

CFRP 板接着による FRP 桁の高剛性化と実用性に関する検討

パシフィックコンサルタンツ 正会員 ○ Onek Denis Obedi
 首都大学東京大学院 正会員 中村一史・フェロー 前田研一
 東日本旅客鉄道 正会員 柳沼謙一 東レ 正会員 松井孝洋

1. はじめに

近年, 社会基盤構造物の工期短縮や維持管理などが益々土木の重要な課題になっており, 軽量性, 耐食性などの特性を有するガラス繊維強化プラスチック (GFRP) および炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は, これからを合理的に解決するための新素材として注目されている. さらに, 新材料を経済的に効率よく組み合わせて所要剛性を得る手法に関する研究が進められてきた. 本研究では, FRP 桁のたわみ剛度を効果的に高めることを目的として, 桁の上下フランジに高剛性の CFRP 板を接着した FRP 桁の適用支間長を試設計により明らかにする. さらに, CFRP 板を接着した GFRP 桁の模型実験により, 曲げ変形特性および終局挙動を検討する.

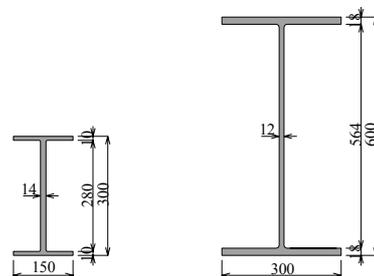
2. 試設計による実構造物への適用性の検討

試設計では, 図-1 に示すように, 引き抜き形成による国内最大断面 (I600) を基本形状とし, 一般的な GFRP と最も剛性の高いハイブリッド FRP を適用した場合を検討した. また, 上下フランジに, 厚さ 2mm の高強度タイプ (S) と高弾性タイプ (M) の CFRP 板を接着 (厚さ 2mm) して高剛性化を図ることとした. 表-1 に材料物性値を示す. 設計条件は, たわみ制限: $L/500$ (活荷重条件: 3.5kN/m^2), 振動使用性: $1.5\sim 2.3\text{Hz}$ の範囲の振動数に抵触しないこと (死荷重条件: 12.2kN/m (上屋等を含む)) である. 有効幅員 4.0m の単径間および 2 径間連続桁形式の歩道橋において, 支間長 L が $12\sim 20\text{m}$ のときに生じる最大活荷重たわみがたわみ制限以下となるのに必要な剛性 (主桁本数) を, Timoshenko はり理論によって算出した. 表-2 に, FRP 桁の必要本数を示す. 同じ支間長であれば, CFRP 板を接着することにより, 主桁の必要本数を減らすことができることが解る. また, 支間長が最大るとき ($L=20\text{m}$), 最低時の固有振動数は, 単径間と 2 径間の場合ともに 3Hz であり, 振動使用性も満たすことを確かめている.

3. 模型実験による GFRP 桁の高剛性化の検証

3.1 実験と解析方法

ここでは, 桁高が小さい GFRP 製の I 形断面桁 ($300\times 150\times 14\times 10\text{mm}$) と高強度の CFRP 板 ($50\times 2\text{mm}$) を使用した. 対象とした試験体の断面と材料物性値を図-1, 表-1 にそれぞれ示す. 試験体は, GFRP 桁のみ (GN), GFRP 桁の上下フランジに, 高強度タイプの CFRP 板を接着したもの (GS) の 2 種類とした. 2 つの試験体は支間長 3000mm の単純桁であり, 載荷条件を 4 点曲げ載荷とし, 載荷位置は両支点から 1000mm



(a) I300 (b) I600
 図-1 対象とした FRP 桁の断面形状

表-1 材料物性値

	GFRP 桁		HFRP 桁		CFRP 板		エポキシ樹脂接着剤		
	I300	I600	I600	高強度	高弾性	シ			
弾性係数 E(GPa)	35.0	28.8	35.0	28.8	65.9	15.7	167	285	1.5
せん断弾性係数 G(GPa)	3.65	3.65	3.65	3.65	3.91	6.68	5.2	5.2	0.6

表-2 FRP 桁 (桁高 600mm) の必要本数

形式	FRP 桁と CFRP 板の組み合わせ	GFRP 桁に対する曲げ剛性比	支間長 L に対する FRP 桁の必要本数 (n)			
			12m	15m	18m	20m
単径間	GFRP	1.00	5	9	-	-
	GFRP+S	1.49	4	7	11	-
	GFRP+M	1.84	3	6	9	12
	HFRP	1.70	3	6	9	12
	HFRP+S	2.19	3	5	7	10
	HFRP+M	2.54	2	4	6	9
2 径間連続	GFRP	1.00	4	8	12	-
	GFRP+S	1.49	3	6	9	11
	GFRP+M	1.84	3	5	7	10
	HFRP	1.70	3	5	7	10
	HFRP+S	2.19	2	4	6	8
	HFRP+M	2.54	2	3	5	7

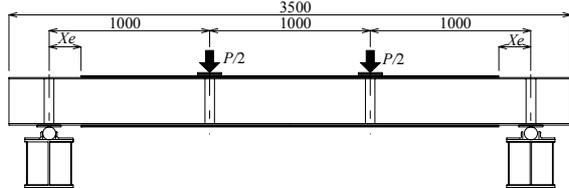


図-2 試験体のセットアップ

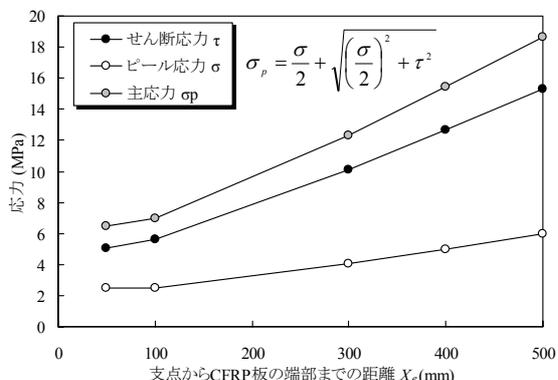


図-3 CFRP 板端部における接着層の応力

Key Words : FRP 桁, CFRP 板, 高剛性化, 接着接合

連絡先* : 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線(4564)

とした。また、GSにおけるCFRP板の定着位置については、汎用有限要素解析ソフト(Marc2005r3)を用い、CFRP板の接着長さを変化させて検討を行った。試験体のセットアップを図-2に示す。試験には、静的載荷能力1000kNの油圧アクチュエータを使用し、変位制御(0.05mm/sec)で載荷を行った。支間中央部の鉛直変位を高感度変位計で、また、中央断面および支点から500mmの断面のひずみをひずみゲージで測定した。

3.2 剛性の向上効果とCFRP板端部の接着特性の検討

試験体が完全な合成断面を形成するものと仮定し、等価曲げ弾性係数を算出した。その値は、GNでは33.2GPaであり、GSでは48.2GPaであった。ちなみに、高弾性タイプ(M)のGMでは63.2GPaとなった。したがって、等価曲げ弾性係数は、GNに対して、それぞれ1.45倍、1.90倍になることが解った。

図-3に、CFRP板の定着位置を支点から50~500mmの範囲で変化させた場合(P=100kN載荷時)におけるCFRP端部の接着層のせん断応力とピール応力(接着面法線方向の応力)および主応力を示す。ピール応力よりもせん断応力の方が大きいこと、また、全ての応力は、CFRP板の定着長さが短くなるほど、ほぼ直線的に増加することが解る。これは、桁の曲げモーメントに起因して生じるためである。したがって、CFRP板の定着位置は支点付近とするのが良いが、ここでは、ソールプレートとの取り合いを考慮して、支点から200mmの位置までとし、CFRP板の接着長さは2600mmとした。

3.3 曲げ載荷実験による検討

図-4に、荷重と支間中央部の鉛直変位の関係を示す。両試験体でTimoshenkoはり理論による値と実験値がほぼ一致することが確認できた。GNの場合、荷重Pが約250kNのとき、等曲げ区間における上フランジ部で曲げ圧縮破壊が生じ、終局となった。一方、GSの場合、荷重Pが約330kNのとき、写真-1に示すように、同じく等曲げ区間における上フランジ部で、片側のCFRP板がはく離した直後に、曲げ圧縮破壊が生じ、終局となった。図-5に、荷重と支間中央断面における上縁ひずみの関係を示す。GSのひずみは、終局まで理論値と一致し、線形挙動を示すが、GNでは、荷重の増加とともに、やや非線形の挙動を示した。終局ひずみは、GSで約4900×10⁻⁶となり、GNの約7200×10⁻⁶に対してかなり小さくなることが解った。図-6に、GSにおける支間中央部断面の垂直ひずみ分布を示す。実験値と理論値はほぼ一致し、終局まで平面保持されることも確かめられた。

4. まとめ

以上のことから、弾性係数の高いCFRP板をFRP桁の上下フランジに接着することによって、桁の曲げ剛性が大きくなることを確認できた。さらに、接着剤が十分な強度を持ち、破壊の直前まで桁断面は平面保持することが確かめられた。したがって、たわみ制限が支配的となるFRP桁を歩道橋として使用する場合、CFRP板接着による高剛性化は極めて有用であるといえた。

本研究を行うにあたり、日本シーカ株式会社より、実験材料を提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

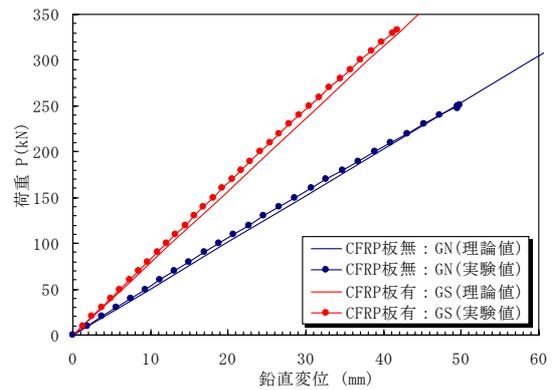


図-4 荷重と支間中央部の鉛直変位の関係

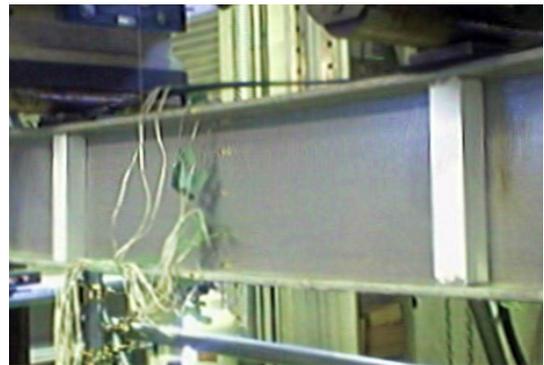


写真-1 上側のCFRP板のはく離(P=330kN)

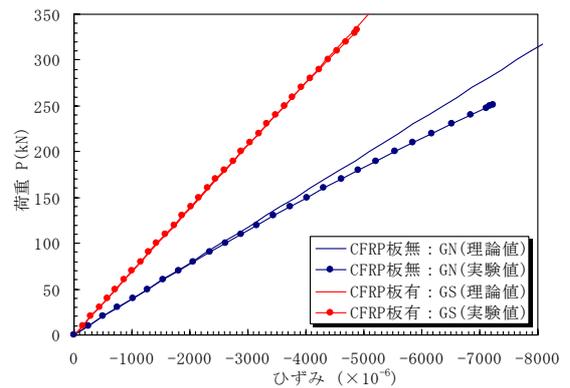


図-5 荷重と支間中央断面の上縁ひずみの関係

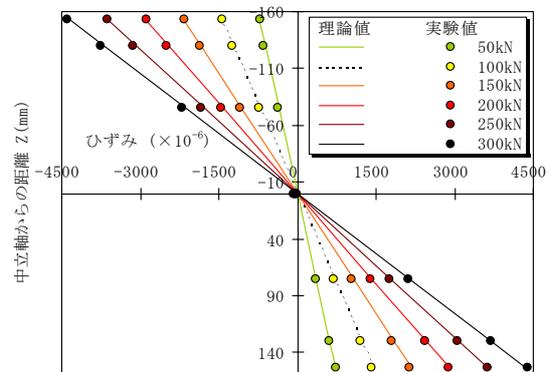


図-6 GSにおける支間中央部の垂直ひずみ分布