

CFRP 板補強鋼桁の耐荷力に関する実験的研究

Experimental study on strength of steel girders strengthened by CFRP strips

○伊藤 久継*, 野阪 克義**, 鈴木 研二***, 伊藤 満****
Hisatsugu Ito, Katsuyoshi Nozaka, Kenji Suzukawa, Mitsuru Ito

*工修, 前田建設工業(株) (〒102-8151 東京都千代田区富士見 2 丁目 10 番 26 号)

**Ph.D., 立命館大学講師, 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

***東レ株式会社 機能資材・商品開発センター (〒520-2141 大津市大江 1-1-1)

****工博, 立命館大学教授, 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

In this study, I-shaped steel girders were strengthened by bonding Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) strips onto the web and compression flange plates and were tested under three point bending condition in order to investigate the strength improvement. Parameters were 1) the web slenderness ratio, 90 and 120, and 2) application of strengthening by CFRP strips.

The results indicated that the maximum strength of the girder was increased by a factor of approximately 1.14 relative to the specimens without strengthening. The strength improvement was achieved mainly due to the restraint on the web local buckling by the bonded CFRP strips onto the web plate; as a result, both strengthened specimens reached their peak moments at the same time when the peeling failure of the CFRP strips occurred. In addition, a slight improvement on the plastic rotation capacity was observed in the specimen having the web slenderness ratio 90.

Key Words: AASHTO LRFD 法, CFRP, 塑性変形能, 接着剤

AASHTO LRFD Procedures, CFRP, Plastic rotation capacity, Adhesive

1. はじめに

近年, 我が国の道路橋示方書も許容応力度設計法から性能照査型設計法へと移行しつつある. この性能照査型設計法の利点として, 構造物が持つべき性能さえ満たしていれば, 自由な設計を行うことが可能な点が挙げられる. このような性能照査型設計法の一例として, 米国の荷重抵抗係数設計 (Load and Resistance Factor Design: LRFD) ¹⁾法がある.

LRFD 法は, それまでは建築構造物に適用されていたが, AASHTO (The American Association of State Highway and Transportation Officials) によって, 1994 年に橋梁構造物への適用も認められた設計法である. この設計法は, 各限界状態に対して荷重, および抵抗係数を定めているのが大きな特徴である. さらに, ある一定の幅厚比制限値を満足している断面であれば, 非弾性設計法の使用を認めている.

LRFD 法の非弾性設計においては, 連続桁の中間支点上断面に対し, 塑性域までの変形を認め, 崩壊メカニズム形成に対して照査を行っている. そのため, 桁に十分な塑性回転容量が要求され, 幅厚比制限値が

設けられている.

AASHTO は 2004 年度の LRFD 改訂版 ²⁾において, 非弾性設計法が適用可能なウェブ幅厚比をそれまで以上に大きくしており, 断面の薄肉化の方向に進んでいる. しかしながら, 非弾性設計法が適用できる断面は, 許容応力度設計に用いられる断面と比較して厚肉であることが多い. 非弾性設計法が通常のプレートガーダータイプの断面にも適用可能となれば, 適用支間長の増大とともに薄肉断面化による軽量化, および設計の合理化を期待することができると考える.

一方, 近年, 鋼構造物の長年の供用による老朽化が指摘されており, それらの補修・補強が問題となってきた. その補修・補強の一つの手段として, 炭素繊維強化樹脂 (CFRP) 板を用いた手法が研究されてきている. CFRP とは, カーボン繊維をエポキシ, ポリイミドなどのマトリックス樹脂で成形・加工して製作したもの ^{3), 4)}であり, その特徴に, 軽量, 高弾性, 高強度, 振動衰減性, 耐食性・耐薬品性・耐候性が挙げられる. 現在, CFRP は高価であるという短所を持っているが, 使途が広がり, 大量生産されるようになれば将来的に安価になる可能性がある.

The diagram shows a horizontal beam with a triangular load applied to its top surface. The load is represented by a triangle with its peak at the center. The base of the triangle is labeled L on both sides of the center. An upward arrow labeled P (載荷荷重) is shown at the center of the beam. The beam is supported by two points, each indicated by a vertical line with a horizontal bar at the top. An upward arrow labeled R (支点反力) is shown at the center of the beam, between the two support points. The beam is labeled with L on both sides of the center. A label P (載荷荷重) is at the bottom center. A label R (支点反力) is at the center of the beam, between the two support points. A label L is on the left side of the beam, and another L is on the right side. A label P (載荷荷重) is at the bottom center. A label R (支点反力) is at the center of the beam, between the two support points.

CFRP 板接着による鋼構造物補強の一例として座屈問題への適用がある⁵⁾。補強された鋼板では、CFRP 板接着により断面が増加し、座屈荷重の増加が見込まれる。また、鋼部材の局部座屈発生後も弾性状態を保つ CFRP 板によって、座屈後の耐力低下の抑制も期待できると考えられる。

本研究では、主に部材の局部座屈により耐力が決定される鋼 I 桁部材の塑性変形能および耐力増加に、CFRP 接着補強が効果的であるかを検討するため、CFRP 板を接着した供試体の静的載荷実験を行った。

2.1 供試体概要

供試体は、全断面に SM400A 鋼材を用い、無補強の桁を N シリーズ、CFRP 補強を行った桁を S シリーズとした(表-1). 表中、カッコ内の数値は設計寸法を示す。

$$\frac{b_f}{2t_f} \sqrt{\frac{F_{yc}}{345}} \leq 9.2 \quad (1)$$

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \sqrt{\frac{F_{yc}}{345}} \leq 90.5$$

ここで, b_f : フランジ幅, F_{vc} : フランジ降伏応力, t_f :

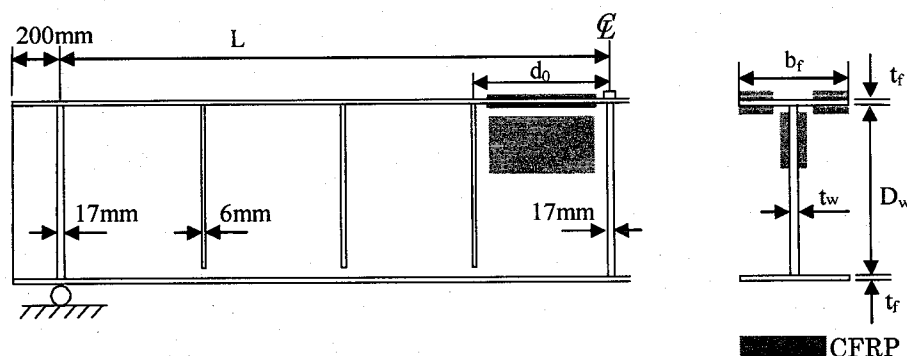


図-2 供試体概略図

表-1 供試体実測(設計)寸法

Specimen	b_f (mm)	t_f (mm)	D_w (mm)	t_w (mm)	L (mm)	d_0 (mm)	$\frac{b_f}{2t_f} \sqrt{\frac{F_{yc}}{345}}$	$\frac{D_w}{t_w} \sqrt{\frac{F_{yc}}{345}}$
N-90	175.2(176)	11.2(11)	615.8(617)	6.3(6)	1935(1940)	483(485)	6.8(7.0)	85.4(90)
S-90	174.6(176)	11.2(11)	614.3(617)	6.2(6)	1938(1940)	488(485)	6.8(7.0)	87.2(90)
N-120	192.6(193)	12.1(12)	826.0(828)	6.1(6)	2597(2600)	648(650)	6.9(7.0)	118.7(120)
S-120	191.5(193)	12.1(12)	825.5(828)	6.1(6)	2604(2600)	647(650)	6.9(7.0)	117.5(120)

表-2 CFRP 補強長さ

Specimen	X	Y
S-90	375	150
S-120	540	200

(mm)

表-3 材料特性

	ヤング係数	ポアソン比	引張強さ
	N/mm ²		N/mm ²
ML520	280000	0.3	1500
DP460	1500		35

フランジ厚, t_w :ウェブ厚, および D_{cp} :圧縮ウェブ深さである。

供試体は, フランジとウェブの幅厚比を前述の選定した値とするために, 予め使用鋼材の引張試験を行い, 降伏強度を計測した後に供試体製作寸法を決定した(3.1 参照)。

その他の断面特性値については, 以下のように, AASHTO の非弾性設計法基準の原案作成のもととなっている実験的研究^{6)~8)}を参考に選んだ。フランジ全断面積 $A_f (=2b_f \times t_f)$ とウェブ断面積 $A_w (=D_w \times t_w)$ の比は, $A_f / A_w \approx 2.0$, 半スパン長 L と腹板高さ D_w の比は, $L/D_w = 3.05$, 中間支点上断面(荷重載荷点)の最大せん断力 V_{max} と降伏せん断力 $V_p (V_p = 0.58F_{yw}A_w, F_{yw} = \text{腹板の降伏強度})$ の比は, $V_{max}/V_p = 0.50 \sim 0.54$ にそれぞれ選んだ。

2.2 供試体補強方法

図-3 に示すように, 供試体はウェブ, およびフランジの圧縮を受ける範囲にCFRP板を接着することにより補強した。一般に, 薄肉の板要素で構成されている曲げを受ける I 型断面桁は, 無補強の場合, 圧縮を受けるウェブ, およびフランジにおける局部座屈発生により耐力が低下していくことが知られており, 補強による局部座屈の抑制を目的として補強箇所を選んだ。

接着補強箇所は, 図-3 および表-2 に示すように, 支間中央(載荷点)と隣接する垂直補剛材に囲まれるウェブパネルのウェブ圧縮側両面, そして垂直補剛材間

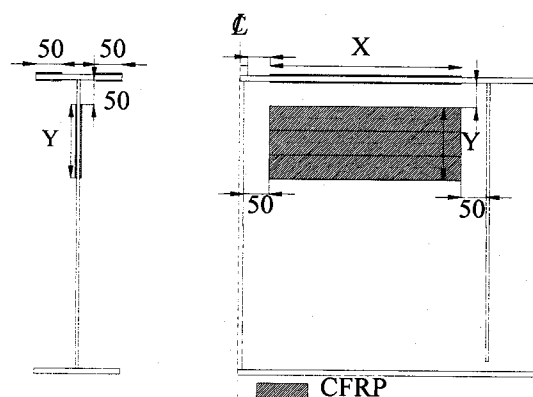


図-3 CFRP 補強箇所

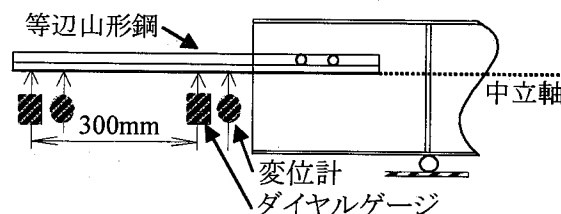


図-4 回転角測定

の圧縮フランジ両面である。これは, 想定した連続桁中間支点上補剛材の両側のウェブパネルである。

本研究では局部座屈抑制効果を確認するため, 引張を受けるウェブおよびフランジには CFRP を接着していない。また, 引張側フランジ外側にはコンクリート床版等が存在する場合が多く, 補強が不可能である場合を想定した。

CFRP1 枚の厚さは 2mm, 幅は 50mm であり, それ以上の範囲を補強する場合には複数枚接着した。また, 施工性を考え, 補剛材から約 50mm 離して接着した。

供試体補強に用いた材料の材料特性⁹⁾を表-3 に示す。CFRP は, トレカミレート ML520(東レ)を用い, 接着剤は, 2 液混合型エポキシ系接着剤 DP460(住友 3M)を用いた。表中, DP460 の引張強さは引張せん断強さを示す。

本実験で用いた接着剤については, 鋼板に本実験で用いられているものと同等の CFRP 板を接着し, 引張

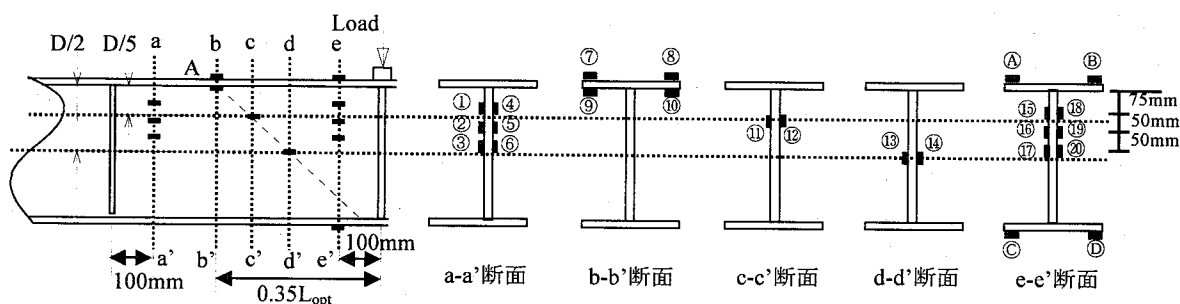


図-5 ひずみゲージ取り付け位置

表-4 引張試験結果

鋼材	板厚 t (mm)	断面幅 b (mm)	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	弾性係数 E (kN/mm ²)	$\varepsilon_{st}/\varepsilon_y$	E/E _{st}	破断時の 伸び率 (%)
SM400A(6)	6.1	40.1	309.3	447.0	207.8	19.7	55.8	25.0
SM400A(11)	11.1	40.1	263.8	418.8	205.5	16.1	50.3	28.0
SM400A(12)	12.1	40.2	260.9	413.8	205.2	14.9	50.5	27.0
ε_y :降伏ひずみ、 ε_{st} :ひずみ硬化開始ひずみ、E _{st} :ひずみ硬化係数								

試験を行い、剥離強度の検討を加えた結果が著者らによって報告されている^{10)~12)}。この中で、本実験で用いられる接着剤は、フランジ鋼材の厚さ、降伏強度を考慮すると、鋼材の降伏まで剥離しないものと考えられる。しかしながら、鋼材降伏後の挙動については未だ明確に把握されていない。また、本実験では圧縮力を受けている点が報告されている研究と異なる点である。

2.3 載荷方法

供試体の載荷形式は、単純ばり形式の中央一点載荷とした。載荷は、計算降伏荷重近くまでは荷重をほぼ等間隔で増加させる荷重制御で行い、その後は変位制御で行った。曲げモーメント-塑性回転角曲線におけるモーメント降下域のデータを多く取るため、座屈発生後もできる限り載荷を続けた。横ねじれ防止装置は、すべての供試体でLRFD法¹⁾における制限値の約45%の位置に設置した。

試験桁の回転角 θ は、図-4に示すような装置を用いて計測した。供試体の両端部に等辺山形鋼(70×70×900×6)を、その一边が桁の全断面塑性時の中立軸位置にくるように取り付け、変位計(データロガーによる計測)およびダイヤルゲージ(目視による計測)を300mm間隔で設置し、変位差より回転角を求め、両端の回転角を合計した。

図-5は、供試体のひずみゲージ貼付け位置である。図中の L_{opt} はフランジ座屈波長¹⁰⁾である。ゲージ①～⑥、⑮～⑳はCFRPの表面であり、Sシリーズのみに貼付けた。S-90ではCFRPを3枚並べたため、ゲージも各1枚ずつ、片側3枚貼付けたが、S-120ではもう1枚増やし、片側4枚ずつ貼付けた。

3. 実験結果

3.1 引張試験結果

JIS規格1A号試験片(材質:SM400A, 板厚:6mm, 11mm, 12mm)を、供試体製作前に各板厚3本ずつ製作し、引張試験を行った。得られた結果の平均値を表-4に示す。

SM400Aの公称降伏応力は235N/mm²とされていることから、今回の供試体に用いた鋼材は公称降伏応

表-5 M_p , θ_p , M_{max}

Specimen	M_p (kN·m)	θ_p (rad)	M_{max} (kN·m)
N-90	511	0.00968	507
S-90	503	0.00969	577
N-120	830	0.00975	787
S-120	827	0.00980	901

表-6 局部座屈荷重

Specimen	P_{cr} (kN)		P_{max} (kN)	P_{cr}/P_{max}
	Flange	Web		
N-90	524	468	524	0.89
S-90	584 (max後)	596	596	1.00
N-120	580 (max後)	602	607	0.99
S-120	688 (max後)	692	692	1.00

力を確保しているといえる。

3.2 曲げモーメント-塑性回転角曲線

図-6に幅厚比90シリーズ、図-7に幅厚比120シリーズの曲げモーメント-回転角曲線を示す。縦軸に支間中央の曲げモーメント M を、横軸に試験桁の全回転角 θ を、それぞれ全塑性モーメント M_p 及びその時の回転角 θ_p で無次元化したものを示してある。 M_p , θ_p はいずれも無補強の桁から算出したものであり、載荷試験により得られた最大曲げモーメント M_{max} とともに表-5に示す。また、図中の実線 M_{pe}/M_p は有効塑性モーメントを塑性モーメントで無次元化したものである。

有効塑性モーメント M_{pe} とは、フランジとウェブの幅厚比制限値がAISCの塑性設計基準の限界値に等しい時、全塑性モーメント M_p に等しく、幅厚比がそれ以上に増加するにつれ、 M_p 以下に減少する低減塑性モーメントである。 M_{pe} は、塑性設計に適用されていたような厚肉断面よりも薄肉断面においても、非弾性設計が適用できるようにするために取り入れられたものであり、塑性回転容量はこの M_{pe} を基準に求められる。

これらより、90, 120シリーズともに、補強により約1.14倍の最大耐力の増加がみられる。また、最大耐力到達後、S-90はN-90に比べて曲線の傾きが緩やかであることもわかり、補強による塑性変形能の改善が可能であると考えられる。

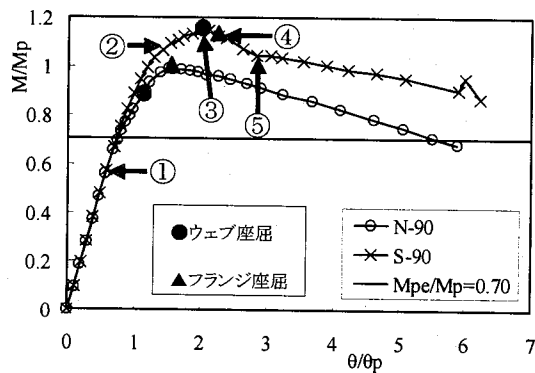


図-6 $M/M_p-\theta/\theta_p$ 曲線 (90 シリーズ)

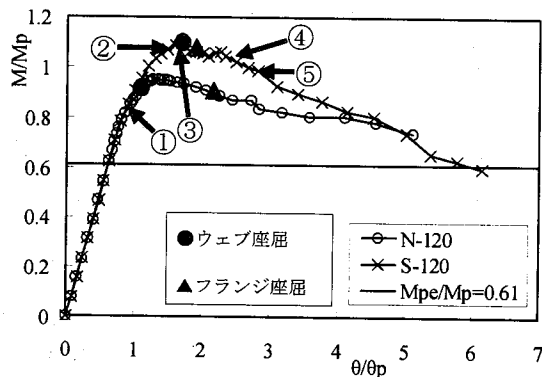


図-7 $M/M_p-\theta/\theta_p$ 曲線 (120 シリーズ)

3.3 座屈荷重及び剥離荷重

3.3.1 座屈荷重

表-6 に局部座屈荷重を示す。表中、 P_{cr} は局部座屈荷重を示し、 P_{max} は最大荷重を示す。また、座屈発生順序を図-6、図-7 に併せて示してある。局部座屈荷重は、ひずみゲージの値より求めた。

これらより、補強前後において座屈の順序(ウェブ→フランジ)は変わっていないが、補強により座屈荷重が増加し、ウェブ座屈発生時に最大耐力を示していることがわかる。S シリーズにおいては、ウェブ座屈発生後耐力が低下していき、フランジの座屈が発生したことが確認された。補強された供試体においては、載荷点を中心に片方のパネルのみに座屈が発生したことを注記しておく。

CFRP 接着補強により、ウェブ局部座屈荷重が増加し、その結果、補強桁は無補強桁に比べて最大耐力が約 1.14 倍と増加したと考えられる。この局部座屈抑制は薄肉断面に対しても同様に有効であると考えられ、無補強においてはその全塑性モーメントに達する事のできない薄肉断面の最大耐力を、補強により無補強桁の全塑性モーメントにまで引き上げる事も可能であると考えられる。

3.3.2 剥離荷重

CFRP の剥離荷重を、実験中の目視による観察結果

表-7 理論降伏時の M/M_p

Specimen		M/M_p		M/M_p
N-90	フランジ降伏	0.85	ウェブ降伏	0.91
S-90	引張フランジ降伏	0.89	引張ウェブ降伏	0.97
	圧縮フランジ降伏	1.05	圧縮ウェブ降伏	1.12

Specimen		M/M_p		M/M_p
N-120	フランジ降伏	0.85	ウェブ降伏	0.90
S-120	引張フランジ降伏	0.87	引張ウェブ降伏	0.95
	圧縮フランジ降伏	1.03	圧縮ウェブ降伏	1.09

表-8 ひずみの低減率

理論値	M/M_p	0.20	0.50	0.75	0.95
90シリーズ	圧縮		24.5		42.7
	引張		5.4		23.5

実験値	M/M_p	0.19	0.47	0.77	0.94
90シリーズ	圧縮	25.6	28.8	68.3	79.3
	引張	0.8	0.7	45.4	72.5

理論値	M/M_p	0.20	0.50	0.75	0.95
120シリーズ	圧縮		22.7		40.8
	引張		3.9		20.4

実験値	M/M_p	0.15	0.55	0.79	0.96
120シリーズ	圧縮	34.1	34.1	69.2	71.5
	引張	2.5	3.0	1.5	32.8

(%)

と、CFRP のひずみデータより求め、曲げモーメント-回転角曲線に剥離の進行状況を併せて示してある(図-6、図-7)。

CFRP の剥離は、図に示す①から⑤の順番で観察された。①で割れるような音が始まり、②では CFRP と鋼材の間に小さな隙間が確認され、③の最大荷重時にフランジに接着された CFRP に顕著な剥離が観察されるとともに、ウェブ座屈が発生した。その後、90 シリーズにおいてはウェブ CFRP の剥離(④)からさらなるフランジ CFRP の剥離(⑤)と続き、120 シリーズにおいては、フランジ CFRP の剥離(④)からウェブ CFRP の剥離(⑤)へと進行していった。

フランジでは、上フランジ上側(座屈変形で凸側)に貼り付けた CFRP の載荷点付近の端部から先に剥離し、次に下側が剥離した。ウェブでは正面から見て裏側(座屈変形で凹側)の載荷点側の端部から剥離が観察された。ここで正面とは、垂直補剛材が付いている側である。

以上より、補強桁においては最大耐力時にフランジ、ウェブに接着された CFRP 端部がほぼ同時に剥離することから、CFRP 接着補強により最大耐力が増加したことが明確となった。

一般に、CFRP 接着による補強の場合、CFRP の剥離と同時に急激に耐力を失うことが懸念されるが、本実験結果の限りではそのような急激な耐力の低下は見られず、CFRP の剥離後、無補強の桁と同様、局部座屈の進展とともに徐々に耐力を失っていった。この点は、CFRP 板接着補強を施工しても、脆性的な破壊形態に

なることはなく、補強工法として有利な点であると考えられる。

3.4 補強によるひずみの低減

補強によるひずみの低減を検討するため、理論値を求め、実験結果と比較・検討を行った。理論値では、上フランジの上側(CFRPを接着している場合はCFRP)のひずみを仮定し、圧縮力と引張力の釣り合いより、中立軸を算出し、曲げモーメントを求めた。断面内各点のひずみは、ひずみの直線分布を仮定し算出した。

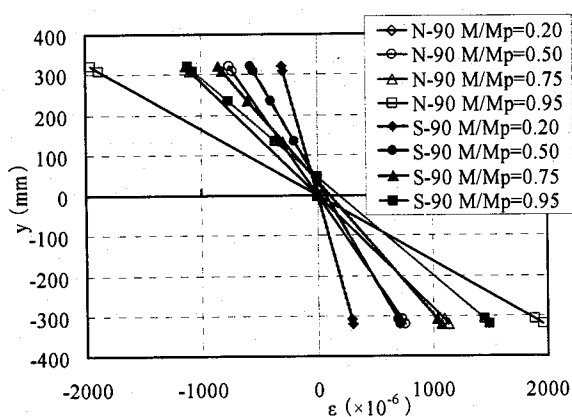


図-8 ひずみ分布(理論値)

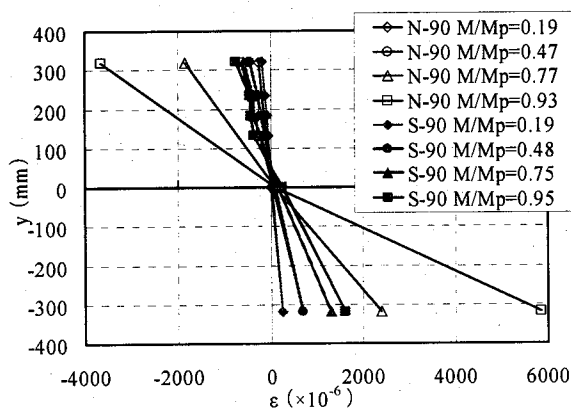


図-9 ひずみ分布(実験値)

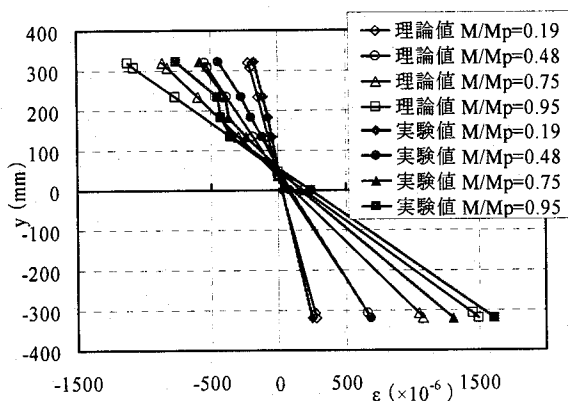


図-10 ひずみ分布の比較(S-90)

3.4.1 理論降伏時の M/M_p

表-7 に、断面各部が降伏する時の、載荷点での M/M_p 値を示す。補強することで圧縮側の降伏が $M/M_p=1.0$ 以降となることがわかる。また、幅厚比による変化はほとんど見受けられず、最大耐力増加率が同程度となった点を裏付けているものと考えられる。

3.4.2 ひずみの低減の比較

図-8, 9, 10 に、90 シリーズの理論値のひずみ分布、実験値のひずみ分布、およびS-90 の実験値と理論値の比較を示す。縦軸はウェブの中心からの距離、横軸はひずみである。実験値のひずみは、載荷点から100mm、すなわちCFRPの端から50mmの位置にあるゲージ(図-5中e-e'断面のゲージ)の値を用いた。前述の通り、実験では正面から見て右側のパネルのみが座屈したため、右パネルの値を実験値とし、参考として $M/M_p=0.2, 0.5, 0.75, 0.95$ に近い荷重時の値を用いた。

表-8 に、式(2)より計算されるひずみの低減率を、圧縮フランジ、引張フランジにおいて示す。理論値は、 $M/M_p=0.2, 0.5, 0.75, 0.95$ 時の低減率を用いた。式中、 ε_N :Nシリーズのひずみ、 ε_S :Sシリーズのひずみである。

$$\left(\frac{\varepsilon_N - \varepsilon_S}{\varepsilon_N} \right) \times 100 \quad (2)$$

表-8 より、理論的には、90, 120 シリーズ共に $M/M_p=0.75$ までは一定の割合(24.5%, 22.7%)でひずみが低減されるが、一部の鋼断面が降伏した後の $M/M_p=0.95$ では低減率が大きくなることがわかる。これは、鋼材が降伏した後もCFRPは弾性であることが原因である。圧縮側のほうが低減率は大きい、引張側も同じ傾向にある。

一方、実験値においては、荷重の増加とともにひずみの低減率が増加する傾向は理論値と同じであるが、圧縮側の低減率は理論値より著しく大きくなっていることがわかる。S-90, $M/M_p=0.77$ においては理論値24.5%に対して実験値は68.3%である。しかし、図-8と図-9を比較すると、荷重が大きい範囲では、実験値のひずみは理論値に比べて、著しく大きいことがわかる。この点が低減率の違いの主な原因と考えられる。

S-90 における実験値と理論値の比較(図-10)より、圧縮側、引張側両方のひずみが理論値に比べ小さく(低減率大)、載荷が進むにつれてその差が大きくなっていることがわかる。 $M/M_p=0.95$ において、圧縮側ひずみの実験値は理論値の約65%である。また、理論値では断面内のひずみ分布は直線分布を仮定していたが、実験値では直線分布となっていない。

鋼断面一部降伏以後の理論値と実験値との違いは、この理論値で仮定したひずみの直線分布が原因とも

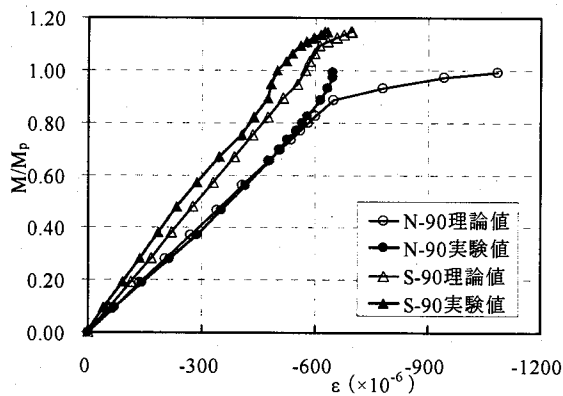


図-11 $M/M_p - \epsilon$ 曲線(フランジ上側)

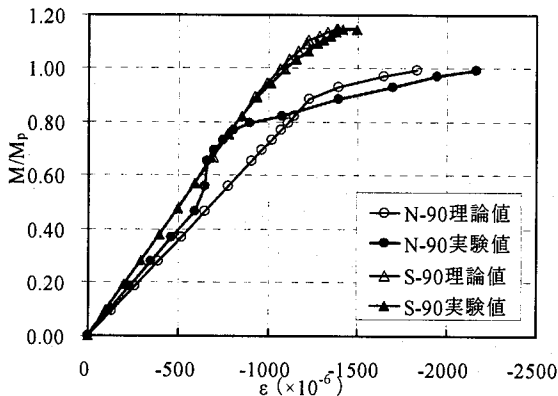


図-12 $M/M_p - \epsilon$ 曲線(フランジ下側)

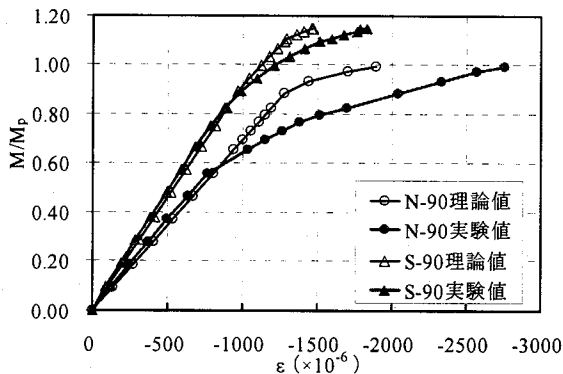


図-13 $M/M_p - \epsilon$ 曲線(ウェブ)

考えられるが、実験で計測されたひずみにも原因があると考えられる。実験値として用いたひずみは、CFRP 端部から 50mm の位置で計測されたものであり、接着剤の降伏など、鋼材から CFRP への力の伝達が変化した影響を受ける可能性もある。

3.4.3 CFRP 中央に近い点での比較

前節において、CFRP 端部から 50mm のひずみを用いて理論値との比較を行ったが、圧縮側では理論値との違いがみられた ($M/M_p=0.95$ において、圧縮側ひずみの実験値は理論値の約 65%)。ここでは、中央に近

い点で計測されたひずみデータを用いて理論値との比較を行う。実験値としては、CFRP 端部から 400mm (フランジ: 図-5 中 b-b' 断面)、および 100mm (ウェブ: 図-5 中 d-d' 断面) の位置に貼り付けたゲージの値を用い、理論値も同じ点での値を用いた。

図-11~13 に、幅厚比 90 シリーズの曲げモーメント-ひずみ曲線を、最大モーメント時まで示す。それぞれ、図-11 にはフランジ上部、図-12 はフランジ下部、図-13 はウェブのひずみを示す。縦軸は試験桁の支間中央の曲げモーメント M を、全塑性モーメント M_p で無次元化したものであり、横軸はひずみである。 M_p は無補強の桁から算出した。前節と同じ理由により、右パネルの値を実験値として示してある。

これらのグラフより、弾性域では、実験値は理論値とほぼ同じ値を示していることがわかる。また、S シリーズにおいては最大モーメント付近まで実験値と理論値がおおよそ一致している。これは、前節で見られた結果とは異なり、CFRP のひずみ計測位置による違いが明らかとなった。

図-12 および 13 において、N シリーズではフランジ下側およびウェブにおいて、 $M/M_p=0.5$ 付近から実験値が理論値と著しく異なる値を示しているが、これは、初期たわみにより、板の面外変形が早期に顕著となったためであると考えられる。

以上より、CFRP 内側のひずみは、弾性域では理論値と実験値の誤差が小さく、弾性域では理論的にひずみの低減を予測することが可能であると言える。また、CFRP 上のひずみ計測位置も重要である。

4. 結論

本研究では、鋼 I 型断面桁の耐荷力および塑性変形能改善に CFRP 接着が適用できるか検討する事を目的とし、AASHTO LRFD 法に基づいて設計した供試体を製作し、CFRP 板接着により補強を行ったものと、無補強の桁の静的荷重試験を行った。

本研究により得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 約 1.14 倍の最大耐力の増加がみられ、厚肉断面、非厚肉断面の両方で、CFRP 板接着が最大耐力改善に効果的である。
- (2) 本実験の範囲においては、補強を行うことにより、主にウェブ局部座屈の発生を抑制でき、補強桁においては CFRP の剥離と同時に耐力が低下する。
- (3) CFRP 剥離後も急激に耐力を失うことなく、徐々に耐力が低下していった。
- (4) 本実験の範囲においては、CFRP 補強によるひずみの低減は、理論値によりほぼ推測できる。
- (5) CFRP 接着補強は、理論的に考えられるより鋼桁のひずみを低減でき効果的である。

謝辞

供試体製作にあたり、富士車輛株式会社から多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications, 2nd Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1998.
- 2) AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications, 3rd Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2004.
- 3) 日本材料科学会：先端材料シリーズ 複合化と材料, 1993.
- 4) 三木光範・福田武人・元木信弥・北條正樹: 機械システム入門シリーズ 8 複合材料, 1997.
- 5) 汐待・宇井・西村・鈴木: 炭素繊維強化樹脂板を接着した圧縮鋼板の座屈解析, 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集, 2001.
- 6) M. A. Grubb and P. S. Carskaddan: Autostress Design of Highway Bridge: phase 3. Initial Moment-rotation Test, AISI Project 188, Am. Iron and Steel Inst., Washington, D. C., 1979.
- 7) M. A. Grubb and P. S. Carskaddan: Autostress Design of Highway Bridges, phase 3, Moment-rotation Requirements. , AISI Project 188, Am. Iron and Steel Inst., Washington, D.C., July, 1981.
- 8) C. G. Schilling: Autostress Design of Highway Bridges, phase 3, Moment-rotation Tests of Steel Bridge Girders, AISI Project 188, Am. Iron and Steel Inst., Washington, D.C., April, 1985.
- 9) 東レ株式会社: トレカミネート工法技術資料 -CFRP 板によるコンクリート構造物の補修・補強-.
- 10) 野阪克義, 古川喬朗, 金子大昨, 鈴川研二, 西出靖: CFRP 接着において被着体厚さが補強効果に与える影響に関する実験的研究, 鋼構造論文集, Vol. 10, No. 36, pp. 61~68, 2003.
- 11) K. Nozaka, T. Furukawa, and K. Suzukawa: Experimental Study of Steel Plates in Tension with CFRP Strips, Proceedings of IABSE Symposium: Metropolitan Habitats and Infrastructure, IABSE, pp.370-371, 2004.
- 12) K. Nozaka, T. Furukawa, and K. Suzukawa: Strengthening Effects of Bonding CFRP Strips onto Steel Plates in Tension, Proceedings of Second International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, October, 2004.
- 13) M. G. Lay and T. V. Galambos: Inelastic Beams under Moment Gradient, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.93, No. ST1, pp. 381-399, February, 1967.

(2005 年 9 月 10 日受付)