

FRP シート接着による鋼部材の補修に関する研究

Repair Method for the Steel Member by FRP Sheets

秀熊佑哉*, 小林 朗*, 長井正嗣**, 宮下剛**, 和久井穰**

Yuya Hidekuma, Akira Kobayashi, Masatsugu Nagai, Takeshi Miyashita, Yutaka Wakui

*日鉄コンポジット株式会社 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8 小原ビル)

**長岡技術科学大学工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

The steel structure is corroded by various mechanisms, and the performance decreases. As a repair method of the corroded steel member, a method to glue the carbon fiber sheets to the steel member has been studied. In recent years, as more efficient FRP materials for repair, the Strand sheet which has high mass per unit area was developed. The purpose of this study is to propose the repair method for steel member by using Strand sheets, in order to prove a reinforcement effect of Strand sheet for steel member, the tensile tests and flexural tests of steel which reinforced by Strand sheets were performed. The results showed that Strand sheets were available for the reinforcement of the steel member.

Key words: CFRP, Strand Sheet, Steel, Corrosion, Reinforcement

キーワード: CFRP, ストランドシート, 鋼部材, 腐食, 補修・補強

1. はじめに

腐食等による経年劣化により力学的特性が低下した鋼部材の補修方法として、現状ではボルトや溶接による当て板添接補強や部材の交換等、大がかりな作業が行われている。そこでより効率的・経済的な補修方法として、施工現場で含浸接着剤を含浸させながら炭素繊維シートを鋼材に接着する炭素繊維シート接着工法が研究されてきた¹⁾。炭素繊維シートの積層数に応じて鋼材の応力低減効果が得られるが、鋼材降伏前に剥離が生じ、積層数が多くなるにつれ剥離発生時のひずみが小さくなる傾向にあることが分かっている。

また、引き抜き成型した幅 50mm 程度の CFRP プレートに接着する工法も検討されており、現場含浸工程がないので施工効率は高いが、シートに比べて厚く細幅の板材を接着するので接着面積が狭くプレート端部での付着せん断応力の集中により低い鋼材応力で剥離する可能性がある。

近年、施工効率の向上を目的として連続繊維ストランド 1 本ずつに樹脂を含浸・硬化させた FRP 素線をすだれ状にシート化した CFRP ストランドシートが開発された²⁾。CFRP ストランドシートは現場含浸工程を省略でき 1 層あたりの炭素繊維量を増加させることが可能で、施工効率が良く品質が高いといった特徴がある。

本研究では、現場含浸型の炭素繊維シートと CFRP ストランドシート（以下 2 種類のシートを総称する場合、CFRP シート）の目付け量、積層数を変化させて鋼材に接着して引張試験、および梁の曲げ試験を行い、鋼材応力低減効果および剥離特性について比較検討した。また、比較としてヤング係数、板厚の異なる CFRP プレートに接着した鋼材の引張試験も実施した。

2. CFRP ストランドシートの構造

炭素繊維の連続繊維は、直径 5~10 μm の非常に細いフィラメントを 3000~24000 本程度収束させたストランドとして製造されている。CFRP ストランドシートは、この連続繊維ストランド 1 本ずつにエポキシ樹脂を含浸させた後、電気炉内で加熱して硬化させた直径 0.5~2mm 程度のロッド状の FRP ストランドを製作し、これを写真-1 に示すように横糸ですだれのように連結してシート状に保形したものである。

図-1 に従来の現場含浸型の炭素繊維シートおよび CFRP ストランドシートを用いた補修の施工過程の模式図を示す。CFRP ストランドシートは含浸・硬化した樹脂がフィラメント間の結合材として機能した FRP となっており、従来の連続繊維シートのように施工現場でフ

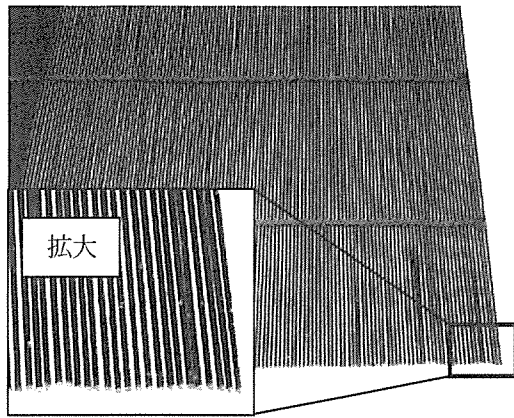
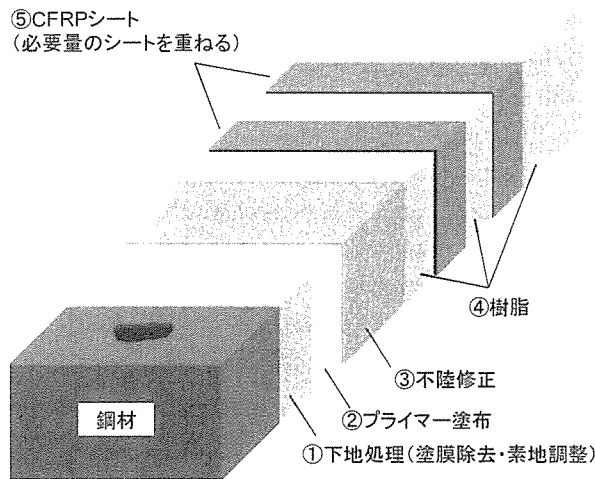
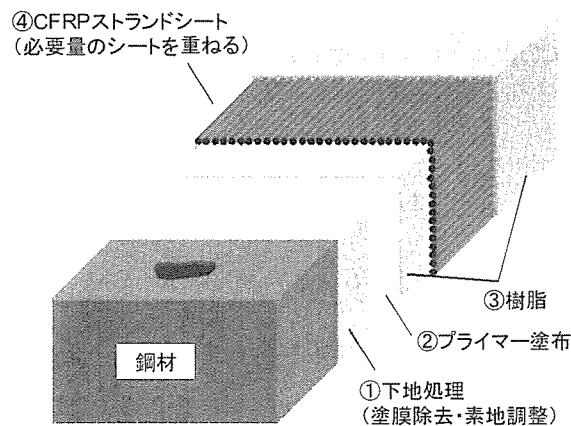


写真-1 CFRP ストランドシート



(a) 炭素繊維シート



(b) CFRP ストランドシート

図-1 補修の施工過程の模式図

イラメント間に樹脂を含浸させる必要がなく、樹脂はストランドの隙間を満たすだけでよいので、含浸不良や接着界面に気泡が残る恐れが少なく、目付量 900g/m^2 といった高目付シートも使用されている。現場含浸工程がないので、接着剤としてはペースト状の粘度高い樹脂が使用されており、シート接着用の樹脂が不陸修正を兼ねることができ、従来型の炭素繊維シートで必要であった不陸修正を省くことができるため、従来型よりも高い施工効率が期待できる。

3. 実験概要

3-1. 引張試験

図-2 に示すように、鋼材 (SM490 降伏強度: 385 N/mm^2) の表裏に繊維目付量の異なる CFRP ストランドシート、炭素繊維シートを積層数を変えて接着し、引張試験を行った。比較として板厚およびヤング係数の異なる CFRP プレートに接着した鋼板の引張試験も行った。試験は、鋼材の降伏荷重 (200 kN) まで単調载荷し、CFRP および鋼板の荷重-ひずみ関係を測定すると同時に、CFRP シートおよび CFRP プレートの剥離状況を観察した。CFRP シートの積層は、端部での応力集中を防ぐために、各層 25mm ずらして接着を行った³⁾。ここで、剥離を一方から進展させて観察するために、片端に CFRP の剥離防止のため最外層にアラミドシート 1 層を貼付け、

表-1 実験パラメータ

供試体	材料積層構成		
	No.	材料	層数 (片面)
引張試験	1-1	SSHT600	5
	1-2	SSHM600	1
	1-3	SSHM600	3
	1-4	SSHM600	5
	1-5	SSHM900	1
	1-6	SSHM900	3
	1-7	SSHM900	5
	1-8	PLHT20	1
	1-9	PLHM20	1
	1-10	PLHM40	1
	1-11	CFHM300	6
	1-12	CFHM300	10
曲げ試験	A-1	CFHM300	5
	A-2	SSHM600/900	1/1 (Total 2)
	A-3	SSHM900	1
	B-1	SSHM600	5
	B-2	SSHM900	5
	B-3	SSHM900	2

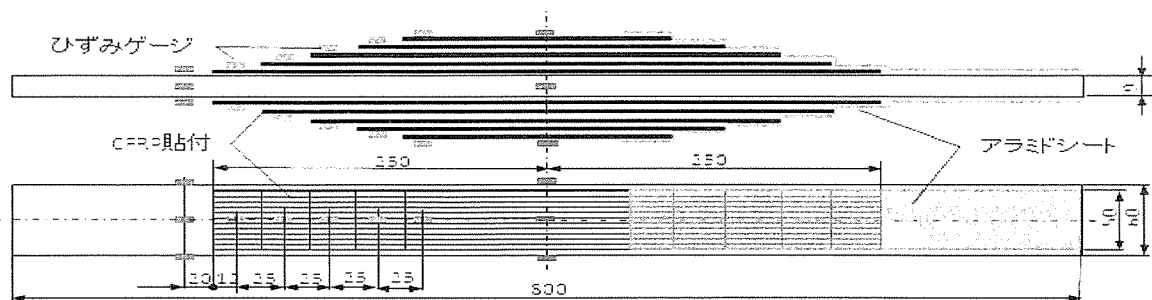


図-2 引張試験供試体

表-2 各 CFRP の物性

強化材の種類	CFRPストランドシート			CFRPプレート			炭素繊維シート
記号	SSHT600	SSHM600	SSHM900	PLHT20	PLHM20	PLHM40	CFHM300
目付 g/m^2	600	628	910	-	-	-	314
厚み mm	0.333	0.286	0.429	2.0	2.0	4.0	0.143
弾性率 E GPa	245	724	710	165	450	450	682

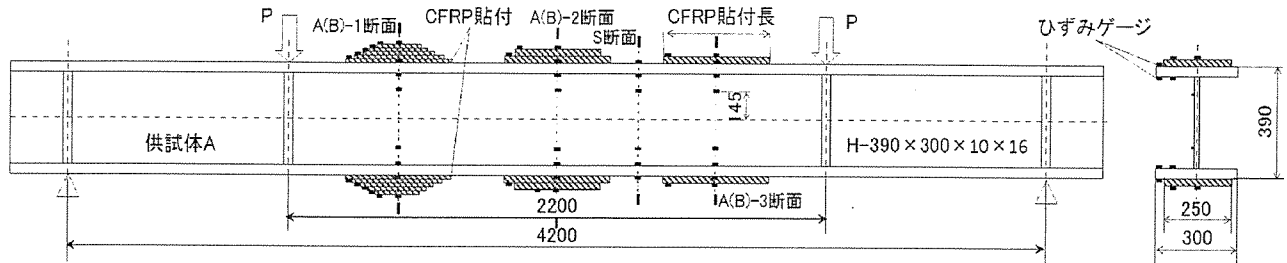


図-3 曲げ試験供試体

他端を計測側とした。実験パラメータおよび各材料の物性は表-1 および表-2 に示すとおりである。

3-2. 曲げ試験

引張試験で剥離が確認されなかった CFRP ストランドシートと炭素繊維シートを用いて、図-3 に示すように鋼製梁 (SS400 降伏強度: 315 N/mm^2) の等曲げ区間の上下フランジに繊維目付け量および積層数を変化させて接着し、曲げ载荷試験を行った。载荷は鋼材の降伏荷重までとし (1200 kN), CFRP 補強鋼製梁の荷重-ひずみ関係の測定を行うと同時に、CFRP シートの剥離状況を観察した。

4. 結果と考察

4-1. 引張試験

引張試験において、CFRP プレートで補強した供試体では、降伏荷重の約 30~60% で CFRP が剥離したのに対し、CFRP ストランドシートおよび炭素繊維シートでは降伏荷重まで剥離は発生しなかった。

図-4 に剥離が発生していない No.1-7 と、図-5 に剥離が発生した No.1-9 の無補強供試体の降伏荷重 (P_y) で無次元化した荷重と、無補強部・鋼補強部・CFRP 端部・CFRP 中央の 4 箇所のひずみとの関係を示す。また、CFRP 補強鋼材の合成部材としたときの計算値も同図に示す。ここで、引張剛性の値は式 (1a) および (1b) により算出した。

$$\frac{P}{\varepsilon} = E_s \cdot A_{s+cf} \quad (1a)$$

$$A_{s+cf} = A_s + \frac{E_{cf}}{E_s} \cdot A_{cf} \quad (1b)$$

ここで、

P : 引張荷重

ε : CFRP 補強鋼材のひずみ
 E_s, E_{cf} : 鋼材, CFRP の弾性率
 A_{s+cf} : 合成部材の鋼換算断面積
 A_s, A_{cf} : 鋼材, CFRP の断面積

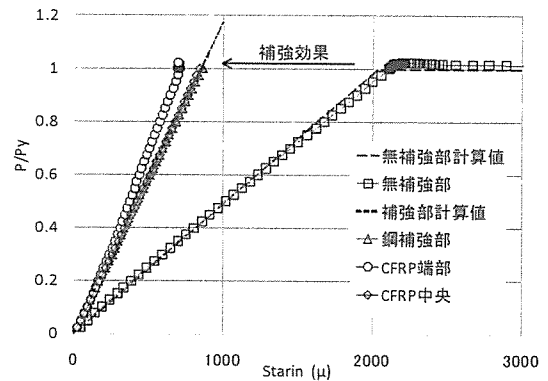


図-4 No.1-7 の荷重-ひずみ関係

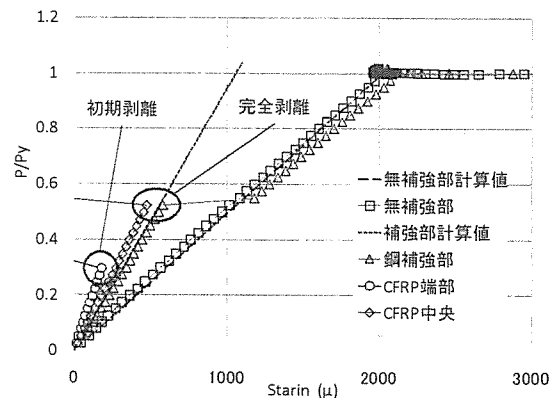


図-5 No.1-9 の荷重-ひずみ関係

これらの結果より、CFRP が剥離に至るまでは、実験値と CFRP と鋼材の合成断面の計算値が一致していることがわかる。他の供試体においても同様の結果が得られた。

表-3 に引張剛性の計算値と測定値との比較および初期剥離荷重を示す。同表において、CFRP 部の引張剛性

表-3 引張剛性の計算値と測定値との比較および初期剥離荷重

供試体 No.	CFRP部			全体引張剛性		引張剛性	初期剥離	完全剥離
	材料	層数 (片面)	引張剛性 $E A_c$ kN	計算値 $E A_{cal}$ kN	測定値 $E A_{ms}$ kN	発現率 $E A_{ms} / E A_{cal}$	荷重 P_{ip} / P_y	荷重 P_{fp} / P_y
1-1	SSHT600	5	40790	139586	136883	98.1%	> 100%	> 100%
1-2	SSHM600	1	20706	118930	127951	107.6%	> 100%	> 100%
1-3	SSHM600	3	62118	160646	163296	101.7%	> 100%	> 100%
1-4	SSHM600	5	103530	202159	200788	99.3%	> 100%	> 100%
1-5	SSHM900	1	30460	129019	130938	101.5%	> 100%	> 100%
1-6	SSHM900	3	91380	190446	185047	97.2%	> 100%	> 100%
1-7	SSHM900	5	152300	251015	236971	92.5%	> 100%	> 100%
1-8	PLHT20	1	33000	132250	132661	100.6%	59%	82%
1-9	PLHM20	1	90000	189123	204596	113.7%	33%	49%
1-10	PLHM40	1	180000	278990	267588	95.9%	34%	35%
1-11	CFHM300	6	58512	157496	151926	96.5%	> 100%	> 100%
1-12	CFHM300	10	97520	196149	167067	86.4%	> 100%	> 100%

$E \cdot A_c$ は各 CFRP の弾性率と 1 層の断面積、積層数(両面)の積で計算した。また、全体の引張剛性の計算値 $E \cdot A_{cal}$ は鋼板の引張剛性に CFRP 部の引張剛性 $E \cdot A_c$ を足したものである。測定値 $E \cdot A_{ms}$ は $P/P_y=0.2$ および $P/P_y=0.6$ での荷重と補強部鋼板ひずみの傾きより算出した。ただし、No.1-9, No.1-10 では $P/P_y=0.6$ に達する前に完全剥離が発生したため、No.1-9 では $P/P_y=0.1$ と $P/P_y=0.5$, No.1-10 では $P/P_y=0.05$ と $P/P_y=0.25$ の値を用いた。表-3 より得られた結果を以下に示す。

(1) 引張剛性

各供試体とも設計値より求めた全体の引張剛性と、測定値より求めた引張剛性がほぼ一致している。No.1-12 は他の供試体と比べ若干引張剛性の発現率が低い値を示している。これまでの研究で十分な発現率を得るには補強部の最外層の長さが 200mm 以上必要とされているが¹⁾、No.1-12 は 10 層を段差積層しており、最外層の長さが 50mm と短いため、応力の伝達が不十分であったと考えられる。

(2) 剥離状況

図-5 に剥離の発生した No.1-9 の荷重ひずみ関係を示すが、CFRP プレート端部で剥離が発生し CFRP プレート端部のひずみが急減し、つぎに CFRP プレートが全長にわたって剥離した時点で CFRP プレート中央部のひずみは急減して 0 となり、鋼材のひずみは急増して無補強部のひずみとほぼ等しくなった。この荷重ひずみ関係から、CFRP プレートで補強した No.1-8 (高強度型 CFRP 板厚 2mm) では鋼板降伏荷重の 57%, No.1-9 (高弾性型 CFRP 板厚 2mm) では 32%, No.1-10 (高弾性型 CFRP 板厚 4mm) では 30% で端部に初期剥離が確認され、その後、剥離が進展していき No.1-8 では 82%, No.1-9 では 52%, No.1-10 では 35% で CFRP プレートは完全に剥離した。CFRP プレートの板厚が大きく、ヤング係数が高い方が初期剥離発生荷重、完全剥離荷重とも低くなる傾向にあった。CFRP プレートは 1 層の厚さが厚く端部

の接着界面に付着せん断応力の集中が生じ、CFRP プレートの剛性が高いほど低い荷重で剥離したと考えられる。

これに対して炭素繊維シートおよび CFRP ストランドシートで補強した供試体は鋼板の降伏荷重に至るまで剥離は発生しなかった。シート材料では補強材の 1 層当たりの引張剛性が小さく、端部をずらしてテーパ状に接着することで、補強材端部での付着せん断応力の集中が低減されたため、鋼材降伏まで剥離しなかったものと考えられる。

そこで、剥離が発生した No.1-9 および No.1-9 と CFRP シートの引張剛性がほぼ等しい No.1-4, No.1-6 について、No.1-9 で初期剥離が発生した $P/P_y=0.3$ での CFRP の付着せん断応力を、式 (2a), (2b) および図-6 に示した CFRP 表面のひずみ分布より算出した。

$$\tau_i = \frac{P_i - P_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (2a)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, P_0, x_0 = 0)$$

$$P_i = E_{cf} \cdot \varepsilon_i \cdot t_{cf} \cdot n_i \quad (2b)$$

ここで、

- τ_i : 区間 i での付着せん断応力
- P_i : 端部から i 番目のひずみゲージの値より算出した CFRP の分担引張荷重
- x_i : 端部から i 番目のひずみゲージまでの距離
- E_{cf} : CFRP の弾性率
- ε_i : 端部から i 番目のひずみゲージのひずみ
- t_{cf} : CFRP1 層あたりの厚さ
- n_i : 端部から i 番目のひずみゲージ位置での積層数

図-6 の各ひずみより CFRP の分担引張荷重を算出し、区間ごとに付着せん断応力を算出した付着せん断応力の分布を図-7 に示す。図-7 より、No.1-9 では端部での

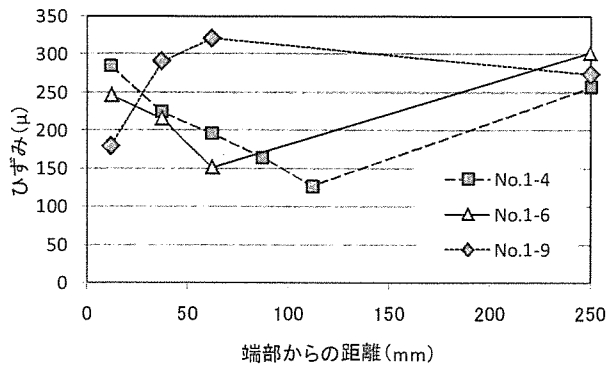


図-6 CFRP 表面ひずみの軸方向の分布

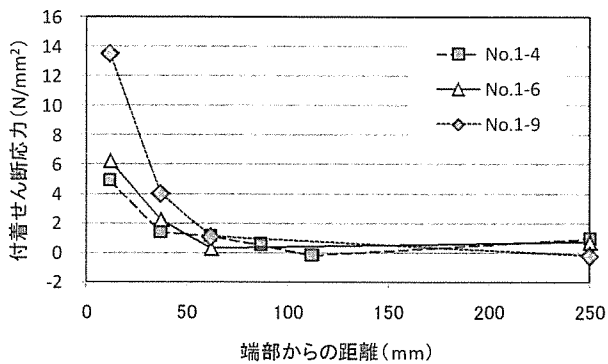


図-7 付着せん断応力の軸方向の分布

付着せん断応力の集中がほかの2つに比べて著しく大きく、端部での付着せん断応力が接着強度を上回り剥離に至ったと考えられる。No.1-4とNo.1-6を比較すると、1層あたりの剛性が低いNo.1-4の方が端部での付着せん断応力が低く、付着せん断応力の伝達区間も長いことがわかる。これらの結果より、CFRPの端部をずらしてテーパ状に接着することによる端部での付着せん断応力集中の低減効果の有効性が示された。

4-2. 曲げ試験

供試体 A, B ともに引張側と圧縮側で CFRP シート接着部の鋼材のひずみは CFRP シート未接着部 (図-3 S 断面) より減少し、すべての貼付タイプで鋼材の降伏まで CFRP シートの剥離は観察されなかった。

供試体 A の無補強供試体の降伏荷重 (P_y) で無次元化した荷重とひずみの関係を図-8 に示す。ひずみは H 鋼フランジ裏面のひずみである。また、同図に計算値 (2a) および (2b) より算出した CFRP 補強鋼材の合成部材としたときの計算値も示す。

$$\varepsilon_i = \frac{M}{E_s \cdot I_{s+cf}} \cdot y_i \quad (2a)$$

$$I_{s+cf} = I_s + \frac{E_{cf}}{E_s} (I_{cf} + A_{cf} \cdot e_{cf}^2) \quad (2b)$$

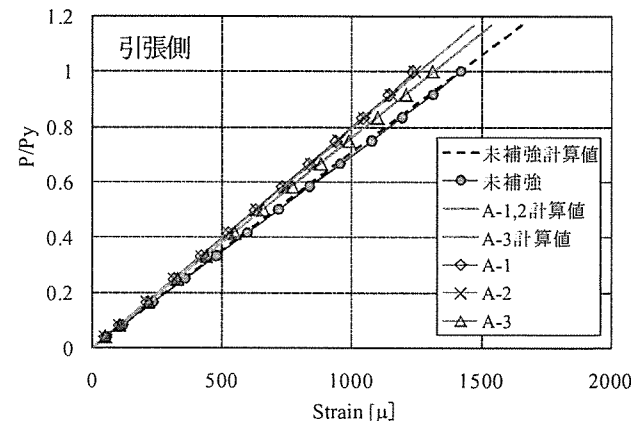
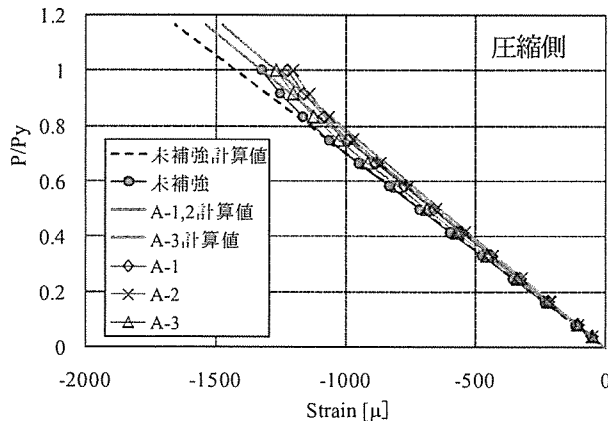


図-8 供試体 A の曲げ試験結果

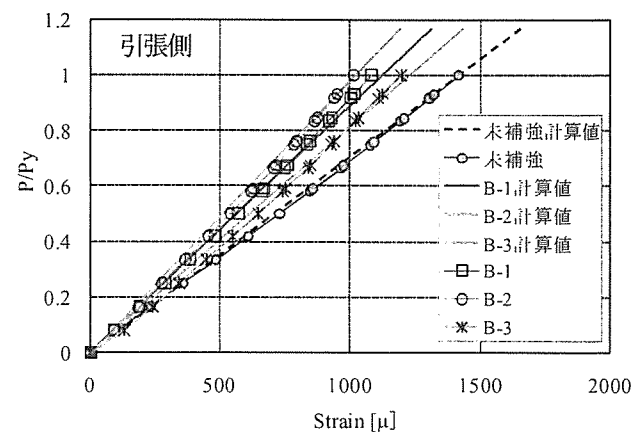
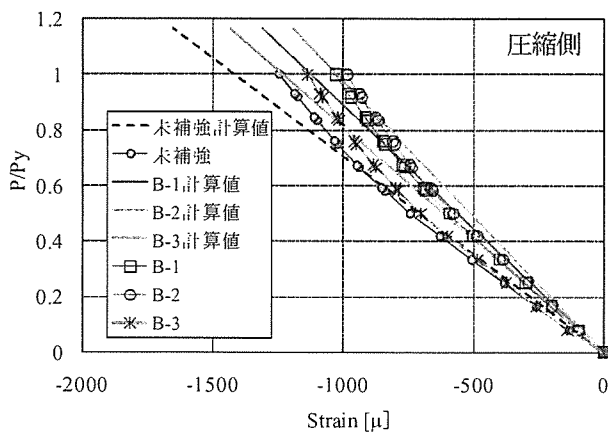


図-9 供試体 B の曲げ試験結果

ここで,

- e_i : 任意の位置のひずみ
- M : 曲げモーメント
- E_s, E_{cf} : 鋼材, CFRP の弾性率
- I_{s+cf} : 合成断面の断面二次モーメント
- I_s, I_{cf} : 鋼材, CFRP の断面二次モーメント
- A_{cf} : CFRP の断面積
- y_i : 中立軸から任意の位置までの距離
- e_{cf} : 中立軸から CFRP 図心までの距離

同図より, 総目付量の等しい A-1 と A-2 とで同等の補強効果が得られる結果となっていることがわかる. さらにそれらの補強効果は CFRP シートと鋼材の合成部材の計算値と一致する.

図-9 に供試体 B の荷重-ひずみ関係を示す. 同図より, CFRP シートの補強効果は CFRP シートの目付量の増加に応じた補強効果が得られていることがわかる. その補強効果は CFRP シートと鋼材の合成部材の計算値とほぼ一致する.

引張側, 圧縮側ともに荷重-ひずみ曲線は若干の非線形性を示している. 引張側の非線形性は高弾性型炭素繊維が応力が高くなると徐々に弾性係数が大きくなる非線形な材料特性をもつことに起因するものと思われる. 圧縮側は炭素繊維の荷重-ひずみ曲線の圧縮側の傾きは徐々に小さくなっていくにもかかわらず, 本実験結果では傾きが大きくなっている. これは, 未補強部(図-3 S 断面)の圧縮側の荷重-ひずみ曲線が荷重が増加すると剛性が高くなる非線形性が認められることから, 上フランジでは圧縮荷重が大きくなるとフランジの面外変形が生じていたなど幾何学的非線形性の影響が考えられる.

表-4 に鋼材の降伏荷重を約 1.7 で割った $P/P_y=0.6$ と, その 1.5 倍である $P/P_y=0.9$ での未補強に対する補強後の低減率 (R_{exp}) と, CFRP シートと鋼材の合成部材の計算値による低減率 (R_{cal}) および, 計算値の低減率に対する実験値の発現率 (R_{exp}/R_{cal}) を示す. 同表より, 低減率の発現率は約 90%以上を示し, CFRP シートで補強した鋼材のひずみは CFRP と鋼材の合成断面として計算可能であることが示された. また, $P/P_y=0.6$ より $P/P_y=0.9$ のほうが高い発現率であることがわかる. これは, CFRP 補強鋼板の荷重-ひずみ曲線の傾きが, ひずみが大きくなるにつれ大きくなるためと考えられる. 圧縮側では, ひずみ低減率の発現率が $P/P_y=0.6$ で 63~113%とばらつきが大きく, $P/P_y=0.9$ では 100~168%と荷重が高い方が発現率が高くなっている. これは先にのべたように無補強断面での鋼材ひずみの非線形性が影響しているものであり, 圧縮側のひずみ低減率については今後さらに検討を行っていく予定である.

表-4 ひずみ低減率

(a) 引張側

	ひずみ低減率 (%)			低減率の発現率	
	実験 R_{exp}		計算 R_{cal}	R_{exp}/R_{cal} (%)	
	$P/P_y=0.6$	$P/P_y=0.9$		$P/P_y=0.6$	$P/P_y=0.9$
A-1	11.3	12.0	10.9	103	110
A-2	10.2	11.4	11.4	90	100
A-3	6.7	7.1	7.1	94	99
B-1	20.2	23.2	20.7	98	112
B-2	24.6	27.8	27.9	88	100
B-3	13.2	17.2	13.3	99	130

(b) 圧縮側

	ひずみ低減率 (%)			低減率の発現率	
	実験 R_{exp}		計算 R_{cal}	R_{exp}/R_{cal} (%)	
	$P/P_y=0.6$	$P/P_y=0.9$		$P/P_y=0.6$	$P/P_y=0.9$
A-1	6.9	10.9	10.9	63	100
A-2	8.3	12.2	11.4	73	107
A-3	8.0	12.0	7.1	113	168
B-1	17.3	25.3	20.7	83	122
B-2	20.5	28.7	27.9	73	103
B-3	11.0	21.6	13.3	83	163

5. まとめ

以下に本研究で得られた結果をまとめる.

- ・引張試験結果より, CFRP プレートで補強した供試体では, 降伏荷重の約 30~60%で CFRP が剥離したのに対し, CFRP スtrandシートおよび炭素繊維シートでは降伏荷重まで剥離は発生しなかった. また, CFRP 補強鋼板は剥離までは合成断面として計算可能であることが示された.
- ・梁曲げ載荷試験結果より, 高目付の CFRP スtrandシートを貼付した場合でも, 従来の炭素繊維シート補強と同様に, 剥離することなく積層数に応じた補強効果が得られることが確認できた. また, 荷重とひずみの関係は CFRP と鋼材の合成部材の計算値と近い値を示したことから, CFRP スtrandシート鋼製梁は合成断面として設計可能であることが示された.

参考文献

- 1) 杉浦, 大垣, 長井, 小林: 炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼部材部分補強に関する研究: 土木学会第 60 回年次学術講演論文集, 2006.9
- 2) 小林, 佐藤, 高橋: スtrandシート, CFRP プレート, 炭素繊維シートによる RC はりの曲げ補強効果: 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集 V, pp763-764, 2007.9
- 3) 杉浦, 小林, 大垣, 稲葉, 富田, 長井: 鋼部材腐食損傷部における炭素繊維シート接着方法に関する解析的検討: 土木学会論文集 A, vol.64, No.4, pp806-813, 2008