

ボルトおよび接着接合を用いた HFRP 部材の接合手法に関する研究

Joining method for HFRP members using bolted and bonded joint

白木健亮*, 睦好宏史*, 浅本晋吾*, Nguyen Duc Hai*, 山本育実**
Kensuke Shiroki, Hiroshi Mutsuyoshi, Shingo Asamoto, Nguyen Duc Hai, Ikumi Yamamoto

*埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

**株式会社 竹中工務店 (〒541-0053 大阪府中央区本町 4 丁目 1-13)

Fiber Reinforced Polymer (FRP) has been increasingly used in civil engineering field due to its advantages such as high specific strength/stiffness, lightweight, corrosion resistance, etc. An innovative hybrid FRP composite girder which optimizes the combined use of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) was developed. The objective of this research is to develop the joining method for hybrid FRP members using in bridge applications. To determine an appropriate joining method, coupon tests with bolted-only and bolted-and-bonded joint and beam joint tests were conducted.

The experimental results revealed that specimens with the bolted-and-bonded joint using v-notch steel plates showed significantly higher stiffness compared to specimens with bolted-only joint using flat steel plates. The adhesives in bolted-and-bonded joint contributed to resist the slipping between steel plates and FRP laminates.

Key Words: HFRP, bolted-only joint, bolted-and-bonded joint

キーワード: ハイブリッドFRP, ボルト接合, ボルト接着併用接合

1. はじめに

近年、高強度・軽量・高耐食性などの特徴を有する FRP (Fiber Reinforced Polymer) の橋梁などの構造物への適用が進められている。本研究では CFRP (炭素繊維強化プラスチック) と GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) から構成されるハイブリッド FRP (以下、HFRP) の開発に着目した。HFRP は、軽量・高強度・高耐久性などの FRP 本来の特徴に加え、強度や単価の異なる CFRP と GFRP を適切に組み合わせることで構造部材に要求される力学性能を付与することができる、経済的な設計が可能となるなどの大きなメリットがある。また、近年社会問題となっている老朽化した橋梁などの補修や新設に対して HFRP を適用することで、工期短縮や環境負荷低減、LCC 削減が可能となると期待される。

HFRP を構造部材として適用するに当たり、HFRP 部材同士または他部材との接合は必要不可欠である。そこで本研究では HFRP 部材に適した接合方法の開発を目的とし、鋼材の接合方法として一般的なボルト接合を対象とし、接着併用接合の有無や添接鋼板の表面加工の有無などをパラメータとして小型供試体による継手引張試験を行った。また、クーポン試験結果をもとに提案された接合方法を採用した I 型断面桁の 4 点曲げ載荷試験を行

った。

2. 小型供試体による継手引張試験

2.1 実験概要

小型供試体によるクーポン試験を行い、HFRP に適した接合方法について検討した。クーポン試験ではフランジ部が CFRP と GFRP、ウェブ部は GFRP のみで構成される、引き抜き成形された I 型 HFRP 桁のフランジ部、ウェブ部から長さ 400~500mm、幅 80mm、板厚 14mm (フランジ)、9mm (ウェブ) の FRP 板を切り出し、試験片を作製した。本実験で用いた HFRP の積層構成を表-1 に示す。大きな引張力や圧縮力が作用するフランジ部に力学特性に優れた炭素繊維を長手方向に角度 0° で配向することで桁剛性を高めたものである。

供試体詳細を図-1 に示す。接合形式はダブルラップ形式とし、SS400 で板厚 9mm の添接鋼板をステンレスボルトおよびエポキシ樹脂接着剤により接合した。添接鋼板は表面加工がないもの (Flat) と表面にジグザグ加工を設けたもの (v-notch) の 2 種類とした。これはすべり荷重の増加を期待したものである。FRP 板に卓上ボール盤で孔径 10.5mm の孔をあけ、エポキシ樹脂を塗布し、エポキシ樹脂が硬化する前に M10 のステンレスボルト

表-1 HFRP の積層構成

	フランジ(%)	ウェブ(%)
CFRP 0°	33	0
GFRP 0°/90°	17	43
GFRP ±45°	41	43
CSM	9	14

表-2 材料特性値

HFRP	圧縮強度 (MPa)	394
	引張強度 (MPa)	884
	弾性係数 (MPa)	49600
ボルト	降伏強度 (MPa)	600
	破壊強度 (MPa)	800
エポキシ樹脂接着剤	引張せん断強度 (MPa)	15(鋼材同士)
		18(CFRP同士)

表-3 実験シリーズ

シリーズ	切り出し位置	ボルト本数	縁端距離	添接板	接着厚(mm)
E	フランジ	2	2d, 3d, 4d	Flat	-, 0
BF	フランジ	6	3d	Flat	0, 0.5, 1.5
BV	フランジ	6	3d	v-notch	0, 0.5, 1.5
B	フランジ	0	-	v-notch	-
WF	ウェブ	6	3d	Flat	0, 1.5
WV	ウェブ	6	3d	v-notch	0, 1.5

を挿入し、トルクレンチを用いてトルク $20\text{N}\cdot\text{m}$ を導入した。また、FRP 板には、載荷時におけるつかみ具による圧壊を防ぐために、アルミプレートを貼付した。本実験で使用した材料の特性値を表-2 に示す。

表-3 に実験シリーズとそれぞれのパラメータを示す。E シリーズは縁端距離をボルト径の2倍、3倍、4倍と変化させ、その影響について検討した。BF および BV シリーズはボルト接着併用で、添接板の表面加工の影響および接着剤厚の影響を確認した。B シリーズは接着接合のみとし、接着剤の効果を確認するためのものである。BF および BV シリーズにおける接着層の厚さは、厚さを制御しないもの、0.5mm、1.5mm の3種類とし、HFRP 板と添接板の間に所定の厚さのワッシャーを挿入することで管理した。WF および WV シリーズはウェブから切り出したもので、添接鋼板を Flat または v-notch、接着厚を制御しないものと 1.5mm の2種類とした。

試験は、最大荷重 500kN の万能試験機で引張試験を行い、供試体にはとひずみゲージとクリップゲージを貼付し(図-2)、終局に至るまでひずみと添接板と FRP 板の相対変位を計測した。セットアップを図-3 に示す。

2.2 実験結果および考察

まず、縁端距離を変化させた E シリーズについて考察する。図-3 にボルト接合のみの場合、図-4 に接着接合を併用した場合の荷重-変位関係を示す。ボルト接合のみの場合は、縁端距離を 2d とした供試体において非常に低い耐力となった。破壊状況を見ると、縁端距離の増加に伴い母材のせん断破壊から支圧破壊およびボルトのせん断破壊へと破壊モードが移行していくことが確認された(写真-2)。一方、接着接合を併用した場合には母材のせん断破壊は確認されず、全ての供試体でボルトのせん断破壊によって終局となった(写真-3)。同様の縁端距離の場合でも接着接合を併用することで破壊モードがより安全なものに変化することが分かった。このことから、継手の設計を行う際に、ボルト接合のみの場合は縁

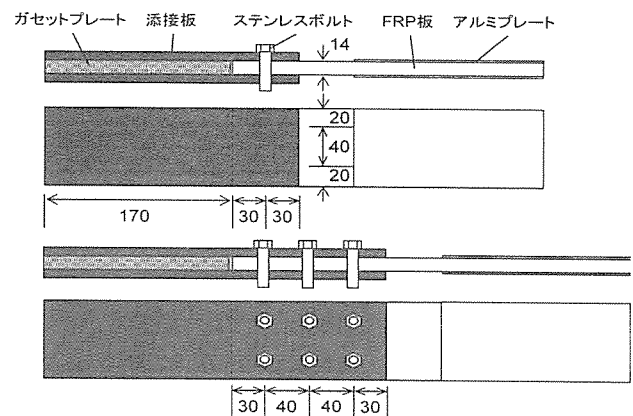


図-1 供試体寸法

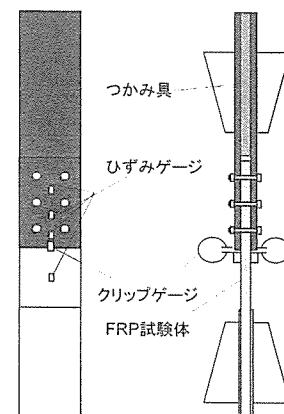


図-2 ゲージ位置

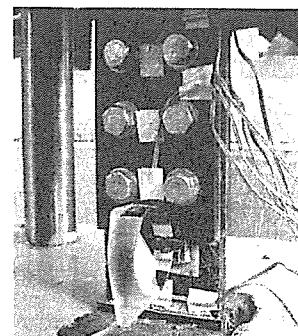


写真-1 セットアップ

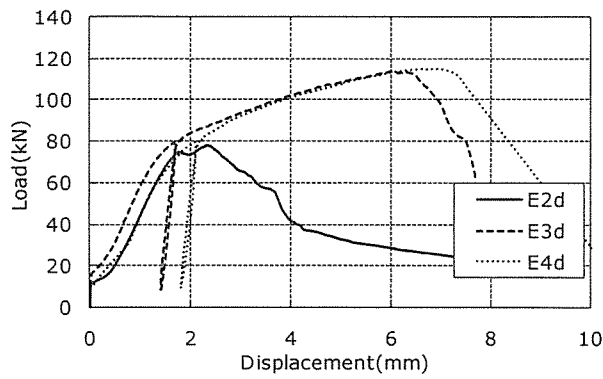


図-3 荷重-変位関係 (E シリーズ ボルト接合のみ)

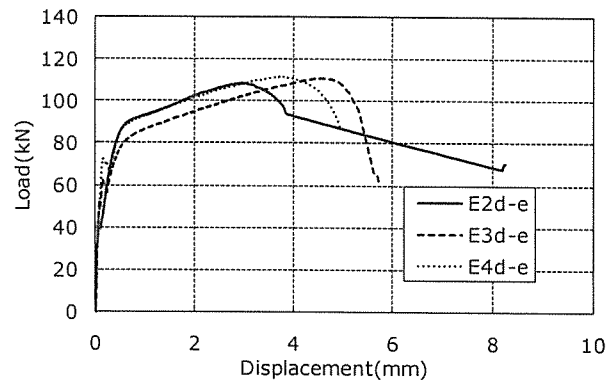


図-4 荷重-変位関係 (E シリーズ 接着併用)

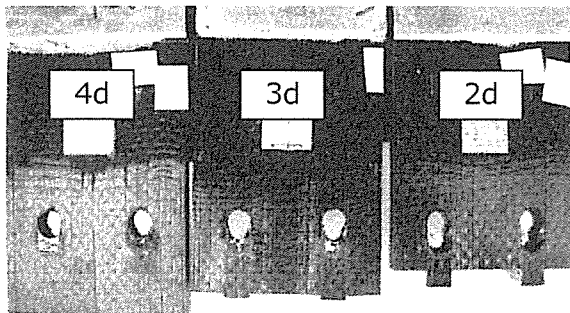


写真-2 破壊状況 (E シリーズ 接着なし)

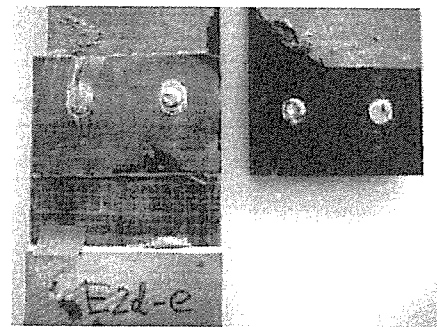


写真-3 破壊状況 (E シリーズ 接着併用)

端距離 4d を確保することが望ましいが, 接着接合を併用する場合はその値を小さく設計することが可能であると言える。

次に BF および BV シリーズについて考察する。図-5 に BF シリーズから得られた荷重-変位関係を示す。BF と過去に行ったボルト接合のみの結果 (AF) ¹⁾ を比較すると, 接着接合を併用することですべり抑制に大きな効果があることが確認されたのに対し, 接着接合の有無による終局荷重の差は見られなかった。これは終局時においてはボルトと母材で全荷重を負担しており, 接着剤は寄与していなかったためであると考えられる。また, 接着厚の異なる BF, B5F, B15F を比較すると, 接着層厚によるすべり, 終局荷重への影響はほぼないと言える。図-6 に BV シリーズから得られた荷重-変位関係を示す。BF と BV シリーズを比較すると, v-notch を設けた供試体において変位が抑制され, 剛性が増加していることが分かる。これは表面加工によって接着面積が増加したために接着効果が大きくなったためであると推測される。接着厚について比較すると BV シリーズにおいても接着層厚の効果に規則性は確認できなかった。実構造物に適用することを考えると, 施工性が重要となってくるため, 接着厚による影響が小さいことから, 接着厚は管理しないものが望ましいと言える。

載荷初期段階では各ひずみの値は線形的に増加しているが, 荷重が 50kN を超えた辺りから非線形の挙動を示している (図-7)。この段階で接着剤の剥離が始まった

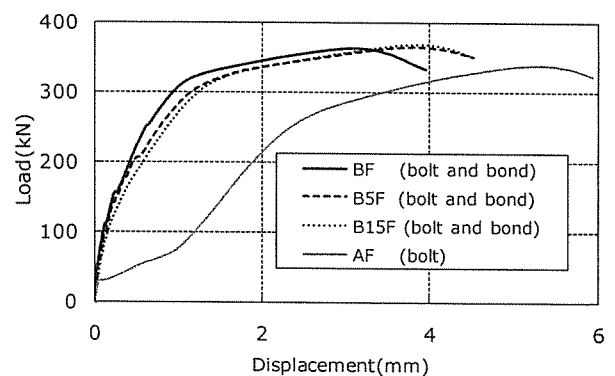


図-5 荷重-変位関係 (BF シリーズ)

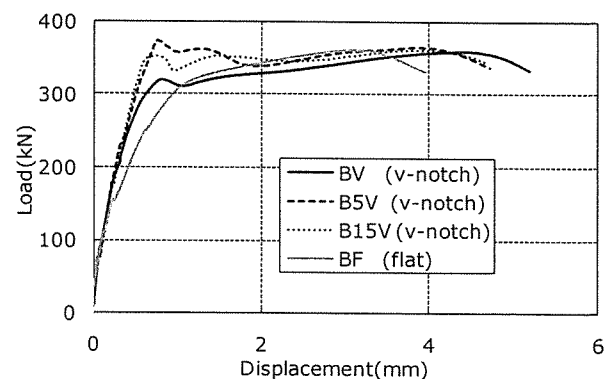


図-6 荷重-変位関係 (BV シリーズ)

ものと考えられることから、この点をすべり荷重と定義することとする。すべり荷重を接着面積で除したものをボルト本数でまとめたグラフが図-8 である。この図からすべり発生荷重に対する添接板の表面加工の影響は確認できなかった。V-notch 添接板はすべり発生荷重には影響しないが、その後のすべり抑制には効果があると言える。これらの結果から、添接鋼板には v-notch を設け、施工性を考え接着厚は制御しないものが適当であると言える。

破壊状況について考察する。接着接合を併用した場合、すべての供試体においてボルトのせん断破壊が確認され、母材の支圧破壊も確認された。表-2 に示す材料特性値を用いて HFRP の支圧強度を式 (1a) より、ボルトのせん断強度を (1b) より計算すると、

$$P_b = \sigma_b n d_b t_{pl} \quad (1a)$$

ここに P_b : HFRP の支圧強度, σ_b : HFRP の支圧(圧縮)許容応力, n : ボルト本数, d_b : ボルト径, t_{pl} : HFRP の厚さ

$$P_v = 2\tau_b A_b \quad (1b)$$

P_v : ボルトのせん断破壊荷重, τ_b : ボルトのせん断強度, A_b : ボルトの断面積

ほぼ同様の値が得られた(図-9)。このことから、支圧破壊とボルトのせん断破壊が同時に進行し終局に至ったものと考えられる。図-9 はそれらの値と実験から得られた破壊荷重をグラフにまとめたもので、すべての供試体において、概ね一致していると言える。このことから終局荷重は接着接合の有無にかかわらず、ボルトのせん断強度もしくは FRP の支圧強度に依存することが分かった。本実験においてはボルトの破断が確認されたことから、ボルトのせん断強度が支配的であり、式 (1b) によって破壊荷重が推定可能であることが分かった。

ウェブ供試体ではすべての供試体で FRP の引張破壊が確認された。これは板厚が 9mm とフランジ供試体に比べ薄いことから、ボルトのせん断強度に達する前に FRP の引張強度に達したためである。ウェブ供試体では WV シリーズが WF シリーズに比べ終局荷重が高い結果となった。

クーパー試験結果から、

- ・添接板に v-notch を設ける
 - ・接着接合を併用する
 - ・施工性を考慮して接着厚は制御しない
- 接合方法が効果的であると言える。

3. I 桁 4 点曲げ載荷試験

3.1 実験概要

前述のクーパー試験の結果を受け、接合部を有する I

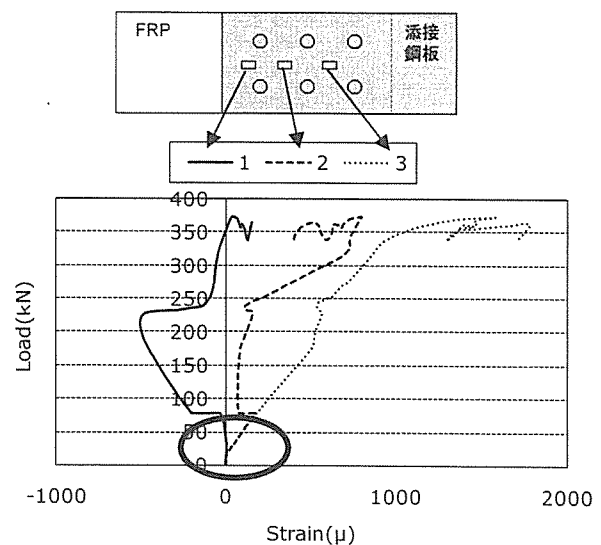


図-7 添接板ひずみ

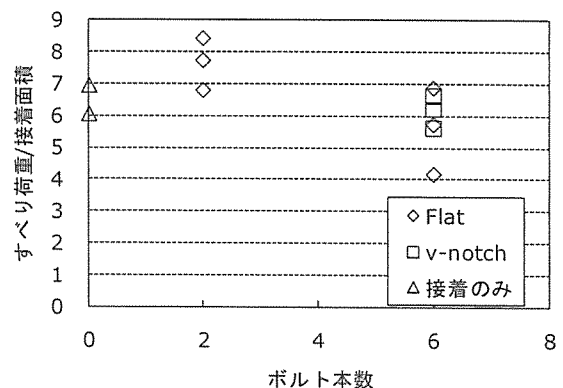


図-8 すべり荷重—ボルト本数関係

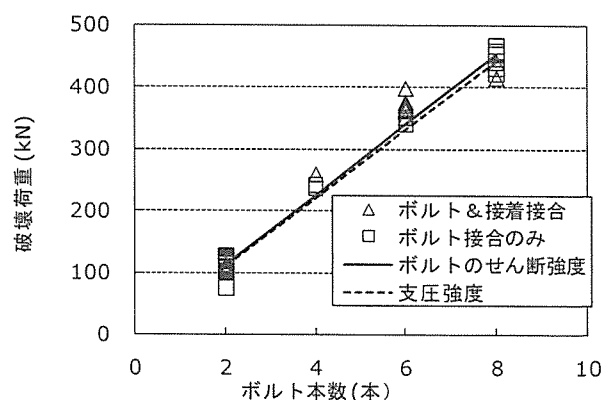


図-9 破壊荷重—ボルト本数関係

型 HFRP 桁の曲げ試験を行った。HFRP 桁の積層構成は前述の表-1 と同様である。供試体は接合部のないもの (control) と、接合部を有し、接合強度の異なる 2 種類 (B-1, B-2) の計 3 体を作製し実験を行った。図-10 に載荷実験のセットアップを示す。桁断面は高さ 250mm, 幅 95mm, フランジ厚 14mm, ウェブ厚 9mm で、全長 3500mm である。載荷点間距離は 1000mm, 支点間距離

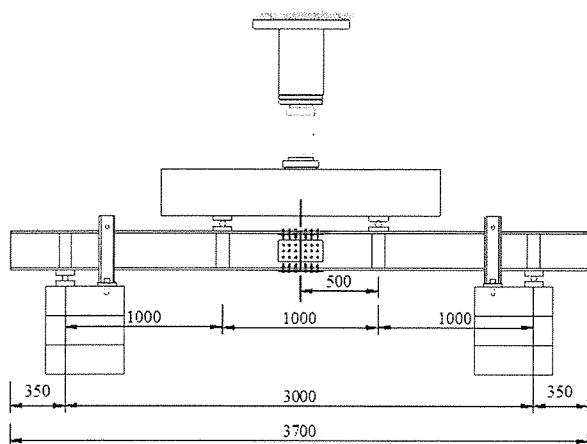


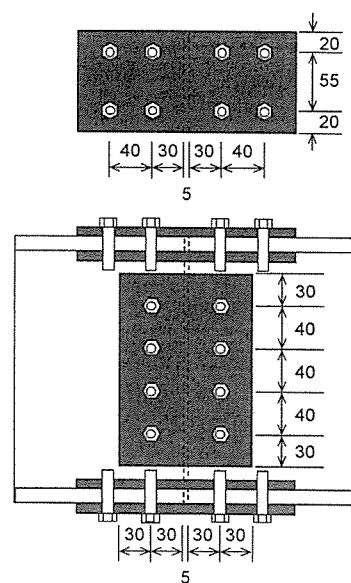
図-10 セットアップ

3000mm とし、4 点曲げ載荷試験を行った。横倒れ座屈防止のため、載荷点および支点にスティフナを設置した。B-1 および B-2 供試体については、接合部は曲げスパン中央に設けた。B-1、B-2 供試体の接合部詳細を図-11 に示す。接合方法は前節にて提案した接合方法を採用した。接合部の作製方法はクーポン試験と同様で、卓上ボール盤で孔をあけたのち、エポキシ樹脂接着剤を塗布し、硬化する前にトルクレンチを用いてトルク量 $20\text{N} \cdot \text{m}$ をステンレスボルトに導入した。接着層の厚さは制御しないこととした。容量 3000kN の油圧ジャッキを用いて静的載荷試験を行い、変位、ひずみを終局に至るまで計測した。

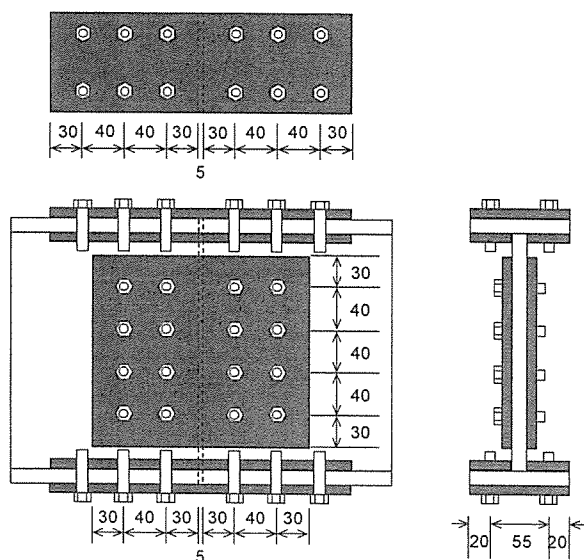
3.2 実験結果および考察

荷重とスパン中央での鉛直変位の関係を図-12 に示す。この図から接合部を有する場合でも接合がないものと同等以上の剛性が得られることが分かった。接合を有する供試体がわずかに高い剛性を示したのは、接合部の添接鋼板は FRP より剛性が高く、桁剛性を大きくしたためだと考えられる。また、いずれの供試体も終局に至るまで荷重-たわみの関係は線形関係にあり、弾性挙動を示していると言える。

破壊状況について述べる。Control は載荷点での上フランジの層間剥離によって脆性的に破壊へと至った。応力集中が原因だと考えられる。過去に行った積層構成の異なる供試体の曲げ実験²⁾では、スパン中央での圧縮フランジの剥離破壊が確認されたが、本実験では載荷点外側にて破壊が確認された。積層構成や成形方法の違いによる破壊形式の違いについてさらなる考察、検討を行う必要がある。B-2 供試体では接合部での破壊は確認されず、control と同様に載荷点付近での圧縮フランジ剥離破壊が確認された。また、接合部直近のウェブ部での破壊も観察された。しかし接合部は健全で、接着剤の剥離やボルトの破断などは観察されなかった。一方 B-1 供試体では接合部下フランジでボルトの破断によって終局に至っ



(a) B-1



(b) B-2

図-11 接合部詳細

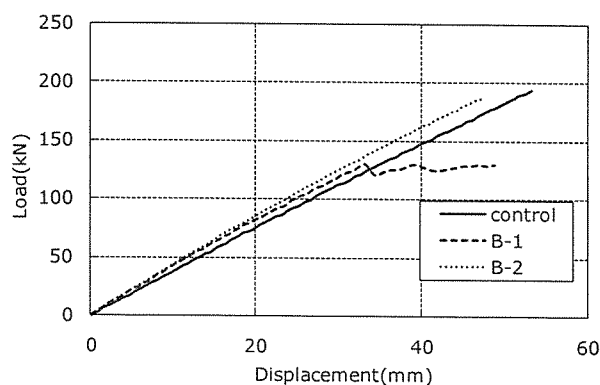


図-12 荷重-たわみ関係

た。破壊状況を図に示す。

B-1 供試体における終局時の下フランジに作用する作用力を平面保持の仮定のもと算出すると、 225.2kN と



写真-4 破壊状況 (control)

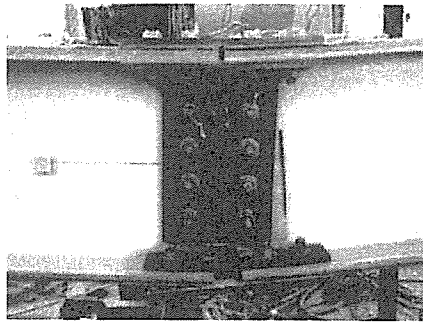


写真-5 破壊状況 (B-1)

計算される。ボルト4本の場合のボルトのせん断破壊荷重は式(1b)から226.2kNと計算されることから、曲げが作用する場合の接合部の破壊荷重は、鋼桁の接合部と同様に計算できると言える。

4. まとめ

ボルトおよび接着接合を併用した HFRP 部材の継手引張試験、I 桁の曲げ載荷実験を行った。以下に本研究より得られた知見を示す。

- 1) 樹脂を用いた接着接合を併用することで、破壊モードが母材のせん断破壊から支圧破壊、ボルトのせん断破壊へと移行する。
- 2) 添接鋼板に表面加工を施すことですべりを抑制し、接合部の剛性を高めることができる。
- 3) 接着剤の厚さによる有意な差は確認できなかった。
- 4) I 桁の曲げ実験においても、クーボン試験から得られた結果を用いることで接合部の破壊荷重を推定することができる。

クーボン試験では各パターン1体の実験のみ行ったた

め、データのばらつきなどを検討することはできなかった。より信頼性のあるデータを蓄積するためにより多くの実験結果やデータの蓄積が望まれる。また、本実験では、曲げスパンに接合部を有する場合の検討を行ったが、今後接合部がせん断を受ける場合についても検討を行う必要がある。

謝辞

本研究は国土交通省建設技術研究開発助成補助を受け実施した。本研究プロジェクトの共同研究者各位から貴重なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 山本育実, 睦好宏史, 浅本晋吾, 松井孝洋: ハイブリッドFRP 桁のボルト接合に関する実験的検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会
- 2) 浅本晋吾, 睦好宏史, 鈴川研二: ハイブリッドI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