる。そのため、プレート貼付長を大きくすることにより、付着性能が向上すると考えられるため、今後プレート貼付長の大きい試験体で実験を行い、有効付着長を正しく評価できるか検証する予定である。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) プレハブ工法の CFRP プレート接着工法において、プレートとポリウレアパテの間にエポキシプライマーを設けることにより、エポキシプライマー無試験体と比較して最大荷重は 1.2~1.4 倍程度向上することが実験により確認された。また、CFRP プレートの最大ひずみも 1.2~1.4 倍程度向上することがわかり、プレハブ工法においてエポキシプライマー挿入による付着性能の向上が確認できた。
- (2) また、従来工法のポリウレア有試験体と比較すると、最大荷重、最大せん断応力度で 15~30%、界面剥離破壊エネルギーで 35~55%ほど低下したが、従来工法のポリウレア無試験体と比較すると、最大荷重、最大せん断応力度で 1.7~2.0 倍、界面剥離破壊エネルギーで 2.7~3.8 倍増加し、プレハブ工法においてもポリウレア樹脂の有効性は確認できた。

(3) 本試験ではポリウレア樹脂を用いた全ての試験体で CFRP プレートの有効付着長は評価できなかつた。プレート貼付長を大きくすることで付着性能が向上すると考えられるので、今後追加実験を行う予定である。

- (4) CFRP プレート接着工法において、各材料の力学特性を弾性またはバイリニアでモデル化した簡易な 2 次元非線形 FEM 解析により、剥離発生以前の CFRP プレートのひずみ挙動は精度良く追跡できるが、剥離後の挙動は追跡できないことが確認された。今後、異種材料間の付着性能を定量的モデル化し、プレート剥離、破壊モードおよび最大耐力を特定することができると数値解析モデルに改善することが必要である。今後、CFRP プレートの他種類や厚さの異なるプレートでの補強効果についてもデータを集積し、プレハブ工法の有効性をさらに究明する必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州大学大学院島山繁忠助教、新日鉄住金マテリアルズ(株)小森篤也氏、谷口硯士氏および(株)SNCの赤澤一彰氏には多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 道路構造物の現状(橋梁), 国土交通省, 2013, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf
- 2) 扇孝洋, 日野伸一, 島山繁忠, 小林朗: CFRP プレート接着補強工法におけるポリウレア樹脂挿入による付着性能の改善, コンクリート工学論文集, Vol.39, No.2, pp.1129-1134, 2017
- 3) 土木学会, 連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法, コンクリート標準示方書[規準編], 2007.5
- 4) Pham B.H, and Al-Mahaidi R, "Modeling of CFRP-Concrete Shear lap Test", Construction and Building Materials (21): 727-735, 2007
- 5) Comite Euro-International du Beton; CEB-FIB Model Code 1990, London, Great Britain, Thomas Telford, 1991.
- 6) 土木学会, 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, 土木学会コンクリートライブラリー-101, 2000
- 7) Jianguo Dai, Tamon Ueda, Yasuhiko Sato: Development of Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with Simple Method, Journal of Composites for Construction, Volume 9 Issue 1, 2005