リベット接合と接着接合によるハイブリッド FRP桁の連結方法に関する実験的検討

中村 一史1・前田 研一2・睦好 宏史3・松井 孝洋4・柳沼 謙一5

¹正会員 首都大学東京大学院准教授 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

 ²フェロー会員 首都大学東京大学院教授 都市基盤環境学域(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) E-mail: maeda-kenichi@tmu.ac.jp
 ³フェロー会員 埼玉大学教授 工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255) E-mail: mutuyosi@mail.saitama-u.ac.jp
 ⁴正会員 東レ株式会社 コンポジット技術第1部(〒455-8502 愛知県名古屋市港区大江町9番地の1) E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp
 ⁵正会員 株式会社ジェイテック 企画部(〒101-0051 東京都千代田区神田神保町3-12-3)

E-mail: kenichi-yaginuma@j-t-e-c.co.jp

繊維強化プラスチック(FRP)を歩道橋の構造部材として適用する場合,その設計ではたわみ制限が支 配的となるため,効率的な曲げ剛性の確保が必要となる.本研究は、フランジ部に集中して炭素繊維を、 それ以外の部位にはガラス繊維を配置するハイブリッドFRP桁の開発を目的としたものであり、実構造へ 適用する上で不可欠な桁の連結部について実験的な検討を行ったものである.はじめに、施工性に優れる リベットと接着の併用接合の適用性を把握するために、クーポン試験片による継手の引張実験を行い、 FRP桁接合部におけるリベット接合の合理的な接合方法とリベット本数を実験的に検討した.さらに、曲 げ加工した添接板を適用することを提案し、桁試験体による連結部の曲げ載荷実験を行って、その安全性 について実験的に検討した.

Key Words : Hybrid FRP Composite Girder, Rivet Jiont, Boning Joint, Girder Connection

1. はじめに

近年,社会基盤施設の建設において、コスト削減や、 急速施工を含む架設作業の省力化、維持管理の合理化な どの重要性が指摘されるなか、軽量性、耐食性をはじめ、 加工性や、成形性などにも優れた繊維強化プラスチック (FRP)は、構造用の新素材として注目され、研究開発 が活発に行われている^{1,2,3}、繊維強化プラスチック (FRP)を歩道橋の構造部材として適用する場合、設計 では、たわみ制限が支配的となるため⁴、効率的な曲げ 剛性の確保が必要となる.

このような背景のもと,著者らは,曲げ剛性に対する 寄与度が高い部位に集中して炭素繊維を,それ以外の部 位には比較的安価なガラス繊維を配置するハイブリッド FRP(以下,HFRPと略称する)桁を開発し⁹,その力学 特性を明らかにするとともに^{0,7},軽量化により大幅な 工期短縮が期待される,線路上空のペデストリアンデッ キや自由通路への適用性を検証してきた^{8~12}. 今後の実 用化にあたっては、合理的な接合部の設計が課題とされている.

そこで、本研究では、HFRP桁の連結方法について、施工性に優れるリベット接合に着目して、実験的な検討を行った.まず、HFRP桁から切り出したクーポン試験 片を用いて、リベット接合部の引張実験を行い、HFRP 桁の接合部におけるリベット接合の合理的な接合方法と リベット本数を実験的に検討する.次に、曲げ加工した 添接板を適用することを提案し、桁試験体による連結部 の曲げ載荷実験を行って、その安全性について実験的に 検討する.

2. ハイブリッドFRP桁の断面形状と製作方法

開発したHFRP桁¹は、ウェブにGFRPを、曲げ剛性への寄与が大きい上下フランジにCFRPとGFRPを融合させたハイブリッドFRPを配置した構造である.図-1に、I

形断面桁の寸法を示す.HFRP桁は,RTM (Regin Transfaer Molding)成形および引き抜き成形によって製作 された.本研究では、クーポン試験片による継手強度の 評価では、製作が容易であることからRTM成形によっ て製作された板材を、また、桁同士の連結構造の検討で は、引き抜き成形によって製作された桁をそれぞれ用い た.いずれも層構成は同一とした.

3. 接着接合を併用したリベット接合継手の強度 評価

(1) 試験片と実験方法

添接板には、強度と耐久性に優れたステンレス鋼板 (SUS304)を用いる.リベットには片側施工が可能な ブラインドリベットを、接着剤にはエポキシ樹脂接着剤 を適用し、それらの材料物性値を**表-1**に示す.

本研究では,接合方法を3シリーズ(リベット接合R, 接着接合A,リベット接着併用接合RA),リベット列

板厚(mm)	12.5
弹性係数(kN/mm ²)	49.8
引張強度(N/mm ²)	860
板厚(mm)	3.8
弹性係数(kN/mm ²)	181
0.2%耐力 (N/mm ²)	297
引張強度(N/mm ²)	634
伸び (%)	56
厚さ (mm)	0.2
引張せん断強度 (N/mm ²)	17.2
引張強度(N/mm ²)	30
弹性係数(kN/mm ²)	1.5
直径 (mm)	4.8
適正かしめ板厚 (mm)	22.3~25.4
引張強度(kN)	6.5
せん断破壊強度(kN)	5.3
	 板厚(mm) 弾性係数(kN/mm²) 引張強度(N/mm²) 板厚(mm) 弾性係数(kN/mm²) 0.2%耐力(N/mm²) 引張強度(N/mm²) 引張強度(N/mm²) 伸び(%) 厚さ(mm) 引張強度(N/mm²) 引張強度(N/mm²) 引張強度(N/mm²) 道径(mm) 適正かしめ板厚(mm) 引張強度(kN) せん断破壊強度(kN)

表-1 材料物性值



写真-1 セットアップ状況 (HL300RA)

数を5ケース(1, 4, 7, 10, 13列)設定して検討する. 図-2に,試験片図を示す.幅50mmの母材に対し,リベット行数を2行とし,リベット間隔25mm,縁端距離 15mm,縁側距離12.5mmとした¹³⁾.なお,添接板の板厚 については、リベットのかしめ厚を考慮して4mmとした.

A, RAシリーズの接着接合では,表面処理として, ステンレス鋼板の表面はガラスビーズ(#40)でブラス ト処理を,また,ハイブリッドFRP部材の表面はサンド ペーパー(#150)で目粗しを行い,接着直前に表面をア セトンで十分脱脂を行った.接着後の養生は,温度20℃ の常温で1週間とした.

5ケースの列数と3つの接合方法を組み合わせ、それぞれ3体(N=3水準)の試験片(合計45体)を製作して、 継手の引張実験を行った.実験には万能試験機(載荷能力:1,000kN)を用い、荷重の載荷は変位制御とし、載荷速度は2.5mm/minとした.

写真-1に、セットアップ状況を示す.また、図-2に、 示すように、端部と突合わせ部の4箇所にクリップ型変 位計を、また、添接板の表面には所定間隔でひずみゲー



図-1 ハイブリッド FRP 桁の断面形状



ジを設置した.

なお, 試験片の名称については, リベット列数(1, 4, 7, 10, 13列)に対する添接板の長さを用い, それぞれ HL225, HL300, HL375, HL450, HL525と表記し, 3つの 接合方法に対応して, 末尾にR, A, RAを付記する.

(2) 接合方法による継手挙動の比較

図-3に、HL225(1列)およびHL450(10列)シリーズ における荷重と突合わせ部の相対変位の関係を示す.図 より、リベット接合Rは剛性が低いこと、接着接合Aは 剛性が高いことがわかる.リベット接着併用接合RAは 接着接合Aと同程度の剛性を有していることもわかる. 1列のHL255シリーズでは、最大荷重は、接着接合Aが最 も高く、リベット接合が最も低かった.これは、1列に おけるリベットの強度が接着強度よりも低いためである. 一方、10列のHL450では、最大荷重は、リベット接着併 用接合RAが最も高かったが、リベット接合Rと同程度で あった.これは、図中で示したように、載荷の過程では く離が生じるため、終局付近ではリベット接合とほぼ同 じ挙動となることがわかる.これらの傾向は、リベット 列数が4列以上では、同様の傾向であった. 図4に、HL450(10列相当)シリーズにおける64kNお よび100kN載荷時の添接板表面のひずみ分布を示す.ま ず,64kN載荷時では、リベット接合Rの端部付近ではひ ずみが生じず、突合わせ部に向かうにしたがって大きく なることがわかること、また、接着接合Aおよびリベッ ト接着併用接合RAでは、添接板全体のひずみがほぼ等 しく、力の伝達が均一であることがわかる.一方、 100kN載荷時には、リベット接合Rの突合わせ部付近の ひずみは急激に大きくなり、02%ひずみに達し、塑性化 する.これに対し、接着接合Aおよびリベット接着併用 接合RAでは、端部付近のひずみ分布に勾配が生じるも のの、全体として02%ひずみに達していない.これらよ り、接着接合を併用することによって、添接板に作用す る力の伝達が均一になることがわかる.これらの傾向は、 HL255シリーズ(1列)以外はほぼ同じであった.

図-5に、3つの接合方法に対する荷重と変位の関係を 示す.変位は上下チャック間の相対変位とした.図より、 接着接合では、荷重-変位関係の傾きから判断される剛 性を比較すると、添接板長さに関わらず一定であること、 また、添接板が長くなると最大荷重も増大するが、 375mm以上ではほぼ同じになることがわかる.リベット



図4 HL450シリーズ(10列)における添接板表面のひずみ分布

接合では、リベット列数が増加するほど剛性が高くなる こと、また、その剛性は7列以上でほぼ一定になること がわかるが、荷重が120kNで剛性が低下し、非線形とな る.これは、添接板およびリベットが塑性化し、変形が 大きくなることによるものと考えられる.また、リベッ ト列数が増加すると、最大荷重と終局時の変位も増大す るが、増加の割合は小さくなることもわかる.一方、リ ベット接着併用接合では、剛性は、リベット列数に関わ らず、接着接合と同程度であり、リベット接合に比べて、 剛性、最大荷重、終局時の変位が若干向上していること がわかる.しかしながら、HL255RAシリーズ(1列)を 除いて、載荷の過程で、一旦荷重が低下することも確か められる.この時点で、接着接合部ではく離が生じたも のと判断され、この時の荷重をはく離荷重P_aと定義す る.さらに、全体の挙動であるため、チャック間の相対 変位からは判別できないが、リベット接着併用接合では、 図を略したが、端部の相対変位やひずみの変化から一旦 荷重が低下する現象が見られた.この時の荷重を初期は く離荷重P_aと定義する.これらについては、次節で考 察する.



表-2 継手の最大倚重のと	比較
---------------	----

列数 試驗片名			継手の最大荷	重 P _{max} (kN)	標準偏差	変動係数	リベット破壊	
少月安久	时间火川一口	1	2	3	平均值	SD	CV (%)	荷重 (kN)
	HL225R	26.3	24.6	23.0	24.6	1.6	6.6	21.2
1列	HL225A	62.0	66.2	51.0	59.7	7.9	13.2	—
	試験片名 1 HL225R 26.3 HL225A 62.0 HL225RA 38.0 HL300R 91.6 HL300A 86.2 HL300RA 112.6 HL375R 155.8 HL375A 119.5 HL375RA 167.4 HL450R 179.4 HL450RA 186.8	44.9	34.9	39.3	5.1	13.1	-	
	HL300R	91.6	93.9	94.1	93.2	1.4	1.5	84.8
4列	HL300A	86.2	99.1	108.4	97.9	11.2	11.4	_
	HL300RA	112.6	117.4	111.7	113.9	3.0	2.7	-
7列	HL375R	155.8	157.0	158.9	157.2	1.6	1.0	148.4
	HL375A	119.5	142.4	131.8	131.2	11.4	8.7	_
	HL375RA	167.4	162.7	168.9	166.3	3.3	2.0	-
	HL450R	179.4	190.3	174.5	181.4	8.1	4.5	212.0
10列	HL450A	114.3	116.6	130.1	120.3	8.5	7.1	—
	HL450RA	186.8	185.5	181.8	184.7	2.6	1.4	-
13列	HL525R	184.3	196.2	189.3	189.9	6.0	3.1	275.6
	HL525A	131.6	112.9	89.7	111.4	21.0	18.9	_
	HL525RA	200.0	203.2	194.6	199.3	4.3	2.2	_

表-2 接着接合(A), リベット接着併用接合(RA)における初期はく離荷重 P_{dbi}, はく離荷重 P_{db}の比較

石山米ケ	試驗片夕	初期はく離荷重 P _{dbi} (kN)					はく離荷重 P _{db} (kN)						
2月 <u>8</u> 5	mvity/1-11	1	2	3	平均	SD	CV(%)	1	2	3	平均值	SD	CV(%)
1 万川	HL225A	-	-	-	-	-	-	62.0	66.2	51.0	59.7	7.9	13.2
199	HL225RA	-	-	-	-	-	-	38.0	44.9	34.9	39.3	5.1	13.1
4 751	HL300A	-	-	-	-	-	-	86.2	99.1	108.4	97.9	11.2	11.4
4少り	HL300RA	68.8	83.4	26.8	59.6	29.4	49.2	102.8	117.4	91.2	103.8	13.1	12.6
7列	HL375A	67.0	116.6	74.8	86.1	26.7	30.9	119.5	142.4	131.8	131.2	11.4	8.7
	HL375RA	46.3	56.8	64.4	55.9	9.1	16.3	137.7	139.7	126.6	134.7	7.1	5.3
10列	HL450A	64.9	57.6	91.1	71.2	17.6	24.7	114.3	116.6	130.1	120.3	8.5	7.1
	HL450RA	84.4	75.0	56.7	72.0	14.1	19.6	144.4	148.6	140.9	144.6	3.8	2.7
13列	HL525A	80.1	58.9	76.9	72.0	11.4	15.9	131.6	112.9	89.7	111.4	21.0	18.9
	HL525RA	70.9	55.8	62.2	62.9	7.6	12.0	135.2	132.1	143.3	136.9	5.8	4.2



図-6 リベット列数と最大荷重,初期はく離荷重およびはく 離荷重の関係

(3) リベット列数と継手強度の評価

リベット列数と継手強度の関係を評価するために, 表-2に,全ての試験片における最大荷重を,また,表-3 に,接着接合,リベット接着併用接合における初期はく 離荷重とはく離荷重を比較してそれぞれ示す.ここに, 表-2のリベット破壊荷重は,表-1に示した,リベット1 本当たりのせん断強度に,リベット総数とせん断面の数 (2面)を乗じて算定した予測値である.また,表-3に おける接着接合Aのはく離荷重(灰色のハッチング箇 所)は,表-2の最大荷重と同じ値である.

まず,表-2より,1列のHL255シリーズでは,全ての接 合方法で,最大荷重のばらつきが大きくなることから, 連結部では,添接板を長くとり,複数列とする必要があ るといえる.また,4列以上のシリーズでは,接着接合 がもっともばらつきが大きいことから,接着接合のみで は,信頼性に欠けるといえる.これに対して,リベット 接合,リベット接着併用接合のばらつきは同程度であり, 接着接合と比べて,ばらつきは小さいことがわかる.

一方,表-3からは、初期はく離荷重は、接着接合、リ ベット接着併用接合ともに大きくばらつき、列数、添接 板の長さによらず、低い値であることがわかる. はく離 荷重については、接着接合でばらつきが大きいが、リベ ット接着併用接合では、リベット列数が増加するほど、 ばらつきが改善される傾向にある. しかしながら、はく 離荷重は増加しないこともわかる.

初期はく離荷重については、前述したように、継手の 終局限界状態にはとんど影響しないものの、接合部の劣 化の要因となることが考えられ、耐久性が懸念される. そこで、設計では、使用限界状態に対して限界値を定め、 例えば、実働荷重下では、初期はく離を生じないよう配 慮することなどが考えられる.



図-6に、リベット列数と最大荷重、初期はく離荷重お よびはく離荷重の関係を示す.まず、最大荷重について、 1列では、接着接合が最も高く、4列以上では、リベット 接着併用接合が最も高いことがわかる.リベット接合お よびリベット接着併用接合では、7列までは線形的に強 度が増加するが、7列以上では、表-1の材料物性値から 予測されるように、添接板の塑性化が進展して、リベッ トせん断強度による算定値を下まわるようになり、その 最大荷重は添接板の引張破断荷重に支配されるといえた. 接着接合の場合、1列相当のHL225では、他の接合方法 に比べて強度が高くなるものの、7列をピークにほぼ横 ばいとなる.

写真-2に、HL450シリーズにおける破壊形態の一例を 示す.リベット接合ではリベットのせん断破壊,接着接 合では界面破壊,凝集破壊,層間破壊を含む混在破壊, さらに、リベット接着併用接合では,接着接合部がはく 離した後,リベットのせん断破壊であった.これらの傾 向は、リベット列数,添接板の長さに関わらず,ほぼ同 じであった.

4. リベット接合による連結構造の安全性の検証

(1) ハイブリッド桁の連結構造

図-7に、ハイブリッドFRP桁の連結構造を示す.本研 究では、フランジとウエブの直交する面に沿うように、 折り曲げ加工された添接板(ステンレス鋼板SUS304) を適用する.これは、フランジのスプライスプレートと ウエブのモーメントプレートを一体化して合理化を図る とともに、I形断面形状のFRP部材において、弱点とさ れる首部の補強を目的としたものである.さらに、折り 曲げ加工された添接板を用いることで、フランジ幅方向 に対するウエブ側の添接板の縁端距離の問題も解決する ことができる.

(2) 実験方法と模型試験体

表-4に、ハイブリッドFRP桁、添接板、リベットおよ び接着剤の材料物性値を示す.ハイブリッドFRP桁は引 き抜き成形によって製作されたものであり、積層構成は、 第3章で検討したハイブリッドFRP部材と同じである.

ここでは、第3章におけるクーポン試験による継手強 度の結果を踏まえ、接合方法は、リベット接着併用接合 を採用することとした.だだし、桁同士の連結構造では、 連結板の剛性の確保や接合面の不陸調整などが必要があ った.そこで、まず、添接板(SUS304)の板厚は、外 縁側6mm、内側5mmとした.これは、添接板とフランジ の板厚および接着層の厚さを合計すると、現行のブライ ンドリベットの最大かしめ板厚に相当するものである.

さらに、接合面の不陸調整のために、接着層厚を厚層に できるパテ状のエポキシ樹脂接着剤を用いた.ハイブリ ッドFRP部材の製作方法,添接板の板厚および適用した 接着剤が異なることから,予備的な検討として,引き抜 き成形された桁から幅45mmのクーポン試験片を切り出 し,リベット列数Nを1,4,10,16列(試験片名:RAIC, RA4C, RA10C, RA16C)と変化させて,第3章と同様の 手順で,リベット接着併用接合の継手の評価を行った. その結果の一部を図-8に示す.図より,第3章で検討し た組み合わせの継手の性能より,若干,低下するものの, 添接板の引張破断荷重の大きさに応じて,最大荷重が増 加することなど,同様の傾向であることが確かめられた.

桁連結構造の曲げ載荷実験では、リベット列数が連結 部の終局強度に及ぼす影響を把握するために、リベット の行数を4行に固定し、列数Nを4、7列(試験体名: RA4G, RA7G)と変化させた.なお、リベット孔の直径 Dに対する縁端距離およびリベット間隔は、第3章で検 討した値と同一とした.

桁同士の連結作業では、まず、添接板を所定の位置に エポキシ樹脂接着剤で接着後、直ちに仮固定用に4本の リベットを施工した.残りについては、接着剤の硬化後





運給構造に適用した部材の	以科物的	出旦.	
板厚(mm)	13	8.8	
弹性係数(kN/mm ²)	48	3.8	
引張強度(N/mm ²)	88	34	
板厚(mm)	8	9	
弹性係数(kN/mm ²)	15	5.7	
引張強度(N/mm ²)	18	35	
板厚(mm)	4.8	5.8	
弹性係数(kN/mm ²)	18	30	
0.2%耐力 (N/mm ²)	31	17	
引張強度(N/mm ²)	63	36	
伸び (%)	5	6	
厚さ (mm)	約	0.3	
引張せん断強度(N/mm ²)	1	8	
引張強度(N/mm ²)	3	2	
圧縮弾性率(kN/mm ²)	6	.4	
直径(mm)	4.8		
適正かしめ板厚 (mm)	22.3~25.4		
引張強度(kN)	6.5		
せん断破壊強度(kN)	5.	.3	
	板厚 (mm) 弾性係数 (kN/mm ²) 引張強度 (N/mm ²) 引張強度 (N/mm ²) 引張強度 (N/mm ²) 引張強度 (N/mm ²) 板厚 (mm) 弾性係数 (kN/mm ²) 包2%耐力 (N/mm ²) 包2%耐力 (N/mm ²) 引張強度 (N/mm ²) 引張強度 (N/mm ²) 目張強度 (N/mm ²) 目孫強度 (kN/mm ²) 直径 (mm) 引張強度 (kN) せん断破壊強度 (kN)	板厚(mm) 13 弾性係数(kN/mm²) 48 引張強度(N/mm²) 48 弾性係数(kN/mm²) 15 引張強度(N/mm²) 16 02%耐力(N/mm²) 18 02%耐力(N/mm²) 31 引張強度(N/mm²) 62 伸び(%) 55 厚さ(mm) 約 引張強度(N/mm²) 1 引張強度(N/mm²) 33 上縮弾性率(kN/mm²) 62 直径(mm) 42 適正かしめ板厚(mm) 22.3 引張強度(kN) 6 世ん断破壊強度(kN) 5	



図-8 クーポン試験による継手強度の比較

に,穿孔してリベットで接合した.

図-9に、添接板とリベットで連結されたハイブリッド FRP桁の曲げ載荷実験のセットアップの状況を示す.支 持条件を単純支持、支間長Lを3,000mm,載荷位置aを 1,000mmとして、変位制御(0.05mm/sec)により破壊ま で載荷を行った.

(3) 曲げ載荷実験による耐荷力の検討

実験結果の一部として、曲げ載荷実験における荷重と 変位の関係を図-10に示す.鉛直変位はアクチュエータ のストローク変位を示している.全ケースにおいて、 100kNあたりで、破壊音とともに荷重が一度低下するこ と、また、荷重の低下の度合いはリベット列数が少ない ほど大きいことがわかった.これは、図-5 (c) に示した クーポン試験片における傾向と同様であった.最大荷重 は、リベット列数が多いほど大きくなり、破壊について は、4列ではリベットの破断、7列では母材の曲げ圧縮破 壊であった.

図-11に、RA7GBTシリーズにおける下フランジ添接 板下面の軸方向のひずみ分布を示す.図より、荷重の増 加とともにひずみも増加するが、約60kNから端部より 徐々にひずみが小さくなることがわかる.さらに、120 ~130kNで突合わせ部と端部の間でひずみ分布に大きな 勾配が生じることがわかる.この変化は、図-10における荷重が一時的に低下した挙動と一致したこと、また、この時点ではリベットの破壊は見られなかったことから、接着剤がはく離したものと判断され、この時の荷重をはく離荷重 P_{ab} と定義する.一方、図-11で示したように、添接板端部よりひずみの値が小さくなる挙動は、接着強度の低下により応力の伝達効果が低下したものと考えられ、部分的なはく離の兆候と判断された.この時の荷重を初期はく離荷重 P_{ab} と定義する.

初期はく離荷重について,突合わせ部からの距離で整 理すれば,図-12のようになる.図より,RA7Gでは,端 部の初期はく離荷重が最も小さいこと,また,突合わせ 部へ向かって初期はく離荷重が増加することがわかる. また,RA4Gでは,端部から突き合わせ部に向かって初 期はく離荷重は同じであることから,リベット列数が少 ない場合,初期はく離は,端部から突合わせ部まで同時 に進展するといえた.なお,図を略したが,上フランジ 側(圧縮側)についても初期はく離荷重はほぼ同じであ り,その進展挙動も類似であった.

図-13に、リベット列数と最大荷重、初期はく離荷重 およびはく離荷重の関係について、曲げ載荷実験とクー ポン試験の結果を併記して示す.曲げ載荷実験における 各荷重強度は、純曲げ区間のフランジに生じる軸方向力





図-11 RA7Gにおける下フランジ添接板下面のひずみ分布



図-12 桁連結部におけるはく離時の荷重の比較

を与える	次式より算出した.	
$\frac{P_{ev}}{2} = \frac{E}{2}$	$\frac{E_f Lht_f b_f}{24E_s I} P$	(1)
ここに,	<i>D</i>	(1)
P_{ev} :	下フランジに生じる引張力(kN),	
E_{f} :	フランジの弾性係数(kN/mm ²),	
L:	支間長(mm),	
h:	桁高 (mm),	
t_f :	フランジ厚(mm),	
b_f :	フランジ幅(mm),	
P:	載荷荷重(kN).	

なお、桁の連結構造では、リベット行数は4行であり、 クーポン試験片の2行と比較するため、下フランジに生 じる引張力 $P_{a'}$ の半分 ($P_{a'}$ 2) で評価した.式(1)より、載 荷荷重Pに対する換算係数は、1.056となった.また、 RA7Gの初期はく離荷重は最小値を示している.

図より,桁連結構造の曲げ載荷実験による各荷重強度 は、クーポン試験結果によるものよりも若干高くなるが、 両者はほぼ同様の傾向を示すことがわかる.したがって、 クーポン試験片による継手強度から,桁の連結構造の耐 荷力を概ね評価することが可能であるといえる.

写真-3に、桁連結部の破壊状況を示す. リベット列数 が4列のRA4Gでは、下フランジ側のリベットが破壊し、



図-13 リベット列数と最大荷重,初期はく離荷重およびはく 離荷重の関係



 (a) RA4G
 (b) RA7G

 写真-3
 曲げ載荷後の破壊の状況

ウエブのリベットまで破壊が進展して終局となった.上 フランジ側の添接板も塑性変形していることがわかる. 一方,7列のRA7Gでは、リベットを含む連結部での破 壊は生じず、母材の破壊で終局となった.載荷点の応力 集中による母材の破壊が起点となり、添接板の端部へ破 壊が伝播し、ウエブまで破壊が進展して終局となった. RA7Gでは、連結部での破壊は生じず、フランジ部の曲 げ圧縮破壊で終局となったが、その曲げ耐力は、図-13 に併記したように、過去に実施された、連結構造のない ハイブリッドFRP桁の曲げ耐力⁶よりも若干、低かった.

5. まとめ

本研究では、リベット接合と接着接合を併用した HFRP桁の連結方法について、実験的に検討した.その 結果、以下のことがいえた.

- (1) リベット接合に接着接合を併用することで、剛性が 高められ、継手効率が向上するとともに、力の伝達 が均一化されることがわかった.
- (2) リベット接着併用接合では、はく離が先行することから、連結部の設計においては、はく離挙動を適切に考慮する必要があるといえた。
- (3) リベット接着併用接合における継手強度は、7列ま では、リベットのせん断強度が支配的であり、効率 も高いことがわかった.
- (4) リベットを7列配置して連結すれば、桁の曲げ破壊 強度に至るまでの十分な接合が可能であることが確 かめられた.

謝辞:本研究の一部は、国土交通省建設技術研究開発助 成制度(研究課題名:革新的材料を用いた社会基盤施設 の再構築)の一環として行われた.共同研究者各位から は貴重なご助言をいただいた.また,研究当時,首都大 学東京の大学院生であった菊地勇気氏(現首都高速道 路株式会社)には,試験体の製作・実験データの整理等 でご協力いただいた.ここに記して謝意を表します.

参考文献

- J. L., Clarke: Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, European Structural Polymer Composite Group, E & SPON, 1996.
- 2) T. Keller: Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction, Structural Engineering Documents 7, IABSE 2003.
- 3) 土木学会: FRP 橋梁-技術とその展望-,構造工学シリーズ 14, 丸善, 2004.
- 4) 土木学会: FRP 歩道橋の設計・施工指針(案), 複合構造シ リーズ 04, 2011.
- 5) 土木学会:先進複合材料の社会基盤施設への適用,複合構造

レポート01, pp.121-136, 2007.

- 6) 浅本晋吾,睦好宏史,鈴川研二:ハイブリッド1型FRP構造 部材の曲げ性状に関する実験的,解析的検討,第7回複合構 造の活用に関するシンポジウム,土木学会,CD-ROM, 6pages, 2007.
- 7) 中村一史,前田研一,睦好宏史,鈴川研二:ハイブリッド FRP 桁のせん断変形特性とウエブ・クリップリングに関する 実験的検討,第7回複合構造の活用に関するシンポジウム, 土木学会, CD-ROM, 6pages, 2007.
- 前田研一, 睦好宏史, 津吉毅, 鈴川研二, 松井孝洋:ハイブ リッド FRP 桁のペデストリアンデッキへの適用検討, 鋼構 造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, Vol.15, pp.211-218, 2007.
- 9) 中村一史,前田研一,睦好宏史,吉田 一,松井孝洋:ハイ ブリッド FRP 桁斜張橋の試設計と線路上空自由通路への適 用可能性,鋼構造年次論文報告集,日本鋼構造協会,Vol.16,

pp.167-174, 2008.

- 10) 中村一史,前田研一,渡辺貴之,柳沼謙一,松井孝洋:ハ イブリッド FRP 桁を用いた斜張橋形式こ線人道橋の振動使 用性,土木学会,橋梁振動コロキウム 2011 論文集, pp.142-149, 2011.
- 11) 中村一史,前田研一,渡辺貴之,柳沼謙一,松井孝洋:ハ イブリッド FRP 桁を用いたこ線人道橋の概略設計と使用性, 日本鋼構造協会,鋼構造年次論文報告集,第 19 巻, pp.27-34, 2011.
- 12) 柳沼謙一,石井高広,高木芳光,中村一史,前田研一:ハ イブリッド FRP 桁を有するこ線人道橋の試設計,日本鋼構 造協会,鋼構造年次論文報告集,第19巻, pp.35-40, 2011.
- L. C. Bank : Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials, John Wiley & Sons, Inc, pp.499-502, 2006.

EXPERIMENTAL STUDY ON CONNECTION METHOD OF HYBRID FRP COMPOSITE GIRDER USING RIVETS AND STRUCTURAL ADHESIVES

Hitoshi NAKAMURA, Ken-ichi MAEDA, Hiroshi MUTSUYOSHI, Takahiro MATSUI and Ken-ichi YAGINUMA

In the structural design of footbridge using FRP composite girders, since the deflection limitation is dominant, ensuring of the efficient flexural rigidity should be required. A hybrid FRP composite girder is being developed consisting of carbon and glass fibers. In this study, the method of girder connections have been experimentally investigated for a practical use. First, the coupon tests were conducted to evaluate the joint strength using rivets and/or adhesives. Next, the connections of the hybrid FRP composite girders were investigated by 4-point bending loading test.