

論文 RC はりの曲げ試験によるポリウレア樹脂を用いたプレハブ式 CFRP プレート接着補強工法の曲げ補強効果に関する研究

櫻井 俊太*1・小林 朗*2・小森 篤也*3・日野 伸一*4

要旨: 著者らによる既往の研究から, CFRP プレート接着補強工法においてプレート接着にポリウレア樹脂を用いることによる付着性能の改善, また, 現場施工の省力化を目的としたプレハブ工法の有効性を確認した。本研究では, 同工法の曲げ補強効果を検証するため, プレートタイプ, ポリウレア樹脂の有無, 接着長さ, 接着工法をパラメータとして RC はりの曲げ載荷試験を行った。その結果, 高弾性タイプ試験体ではポリウレア樹脂挿入による曲げ補強効果の向上は確認できなかったが, 高強度タイプ試験体ではポリウレア樹脂を用いることによる曲げ補強効果の向上, プレハブ工法の有効性が確認できた。

キーワード: CFRP プレート, 曲げ補強, ポリウレア樹脂, プレハブ工法

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。また, 東日本大震災等による甚大な被害を受け, 復旧や補強対策等の維持管理がますます重要視されるようになってきた。このような中, 近年, 高強度で耐久性に富み, かつ軽量で現場施工性に優れた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注目されている。

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, 図-1 (a) に示す従来から行われている接着補強工法では, CFRP プレート接着端部に応力集中が生じ, プレート自身の引張強度に達する前にコンクリート接着面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応力集中を緩和するため, 図-1 (b) に示すように接着面に柔軟層としてポリウレア樹脂を挿入することで高強度タイプ CFRP プレートに関しては付着性能が大幅に改善されることを実験により確認した¹⁾。また, 図-1 (c) に示す現場施工の省力化を目的としたプレハブ工法においてもポリウレア樹脂を挿入することで付着性能が改善されることを実験により確認した²⁾。本研究では, 既往の研究により得られた結果をもとに, プレート種類, ポリウレア樹脂の有無, プレート接着長さ, プレート接着工法をパラメータとして補強した RC はりの曲げ載荷試験を行い, ポリウレア樹脂を用いた CFRP プレート接着補強工法における曲げ補強効果の評価を行った。

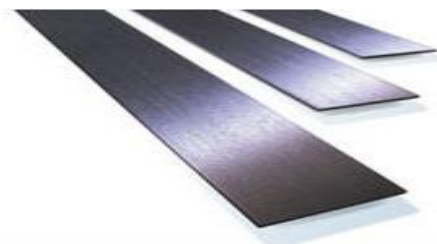
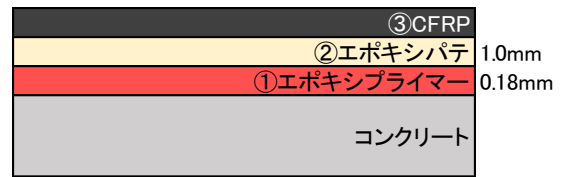


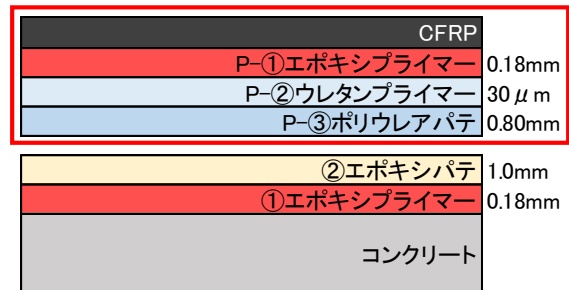
写真-1 CFRP プレート



(a) 現場施工型従来工法 (ポリウレア無)



(b) 現場施工型従来工法 (ポリウレア有)



(c) プレハブ工法 (PP タイプ)

図-1 プレート接着部詳細

*1 元 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 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部 事業企画部 工修 (正会員)

*3 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部 社会資本材料部 博 (工) (正会員)

*4 大分工業高等専門学校 校長 工博 (フェロー会員)

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 プレートと鉄筋の材料特性値を表-1 に、CFRP プレート接着に用いたエポキシ樹脂およびポリウレア樹脂の材料特性値を表-2 に示す。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、コンクリートの圧縮強度は 43.7N/mm^2 である。

2.2 曲げ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タイプ、ポリウレア樹脂の有無、接着長さ、接着工法をパラメータとして計 6 種類の試験体を各 1 体ずつ製作した。試験体概略図を図-2 に示す。コンクリート試験体の寸法は $250 \times 150 \times 2700\text{mm}$ とし、CFRP プレートの曲げ補強効果の検討を行うために、土木構造物で一般的な引張鉄筋比が約 1% で曲げ破壊先行型となるようにせん断補強筋を配置した。コンクリート表面はブラストにより下地処理をした後、接着剤を塗布し、CFRP プレートをはり下面に長さ 2200mm もしくは 1700mm、幅 50mm の範囲で設置した。接着長さ 2200(1700)mm は既往の研究¹⁾の解析結果より、高強度タイププレート厚さ 1mm 従来工法ポリウレア有試験体の場合、有効付着長が 725mm であったため、プレート接着長さが荷重点直下から 950(700)mm となるように決定した。接着方法は図-1 に示すものとした。CFRP プレート接着後はさらに 1 週間以上養生した。試験方法はせん断スパン 1050mm、等曲げ区間 300mm の 2 点漸増荷重とした。また、実験は写真-2 に示すように手動式油圧ジャッキによって荷重を行い、荷重の測定はロードセルを用い測定した。また、中央部における変位を測定するため変位計を支間中央部に設置した。

表-1 使用材料特性値

(a) CFRP プレート (高強度タイプ)

	単位	実測値	規格値	試験方法
幅	mm	50.6	50±2	実測
厚さ	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

(b) CFRP プレート (高弾性タイプ)

	単位	実測値	規格値	試験方法
幅	mm	50.3	50±2	実測
厚さ	mm	1.02	1.0±0.1	実測
引張強度	N/mm^2	1,925	1625以上	JIS A 1191
引張弾性係数	kN/mm^2	412	410±41	JIS A 1191

(c) 鉄筋

	単位	SD345			試験方法
		D10	D13	D16	
降伏強度	N/mm^2	387	397	405	JIS G3112
引張強度	N/mm^2	553	542	577	JIS G3112

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	プレートタイプ	プレート厚さ(mm)	ポリウレア	接着長さ(mm)	工法
1HTN(2200)	高強度	1	無	2200	従来
1HTS(2200)			有	2200	
1HTS(1700)			有	1700	プレハブ
1HTS-PP(2200)			有	2200	
1HMN(2200)	高弾性	1	無	2200	従来
1HMS(2200)			有	2200	

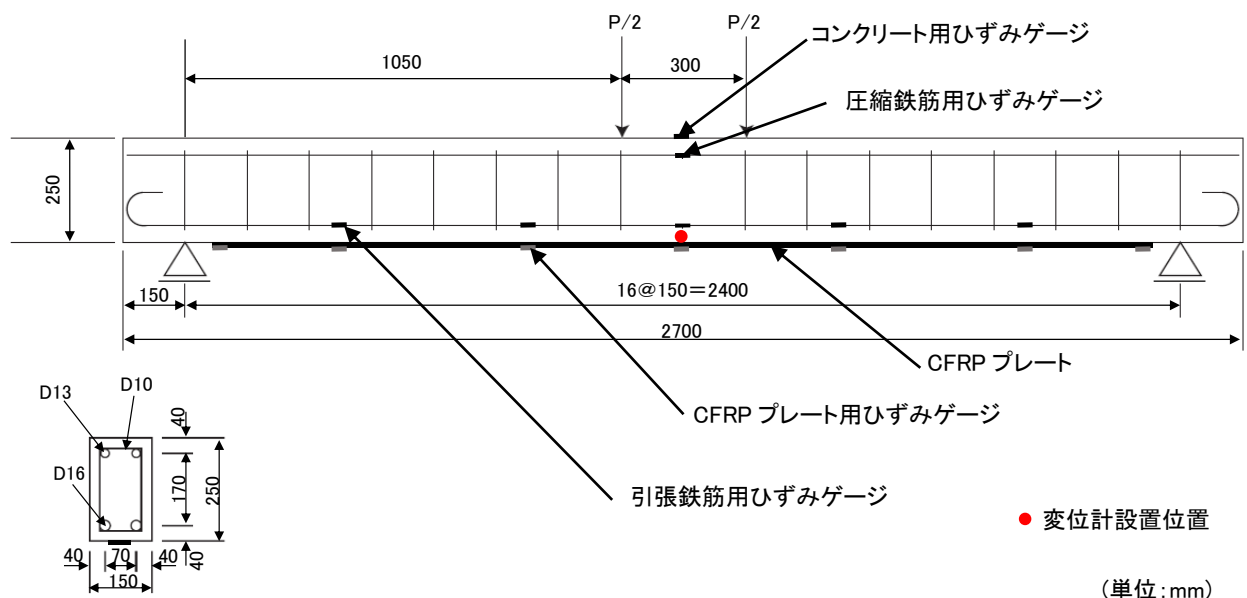


図-2 試験体概略図

(単位: mm)

3. 結果及び考察

3.1 降伏荷重, 最大荷重及び破壊状況

試験結果一覧を表-4 に、降伏荷重時, 最大荷重時の計算値と実験値の比較を図-3 に示す。表中の最大荷重の計算値は高強度タイプ試験体ではコンクリートの圧壊, 高弾性タイプ試験体ではプレートの破断を終局として断面計算により算出した。また, コンクリートと CFRP プレートは完全付着として計算した。CFRP プレートの材料特性値は表-1 (a) (b) 中の規格値, 鉄筋は表-1 (c) の値を用いた。また, コンクリートの圧縮強度は 43.7N/mm^2 を用いた。降伏荷重の実験値に関しては, 鉄筋のひずみが降伏ひずみの 2025×10^{-6} に達した時の荷重と図-5 の荷重-支間中央たわみ関係図から読みとれる降伏荷重との平均値を示している。

(1) 実験値比較

・ポリウレア樹脂の有無による影響

表-4 より無補強 (計算値) と比較して補強試験体は降伏荷重, 最大荷重ともに増加した。高強度タイプ試験体では, 降伏荷重が 64~68kN となりポリウレア樹脂によって降伏荷重に大きな差は確認できなかったが, 最大荷重は 1HTN(2200)で 85kN, 1HTS(2200), 1HTS(1700), 1HTS-PP(2200)で 95~97kN となり, 10%程度増加した。

高弾性タイプ試験体では, 降伏荷重が 1HMN(2200)で



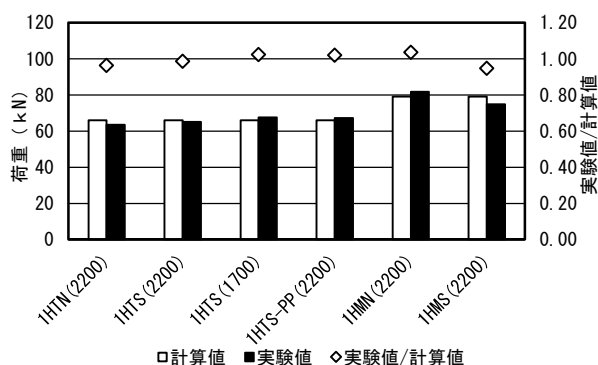
写真-2 試験状況

は 82kN, 1HMS(2200)では 75kN となり, ポリウレア樹脂によって降伏荷重は 10%ほど減少した。ここで, 試験体中心部断面ひずみ分布図を図-4 に示す。これは, 最大荷重時と引張鉄筋ひずみが約 2000×10^{-6} であった 65kN 時の断面ひずみ分布図である。65kN 時, 高強度, 高弾性両タイプ試験体でポリウレア無試験体がポリウレア有試験体より CFRP プレートのひずみが大きくなっており, CFRP プレートが大きく応力を負担する状態となっている。これはポリウレア有試験体には CFRP プレートーコ

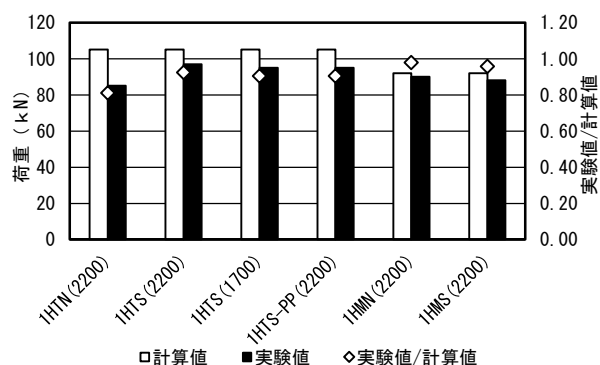
表-4 試験結果一覧

試験体名	P_{yex} (kN)	P_{yca} (kN)	P_{yex}/P_{yca}	P_{max} (kN)	P_{uca} (kN)	P_{max}/P_{uca}	破壊状況
無補強		57			60		
1HTN(2200)	64	66	0.96	85	105	0.81	CFRPプレートの剥離破壊
1HTS(2200)	65	66	0.98	97	105	0.92	コンクリートの圧壊
1HTS(1700)	68	66	1.02	95	105	0.90	コンクリートかぶり部の剥落破壊
1HTS-PP(2200)	67	66	1.02	95	105	0.90	コンクリートの圧壊
1HMN(2200)	82	79	1.03	90	92	0.98	プレートの破断
1HMS(2200)	75	79	0.95	88	92	0.96	プレートの破断

P_{yex} : 降伏荷重(試験), P_{yca} : 降伏荷重(計算), P_{max} : 最大荷重(試験), P_{uca} : 最大荷重(計算)



(a) 降伏荷重時



(b) 最大荷重時

図-3 計算値と実験値の比

ンクリート間にポリウレ樹脂の柔軟層があり、CFRPプレートへの荷重伝達が遅れるためであると考えられる。そのため、高弾性タイプ試験体では高強度タイプ試験体と比較し、ポリウレ樹脂によって同荷重時のCFRPプレートの負担する応力の差が大きく生じ、1HMS(2200)の方が1HMN(2200)より引張鉄筋の応力負担が大きくなり、降伏荷重が小さくなったと考えられる。最大荷重は1HMN(2200)で90kN、1HMS(2200)で88kNとなり、最大荷重には大きな差は見られなかった。そのため、接着にポリウレ樹脂を用いることによって高強度タイプ試験体では曲げ補強効果が向上することが確認できたが、高弾性タイプ試験体では接着にポリウレ樹脂を用いることによる曲げ補強効果の向上が確認できなかった。

・接着長さによる影響

1HTS(2200)と1HTS(1700)を比較すると、最大荷重は1HTS(2200)で97kN、1HTS(1700)で95kNとなり大きな差はなかった。そのため、高強度タイプCFRPを用いた場合、有効付着長以上の接着長さであれば、接着長さによる影響が小さく、補強効果が十分に発揮されると考えられる。

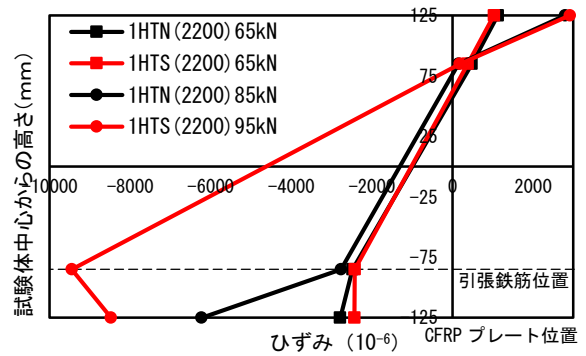
・プレハブ工法による影響

1HTS(2200)と1HTS-PP(2200)を比較すると、最大荷重は1HTS(2200)で97kN、1HTS-PP(2200)で95kNとなり大きな差はなかった。そのため、施工性を考慮したプレハブ工法試験体においても十分な補強効果が得られると考えられる。

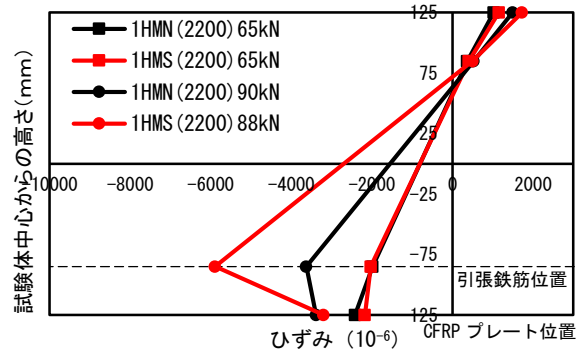
(2) 実験値と計算値の比較

降伏荷重の実験値と計算値を比較すると、高強度タイプ試験体、高弾性タイプ試験体ともに実験値と計算値の差が上下5%以内となり近い値となり、降伏荷重の計算値の妥当性が確認できた。また、最大荷重の実験値と計算値を比較すると、ポリウレ無試験体では実験値が計算値を19%ほど下回ったが、ポリウレ有試験体では実験値と計算値の差が10%以内となった。計算値はコンクリートとCFRPプレートは完全付着として計算したため、実験値が計算値を下回ったと考えられる。しかし、1HTS(2200)の最大荷重の実験値と計算値の差は8%と小さいことから、接着にポリウレ樹脂を用いた場合のコンクリートとCFRPプレートの付着性能、さらにはRCはりに対する曲げ補強効果が大きく改善されたと考えられる。また、高弾性タイプ試験体ではポリウレ無試験体で実験値と計算値の差は2%であり、ポリウレ有試験体で実験値と計算値の差は4%であった。高弾性タイプ試験体ではどちらの試験体もプレートの破断により終局したため、実験値と計算値が近い値になったと考えられ、計算値の妥当性も確認できた。

(3) 破壊状況



(a) 高強度タイプ (HT)



(b) 高弾性タイプ (HM)

図-4 試験体中心部断面ひずみ分布図



(a) CFRP プレートの剥離破壊 (1HTN(2200))



(b) コンクリートかぶり部の剥落破壊 (1HTS(1700))

写真-3 破壊状況

写真-3に破壊状況を示す。1HTN(2200)では、写真-3(a)に示すようにCFRPプレートの剥離破壊となった。

1HTS(2200), 1HTS-PP(2200)ではコンクリートの圧壊となり、1HTS(1700)では写真-3 (b) に示すようにコンクリートのかぶり部の剥落破壊となった。1HTS(1700)の破壊状況の差異は偶然によるものと考えられる。そのため破壊状況からもポリウレア樹脂挿入による補強効果の改善が確認できる。また高弾性タイプ試験体では1HMN(2200), 1HMS(2200)ともにプレート破断となったため、高弾性タイプ試験体ではポリウレア樹脂の有無に関わらず十分な曲げ補強効果が得られると考えられる。

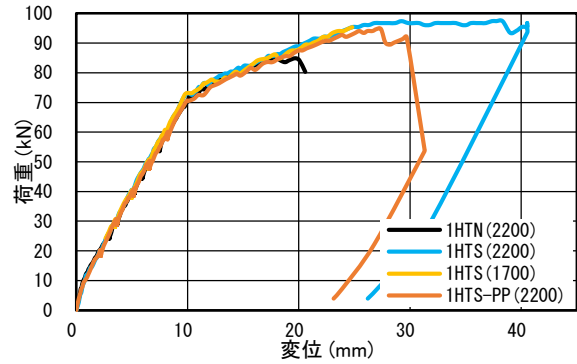
3.2 荷重-たわみ関係

荷重-支間中央たわみ関係図を図-5 に示す。図-5 (a) には高強度タイプ試験体、図-5 (b) には高弾性タイプ試験体、図-5 (c) には高強度タイプと高弾性タイプの比較として1HTS(2200)と1HMS(2200)の荷重-支間中央たわみ関係図を示している。図-5 (a) より、高強度タイプ試験体ではポリウレア樹脂の有無に関わらず、すべての試験体で等しい曲げ剛性を有することが確認され、70kN 付近で剛性が小さくなった。これは引張鉄筋が降伏したためであると考えられる。70kN 以降もポリウレアの有無にかかわらず、各試験体の曲げ剛性に大きな差は確認できなかった。その後1HTN(2200)は85kNで終局、1HTS(1700)と1HTS-PP(2200)は95kNで終局となった。1HTS(2200)に関しては95kN付近でも曲げ剛性が変化している。これは、コンクリート上縁の圧壊によるものと考えられる。そのため、高強度タイプ試験体において、荷重-支間中央たわみ関係図からは、ポリウレア樹脂の有無、プレート接着長さ、プレハブ工法による大きな差異は確認できなかった。図-5 (b) より、高弾性タイプの試験体ではポリウレア無試験体に比して、曲げ剛性が高い結果が得られている。また、どちらの試験体も鉄筋降伏による曲げ剛性の変化がないため、主鉄筋降伏前にCFRPプレートの破断による終局に至ったものと考えられる。図-5 (c) より、高強度タイプ試験体と高弾性タイプ試験体を比較すると、高弾性タイプ試験体の方が高い曲げ剛性を有し、表-1 (a) (b) に示すCFRPプレートの引張弾性率の差によりたわみを小さく抑えられていることが確認された。

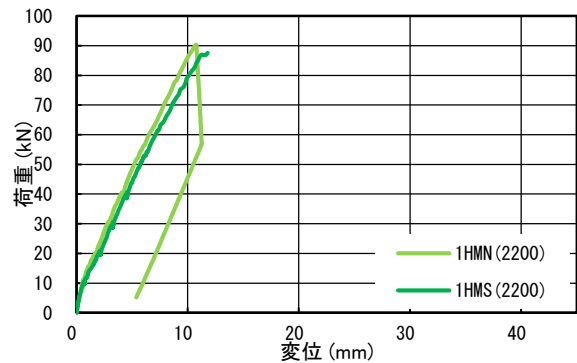
3.3 CFRP プレートひずみ分布

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 (a) (b) に示す。横軸は試験体中央をゼロ点とした。

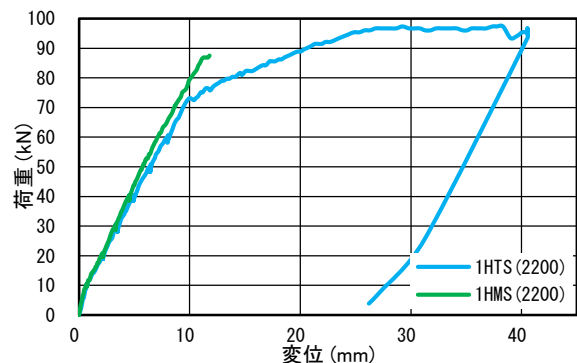
同図よりすべての試験体でひずみ分布はおおよそ左右対称にCFRPプレート端部から載荷点に向かって増加している。今回の試験体を比較すると高強度タイプ試験体ではポリウレア樹脂を用いている1HTS(2200), 1HTS(1700), 1HTS-PP(2200)の全ての試験体がポリウレア樹脂無試験体と比較して最大ひずみが増加しているこ



(a) 高強度タイプ (HT)



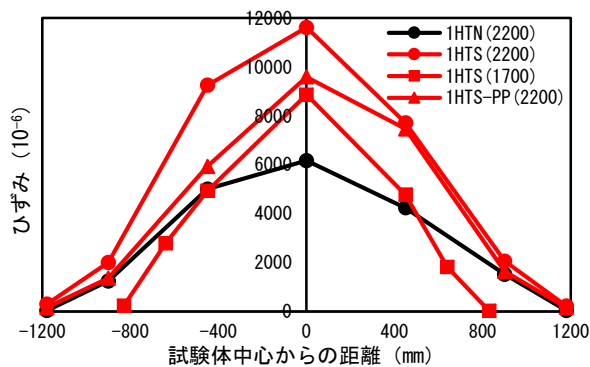
(b) 高弾性タイプ (HM)



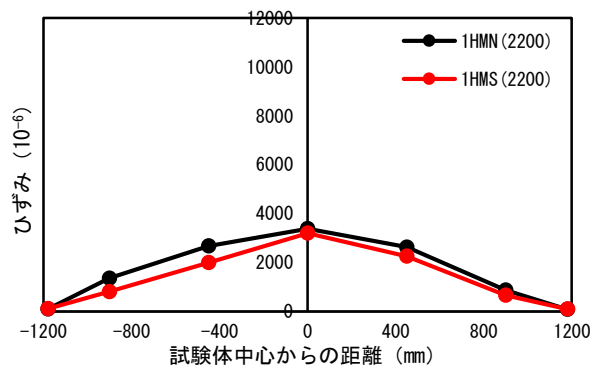
(c) 高強度タイプ・高弾性タイプ比較

図-5 荷重-支間中央たわみ関係図

とが確認できる。また、1HTS(2200)と1HTS-PP(2200)ではプレート接着端部において傾きが小さくなっているが、1HTS(1700)では、プレート接着端部から中心まで傾きに大きな差は確認できないため、プレート接着長さ2200mmの試験体ではプレート接着端部まで均等に応力が伝達しておらず、プレート接着長さ1700mmの試験体ではプレート接着端部まで均等に応力が伝達されていることが考えられる。そのため、接着長さ1700mm試験体においても、接着長さ2200mm試験体と同等の曲げ補強効果を得られたと考えられる。高弾性タイプ試験体ではポリウレア樹脂によって最大ひずみ、ひずみ分布ともに大きな差は確認できなかった。そのため、ひずみ分布か



(a) 高強度タイプ (HT)



(b) 高弾性タイプ (HM)

図-6 最大荷重時ひずみ-測定位置関係図

ら高強度タイプ試験体では接着にポリウレア樹脂を用いることでCFRPプレートとコンクリートの付着性能が向上し、曲げ補強効果も向上していることが確認できたが、高弾性タイプ試験体ではポリウレア樹脂挿入による曲げ補強効果の向上は確認できなかった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) CFRP プレート接着補強工法により補強したはり試験を行うことにより、無補強 (計算値) と比較して補強試験体は降伏荷重、最大荷重ともに増加した。接着にポリウレア樹脂を用いることによって高強度タイプ試験体では曲げ補強効果が向上することが確認できたが、高弾性タイプ試験体ではいずれもプレート破断が先行し、接着にポリウレア樹脂を用いることによる曲げ補強効果の向上が確認できなかった。
- (2) 1HTS(2200)と 1HTS(1700)を比較すると、最大荷重に大きな差はなかった。そのため、既往の研究²⁾の解析により評価した有効付着長以上の接着長さであれば、接着長さによる影響が小さく、曲げ補強効果が十分に発揮されると考えられる。
- (3) 1HTS(2200)と 1HTS-PP(2200)を比較すると最大荷重に大きな差はなかったため、施工性を考慮したプレハブ工法試験体においても十分な補強効果が得られることが確認できた。
- (4) 降伏荷重の計算値と実験値を比較すると、高強度タイプ試験体、高弾性タイプ試験体ともに実験値と計算値の差が上下5%以内となり、降伏荷重に対するRC理論に基づく計算方法の妥当性が確認できた。
- (5) 1HTS(2200)の最大荷重の実験値と計算値の差は8%と小さかったので、接着にポリウレア樹脂を用いた場合のコンクリートとCFRPプレートの付着性能は非常に優れていると考えられる。
- (6) 高弾性タイプ試験体ではポリウレア無試験体で実験

値と計算値の差は2%、ポリウレア有試験体で実験値と計算値の差は4%であり、計算値の妥当性も確認できた。

- (7) 高強度タイプ試験体において、荷重一支間中央たわみ関係からは、ポリウレア樹脂の有無、プレート接着長さ、プレハブ工法による大きな曲げ剛性の差異は確認できなかった。
- (8) 高弾性タイプ試験体ではポリウレア無試験体の方がポリウレア有試験体よりたわみを小さく抑えられることが確認できた。高強度タイプ試験体と高弾性タイプ試験体を比較すると、高弾性タイプ試験体の方が高い曲げ剛性を有し、たわみを小さく抑えられていることが確認できた。
- (9) ひずみ分布からも接着にポリウレア樹脂を用いることで高強度タイプ試験体ではCFRPプレートとコンクリートの付着性能が向上し、曲げ補強効果も向上することが確認できたが、高弾性タイプ試験体ではプレート破断が先行し曲げ補強効果の向上は確認できなかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、日鉄ケミカル&マテリアル(株)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) 扇孝洋, 日野伸一, 畠山繁忠, 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
- 2) 櫻井俊太, 扇孝洋, 小林朗, 日野伸一: 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改善, コンクリート工学論文集, Vol.40, No.2, pp.1417-1422, 2018