

GFRP 引抜き成形 I 形断面はり部材の耐荷挙動に関する解析的検討

Analytical study on the load carrying behavior of GFRP pultruded I-section beam

小林憲治*, 山口浩平**, 大本透*, 日野伸一**

Kenji Kobayashi, Kohei Yamaguchi, Toru Ohmoto, Shinichi Hino

*九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

**九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) is expected to application as the material for the civil engineering structures due to the lightness and corrosion resistance. It was clarified that GFRP pultruded I-section beam collapsed by local buckling and delamination around loading points, and that setting of stiffener into web improved ultimate loading capacities of beam. However, the evaluation of stress state around loading point and ultimate load caused by local buckling is not done. And, the research on the load carrying behavior of GFRP member has been hardly done. In this study, it was simulated load carrying behavior up to ultimate load of GFRP pultruded I-section beam by numerical analysis.

Key Words: GFRP, Load carrying behavior, Local buckling, Numerical analysis

キーワード: GFRP, 耐荷挙動, 局部座屈, 数値解析

1. はじめに

ガラス繊維強化ポリマー (GFRP) は、従来の材料にない軽量、高強度、高耐食性といった特性を活かして様々な分野で利用されている。社会資本の長寿命化や、建設時の低環境負荷が期待され、維持管理の効率化が注目される現在、GFRP 材のいずれの特性も土木構造材料として非常に価値のある特性であり、土木分野への適用に向けた研究開発には期待が大きい。

著者らは、大量生産性に優れ製作コストの低減が可能な連続引抜き成形法で製作された GFRP 材に着目し、GFRP 材の材料強度特性やその接合方法等、土木構造部材としての適用性について研究してきた。GFRP は多くの利点を持つ反面、鋼材や炭素繊維強化ポリマー (CFRP) に比べて弾性係数が低いために、曲げせん断剛性が相対的に小さくなる。そのため、許容されるたわみ量を満足するために大型断面形状の部材や、ハイブリッド化による剛性向上が求められている。

これまで国内では、引抜き成形法で製作された国内で最大となる高さ 600mm の I 形断面はり部材を既設鋼鉄桁橋の補強に適用した事例¹⁾の他、歩道橋²⁾ および自転車橋等のいくつかの適用事例があるものの、GFRP 引抜き成形はり部材の土木・建築構造材への適用事例はもちろん、その力学特性についての研究知見も、著者らの知る限り少ない^{3)~6)}。適用事例の多くは、設計段階でたわみ

制限により断面が大型化されたため、発生応力は極端に小さく、現段階では最適な設計が行われているとは言い難い。

材料特性を最大限に活用する設計とするためには、部材の剛性を向上させるとともに、部材の耐荷特性、特に終局耐力の評価を適切に行うことが必要である。しかし、部材レベルでの耐荷特性については研究事例が少ないのが現状である。これまでの研究により、GFRP の変形状がせん断変形を考慮したはり理論で概ね評価できることや、局部座屈に伴う GFRP 材の層間破壊で終局に至ること、また局部座屈の抑制には垂直補剛材の設置が有効であること等が確認されている^{7)~10)}。

しかしながら、GFRP はり部材の破壊は脆性的であり、局部座屈に伴う層間破壊が瞬間的に発生するため、設計指針等の整備や適切な安全係数の採用に不可欠である部材の終局耐力の評価には至っていない。

そこで本検討では、GFRP 引抜き成形 I 形断面はり部材の曲げ載荷試験を行い、耐荷特性および破壊性状を明らかにするとともに、数値解析により耐荷挙動および局部座屈による終局耐力の再現を試みた。また、GFRP はり部材の終局耐力向上に有効な垂直補剛材については、その形状、材料特性、設置位置など十分に検討されていない。そこで垂直補剛材の設置位置をパラメータとした解析を行い、最大荷重およびはり部材の発生応力について検討した。

2. GFRP 引抜き成形はり部材の曲げ試験

2.1 試験体

GFRP 引抜き成形はり部材はスパン 4000mm, 載荷スパン 600mm, せん断スパン比 (a/h) 2.83 である。試験体を図-1 に、材料試験から得られた引抜き方向に対する角度ごとの材料特性値および文献¹⁾から引用した材料特性値を表-1 に示す。表中、文献から引用した値には*を付してある。

はり部材は、高さ 600mm, フランジ幅 300mm, フランジ厚さ 18mm, ウェブ厚さ 12mm であり、ロービング (Rov) と、ニットファブリック (KF), ダブルバイアス (DB), コンティニューアストランドマット (CSM) で積層構成されている。

中心部の Rov 層は、 0° 方向 (引抜き方向) にガラス繊維を引き揃えた。KF 層は $0^\circ \cdot 90^\circ$ 方向にガラス繊維を配向し、DB 層はウェブのせん断耐力向上のため $\pm 45^\circ$ 層を 2 枚積層した。表層部の CSM 層はガラス繊維をランダムに配向させたストランドマットで構成されている。

試験体には、支点部および載荷点部に片面につき 4 本、合計 8 本の箱型断面 ($100 \times 100\text{mm}$, 厚さ 5mm) の GFRP 材を垂直補剛材として 2 液混合常温硬化型エポキシ樹脂接着剤で接着した。なお、垂直補剛材はフランジおよびウェブに完全に密着している。また、破壊時における垂直補剛材の飛散を防止するため、鋼板 (厚さ 6mm) で垂直補剛材を挟み、長ねじで固定した。なお、鋼板の上下端は、はり部材の上下フランジには接しておらず、鉛直方向の力を負担しないようにしている。

2.2 試験方法

計測位置は、鉛直変位はスパン中央部およびせん断スパン中間部下面、ひずみは上下フランジおよびウェブである。破壊に至るまで 4 点曲げ漸増載荷試験を実施した。

上下フランジは長軸方向に 1 軸ひずみゲージを貼付して、ウェブは 3 軸ひずみゲージを貼付してひずみを計測した。計測した 9 つの計測断面の内、4 章の考察に用いたのは、図-1 中に示す A~C 断面の 3 つである。A 断面はスパン中央、B 断面は載荷点に設置した垂直補剛材端部からスパン中央側に 20mm の位置、C 断面はせん断スパンの中間部である。試験体の試験装置への設置状況を写真-1 に示す。

3. 数値解析

3.1 解析モデル

解析は汎用プログラム Marc.2005 を使用し、GFRP はり部材と GFRP 垂直補剛材を直交異方性の 8 節点ソリッド要素を用い、剛結させてモデル化した。材料特性値は表-1 に示すフランジ、ウェブおよび垂直補剛材それぞ

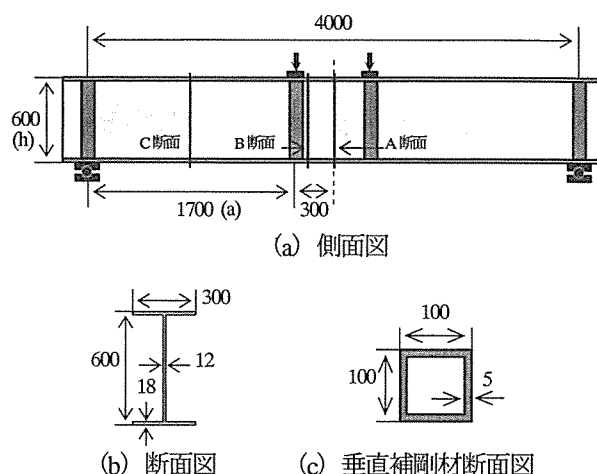


図-1 曲げ試験体 (単位: mm)

表-1 材料特性値

項 目	単位	部 位	引抜き方向	引抜き直角方向
引張弾性係数	GPa	フランジ	37.6	10.1*
		ウェブ	22.6	14.4
		垂直補剛材	30.0	10.1*
引張強度	MPa	フランジ	416	134*
		ウェブ	325	146
		垂直補剛材	300	134*
せん断弾性係数	GPa	フランジ	4.60*	
		ウェブ	4.60	
		垂直補剛材	4.60*	
ポアソン比	-	フランジ	0.24	0.14*
		ウェブ	0.28	0.14
		垂直補剛材	0.30	0.14*

*は文献から引用した値

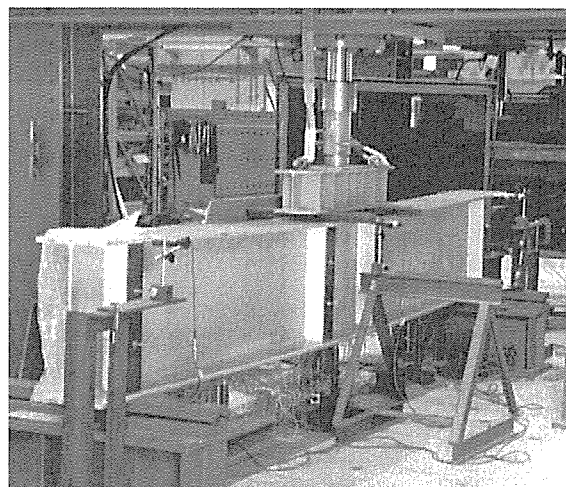


写真-1 試験体設置状況

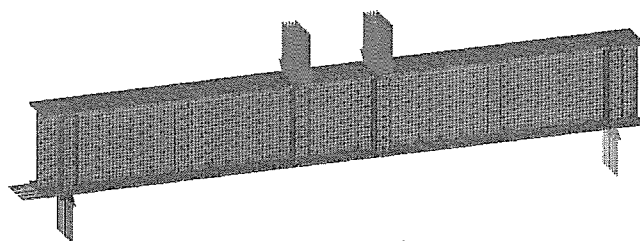


図-2 解析モデル

れ各方向の値を用いて異方性を考慮し、厚さ方向には均一なものとしてモデル化した(図-2)。要素数は22944, 最小要素寸法は垂直補剛材と上下フランジの結合部で $2.5 \times 2.5 \times 5\text{mm}$, 最大要素寸法は垂直補剛材近傍以外の上下フランジで $25 \times 25 \times 18\text{mm}$ である。

材料構成則は、図-3に示すように、既往研究¹⁾を参考に各方向について引張と圧縮は同一とし、終局ひずみまで線形的に増加後、速やかに軟化するモデルとした。軟化の勾配は $100E$ とした。降伏条件には、Hillの降伏関数¹²⁾を用いて異方性を考慮した。すなわち、材料試験で得られたひずみ値からそれぞれのランクフォード値 R_0 , R_{45} , R_{90} を求め、異方性パラメータを算出し、降伏条件として導入した。

3.2 解析手順

解析フローを図-4に示す。解析は、座屈現象再現のため弾性座屈固有値解析を先行して行い、1次モードの幾何学データ(座標位置)を抽出した。1次モードの変形は微小であり、変位量が大きかった上フランジ端部において、 $0.3 \times 10^{-2}\text{mm}$ 程度である。この抽出したモデルを用いて、幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮して、変位増分で非線形解析を行った。なお、材料非線形性はHillの降伏関数の設定により、幾何学的非線形性は大变形オプションを使用して考慮した。

4. 結果および比較

4.1 破壊性状

実験では線形的にたわみが増大し、679kNで大きな破壊音を伴い脆性的に破壊した。図-5に各部位の破壊状況を示す。

破壊後の試験体を観察すると、上フランジが大きく層間破壊している。また、等曲げ区間のウェブ部では局部座屈が発生して、大きく面外方向に孕み出し鉛直方向に割れが生じている。さらに载荷点部において上フランジとウェブの結合部および垂直補剛材が一部圧縮破壊した痕跡も確認された。下フランジと垂直補剛材の結合部においては垂直補剛材が下方に押し込まれ下

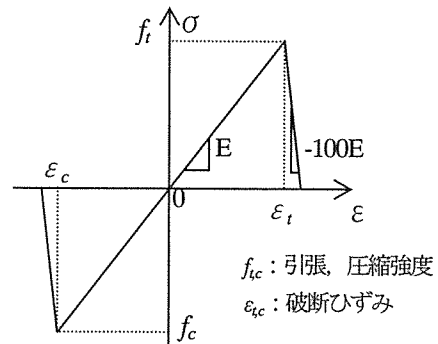


図-3 材料構成則

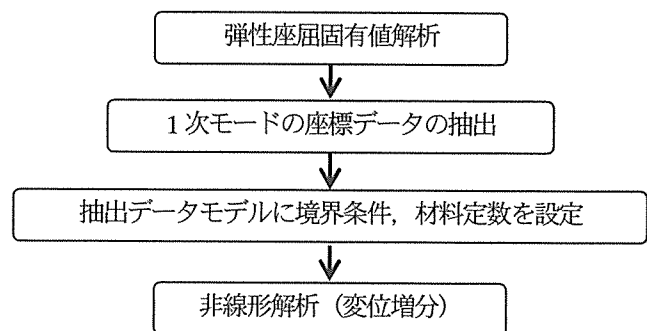


図-4 解析フロー

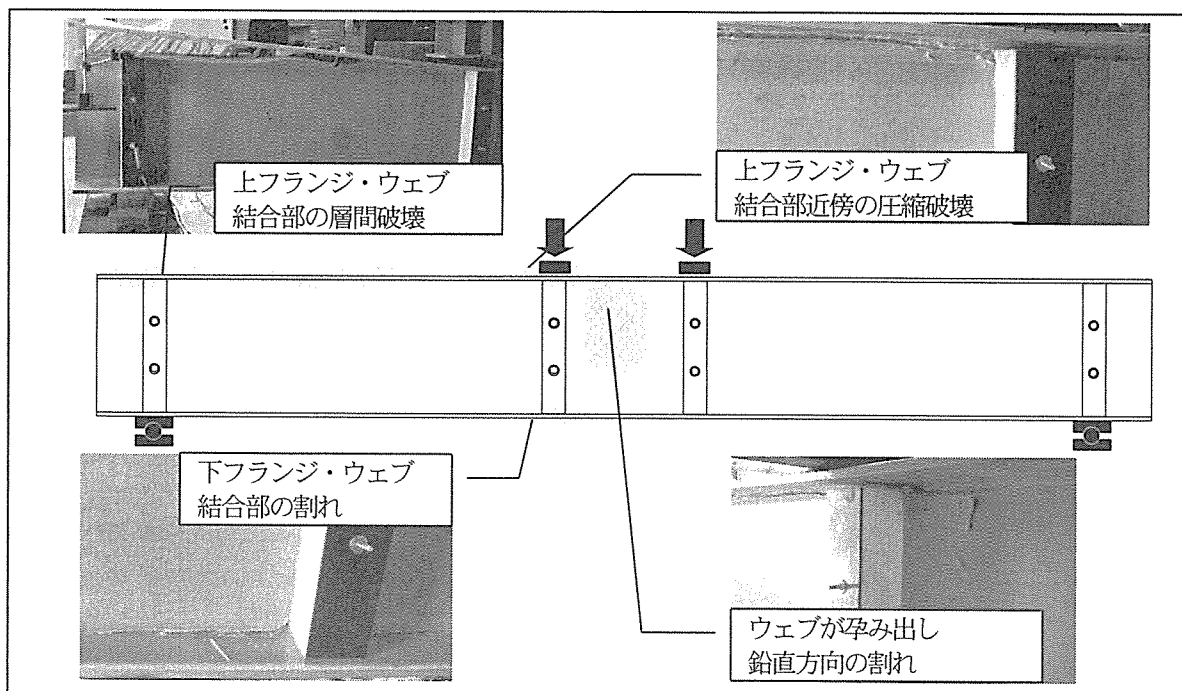


図-5 各部位の破壊状況

ランジとウェブ間に割れが発生している。

終局時におけるこれらの現象は瞬時に発生し、破壊の要因となった部位を特定するのは困難であった。しかし、写真-2 に示すように、ビデオカメラで撮影した映像より、当初、等曲げ区間のウェブ部が局部座屈すると同時に、荷重点部が沈み、荷重点と支点間の上フランジが上方に反るようにウェブ部と剥離していることが確認できた。その後、上フランジとウェブ部の剥離は桁端方向へ進展して、破壊に至っていた。

4.2 変形状

スパン中央における荷重-たわみ関係を図-6 に、スパン中央部上下フランジの荷重-ひずみ関係を図-7 示す。図中には実験値、解析値および初等はり理論での計算値を記載している。ここでのたわみ計算値は、フランジとウェブそれぞれの引張弾性係数を用いて等方性連続体と仮定し、せん断変形を考慮した初等はり理論¹³⁾で算出した値である。ひずみ計算値も弾性係数のみを考慮し、初等はり理論で算出した。同図において、たわみ、ひずみともに解析値および計算値は、実験値によく一致していることが確認できる。

図-8 (a) ~ (c) にスパン中央部、荷重点部およびせん断スパン中間部の断面のひずみ分布図を示す。図中に

は100kN、400kN および最大荷重の679kN 時のひずみ分布の実験値、解析値および初等はり理論での計算値をそれぞれ記載している。図より、(a) スパン中央部および (c) せん断スパン中間部においては、計算値と解析値がともに実験値と概ね一致しており、終局に至るまで平面保持則が成立していることがわかる。(b) 荷重点部では、垂直補剛材の影響により上フランジ部付近において一部

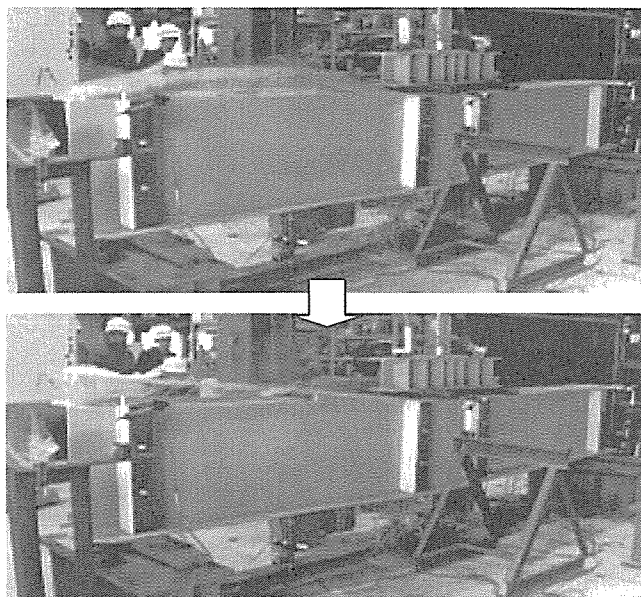


写真-2 破壊状況

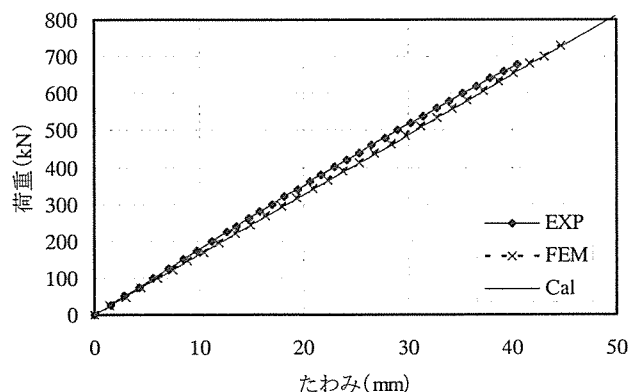


図-6 荷重-たわみ関係

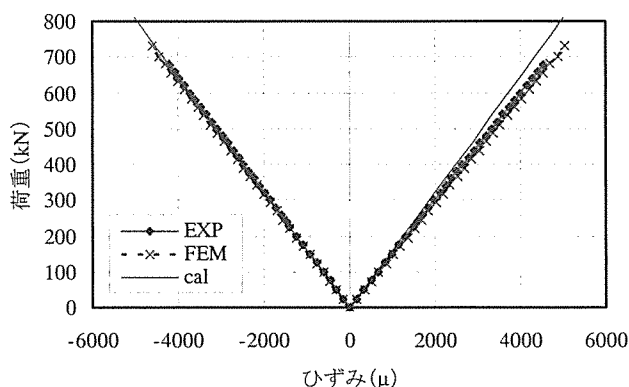


図-7 荷重-ひずみ関係

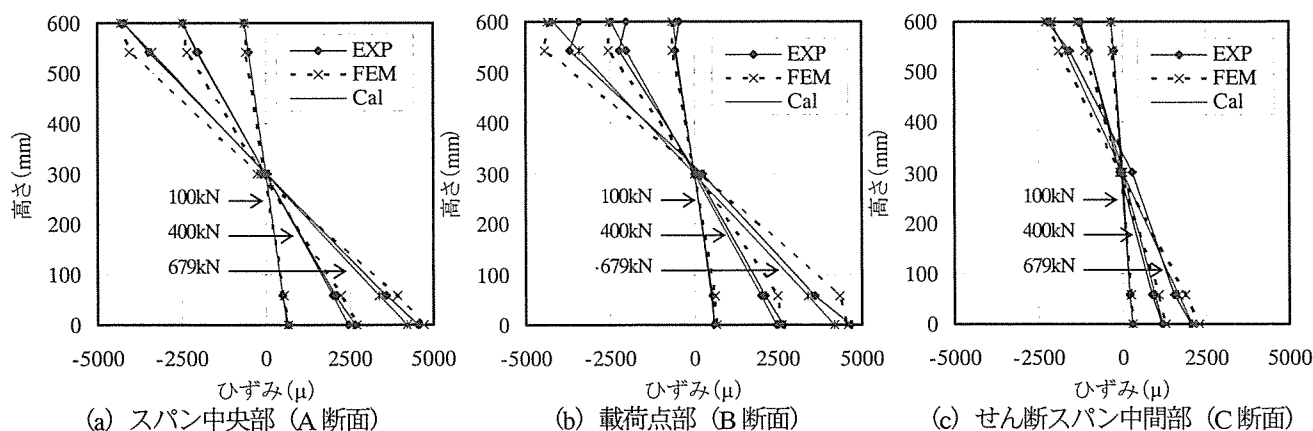


図-8 ひずみ分布図

平面保持則が成立していないが、解析ではその傾向を概ね再現している。よって垂直補剛材近傍部のような、初等はり理論での評価が困難な部位においても、本検討の範囲内では解析により実験結果を再現できた。

図-9 に解析の最大荷重時における変形および mises の相当応力コンター図を示す。図に示す通り、荷重点部の上フランジと垂直補剛材の結合部において 338MPa 程度の応力が発生している。実験では、上フランジと垂直補剛材結合部および垂直補剛材の圧縮破壊が破壊要因の一つであったが、解析においても同部位に顕著に応力が発生していたことが確認された。

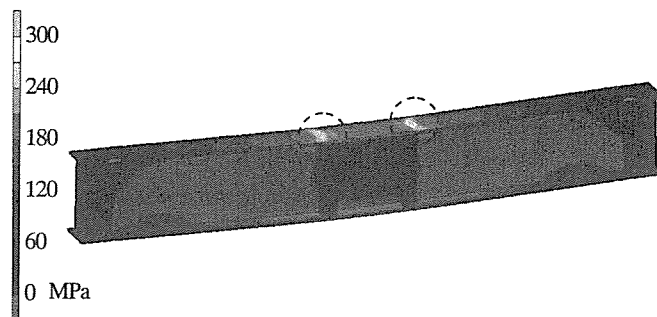


図-9 変形および mises の相当応力コンター図

4.3 最大荷重

最大荷重の実験値、計算値および解析値を表-2 に示す。局部座屈の計算値であるせん断座屈耐力は、鋼プレートガーダー対象とした弾性せん断座屈応力¹⁴⁾に基づき算出した。終局曲げ耐力は、フランジとウェブそれぞれの引張弾性係数を用いて、引張、圧縮強度到達時を最大荷重として、初等はり理論で算出した。せん断耐力はウェブせん断強度に断面積を乗じて算出した。

終局曲げ耐力の計算値は、実験値を大きく上回った。これは、GFRP はり部材が材料強度に達する前に破壊に至っているためである。同様にせん断座屈耐力およびせん断耐力についても破壊モードが異なるため実験値とは差が大きい。これらに対して、解析値は実験値に近い値となった。ただし、実験で同時に生じた破壊現象の要因を特定するには至っておらず、破壊モードの解明は今後の課題である。

今回は試験体数が1体であり最大荷重のばらつきも考えられるため、今後は試験体数を増やして最大荷重のばらつきについて検討し、定量的に精度良く評価する手法について検討が必要である。

表-2 最大荷重比較

	実験値	計算値			解析値
		せん断座屈耐力	終局曲げ耐力	せん断耐力	
最大荷重 (kN)	679	409	1540	410	732
実験値との比	1.00	-	-	-	1.08

表-3 解析パラメータ

設置した垂直補剛材の本数 (片面あたり)

Case	支点部	荷重点部	せん断スパン中間部
1	-	-	-
2	1	-	-
3	2	-	-
4	-	1	-
5	-	2	-
6	1	1	-
7	2	1	-
8	1	1	1

5. パラメータ解析

5.1 概要

GFRP はり部材の終局耐力向上には、垂直補剛材の設置が有効であるが、その形状や材料特性、設置位置などは十分に検討されていない。本検討では、GFRP 製箱型断面垂直補剛材の設置位置をパラメータとした解析を行った。解析パラメータを表-3 に、Case8 の解析モデルを図-10 に示す。解析モデルの垂直補剛材は、応力が集中する箇所を基準として設置し、Case1 は垂直補剛材なし、Case2 および3 は支点部のみ、Case4 および5 は荷重点部のみに垂直補剛材を1~2本設置した。Case6 および7 は、荷重点部に1本、支点部には1本もしくは2本垂直補剛材を設置した。Case8 は、Case6 に加えてせん断スパン中間部にも垂直補剛材を1本設置した。

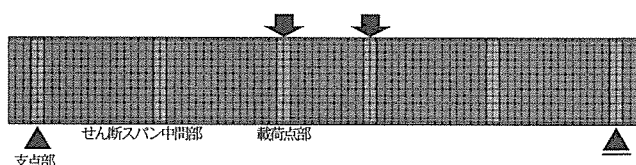


図-10 解析モデル (Case8)

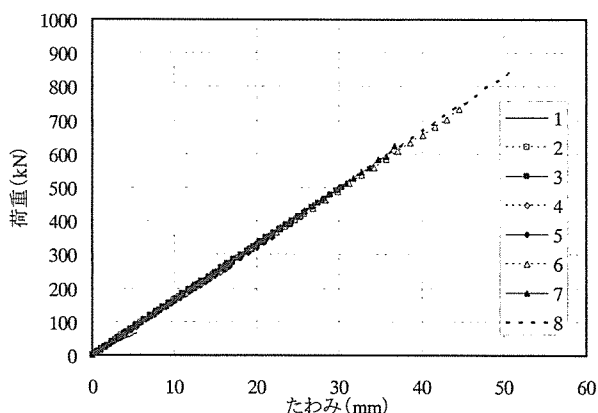


図-11 荷重-たわみ関係

5.2 結果および考察

(1) 変形状

図-11に全 Case のスパン中央部の荷重-たわみ関係を示す。図より、全ての Case で破壊に至るまで線形的に挙動し、その剛性については概ね差異がないことが確認できる。よって、垂直補剛材の設置位置および本数は、はり部材の剛性に影響しないと言える。

(2) 最大荷重

最大荷重については、図-12に示すように垂直補剛材の設置位置が大きく影響することが確認された。載荷点部のみに垂直補剛材を設置した Case4 および Case5 に比べ、支点部のみに垂直補剛材を設置した Case2 および Case3 の最大荷重が 1.2～1.9 倍大きいことがわかる。これは、支点部に設置した垂直補剛材がはり部材の横倒れ抑制に効果があるためで、解析結果からもしり部材の長軸直角方向の変位量が小さいことが確認された。

また Case2 と Case3 および Case4 と Case5 においてそれぞれの最大荷重の差が小さいことから、同一箇所での垂直補剛材の本数は最大荷重にあまり影響がないことがわかる。

また、支点、載荷点部に加えてせん断スパン中間部にも垂直補剛材を設置した Case8 が、Case1 の 10 倍以上の最大荷重であったが、Case6 と顕著な差はなく、支点部および載荷点部のみに垂直補剛材を 1 本ずつ設置することで耐力向上が期待できることがわかる。

(3) 垂直補剛材の影響

図-13に支点部、せん断スパン中間部および載荷点部の垂直補剛材設置位置について、200kN 時におけるウェブの鉛直方向応力分布図を示す。(b)の支点部では、支点部に垂直補剛材のない Case4、5 が他の Case に比べて下フランジ側の鉛直方向発生応力が顕著に大きい。また、(c)のせん断スパン中間部では、全 Case においてほとんど応力が発生していないことがわかる。(b)の支点部とは逆に、(d)の載荷点部では載荷点部に垂直補剛材のない Case2、3 が他の Case に比べて上フランジ側の鉛直方向発生応力が大きい。

支点部に垂直補剛材を 2 本設置した Case3、7 は、1 本のみ設置した Case2、6 と比較するとほとんど差異がないことから、この応力分布図からも同一箇所における垂直補剛材の本数は、ウェブの発生応力への影響が小さいと言える。

また、せん断スパン中間部に垂直補剛材を設置した Case8 は、全ての検討箇所でも Case6 と同様の応力分布であった。よって、支点および載荷点部以外への垂直補剛材の設置についても、ウェブの発生応力への影響が小さいと言える。

図-14にウェブの鉛直方向応力コンター図を示す。図中、(a) (b) (e) (f) の支点部および、(c) (d) の載荷点部のコンター図より、同一箇所における垂直補剛材本数を 1 本から 2 本にすることで、発生応力が若干軽減される傾向が確認できる。

載荷点もしくは支点部のいずれかのみに垂直補剛材を設置した (a) Case2～(d) Case5 では、垂直補剛材を設置していない部位において顕著に鉛直方向応力が発生している。それらに比べて、載荷点および支点部の両方に垂直補剛材を設置した (e) Case6～(g) Case8 では、鉛直方向応力が片方の垂直補剛材設置位置に集中していないことが明らかである。

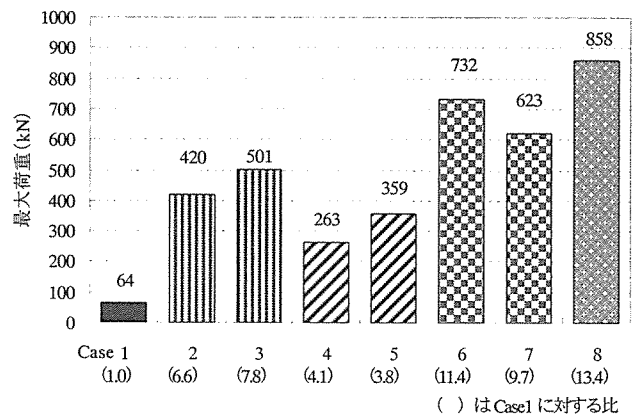


図-12 最大荷重

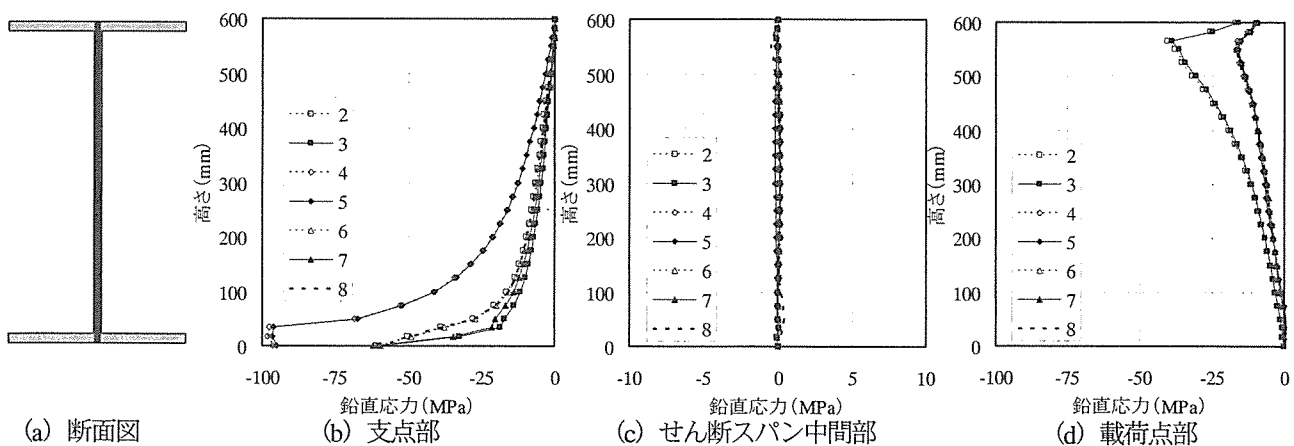


図-13 鉛直方向応力分布図 (200kN 時)

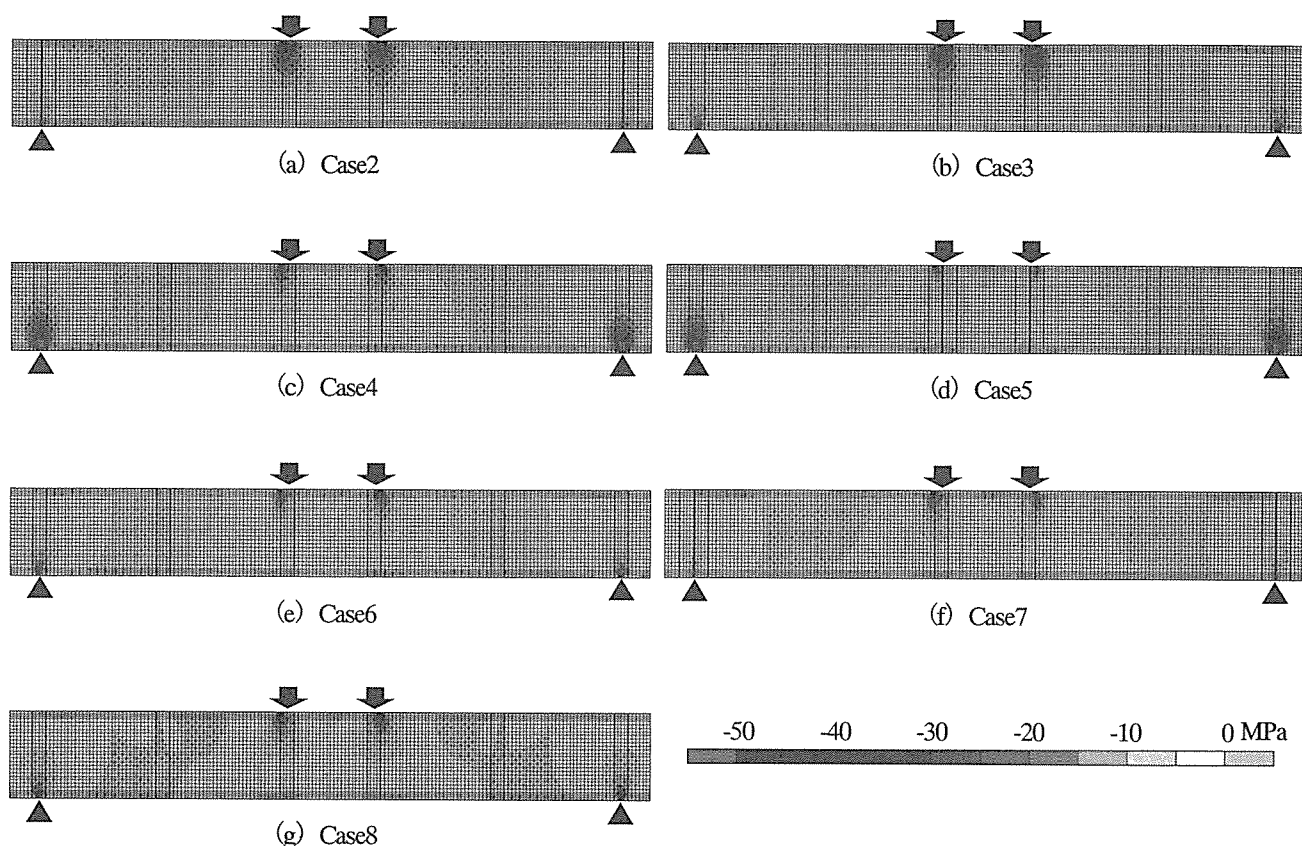


図-14 ウェブの鉛直方向応力コンター図

6. まとめ

本検討では、GFRP 引抜き成形 I 形断面はり部材の曲げ載荷試験を行い、耐荷特性について明らかにした。また、数値解析により耐荷挙動および局部座屈による終局耐力の再現を試みた。さらに、垂直補剛材の設置位置をパラメータとした解析を行い、最大荷重およびはり部材の発生応力について検討した。

得られた結果を以下に示す。

- (1) GFRP はり部材の曲げ試験より、はり部材は線形的な変形挙動を示し、載荷点部付近の圧縮破壊や局部座屈を伴って脆性的に破壊に至った。
- (2) はり部材が破壊に至るまでのたわみやひずみは、初等はり理論において概ね評価できることが確認された。
- (3) 数値解析により、GFRP はり部材の変形性状および終局耐力が概ね再現できた。
- (4) 数値解析により、載荷点部垂直補剛材付近のひずみ分布や応力集中箇所を再現できた。しかし破壊モードの再現には至っていない。
- (5) パラメータ解析により、垂直補剛材は載荷点部より支点部に設置した場合に最大荷重が向上し、載荷点部にも併用設置することで、ウェブの鉛直方向発生応力が低減され、大幅な耐力向上が期待できることが明らかになった。

今後は、数値解析によるはり部材の破壊メカニズムの

解明および終局耐力をさらに精度よく評価するための検討を進める。また、試験体数を増やし最大荷重のばらつきや破壊メカニズムの特定を実験的に明らかにしていく。

謝辞

本研究は、平成19～21年度科研費基盤 (B) (代表：日野伸一) の補助を受けている。また(株)AGCマテックスより試験体を提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Hino,S.,Abdullah,B.:Behavior of GFRP Pultruded I-600 Beam Under Static and Fatigue Loadings,Juanal of Structural Engineering,JSCE,Vol.51A,pp.1267-1274,2005.
- 2) 張惟敦, 鎌田敬治, 佐伯彰一, 山城和男: FRP 製歩道橋の機械的接合部に関する実験的評価, 石川島播磨技報 橋梁特集号, pp.69-72, 2001.
- 3) Thomas Keller,Aixi Zhou:Fatigue behavior of adhesively bonded joints composed of pultruded GFRP adherends for civil infrastructure applications,Composites Part A:Applied Science and Manufacturing 37,pp.1119-1130,2006.
- 4) 増田祐介, 三上修一他: ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)接合部の強度特性に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, I-669, pp.1337-1338, 2002.

- 5) 山田聖志:連続引抜成形 FRP 箱形構造部材の載荷実験と局部座屈耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 20219, pp.437-438, 1995.
- 6) Prakash Kumar and K.Chandrashekhara:Testing and Evaluation of Components for a Composite Bridge Deck,Journal of Reinforced Plastics and Composites,Vol.22, No.5,pp.441-461,2003.
- 7) 浅本晋吾 他: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, 59, pp.1-6, 2007.11
- 8) 小林憲治 他:GFRP 引抜き成形 I 形断面はりの材料力学特性および曲げせん断挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.850-859, 2008.3
- 9) 中村一史 他:ハイブリッド FRP 桁のせん断変形特性とウェブ・クリッピ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, 60, pp.1-6, 2007.11
- 10) 楠窪剛 他:GFRP 構造物の設計法確立のための実験的研究, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, CS2-53, pp.127-128, 2007.9
- 11) Asahi Glass Matex Co., Ltd. : Classification of the mechanical properties of laminates fiber reinforced plastics, 1997.
- 12) 吉田総仁:弾塑性力学の基礎, 共立出版, 1997.
- 13) 土木学会:構造力学公式集, 1986.
- 14) 土木学会:座屈設計ガイドライン, 1987.