

G1-12 . GFRP 引抜き成形はりとその接合部の耐荷挙動に関する実験的研究

小林 恵治

1. 目的

FRP (繊維強化プラスチック) は, その軽量性や耐食性等から, 自重の軽減, 施工性の向上やメンテナンスコスト軽減等の利点があり, 新たな土木構造材料として期待されている. 一般に高コストと言われる FRP の中で GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) は, 他の FRP に比べ材料コストが安価である. さらに GFRP 引抜き成形法 (図-1) は, 大型断面形状での大量生産が可能であり, 製造コストが抑えられる大きな利点がある. しかし異方性材料である GFRP は, 設計が煩雑であり, また土木構造材料としての適用についてはいくつかの事例はあるものの実績が少なく, 今後の基礎研究の蓄積が期待されているところである.

そこで, 本研究では国内最大級の断面を有する GFRP 引抜き成形 I 形断面はりについて, はり部材の材料力学特性の把握を目的とした材料試験, 部材レベルでの耐荷挙動の把握を目的としたはり部材の静的曲げ試験, および材料試験で得られた力学データを用いた FEM 解析ソフトによる曲げ試験の数値解析を行った. さらに構造材として不可欠な部材相互の合理的な接合法の究明とその耐荷挙動の解明を目的とした GFRP 板と鋼板の接合部の引張試験を実施した.

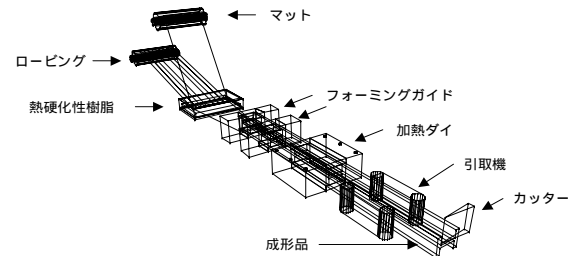


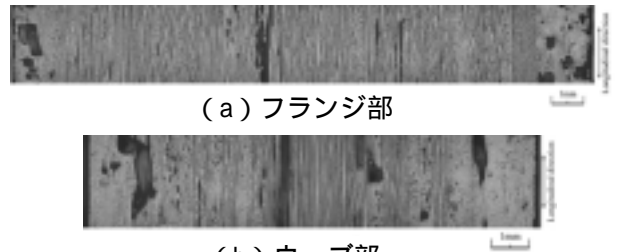
図-1 引抜き成形法

2. 内容

2.1 はり部材の材料力学特性と曲げ耐荷特性

(1) 材料試験

GFRP はり部材から, フランジ部繊維 0° 方向, ウェブ部繊維 0° (強軸方向), 45°, 90° 各方向について試験片を切出し, 引張および圧縮試験を実施した. GFRP はり部材のフランジおよびウェブの積層構成を図-2 に示す. 破壊形式はいずれも繊維の破断ではなく, 繊維と樹脂マトリックス間の界面剥離や層間剥離といった破壊形式となった. 引張および圧縮強度それぞれについて, 繊維 0° 方向に対する 45° 方向と 90° 方向の比はいずれも 30%~50%程度であり, 積層された繊維の配向角や含有率にその強度特性を依存することが確認できた. また引張, 圧縮各方向の弾性係数はほぼ等しいことが確認できた. 写真-1 に圧縮破壊状況を, 表-1 に得られた結果を示す.



(a) フランジ部

(b) ウェブ部

図-2 積層構成

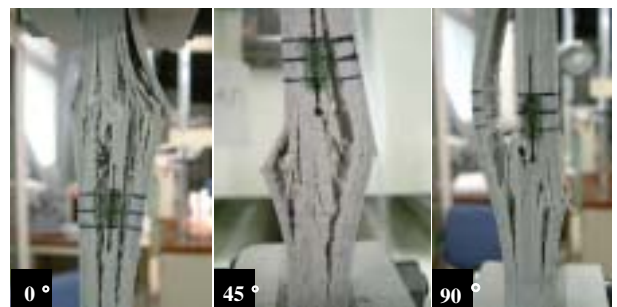


写真-2 圧縮破壊状況

表-1 材料試験結果

| | 引張強度 ft(MPa) | 引張弾性係数 Et(GPa) | 圧縮強度 fc(MPa) | 圧縮弾性係数 Ec(GPa) | せん断強度 τ(MPa) | せん断弾性係数 τ(GPa) | ポアソン比 ν |
|--------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------|
| FLG0° | 416 | 38.8 | 393 | 37.8 | - | - | 0.27 |
| WEB0° | 335 | 23.5 | 283 | 25.0 | 57 | 5.1 | 0.24 |
| WEB45° | 114 | 13.4 | 125 | 15.7 | | | 0.35 |
| WEB90° | 143 | 15.9 | 140 | 16.4 | | | 0.14 |

(2) 曲げ載荷試験

曲げ試験は、高さ 600mm、スパン 4000mm および 2000mm の GFRP はり部材に対し漸増曲げ載荷を行った(写真-2, 図-3)。載荷点には幅 100(mm) 厚さ 25 (mm) の鋼製プレートを敷き、荷重が均一に分布するようにし、A は垂直補剛材 (GFRP 製、箱形断面 100×100×564mm、厚さ 5mm) を支点部のみに片面につき 2 本ずつ、B は座屈耐力を向上させるため、支点部に加え載荷点位置に片面につき 1 本ずつ、それぞれエポキシ樹脂により接着した。一方、FEM 解析では、1/2 対象モデルとして GFRP はり部材と GFRP 垂直補剛材は直交異方性 4 節点シェル要素を用い、剛結させてモデル化した。解析には、汎用解析ソフト Lusas version13.7 を使用し、フランジ・ウェブともに、厚さ方向には均一なものとしてモデル化した。

4000 シリーズの結果について示す。(スパンが異なる 2000 シリーズも同様の耐荷特性を示した。) 4000A は写真-3(a)に示すように載荷点位置において局部座屈が先行し $P_{max}=352kN$ で上フランジとウェブの間に引抜き方向に割れを生じて破壊した。上フランジとウェブの結合部に、局部座屈に伴う面外曲げによりひび割れが発生しており、内部のローピング、ヤーンクロス層についても、破壊していると考えられる。一方、4000B は垂直補剛材によって載荷点位置の局部座屈は抑制されたが、写真-3(b)に示すように $P_{max}=534kN$ で支点部の垂直補剛材が剥落し、急激に GFRP 桁端部上下フランジとウェブの接合部が層間剥離して破壊した。また、A,B ともに下フランジは引張強度時のひずみの 8~14%、上フランジで圧縮強度時のひずみの 12~28% (図-4) 程度にしか至っておらず、十分な性能発揮のためには、最適な部材断面形状の検討や垂直補剛材設置についての検討が重要である。

材料試験から得た材料定数を用いて実施した解析の結果、図-5 に示すように、スパン中央部の荷重 - たわみ関係において、4000A, B ともに FEM に



写真-2 供試体設置図

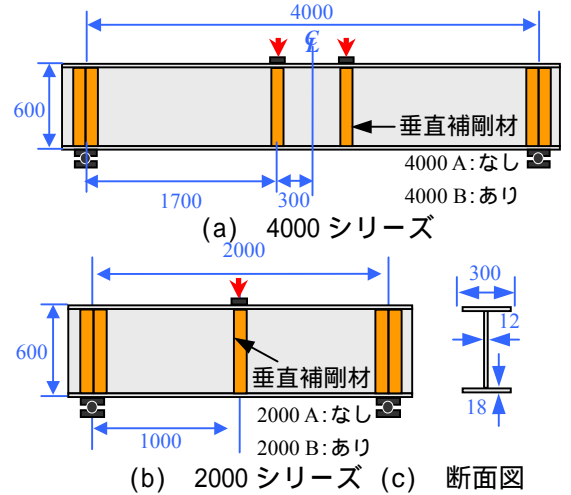


図-3 供試体概要図



(a) 4000A



(b) 4000B

写真-3 4000 シリーズ破壊状況

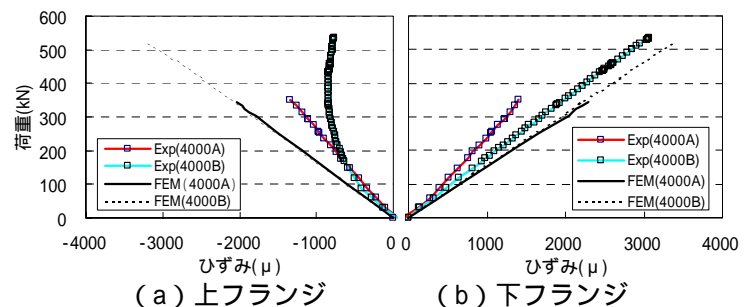
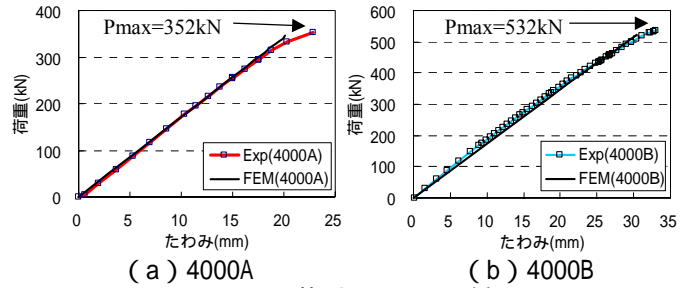


図-4 荷重-ひずみ関係 (上下フランジ)

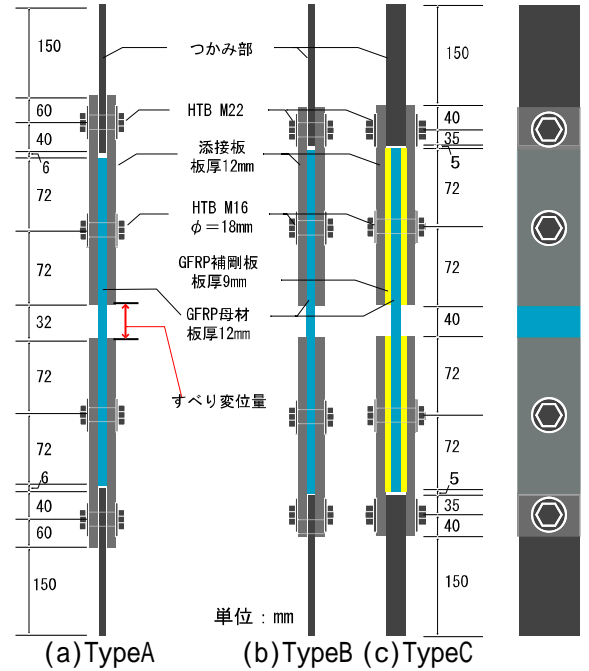
よる解析結果は試験結果と概ね一致することが確認できた。しかし、実験で生じた垂直補剛材の剥がれをモデル化していないため、座屈現象によりウェブが大きく孕み出し破壊に至る終局時の破壊現象を再現するには至らなかった。



(a) 4000A (b) 4000B
図-5 荷重-たわみ関係

2.2 接合部の耐荷特性

供試体の概略図を図-6(a)～(c)に示す。供試体に用いた引抜き成形された GFRP 板は、3 層構成（ローピング、クロス、マット）の TypeA, 2 層構成（ローピング、マット）の TypeB,C とし、長さ 320～328mm, 幅 90mm, 板厚 12mm である。接合する添接板（SS400）は、長さ 224～250mm, 幅 90mm, 板厚 12mm としダブルラップ形式で接合した。TypeC は、GFRP 板と添接板の間に GFRP 補剛板を設置して支圧強度の向上を検証した。供試体の一覧を表-2 に示す。Ad タイプは接着剤のみで接合し、Bo,Co タイプは GFRP 板に $e/d=3.8\sim 4$, $w/d=4.7\sim 5$ (e : 縁孔距離, w : 部材幅, d : 孔径) とした孔を開け、Bo タイプは高力ボルトのみで、Co タイプは高力ボルトと接着剤を併用して接合した。GFRP 板および接着剤の材料特性を表-3 に示す。高力ボルトに導入した軸力は、道路橋示方書に基づき設計ボルト軸力を算出して導入トルクを求め、そのトルクをトルクレンチを用いて導入した。TypeC は、導入軸力による影響を検証するため、4 つの供試体ごとに軸力を変化させた。供試体を固定治具を介して試験装置に固定し、漸増引張載荷試験を行った。



(a)TypeA (b)TypeB (c)TypeC
図-6 供試体の概略図

表-2 供試体一覧

| 供試体名 | 接合形式 | トルク (N・m) | GFRP 補剛板 |
|----------|----------|-----------|----------|
| A-Ad | 接着 | 0 | 無 |
| A-Bo | ボルト摩擦 | 250 | 無 |
| A-Co | 接着+ボルト摩擦 | 250 | 無 |
| B-Ad | 接着 | 0 | 無 |
| B-Bo | ボルト支圧 | 0 | 無 |
| B-Co | 接着+ボルト支圧 | 0 | 無 |
| C-Bo | ボルト支圧 | 0 | 有 |
| C-Co-0 | 接着+ボルト支圧 | 0 | 有 |
| C-Co-70 | 接着+ボルト支圧 | 70 | 有 |
| C-Co-140 | 接着+ボルト支圧 | 140 | 有 |
| C-Co-280 | 接着+ボルト支圧 | 280 | 有 |

表-3 材料特性値

| GFRP板 | TypeA | TypeB, C |
|---------|--------------------|--------------------|
| 引張強度 | 335 | 402 |
| 引張弾性率 | 23.5×10^3 | 26.9×10^3 |
| 圧縮強度 | 283 | 412 |
| せん断強度 | 56.9 | 88.2 |
| 接着剤 | TypeA | TypeB, C |
| 引張せん断強度 | 17.5 | 17.3 |

単位: MPa

(1) TypeA の荷重 - すべり変位関係を図-7 に示す。Ad タイプは、線形的にすべり変位が増大した後、荷重 26.5kN 時点で接着が切れて接着面にずれが生じた。Bo タイプは、荷重が 47.9kN に達したとき摩擦が切れ、ボルト孔の遊間分でボルトがすべり、孔壁に接した後支圧状態となって再び荷重が増加した。Co タイプは、69.1kN 時点で荷重が低下すると同時にすべり変位が増大した。Bo, Co タイプとも最初に荷重が低下した点を初期破壊荷重とした。全供試体の最大荷重を図-8 に示す。最大荷重は Ad タイプに比べ Bo タイプで 3.0 倍, Co

タイプで3.1倍となった。また、Boタイプの初期破壊荷重から算出したすべり係数は、0.23であることからGFRP材と鋼材の摩擦接合では、鋼板同士の接合に比べ接合耐力が著しく低下している。

(2) TypeBについては、一方向性材のロービング層が大部分を占めているTypeB,CのGFRP材は、B-Boタイプでは、ボルトの支圧によって引張方向に引抜かれるようにして荷重27.7kNでせん断破壊した(写真-4)。接着剤の付着切れまではボルト孔壁は支圧されなかったため、CoタイプはBoタイプの2.7倍の最大荷重となった。

(3) 一方向性材のGFRP板に、繊維方向が引張方向と直角になるようにGFRP補剛板を取り付けたTypeCのBoタイプの耐力は、TypeBのBoタイプの3.1倍となった。図-9に示すように、ボルトの導入軸力による比較では、最大荷重は導入軸力に応じて増加するものの、最大荷重に達する前に補剛板のき裂発生および接着剤の付着切れが生じる初期破壊の荷重は、導入軸力に影響を受けないことが確認できた。

3. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 材料試験において、引張・圧縮試験とも界面剥離や層間剥離により破壊に至ることがわかった。また、繊維0°方向に比して45°、90°方向は、30~50%の強度となることが確認できた。

(2) 曲げ試験において、垂直補剛材の設置により、I形断面の局部座屈を抑制し、耐力向上に効果があることがわかった。また、厚さ方向に均一な材料と仮定した非線形FEM解析により、終局耐力直前までの挙動を概ね把握できることが確認できた。

(3) 接合部の引張試験において、高力ボルトのみによる摩擦・支圧接合に比べ、接着剤を併用した接合形式は耐力の増加が期待できることが確認できた。また本試験でのGFRP板と添接板のすべり係数は0.23であり、鋼材のすべり係数(0.4)に比べ過小であること、GFRP板の積層構成が耐力に大きく影響すること、ボルトの導入軸力に応じて最大荷重は増加するものの、初期破壊荷重は導入軸力に影響を受けないことが明らかになった。

今後はGFRP引抜き成形材の土木構造材料としての適用に向け、特にデータの少ないGFRP材の接合について、試験データの蓄積を実施するとともに、GFRP板のリラクゼーションによるボルト軸力低下の影響や樹脂接着剤劣化の影響等、長期耐久性の検証が必要である。

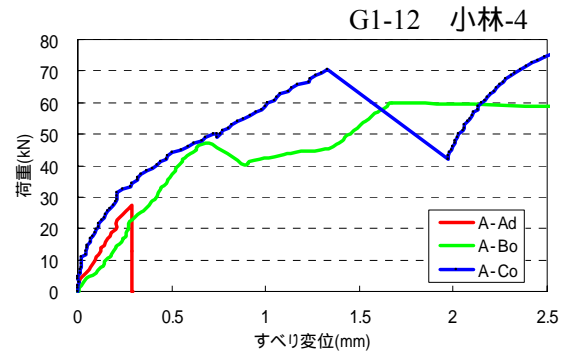


図-7 荷重-すべり変位関係 (Type A)

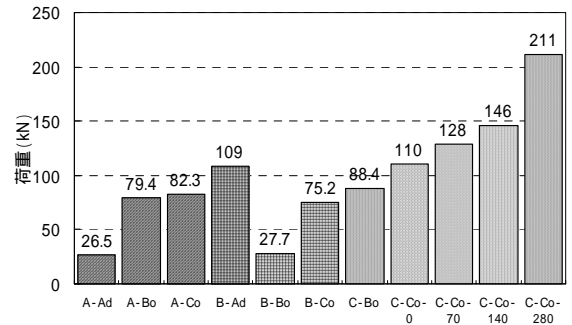


図-8 最大荷重



写真-4 破壊状況 (B-Bo)

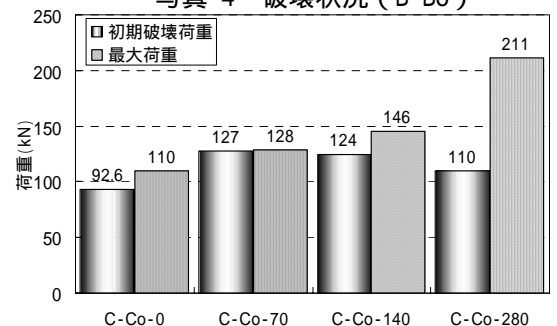


図-9 初期破壊荷重と最大荷重 (Type C)

G1-12 . Experimental Study of Behavior of GFRP Pultruded Beam and Joint Parts

Kenji KOBAYASHI

Fiber Reinforced Plastics (FRP) is considered as a new material of civil engineering structure. FRP has the advantage of alleviation of empty weight, workability improvement, and alleviation of maintenance cost from the lightweight properties and high corrosion resistivity. Generally, though FRP is high cost, material cost of Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) is cheaper than that of other FRP. In addition, pultruding molding process has a big advantage of reduction of manufacturers' cost. Because it has a capability of producing continuously as for the large size cross-section shapes. However, the design of GFRP which is anisotropic material is complicated, and the experience of construction are little. Consequently, the accumulation of fundamental research is expected to obtain.

The purpose of this study is to investigate the characteristic of material mechanics, behavior of GFRP beam and joint parts between GFRP plate and Steel plate under the static loading. Initially, the tensile and compressive test were carried out to investigate the characteristic of the material mechanics of GFRP which is anisotropic material. Subsequently, three or four-point bending test was done to examine the behavior of GFRP beam under the static loading. The parameters of bending test specimens were span and the vertical stiffeners. In addition, the nonlinear analysis was carried out using the mechanics characteristic values as the result of material tests. Finally, the tensile test was carried out to find out the behavior of joint parts between GFRP plate and Steel plate under the static loading. The parameters of tensile test specimens were conducted using joint method and laminated constitution of GFRP plate.

As a result, the finding of anisotropic material mechanics, behavior of GFRP beam, joint parts between GFRP plate and Steel plate under the static loading was obtained. It will be a pressing need to research about Composite and Hybrid structure and design method, when the future. The joint parts test is scheduled to be continued.