有限要素解析による GFRP 梁の変形挙動の解明

A study on the failure mechanism of GFRP box beams by finite element analysis

北海道大学大学院工学院	学生会員	○中村 知美	(Tomomi Nakamura)
北海道大学大学院工学研究院	正会員	松本 高志	(Takashi Matsumoto)

1. はじめに

社会基盤施設の再構築や、架設作業および維持管理の 合理化などの重要性が指摘されるなかで、比強度が高く、 耐食性に優れた構造材料として繊維強化ポリマー(Fiber Reinforced Polymer;以下 FRP)が注目されている¹⁾。

FRP は、社会基盤用途においてもコンクリートや鋼 構造物の損傷・劣化部位に対する補修・補強材としての 活用が多く図られてきた。さらに施工に大きな重機を必 要としないため施工性が高く、工期の短縮が可能であり、 設計及び施工の見直しを図ることができる。また耐腐食 性を有するため、塩害・酸害など過酷な環境下での適応 性に優れ、維持管理労力の軽減、長寿命化等によるライ フサイクルコストの縮減などが期待できる²⁾。このよう に、FRP は社会基盤構造物においても安全性と耐久性を 確保できる構造材料として有望である。橋梁分野におい ては、FRP のなかでも比較的安価なガラス繊維強化ポリ マー(Glass Fiber Reinforced Polymer;以下 GFRP)が梁 部材などの主要部材としても期待され、沖縄県に GFRP 歩道橋が架設された事例もある³⁾。

しかしながら、土木分野において GFRP は比較的新し い材料であるため、その損傷・破壊過程を詳しく把握す る必要がある。GFRP は異方性を有し、破壊が脆性的で あるため、損傷・破壊過程の実験的な把握は難しい。そ のため、有限要素解析を用いることによって、破壊に至 るひずみ分布、応力状態の特徴を捉えることにより、損 傷・破壊過程理解が必要不可欠である。

著者らの既往の実験において、GFRP 梁の曲げ実験と 画像解析による検討が行われてきている。曲げ載荷実験 では、変位、ひずみ、破壊形態、耐荷力の把握と、材料 実験により得られた材料特性値と合わせて、変位と耐荷 力の算定値を実験値と比較検討している。画像解析では、 せん断ひずみ、最小主ひずみの結果より、載荷板端部に おいて観察された局所的なひずみ破壊箇所との関連性が 得られたが、実験で観察された破壊箇所との合致はでき ていない。

以上の背景から、本研究ではGFRPの異方性を考慮し た梁のモデルを構築し、有限要素解析を用いて梁に生じ る卓越的な応力と変形を把握し、さらに載荷実験および 画像解析と比較することで、妥当性を確認することを目 的とする。

2. 載荷実験の概要

既往研究の中空断面 GFRP 梁の曲げ載荷実験について 以下に述べる。実験結果については、有限要素解析の結 果と合わせて示す。

表-1 供試体の標準寸法





図-1 載荷条件(単位:mm)

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。供 試体は、形状記号が SP75 および SP100 の供試体の標準 寸法を表-1 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。

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。

載荷は、荷重制御により約5kNごとに載荷を停止して 計測を行い、載荷は破壊に至るまで継続した。

2.3 計測項目

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。一軸ひずみゲー ジと三軸ひずみゲージについては、一軸ひずみゲージは 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。

3. GFRP 梁の有限要素解析

曲げ荷重下の中空断面 GFRP 梁の基本的な変形挙動と 耐荷機構を把握するため、有限要素法により線形解析を 行い実験結果と比較する。なお、解析コードには MSC.Marc を用いた。

3.1 解析条件

(1) 境界条件

梁の全体座標系を X-Y-Z 座標系とし、X、Y、Z をそれ ぞれ、梁軸方向、鉛直方向、奥行き方向とする。解析で は、GFRP を4節点複合材積層薄肉シェル要素、載荷板 と支持板は8節点固体要素とし、図に示すように梁の対 称性を考慮して 1/2 モデルとして、対称面節点の X 方向 を拘束した。解析の支点は支点上の節点の Y 方向変位を 拘束し、鉛直荷重は面に作用する圧力として与えている。

(2) 材料特性

a) 載荷点と支点

載荷板と支持板の材料特性は *E*=200GPa、*v*=0.3 とし、 弾性体としてモデル化する。解析モデルでは、載荷板の 寸法を、幅 50mm、高さ 50mm、奥行き 100mm、支持板 の寸法を、幅 50mm、高さ 10mm、奥行き 100mm とした。 b) GFRP

GFRP は異方性とし、材料特性は表-2 に示す値を用いた。添え字 1、2、3、T、C、U はそれぞれ梁軸方向、梁 周方向、積層方向、引張強度、圧縮強度、せん断強度を示す。

三次元の異方性要素には9つの独立な弾性定数が必要 である。式(1)にひずみ-応力関係を示す。

$$\begin{cases} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{cases} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{1}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{1}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{1}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_{2}} & \frac{1}{E_{2}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{2}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_{3}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{3}} & \frac{1}{E_{3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{pmatrix}$$
(1)

ここに、*E*:弾性係数、*G*:せん断弾性係数、*v*:ポアソン比である。

異方性要素のポアソン比は、等方性の場合と異なり、 添え字の1文字目は応力の方向、2文字目はひずみの方 向を示すため、方向に注意しなければならない。一般に 単層板軸直角方向応力を受ける時のポアソン比v₁₂につ いては、ベッチの相反定理が成り立つため、式(2)によ り算定することができる。ポアソン比はそれぞれが独立 ではなく、式(2)により3つが独立な定数ということに なる。

$$\nu_{12} = \nu_{21} \frac{E_2}{E_1} \tag{2}$$

本研究における解析対象の GFRP 梁では、材料試験に より面内に関する4つの工学的弾性定数(E_1 、 E_2 、 G_{12} および v_{12})は既に得られている。残りの面外に関する工 学的弾性定数は計算により算出あるいは、既往の研究⁵⁾ を参考に仮定する。

(3) GFRP の破壊規準

GFRPの材料破壊の規準には、式(3)に示すTsai-Wu の破壊基準を用いる。左辺が1となった時に材料破壊す ることを意味する。

$$F_{1}\sigma_{1} + F_{2}\sigma_{2} + F_{3}\sigma_{3} + F_{11}\sigma_{1}^{2} + F_{22}\sigma_{2}^{2} + F_{33}\sigma_{3}^{2} + 2F_{12}\sigma_{1}\sigma_{2} + 2F_{23}\sigma_{2}\sigma_{3} + 2F_{31}\sigma_{3}\sigma_{1} + F_{44}\tau_{23}^{2} + F_{55}\tau_{31}^{2} + F_{66}\tau_{12}^{2} = F \quad (3)$$



図-2 解析モデル

表一2	GFRP	の材料特性値4)
表一2	GFRP	の材料特性値4)

材料特性	単位	
E_1	MPa	9100
E_2		32100
E_3		8500
G_{12}		3320
G 23		3320
G 31		3320
V 12		0.279
v 23		0.37
v 31		0.261
σ_1^T	MPa	22.5
σ_1^{C}		101
$\sigma_2^{\ C}$		397
σ_2^T		609
$\sigma_3^{\ C}$		62
σ_3^T		173
τ_{12}^{U}		25.2
τ_{23}^{U}		33.2
$ au_{31}^{U}$		38.7

$$F_{1} = \frac{1}{\sigma_{1}^{T}} + \frac{1}{\sigma_{1}^{C}}, \quad F_{2} = \frac{1}{\sigma_{2}^{T}} + \frac{1}{\sigma_{2}^{C}}, \quad F_{3} = \frac{1}{\sigma_{3}^{T}} + \frac{1}{\sigma_{3}^{C}}, \quad F_{11} = -\frac{1}{\sigma_{1}^{T} \cdot \sigma_{1}^{C}},$$

$$F_{22} = -\frac{1}{\sigma_{2}^{T} \cdot \sigma_{2}^{C}}, \quad F_{33} = -\frac{1}{\sigma_{3}^{T} \cdot \sigma_{3}^{C}}, \quad F_{44} = \frac{1}{(\tau_{23}^{U})^{2}}, \quad F_{55} = \frac{1}{(\tau_{31}^{U})^{2}},$$

$$F_{66} = \frac{1}{(\tau_{12}^{U})^{2}}, \quad F_{12} = -0.5\sqrt{F_{11}F_{22}},$$

$$F_{23} = -0.5\sqrt{F_{22}F_{33}}, \quad F_{31} = -0.5\sqrt{F_{33}F_{11}}$$
(4)

ここで、 σ_1 :梁軸方向直応力、 σ_2 :梁周方向直応力、 σ_3 : 積層方向直応力、 τ_{12} :面内せん断応力、 τ_{23} および、 τ_{31} : 面外せん断応力、 F_i (*i*=1、2、3)および、 F_{ij} (*i*, *j*=1、 2、3、4、5、6):Tsai-Wu の異方性係数、 σ_1^T :梁軸 方向引張強度、 σ_1^C :梁軸方向圧縮強度、 σ_2^T :梁周方向引 張強度、 σ_2^C :梁周方向圧縮強度、 σ_3^T :積層方向引張強度、 σ_3^C :積層方向圧縮強度、 τ_{12}^U :面内せん断強度、 τ_{23}^U およ び、 τ_{31}^U :面外せん断強度である。

4. 解析結果と考察

4.1 荷重-変位関係

図-3と図-4にそれぞれ、SP75および SP100の載荷 点位置における実験と解析の荷重-変位関係を示す。 Tsai-Wu の破壊指標値が降伏規準を満たす節点が発生し た時点を黒丸で示す。結果として、SP75および SP100 の解析による耐荷力はそれぞれ、26.5kN と 36kN である。 また SP75 と SP100 の実験における耐荷力はそれぞれ、 44.9kN と 56.5kN であった。よって解析における GFRP の損傷は、SP75 と SP100 共に、実験の梁の耐荷力より小 さい荷重で生じる結果となった。

また梁は概ね線形挙動を示しているが、解析耐荷力を 超えた辺りより実験では非線形となり、剛性の低下が見 られる。実験中に隅角部での割れは肉眼で観察できてい ないが、亀裂発生音が生じていることから、進行的に損 傷が進んだ結果だと考えられる。

4.2 梁軸方向直ひずみ

図-5に SP75 および SP100の実験耐荷力時の梁軸方向 直ひずみを示す。梁は曲げを受けると、梁上部で圧縮、 梁下部で引張の応力が生じる。それに応じて梁上部では 圧縮ひずみ、梁下部では引張圧縮ひずみを生じる。図-5 を見ると、曲げスパンにおいて中立軸が梁高さ中央にあ り、概ね理論通りのひずみとなっていることが分かる。 梁軸方向直ひずみはせん断ひずみに比べて2分の1から 3分の1程度と小さく、供試体の破壊に直接関係してい る可能性は低いと考える。

4.3 せん断ひずみ

図-6にSP75およびSP100の実験耐荷力時のせん断ひ ずみ分布を示す。せん断スパンのウェブ中央高さ付近に 大きなせん断ひずみが生じている。載荷板端部に局所的 なひずみ集中が見られ、15,000 μを超えている。また、 載荷板端部よりウェブ中央高さ付近へと高いせん断ひず みの領域が確認できる。破壊箇所について、載荷板のせ ん断スパン側端部で上フランジが座屈し、上フランジと ウェブの境目が分離して破壊する形態が見られたことか ら、載荷板端部に生じた局所的なひずみ集中と破壊箇所 との関連性が考えられる。

4.4 最小主ひずみ

図-7にSP75およびSP100の実験耐荷力時の最小主ひ ずみ分布を示す。せん断スパンにおいて最小主ひずみ(圧 縮)が生じ、特に載荷板端部には局所的なひずみ集中が 見られる。載荷板端部からせん断スパンのウェブ中央高 さ付近にかけて高い主ひずみの領域を確認することがで きる。

4.5 最小主応力

図-8にSP75およびSP100の実験耐荷力時の最小主応 力分布を示す。応力とひずみの方向は等方性材料では一 致するが、本研究のGFRP梁は異方性部材として作成さ れているため、主応力と主ひずみの結果を比較すること で、梁の損傷・破壊過程の検討を行う。最小主応力分布 と最小主ひずみ分布を比較すると、最小主ひずみでは載 荷板のせん断スパン側端部に局所的なひずみ集中が見ら れ、載荷板端部からせん断スパンのウェブ中央高さ付近 にかけて高い主ひずみの領域が確認できるのに対し、最 小主応力では下フランジ側から上フランジ側へと値が大 きくなっていき、載荷板付近で特に大きな主応力が確認 できる。破壊箇所については、載荷板付近で大きな主応 力が確認できるものの、載荷板端部で目立った主応力は 見られないことから、最小主応力分布より破壊箇所・破 壊形態を特定することは困難である。



4. 6 破壞指標値

図-9と図-10にそれぞれ SP75 および SP100の解析耐 荷力(F=1)時と実験耐荷力時の Tsai-Wu の破壊指標値 等高線を示す。図-9と図-10より、せん断スパンのウ ェブ中央高さ付近から載荷板と支点に向かって値の高い 領域が広がっている。特に、載荷板のせん断スパン側端 部において高い値を示していることがわかる。図-9 と 図-10を比較すると、載荷板端部で破壊が生じた後はせ ん断スパンにおいて破壊指標値の上昇が確認できた。

実験では、SP75 と SP100 の供試体はともに載荷板のせん断スパン側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の間が分離する破壊形態となった。また解析の破壊位置と一致していることを確認した。

5. まとめ

本報では、断面高さの異なる GFRP 梁の曲げ載荷実験 を対象として、3次元有限要素解析により梁に生じる卓 越的な応力と変形を把握し、破壊損傷過程の検討を行っ た。また載荷実験および画像解析との妥当性を確認した。 以下に本報のまとめを示す。

本解析では GFRP の非線形性を考慮していないが、破 壊位置や梁の変形は実験と概ね一致する結果であった。

先行研究の画像解析結果⁵の梁軸方向直ひずみ、せん 断ひずみ、最小主ひずみ、最小主応力及び破壊指標値に おいて、傾向が一致していることを確認した。また本解 析の SP75 と SP100 を比較すると、今回比較した項目で は傾向に差異はなかった。

せん断ひずみ、最小主ひずみの結果より、載荷板端部 において局所的なひずみを観察することができ、破壊箇 所との関連性が得られた。また破壊指標値の比較・検討 から、破壊指標値がTsai-Wuの降伏規準を満たす箇所か ら破壊を生じることが明らかとなった。

今後は、今回検討した梁軸方向直ひずみ、せん断ひず み、最小主ひずみ、最小主応力及び破壊指標値に加え、 最大主ひずみ、最大主応力についても検討し、解析によ る損傷と破壊過程の検討をさらに進めていく。

参考文献

1) 櫻庭浩樹他:積層構成が異なる CFRP 梁の有限要素解 析による耐荷機構に関する検討、土木学会北海道支部論 文報告集 Vol. 60、A-22、2010.

2) 土木学会: FRP 橋梁 - 技術とその展望 - 、2004.

3) 山城和男:国内初 実用 FRP 橋(横断歩道橋)の整備、しまたてい、No.14、pp. 22-25、2000.

4) 土木学会:土木構造用 FRP 部材の設計基礎データ(複 合構造レポート 11)、2014.

5) 櫻庭浩樹他:曲げと軸力作用下におけるコンクリート 充填箱形断面 CFRP 梁の変形および耐荷特性の解析的検 討、構造工学論文集、Vol.56A、pp. 979-990、2010.

5) 松本高志、小林周史: GFRP 製箱形断面梁における変 形・損傷の画像解析、第11回複合・合成構造の活用に関 するシンポジウム論文集、pp.221-228、2015.







図-8 最小主応力分布



図-9 Tsai-Wu 破壊指標値等高線 (F=1)



図-10 耐荷力時の Tsai-Wu 破壊指標値等高線