

GFRP 梁部材中の材料特性と材料試験値の関 係の検討

Study on the relationship between material properties in GFRP beams and material test results

北海道大学工学部
北海道大学大学院工学研究院
北海道大学大学院工学研究院
北海道大学大学院工学研究院

○学生員
正員
フェロー
正員

細目貴之 (Takayuki Hosome)
松本高志 (Takashi Matsumoto)
林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
何 興文 (Xingwen He)

1. はじめに

近年、社会基盤施設の耐久性・維持管理性の向上がさらに求められる中で、軽量かつ高強度、さらに耐腐食性に優れる材料である繊維強化ポリマー(Fiber Reinforced Polymer、以下、FRP と称す)を用いた構造物が注目されている。FRP は繊維を強化材とし、樹脂を基材とする複合材料である。FRP は非鉄繊維と樹脂の複合材料であるため、耐腐食性に優れる。

しかし、FRP を構造材料として利用するにあたって、材料の設計値を求めるための材料係数は、データが不足していることや、いくつかの方法が混在して使用されていることにより、信頼性のある値を得る状況に至っていない。また、FRP は繊維と樹脂の複合材料のため、繊維の量や方向によって FRP 毎に変形と強度の特性が異なることから、FRP の積層構成を考慮した材料係数の確立が必要である。

本論文では、FRP の中でも比較的安価で実構造物も多いガラス繊維強化ポリマー(Glass Fiber Reinforced Polymer、以下、GFRP と称す)を対象として、合理的な GFRP 構造物の設計を可能にするために、部材挙動から推定した材料特性値と小規模試験片による材料試験値とを比較し、その差異について考察する。具体的には、GFRP 箱形断面梁について 4 点曲げ実験を行うことで変位とひずみの計測を行い、梁理論より弾性定数を推定している。この弾性定数をクープン試験片による材料試験の結果と比較し、その差異について考察するものである。

2. 曲げ載荷実験

2.1 供試体

曲げ載荷実験に用いた供試体は、箱形断面の GFRP 製引抜成形材である。内部の繊維は主に引抜方向の一方向層となっており、基材はビニルエステル樹脂である。標準寸法を表-1 に、供試体の実寸法(4 面の平均)を表-2 に示す。隅角部の内面および外面には半径が板厚程度のアールが付いている。供試体 4 体の名称を以降 SP100-1、SP100-2、SP100-3、SP100-4 とする。

2.2 載荷条件

図-1 に供試体の載荷条件を示す。載荷条件は 4 点曲げとし、総スパン、せん断スパン、および曲げスパンはそれぞれ、850mm、285mm、280mm である。このスパン割りは 3 等分点曲げの条件に近くなるように設定した。

載荷点には、幅 50mm、高さ 55mm、奥行き 200mm の鋼

製載荷ブロックを置き、鋼製ブロックの上の長さ 1635mm の I 形鋼(鋼種は SS400)を介し、幅 154mm、高さ 55mm、奥行き 100mm の鋼製載荷台より載荷を行った。また、載荷点および支点では、幅 50mm、板厚 5mm、奥行き 120mm の鋼製板を石膏で梁供試体に接着することで、不陸調整をしている。

表-1、表-2 の断面寸法等計測を参考にして、箱形断面の 4 面の内、最も板厚の厚い面を上フランジとして載荷を行うことで、4 体の載荷条件を揃えた。

載荷は荷重制御にて行い、約 4.9kN 毎に載荷を停止して、変位とひずみの計測を行った。約 49kN からは約 2.0kN 毎に載荷を行い、載荷は破壊に至るまで継続した。

2.3 計測器

図-2、3、4 に計測器の配置を示す。

変位計の配置については、載荷点位置とせん断スパン中央位置にレーザー変位計を設置した。また、載荷することによって生じる支点の沈下量を把握するために支点治具端にダイヤルゲージを設置した。

一軸ひずみゲージと三軸ひずみゲージについては、一

表-1 標準寸法

形状記号	高さ・幅(mm)	板厚(mm)
SP100	100.00	5.00

表-2 供試体寸法

供試体名	高さ・幅(mm)	板厚(mm)
SP100-1	100.39	5.18
SP100-2	100.23	5.18
SP100-3	100.41	5.18
SP100-4	100.49	5.35

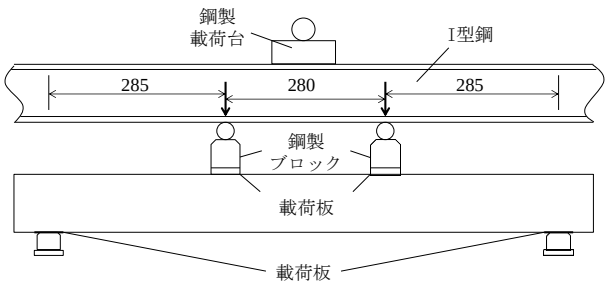


図-1 載荷条件

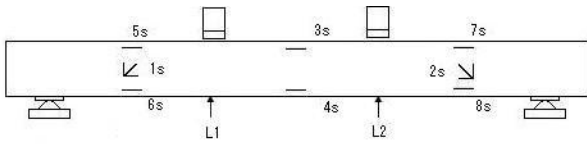


図-2 梁側面計測器位置

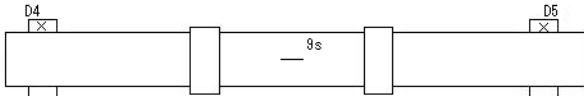


図-3 梁上面計測器位置

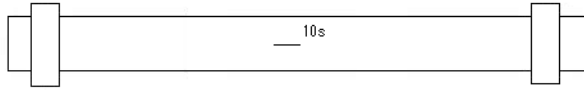


図-4 梁下面計測器位置

軸ひずみゲージは曲げスパン中央部にウェブの上端と下端からそれぞれ 10mm 離れた点に設置した。また、せん断スパン中央部にも上端と下端からそれぞれ 10mm 離れた点にも一軸ひずみゲージを設置した。さらに、曲げスパン中央の梁上面と梁下面にも一軸ひずみゲージを設置した。ここで、上端の一軸ひずみゲージは圧縮方向の梁方向直ひずみを示し、下端は引張方向の梁方向直ひずみを計測する。三軸ひずみゲージは、せん断スパン中央部の中立軸位置に設置した。

3. ひずみとたわみ変位の算定式

梁理論に基づいた梁軸方向直ひずみと面内せん断ひずみの算定式を示す。これらは曲げ載荷実験で計測されるひずみから、梁軸方向弾性係数とせん断弾性係数を算出する際に用いる。

梁軸方向直ひずみ ε_x は、

$$\varepsilon_x = \frac{M_z}{E_x I_z} y \quad (1a)$$

で与えられる。ここで M_z は着目点における z 軸に関する曲げモーメント、 E_x は梁軸方向の弾性係数、 I_z は z 軸に関する断面 2 次モーメント、 y は中立軸から断面の着目点までの距離である。

面内せん断ひずみ γ_{xy} は、図-5 の断面に基づき、

$$\gamma_{xy} = \frac{V_y}{G_{xy} I_z} \left\{ \frac{h}{2} s_b - \left(\frac{y^2}{2} - \frac{h_e^2}{8} \right) \right\} \quad (1b)$$

で与えられる。ここで V_y は梁軸方向着目点におけるせん断力、 G_{xy} はせん断弾性係数、 h_e は梁の有効高さ、 s_b は図-5 に示す箱形断面の幅方向対称面からの距離である。

たわみ変位 δ は、

$$\delta = \frac{P}{2E_x I_z} \left\{ -\frac{x^2}{6} + (a^2 + ab) \frac{x}{2} \right\} + \frac{Px}{2G_{xy} A_w} \quad (1c)$$

と表される。ここで P は荷重、 x は着目点、 a はせん断スパン長、 b は曲げスパン長、 A_w はウェブ断面積である。

4. 実験結果

4.1 ひずみと変位

破壊まで載荷を行った 4 体の最大耐力は、SP100-1 が 56.25kN、SP100-2 が 55.37kN、SP100-3 が 54.19kN、SP100-4 が 51.65kN であった。4 体の供試体の最大耐力の平均は

54.37kN であった。いずれの供試体も、上フランジが局部座屈して荷重減が生じた後に、さらに荷重を増加させると載荷板直下の隅角部より亀裂が生じて、ウェブと上フランジが分離する破壊形態となった。

以下の図-6 から図-8 に、SP100-1 の実験結果を示す。他の供試体も同様の結果を示している。また、図-9 と図-10 に左および右側載荷位置における供試体 4 体のたわ

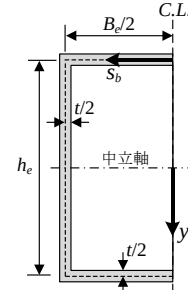


図-5 断面の定義

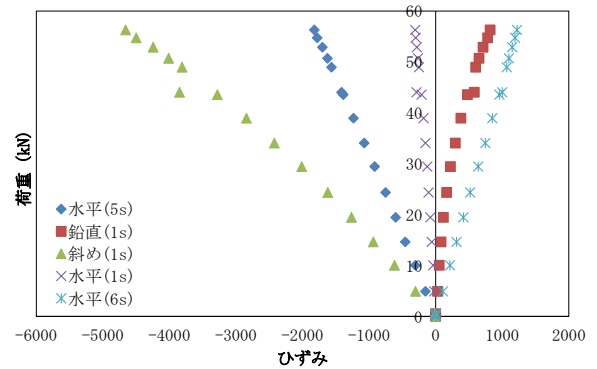


図-6 左側せん断スパンのひずみ

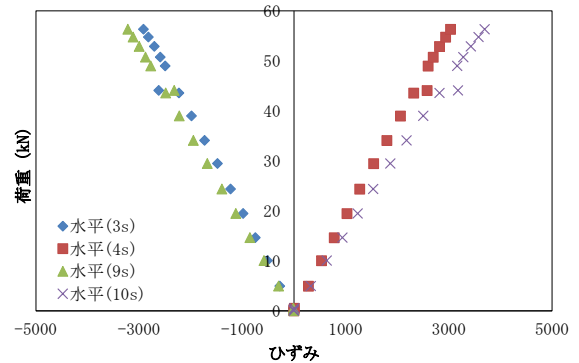


図-7 曲げスパンのひずみ

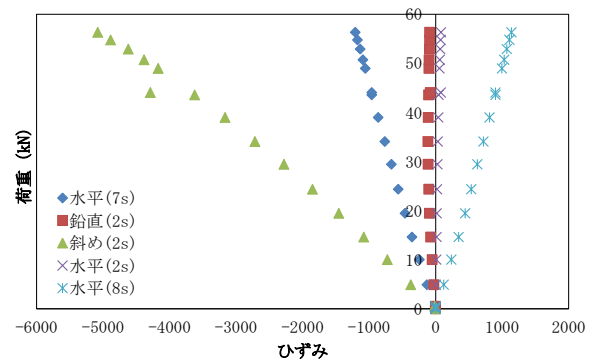


図-8 右側せん断スパンのひずみ

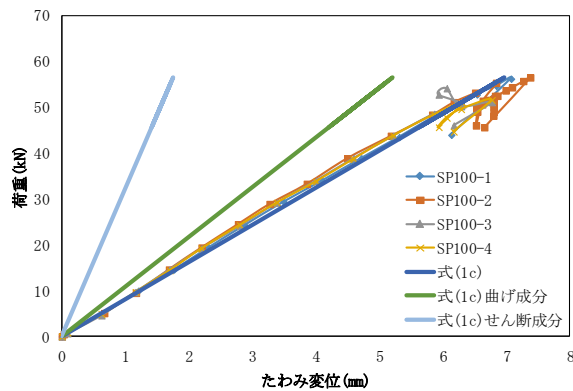


図-9 左側載荷位置(L1)の変位

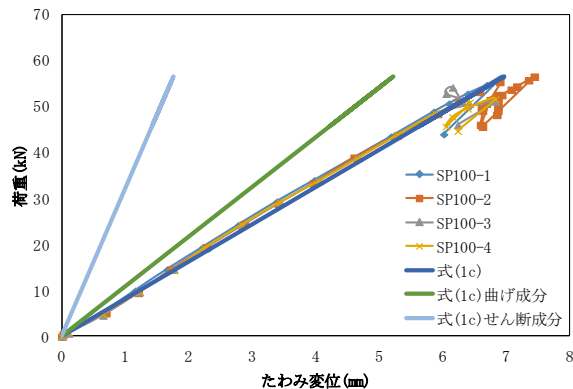


図-10 右側載荷位置(L2)の変位

み変位を示す。たわみ変位はレーザー変位計の値から、両支点の沈下量を按分し差し引いた結果を示している。

図-6 から図-8 において、梁軸方向圧縮ひずみが生じると考えられる梁上部に当たる 5s, 3s, 7s がマイナスの値を示している。また、梁軸方向引張ひずみが生じると考えられる梁下部に当たる 6s, 4s, 8s においては、プラスの値を示している。また、中立軸に当たる三軸ひずみゲージ 1s, 2s の水平方向ひずみゲージはゼロに近い値を示している。三軸ひずみゲージの鉛直方向については小さい値ではあるが、マイナスの値を示しており、圧縮ひずみが生じていることが分かる。三軸ひずみゲージの斜め方向においても、マイナスの値を示しており、圧縮ひずみが生じていることが分かる。ただ、斜め方向のひずみは荷重増加に伴い非線形性が明瞭に観察できる。

4.2 弾性係数の推定値

曲げ載荷実験によって得られた圧縮側と引張側の梁軸方向直ひずみと、断面寸法から得られる断面 2 次モーメントを(1a)の式に代入することで、梁軸方向の弾性係数 E_x を得た。図-11 に供試体 4 体それぞれの圧縮側(3s)の梁軸方向弾性係数、同様に図-12 に引張側(4s)の梁軸方向弾性係数を示す。いずれの供試体も 15kN 以降では弾性係数の値が概ね安定している。荷重初期に弾性係数が小さく、以降 15kN まで上昇していく原因としては、荷重時の遊びが解消していく、もしくは GFRP 内の繊維の緩みを引き伸ばされている可能性が考えられる。

弾性係数がある程度安定している荷重が約 15kN から

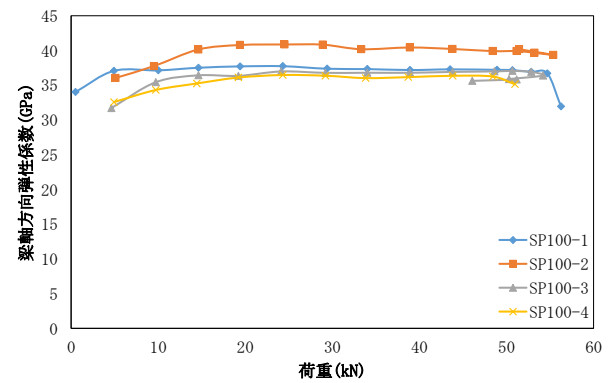


図-11 3s-梁軸方向弾性係数(圧縮)

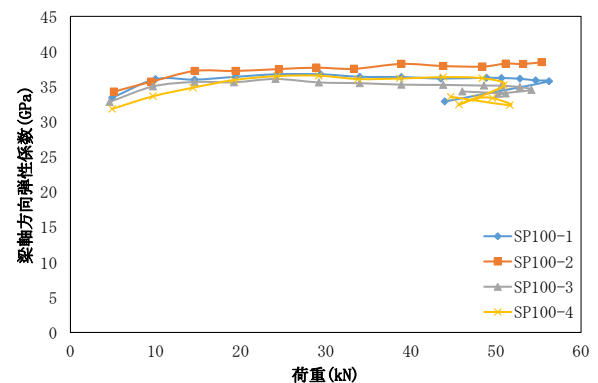


図-12 4s-梁軸方向弾性係数(引張)

約 50kN の範囲における弾性係数について平均値を求めた。軸方向圧縮弾性係数について、SP100-1 は 37.36GPa, SP100-2 は 40.36GPa, SP100-3 は 36.64GPa, SP100-4 は 35.84GPa であった。また、軸方向引張弾性係数について、SP100-1 は 36.35GPa, SP100-2 は 35.02GPa, SP100-3 は 35.43GPa, SP100-4 は 35.74GPa であった。

次に、三軸ひずみゲージから得られたひずみを用いてせん断ひずみを求め、断面寸法から得られる値を(1b)の式に代入することでせん断弾性係数 G_{xy} を得た。図-13 に供試体 4 体それぞれの 1s でのせん断弾性係数、同様に図-14 に 2s でのせん断弾性係数を示す。15kN から 50kN におけるせん断弾性係数の平均値を求めた。1s について、SP100-1 は 5.47GPa, SP100-2 は 4.68GPa, SP100-3 は 4.33GPa, SP100-4 は 4.52GPa であった。2s について、SP100-1 は 3.72GPa, SP100-2 は 4.66GPa, SP100-3 は 4.55GPa, SP100-4 は 5.28GPa であった。せん断弾性係数は 15kN 以降で概ね荷重に伴う減少傾向を示している。これは、せん断応力-ひずみ関係が非線形であることを示している。また、梁軸方向弾性係数と比較してばらつきが大きい。

さらに、上記によって得られた、圧縮側と引張側の E_x の平均値、 G_{xy} 、標準寸法における I_z と A_w を(1c)の式に代入することでたわみ変位を得た。この結果を、図-9 に L1 でのたわみ変位とともに、図-10 に L2 でのたわみ変位とともに示す。また、(1c)の式において、弾性係数 E に関する曲げ成分と、せん断弾性係数 G に関するせん断成分それぞれで生じるたわみ変位も示す。本実験において使

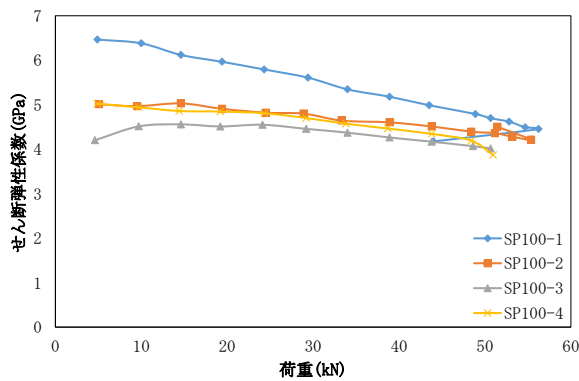


図-13 1s-せん断弾性係数

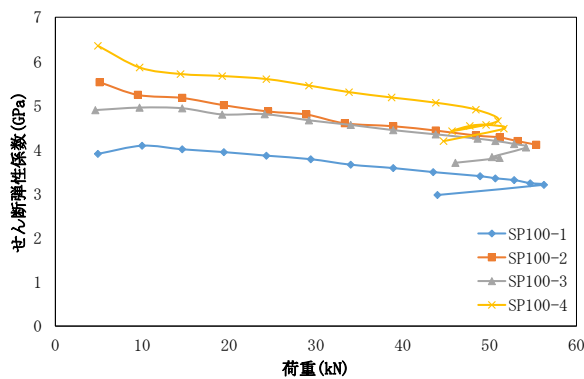


図-14 2s-せん断弾性係数

用した FRP の内部の繊維が一方向層となっているために、たわみ変位に弾性係数のみでなく、せん断弾性係数による影響が無視できないものであることが分かる。また、(1c)の式は実験結果の下限側にある。これは、せん断応力-ひずみ関係が実際には非線形であるが、せん断弾性係数 G を約 15 から 50kN の間で平均値を求めたことによると考えられる。

5. 材料試験値との比較

弾性係数について、GFRP のクーボン試験による評価と本論文の梁部材実験による評価を行った。クーボン試験により得た弾性係数の値と梁部材実験により推定した弾性定数の値の比較を行うことで、GFRP 梁部材中の材料特性と材料試験値の関係の検討を行う。

表-3 に示すひずみの範囲は、JIS によるクーボン試験において弾性係数を算出する際に用いるものである。本研究の梁部材実験においても同じひずみ範囲として弾性係数を推定した。これらの弾性係数の比較を表-4 に示す。引張と圧縮の弾性係数は、それぞれ 9%と 16%の差異があった。せん断弾性係数については、部材実験から得た弾性係数の方が 22%大きくなる結果となった。いずれの弾性係数も部材実験からの推定値が大きくなる結果となった。これは、クーボン試験において、繊維の量や方向が部材中の状態と異なっているためであると考えられる。

表-3 弾性係数を検討したひずみ範囲

	ひずみ($\times 10^{-6}$)
引張弾性係数	500-1000
圧縮弾性係数	500-1000
せん断弾性係数	500-2000

表-4 クーボン試験と部材実験の弾性係数の比較

	クーボン試験 (GPa)	部材実験 (GPa)	部材/ クーボン
引張弾性係数	32.2	35.2	1.09
圧縮弾性係数	32.0	37	1.16
せん断弾性係数	4.2	5.1	1.22

6. まとめ

本研究では、GFRP 箱形断面梁部材 4 体において、4 点曲げ载荷実験を行った。それに伴い、変位とひずみの計測を行い、梁理論より弾性定数を推定した。この弾性定数をクーボン試験片による材料試験の結果と比較し、その差異について考察した。

実験において変位とひずみから算出した弾性定数を材料試験の結果と比較したところ、部材実験の値が常に大きく、引張弾性係数は 9%、圧縮弾性係数は 16%、せん断弾性係数は 22%大きくなった。

供試体 4 体のサンプル数では、弾性定数にばらつきが見られるので、さらに多くのデータを得ることで GFRP 構造物設計における材料係数の設定を可能にしていくと考えられる。

謝辞

本研究は、土木学会複合構造委員会 FRP 複合構造研究小委員会の活動の一環としてなされたものである。関係各位に謝意を示す。

参考文献

- 1) 土木学会：FRP 橋梁 - 技術とその展望 -，2004。
- 2) 松本高志，竹津宗平，林川俊郎，何興文：GFRP 梁の断面寸法が曲げ特性に及ぼす影響の検討，土木学会北海道支部論文報告集 Vol.70, A-66, 2014。
- 3) 土木学会：土木構造物用 FRP 部材の設計基礎データ（複合構造レポート 11），2014。