

CFRP 板接着補強が I 形断面桁の変形能に与える影響に関する解析的研究

立命館大学理工学部 正会員 ○野阪 克義
立命館大学理工学部 正会員 伊藤 満

1. はじめに

炭素繊維強化樹脂（CFRP）板接着による鋼板補強の一例として座屈問題への適用がある¹⁾。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、また、座屈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が期待できると考えられる。局所的な CFRP 板接着により桁の塑性変形能を増加することが出来れば、従来厚肉断面にしか適用できなかった非弾性設計法²⁾に対して、より薄肉の断面を用いることが出来るようになる。また、既存橋梁の耐力増加にも有効であると思われる。

本研究では、部材の局部座屈を伴う鋼 I 桁橋の塑性変形能の増加に CFRP 接着が適用できるかどうかを検証するため、有限要素解析を行い 2、3 考察を行った。

2. 解析モデル

解析モデルとして、AASHTO の LRFD²⁾において、非弾性設計を行うために定められているウェブの幅厚比よりも大きな値を持つ供試体を考えた。供試体はウェブの幅厚比を大きくし、フランジは幅厚比制限値内で、試設計において最小重量を与えるものとした。供試体の材料特性と断面寸法を表 - 1、2 に示す。鋼材の応力 - ひずみ曲線は、過去の実験³⁾を参考に 3 直線近似で与えた。また、解析モデルによっては接着剤の降伏応力（35MPa と仮定、弾性 - 完全塑性の 2 直線近似）も考慮に入れ、補強効果に与える影響を考察した。

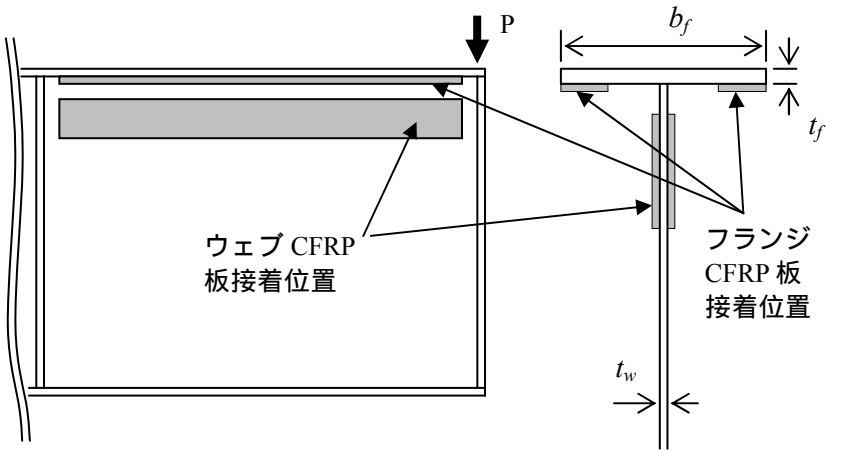


図 - 1 解析モデル概略図

解析には汎用有限要素解析プログラム MARC⁴⁾を用いた。例として HO110 の解析モデル（载荷点付近のみ）を図 - 1 に示す。供試体は中央一点集中载荷される単純桁を想定し、解析モデルは、供試体の対称性を再現する境界条件を支間中央断面に設け、半スパンとした。

载荷は、どちらの供試体も、たわみが最大 50mm に達するまで支間中央に強制変位を与える事によって行った。初期不整として、中心で約 $D_w/250$ の面外変形となるような正弦波の波形を垂直補剛材間のウェブパネルに与えた。垂直補剛材は载荷点及び支点、さらに半スパンを 3 等分する位置に設けた。また、残留応力として、フランジとウェブの交点に引張応力を降伏応力と等しい大きさで与えた。圧縮応力はフランジとウェブが各々自己平衡にあるよう調節して与えた。

CFRP 板の厚さは 2mm、接着剤層の厚さは 1mm とした。CFRP 板を接着する範囲は図 - 1 に示すようにウェブの圧縮側両面と圧縮フランジとし、ウェブ高さの上フランジ側から約 20% の位置までに CFRP 板を接着した。フランジには自由突出幅の約半分を覆うように、片面もしくは両面に接着した。接着長さは図 - 1 に示されている通り、载荷点から一つ目のウェブパネル（700mm）をほぼ覆う長さとした。

表 - 1 材料特性

	Steel	CFRP-1	Adhesive
E_x (MPa)	210000	280000	1500
E_y (MPa)	210000	7000	1500
E_z (MPa)	210000	7000	1500
ν_{xy}	0.3	0.28	0.4
ν_{yz}	0.3	0.3	0.4
ν_{zx}	0.3	0.007	0.4
G_{xy} (MPa)	8100	1000	540
G_{yz} (MPa)	8100	2700	540
G_{zx} (MPa)	8100	1000	540

表 - 2 解析モデルの断面寸法

	t_f mm	b_f mm	t_w mm	D_w mm	F_{yf} MPa	F_{yw} MPa	L mm	$(b_f/2t_f)$ $\times (F_{yf}/345)$	(D_w/t_w) $\times (F_{yw}/345)$	M_p KN-m
HO110	11	125	6	546	520	540	2100	6.98	114	640
HO130	11	125	6	640	520	540	2100	6.98	133	797

E : 弾性係数 ν : ポアソン比 G : せん断弾性係数
 D_w : ウェブ高さ F_{yf} , F_{yw} : フランジ及びウェブの降伏応力

キーワード：炭素繊維強化樹脂板，接着，補強，変形能
連絡先：〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 TEL: 077-566-1111 (ext.8728) FAX: 077-561-2667

3. 解析結果および考察

解析結果を、塑性モーメント(M_p)とその時の回転角(θ_p)で無次元化したモーメント - 回転角曲線によって比較したものを図 - 2~4 に示す。凡例中、“no cfrp”は無補強のモデルを示し、“f1”、“f2”はウェブ及びフランジの片面および両面に CFRP 板を接着したものを示す。これらの記号の後に続く“pl”、“rs”は、接着剤の降伏、および桁の残留応力を考慮した場合を示している。

図 - 2、3 から、無補強の場合、残留応力を考慮することにより最大荷重は低下するが、塑性回転容量に大きな変化は無いことがわかる。さらに、補強された桁の場合、 $M/M_p = 0.8$ 程度までであれば、どのケースにおいても、CFRP 板接着により桁の塑性回転容量が増加していることがわかる。変形の様子から、補強により最大荷重到達後の局部座屈変形が抑制されているのが確認された。

最大荷重も補強により増加しており、その効果は残留応力を考慮した解析モデルの方が大きいことが読み取れる。これは、接着される CFRP 板の厚さ、弾性係数が同じであるため、補強される桁の曲げ剛性が低い(残留応力による)方が補強効果が高くなるためである。

接着剤の降伏を考慮した場合、最大荷重、塑性回転容量とも減少しており、CFRP 板接着による桁の補強を行う場合に重要な要因となることを示している。接着剤の降伏の有無によって、モーメント - 回転角曲線は最大荷重に達する以前に違いが出ており、接着剤の降伏は早い段階で起きている事が分かる。早い段階で降伏する場合、降伏後のじん性が接着剤のはく離崩壊に影響を与えるため、補強に使用される接着剤の材料特性に関する更なる検討も必要であると思われる。

図 - 4 には、HO110 においてフランジの両面に CFRP 板を接着した場合と、片面のみの場合とを比較してある。すべての解析において、残留応力、接着剤の降伏が考慮されている。この図より、両面接着による最大荷重の増加は僅かであるが、片面接着に見られる急激な耐力低下が発生しておらず、塑性回転容量が増加していることが分かる。崩壊形式を比べると、片面接着の場合耐力低下とともに横ねじれ変形が進んでいたが、両面接着の場合には横ねじれ変形はほとんど見られず、載荷点直下付近のウェブの局部変形が顕著となっていた。この結果から、接着される CFRP の枚数(即ち補強フランジの剛性増加率)により崩壊形式が変化することがわかる。

4. おわりに

これらの結果から、CFRP 接着により部材の局部座屈の発生を遅らせることが可能で、塑性変形能を改善出来ることが分かった。また、桁に存在する残留応力は CFRP 板接着においては有利に働く結果となった。今回は接着剤の崩壊、CFRP 板のはく離などについては考慮しなかったが、これらは補強効果にも大きく影響すると思われるので今後検討が必要である。また、実際に供試体を製作し載荷実験を行い、補強効果を検討する予定である。

<参考文献>

1) 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) 2) AASHTO：LRFD Bridge Design Specifications (1998) 3) 山崎・鈴木・上平・伊藤：SM570 材の非弾性設計法への適用に関する実験的研究，土木学会第 57 回年次学術講演会概要集 (2002) 4) 日本マーク株式会社：MARC User's Manual (2001)

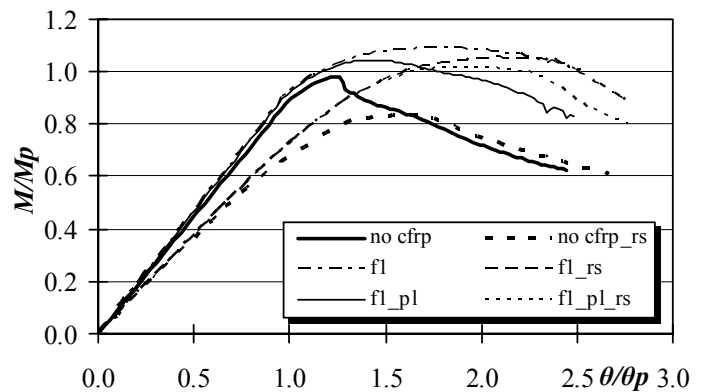


図 - 2 $M/M_p - \theta / \theta_p$ の比較 (HO110)

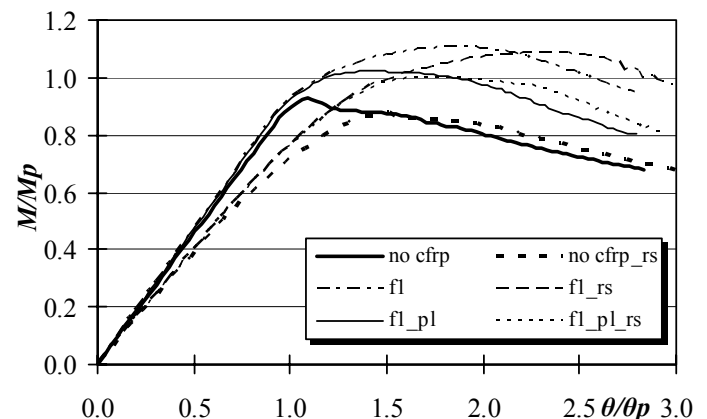


図 - 3 $M/M_p - \theta / \theta_p$ の比較 (HO130)

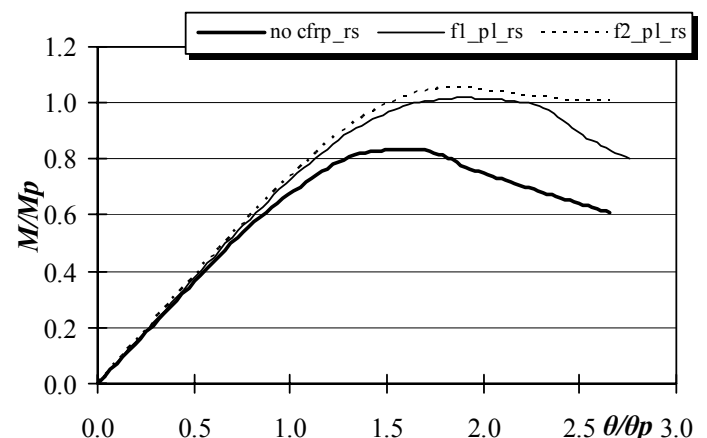


図 - 4 フランジ両面接着の効果 (HO110)