

# 約20年間暴露されたGFRP引抜成形角パイプの 曲げ耐荷力実験

辰田 翔太<sup>1</sup>・北根 安雄<sup>2</sup>・日比 英輝<sup>3</sup>  
佐藤 顕彦<sup>4</sup>・杉浦 邦征<sup>5</sup>・西崎 到<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 学生員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: tatsuta.shouta.47e@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: kitane.yasuo.2x@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 株式会社ヒビ代表取締役 (〒503-1337 岐阜県養老郡 養老町直江 613-1)  
E-mail: hidekey@hibi-frp.co.jp

<sup>4</sup> 学生員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: sato.akihiko.45m@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup> 正会員 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: sugiura.kunitomo.4n@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>6</sup> 正会員 (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター (〒305-8516 つくば市南原 1-6)  
E-mail: nishizaki-i553jp@pwri.go.jp

GFRP 引抜成形材は土木構造部材として広く用いられているが、長期暴露後のデータが少なく耐久性が不明確なことから、主要構造部材としては普及していない。本研究では、長期暴露後の GFRP 引抜成形材の部材としての残存性能を明らかにすることを目的に、約 20 年間屋外暴露された GFRP 引抜成形角パイプ及び同期間室内保管されていた同部材を対象に、静的 4 点曲げ試験を行うことにより残存曲げ耐荷力を明らかにした。また、長期暴露後においてもチモシェンコのはり理論により変形挙動を概ね評価可能であったことを確認した。さらに、得られた曲げ耐荷力を局部座屈応力の計算値や初等はり理論から用いて計算される値と比較し、暴露後の供試体において、載荷に伴う角部の破壊進行により回転拘束効果が低下し局部座屈耐荷力が小さくなる可能性を示した。

**Key Words:** GFRP Pultruded Member, Long-term exposure, Bending, Local Buckling

## 1. はじめに

FRP (Fiber Reinforced Polymer) は、樹脂を母材、繊維を強化材に用いた複合材料であり、強度や弾性係数などの機械的性質だけでなく、軽量性や耐食性などの機能的特性にも優れている。FRP はこれらの利点から、航空機、船舶、自動車などの分野における用途の比率が大きい<sup>1)</sup>。一方、土木構造物においては、既設構造物の補修・補強材としての利用が中心であり<sup>2)</sup>、主要構造部材としては水門や歩道橋などにおいて適用される例があるが<sup>3,4)</sup>、これらの施工件数は、鋼・コンクリート製構造物と比べるとごく僅かなものに留まり、あまり普及していないのが現状である。

FRP を土木構造部材として用いる際には、大きな断面を経済的に得られること、ガラス繊維が他の繊維と比べ安価に入手できることから、GFRP 引抜成形材が用いられることが多い。しかし、土木構造部材としての FRP の適用は比較的歴史が浅いため、長期間暴露データが限られており、加えてそのデータもハンドレイアップ成形やプレス成形によるものがほとんどであるため、引抜成形品の長期暴露データは少ない<sup>1)</sup>。このような耐久性の不明確さも、国内における FRP を用いた土木構造物の普及を妨げている原因の一つである<sup>4,5)</sup>。

GFRP 引抜成形材の暴露試験としては、西崎らが 10 年間の暴露試験を実施し、その結果無塗装の暴露供試体において 0 度方向の引張強度が最大 17% 低下したことを報

告している<sup>6)</sup>。また、著者らも先行研究において、GFRP引抜成形材の長期間における暴露試験データの蓄積を目的に、約20年間暴露されたGFRP引抜成形材の残存力学性能について研究を実施し<sup>7)</sup>、その結果、無塗装の暴露供試体において、引抜0度方向の引張強度が最大50%低下していることを明らかにした。しかし、構造部材としてFRPを適用する場合は、材料としてだけでなく部材としての残存性能も把握する必要がある。

本研究では、長期暴露されたFRPの部材曲げ耐力に着目し、土木研究所において約20年間暴露された引抜成形GFRP角パイプについて、静的4点曲げ载荷試験を通じて暴露後の残存曲げ耐力を調べた。なお、用いた引抜成形材には塗装などの表面保護層が設けられていないことを付記しておく。

## 2. 供試体

### (1) 概要

本研究で用いる供試体は、土木研究所つくば屋外暴露場（茨城県つくば市）で、約20年間屋外暴露された、無塗装の引抜成形GFRP角パイプ（AGCマテックス製、KP40）及び同期間室内に保管されていた同部材である。以降、暴露されたKP40を暴露供試体、未暴露のモノを未暴露供試体と呼称する。供試体は長手方向を南北に向け、水平に対して約5度の角度で南向きに傾斜をつけて架台に固定され暴露された。供試体の外観写真を図-1に、寸法及び各面名称を図-2に示す。面名称には、未暴露供試体には大文字、暴露供試体には小文字のアルファベットの図-2のように割り振った。暴露供試体の暴露面をa面、設置面をb面と称している。供試体に使用された樹脂はビニエステル樹脂（VE）、繊維はガラス繊維であり、積層構成は中心部にロービング（ROV）が0度方向（引抜方向）に引き揃えられ、表層部にコンティニューアストランドマット（CSM）が配置されている。また、繊維体積含有率は未暴露供試体を対象に、JIS K7052<sup>8)</sup>に従い焼成試験で求められた値がA面・B面において45.9%、C面・D面において49.6%となっている。

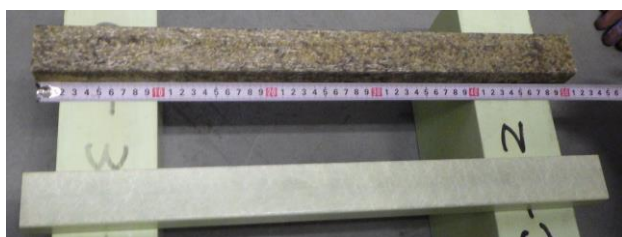


図-1 KP40 供試体（上が暴露あり、下が暴露なし）

### (2) 外観観察

対象の暴露供試体は複数ある同暴露期間のKP40の中から選定した。これらの暴露供試体には外観上からa面において暴露程度に差が認められており、ROVが大規模に露出している供試体（以下、RLE供試体：Roving Large Exposure）、ROVが小規模に露出している供試体（以下、RSE供試体：Roving Small Exposure）、ROVの露出が認められない供試体（以下、RNE供試体：Roving No Exposure）に大別される。未暴露供試体（以下、NE供試体：No Exposure）、RLE供試体及びRSE供試体に対し、デジタルカメラ（RICOH 防水コンパクトデジタルカメラ WG-60）の顕微鏡モードを用い撮影したA面及びa面の接写写真の例を図-3に示す。図-3に示す通り、NE供試体では樹脂の黄変や繊維の露出などは認められない。一方、暴露供試体a面では樹脂の黄変が生じており、さらにRLE供試体では、長さが40mm程度のROVの露出が供試体の一部に認められる。また、RSE供試体では、長さ20mm程度のROVの露出が供試体の一部に認められ、RLE供試体と比較すると、幅方向の規模も小さいことがわかる。FRPでは、荷重が作用する方向のガラス繊維が、その荷重をほとんど受け持つため、ROVの露出程度は、0度方向の弾性係数及び強度に影響すると予想される。

### (3) 0度方向引張特性

著者らは、過去に暴露供試体に対して引抜方向に対する一軸引張試験を行ったが<sup>7)</sup>、前回試験を行った暴露供試体は外観観察を行っていないため、外観観察結果と機械的特性の相関を調べる目的でRLE供試体及びRNE供試体を対象に追加で一軸引張試験を行った。クーポン試験片は過去同様、図-2に示す各面より切り出した。試験片形状を図-4に、各試験片寸法及び試験片数を表-1に示す。ここで、表-1には以前行った、NE供試体及びROVの露出程度を把握していない暴露供試体（以下RUE供試体：Roving Uncertain Exposure）も合わせて記載している。また、今回追加で試験を行った試験片では、暴露による板厚のばらつきを把握するために、長さ方向に

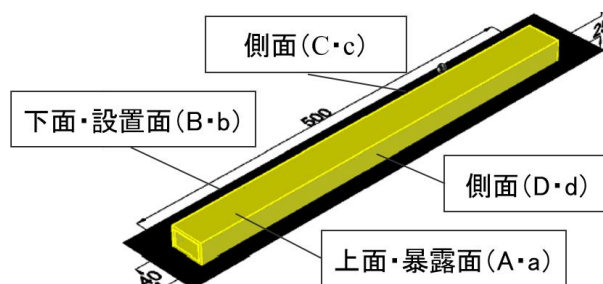
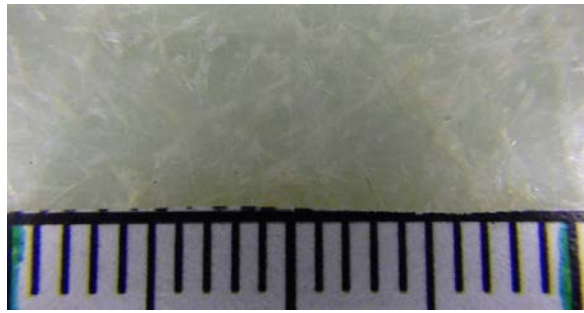
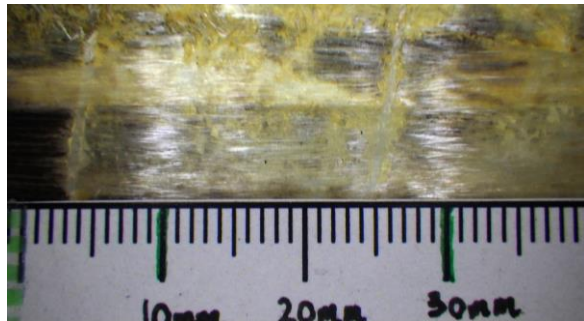


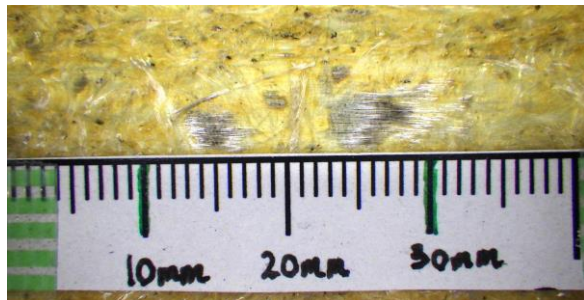
図-2 KP40 寸法及び面名称（単位：mm）



(a) NE 供試体



(b) RLE 供試体



(c) RSE 供試体

図-3 各供試体接写写真

10mm 間隔で板厚の計測を行っており、表-1 には、板厚のばらつきを変動係数として記載している。RLE 供試体 a 面では 2.5%、c・d 面では 0.9~1.1%、b 面では 0.9%の板厚のばらつきが見られ、紫外線の影響が表れていることがわかる。また RLE 供試体と RNE 供試体の a 面の板厚変動係数を比較すると、ばらつきが小さいことがわかり、外観上の ROV 露出程度差と板厚のばらつきに関連があると考えられる。

一軸引張試験では、荷重及び 2 軸ひずみを計測した。ひずみは、試験片標線間中央位置の各面に 2 軸ひずみゲージを貼付することにより計測した。載荷試験には、MTS 材料試験機（最大荷重 500kN）を用い、JIS K7164<sup>9)</sup> に従い載荷速度 1mm/min にて試験片が破壊し荷重が急激に低下するまで載荷した。試験片長さの違いにより、この載荷速度におけるひずみ速度は等しくないが、いずれの試験片においても弾性域内におけるひずみ速度は 80 $\mu$ e/sec~150 $\mu$ e/sec の範囲であった。また、引張強度、引

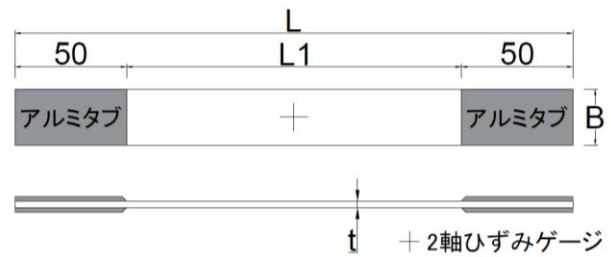


図-4 引張試験片形状

表-1 引張試験体寸法および試験体数

| 供試体 | 面   | 寸法 (mm) |     |      |      |      | 試験<br>体数 |
|-----|-----|---------|-----|------|------|------|----------|
|     |     | L       | L1  | B    | t    |      |          |
|     |     |         |     |      | Ave. | CV   |          |
| NE  | A・B | 250     | 150 | 25   | 3.08 | -    | 4        |
|     | C・D |         |     | 15   | 3.14 | -    | 4        |
| RUE | a   | 250     | 150 | 25   | 2.63 | -    | 2        |
|     | b   |         |     | 3.04 | -    | 2    |          |
|     | c   |         |     | 3.13 | -    | 2    |          |
|     | d   |         |     | 2.98 | -    | 2    |          |
| RLE | a   | 200     | 100 | 25   | 2.75 | 2.5% | 2        |
|     | b   |         |     | 2.98 | 0.9% | 2    |          |
|     | c   |         |     | 3.13 | 1.1% | 2    |          |
|     | d   |         |     | 2.84 | 0.9% | 2    |          |
| RNE | a   | 200     | 100 | 25   | 2.88 | 1.3% | 2        |
|     | b   |         |     | 2.94 | 0.8% | 2    |          |
|     | c   |         |     | 2.89 | 0.6% | 2    |          |
|     | d   |         |     | 3.07 | 1.2% | 2    |          |

張弾性係数、ポアソン比の算出も同様に JIS K7164 に従い算出した。

表-2 に引張強度、引張弾性係数、ポアソン比の結果を示す。各項目について試験片の平均値、変動係数、初期値 (NE 供試体) に対する比率 (以下、保持率) を示している。また、試験片名称は供試体と切り出し面を組み合わせる表記し、NE-AB など切り出し面が二つ書かれている供試体は、その二つの面における試験結果の平均値を表している。さらに、図-5 に、弾性係数及び強度の保持率、および NE 試験片とそれぞれの暴露試験片において両側 t 検定を行うことにより得られる P 値を示す。有意水準は 10% とした。

暴露供試体 a 面における引張弾性係数は、RLE-a 試験片では保持率が 0.98 であり有意差は認められなかった。一方 RNE-a 試験片では保持率が 0.92 で有意な低下が見られた。これは、暴露供試体の減肉が表層の CSM から生じることから、ROV が大規模に露出している RLE-a 試験片では CSM が脱落することにより、試験片内の ROV 層が占める割合が大きくなったためと考えられる。また、暴露供試体 b 面における引張弾性係数は、RLE-b 試験片では保持率が 0.98 で有意差が認められないのに対し、RLE-b 試験片では 0.87 で有意な低下が認められたが、

表-2 一軸引張試験結果

| 試験片    | 引張弾性係数 |      |                  | 引張強度  |      |                  | ポアソン比 |       |
|--------|--------|------|------------------|-------|------|------------------|-------|-------|
|        | (GPa)  | CV   | E/E <sub>0</sub> | (MPa) | CV   | F/F <sub>0</sub> | -     | CV    |
| NE-AB  | 35.3   | 3.1% | -                | 717.3 | 1.4% | -                | 0.307 | 6.3%  |
| NE-CD  | 39.4   | 4.1% | -                | 753.3 | 3.6% | -                | 0.310 | 5.1%  |
| RUE-a  | 33.1   | 1.8% | 0.94             | 358.5 | 4.3% | 0.50             | 0.263 | 11.3% |
| RUE-b  | 35.4   | 2.2% | 1.00             | 480.6 | 5.6% | 0.67             | 0.304 | 4.5%  |
| RUE-cd | 34.4   | 3.4% | 0.87             | 458.2 | 4.5% | 0.61             | 0.293 | 5.8%  |
| RLE-a  | 34.6   | 3.1% | 0.98             | 318.5 | 1.7% | 0.44             | 0.327 | 5.2%  |
| RLE-b  | 30.7   | 0.1% | 0.87             | 444.1 | 0.8% | 0.62             | 0.325 | 6.0%  |
| RLE-cd | 34.3   | 1.7% | 0.87             | 477.2 | 3.8% | 0.63             | 0.292 | 4.5%  |
| RNE-a  | 32.5   | 1.4% | 0.92             | 389.6 | 6.0% | 0.54             | 0.307 | 3.2%  |
| RNE-b  | 34.8   | 1.9% | 0.98             | 508.8 | 0.2% | 0.71             | 0.319 | 1.3%  |
| RNE-cd | 33.8   | 2.2% | 0.86             | 459.1 | 2.5% | 0.61             | 0.276 | 4.0%  |

※E<sub>0</sub> : NE 供試体弾性率, F<sub>0</sub> : NE 供試体強度

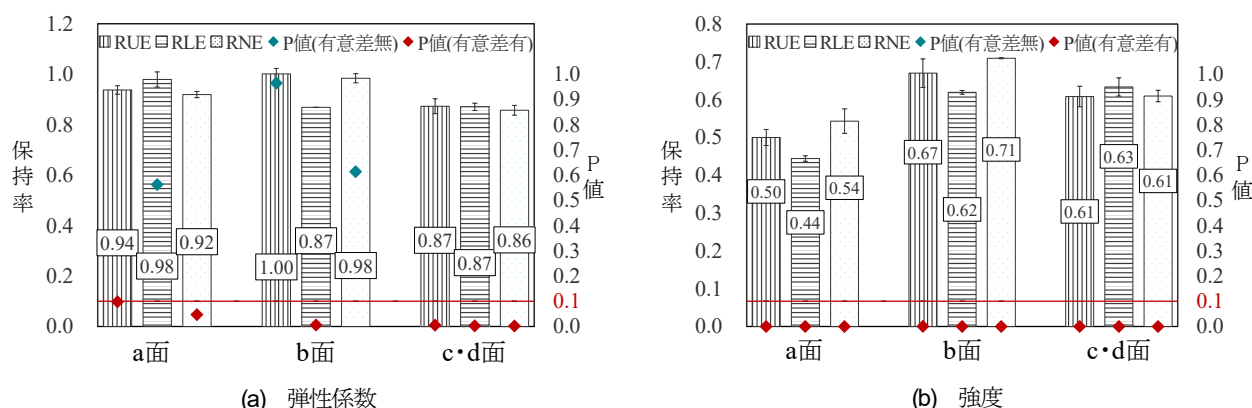


図-5 暴露試験片保持率及び両側t検定結果

RLE 供試体と RNE 供試体の b 面はどちらも CSM の露出が認められないため、この原因については明らかでない。c・d 面においては RLE 試験片、RNE 試験片ともに保持率が 0.86~0.87 であり、いずれも有意差が認められたものの、各暴露試験片の間ではあまり差が見られなかった。

一方、引張強度に関しては、RLE-a 及び RLE-b 試験片ともに、RNE-a 及び RNE-b 試験片の強度よりも低い。b 面については弾性係数同様、差異が見られる原因は明らかでないが、a 面に関しては ROV が露出している RLE 試験片では、紫外線や水分が ROV 層の樹脂と繊維により影響を与えるためと考えられる。c・d 面においては RLE 試験片、RNE 試験片ともに保持率が 0.61~0.63 程度とあまり差は見られず、c・d 面においては全暴露供試体において ROV の露出が認められていないことから、この結果も外観上の判断と傾向が一致していると考えられる。

### 3. はり部材の残存曲げ耐荷特性

#### (1) 荷重方法及び計測項目

荷重は 4 点曲げにより行い、支間長 420mm に対して、せん断支間 140mm、曲げ試験 140mm とした。また用い

る供試体は、2.2 で述べた NE 供試体を 3 体、RSE 供試体及び RNE 供試体を各 1 体ずつとした。図-6 に荷重条件及び変位とひずみの計測位置を示す。供試体は A・a 面が上フランジ、B・b 面が下フランジ、c・C 面及び d・D 面がウェブとなるように設置した。また変位とひずみは、変位計 5 点 (図中矢印 1~5)、三軸ゲージ 4 点 (図中 1r~4r)、一軸ひずみゲージ 14 点 (図中 1u~14u) により計測した。表-3 に用いた供試体の板厚を示す。ここで、表に記載されている板厚は端部において計測されたものであるため、2.3 の表-1 で述べた材料試験片に対する板厚計測結果から、暴露供試体の実際の板厚にはばらつきが予想されるが、今回は端部において計測された値を用いた。

今回対象となる KP40 では、暴露試験開始前に未暴露供試体を対象に静的 4 点曲げ試験が行われている<sup>10)</sup>。その際の試験条件は、各種支間長やウェブ、フランジとなる面に違いはあるものの、荷重点でのウェブの圧壊により終局に至っている。通常設計時には集中荷重が作用する箇所に補剛構造を施しこのような破壊は防止されると判断したため、今回は図-6 に示すように、荷重点と支間に幅 34.6mm、高さ 19.6mm、奥行き約 4.9mm の GFRP を補剛材として隙間なく嵌めこみ、設置した。荷重には万

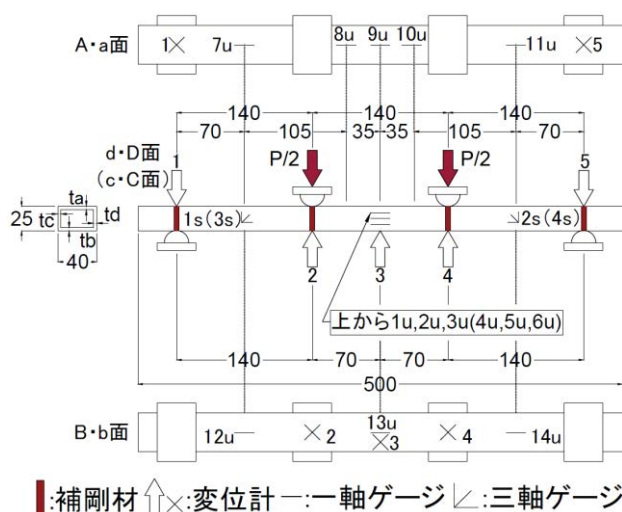


図6 荷重条件及び計測位置

表-3 板厚寸法

| 供試体  | 板厚 (mm) |      |      |      |
|------|---------|------|------|------|
|      | ta      | tb   | tc   | td   |
| NE-1 | 2.98    | 3.15 | 2.96 | 3.25 |
| NE-2 | 3.10    | 3.03 | 3.02 | 3.12 |
| RNE  | 2.83    | 2.88 | 2.99 | 2.91 |
| RSE  | 2.58    | 3.20 | 3.02 | 2.94 |

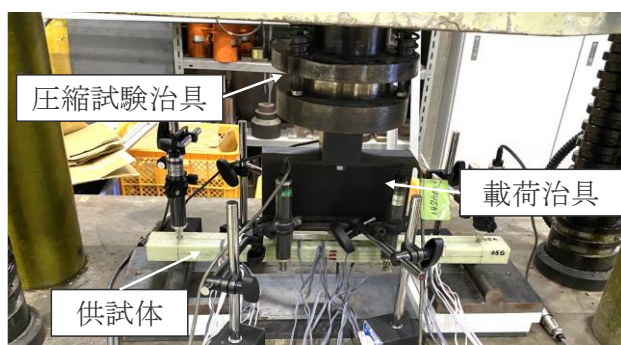


図-7 曲げ荷重実験供試体設置状況

能試験機（東京衡機製，最大荷重 1000kN）を用いた。また，実験は変位制御にて行い，供試体が破壊し終局に至るまで荷重を行った。ここで，荷重速度はマニュアル制御であるため，1.5~2.2mm/min と供試体ごとに違いが生じたが，いずれの供試体においても，弾性域内における支間中央部の圧縮ひずみ速度が 70μe/sec 以下となるように荷重した。

万能試験機への供試体設置状況を図-7 に示す。両荷重点に荷重を均等に加えるため，荷重ばり（ロードセル）を供試体の上に載せ，荷重治具の上から圧縮試験用の治具で押すことにより荷重した。荷重治具の重量による荷重は，ロードセル式はかり（島津製作所，WJ5K）により測定された重さが 3.060kg であったことから，約 30N 程度であり，試

表-4 面内材料定数の算出及び結果

(a) 樹脂及び繊維の材料特性

|         | CSM  | ROV  | VE   |
|---------|------|------|------|
| E (GPa) | 26.9 | 75   | 3.54 |
| ν       | 0.3  | 0.23 | 0.38 |
| G (GPa) | 10.3 | 30.5 | 1.3  |

(b) 各繊維の体積含有率

|            | CSM   | ROV   |
|------------|-------|-------|
| A(a)・B(b)面 | 9.4%  | 36.5% |
| C(c)・D(d)面 | 10.1% | 39.5% |

(c) 使用する面内材料定数

| 供試体 | 面   | E <sub>1</sub><br>(GPa) | E <sub>2</sub><br>(GPa) | ν <sub>12</sub> | ν <sub>21</sub> | G <sub>12</sub><br>(GPa) |
|-----|-----|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| NE  | A・B | 35.3                    | 6.2                     | 0.31            | 0.054           | 2.3                      |
|     | C・D | 39.4                    | 6.6                     | 0.31            | 0.052           | 2.4                      |
| RNE | a・b | 32.5                    | 6.2                     | 0.31            | 0.059           | 2.3                      |
|     | c・d | 33.8                    | 6.6                     | 0.28            | 0.054           | 2.4                      |
| RSE | a・b | 34.6                    | 6.2                     | 0.33            | 0.059           | 2.3                      |
|     | c・d | 34.3                    | 6.6                     | 0.29            | 0.056           | 2.4                      |

※1 1：部材軸方向，2：部材軸直角方向

※2 E：弾性係数，ν：ポアソン比，G：せん断弾性係数

験結果で述べる最大荷重の 0.4% にも満たない。

## (2) 試験結果

### a) 破壊性状及び変形状

まず，実験によって得られた支間中央の荷重たわみ関係を計算値と比較するために，チモシェンコのはり理論に従い，式(1)により支間中央におけるたわみを算出した。

$$\begin{aligned}
 \delta_c &= \frac{PL_s(3L^2 - 4L_s^2)}{48EI} + \frac{PL_s}{K \cdot 2GA} \\
 &\approx \frac{PL_s(3L^2 - 4L_s^2)}{48EI} + \frac{PL_s}{2GA_w}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで，

δ<sub>c</sub>：支間中央部のたわみ (mm)

P：荷重 (N)

L<sub>s</sub>：せん断支間長 (mm)

L：支間長 (mm)

E：弾性係数 (MPa)

I：断面 2 次モーメント (mm<sup>4</sup>)

G：面内せん断弾性係数 (MPa)

A：断面積 (mm<sup>2</sup>)

K：修正せん断係数

A<sub>w</sub>：ウェブの断面積 (mm<sup>2</sup>)

式(1)において，弾性係数は A 面・a 面の引抜方向の引

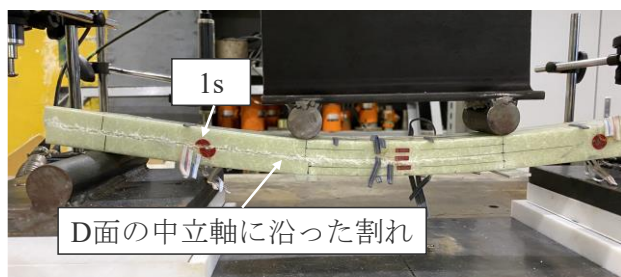
張弾性係数を用い、 $K$ は複合材料における厳密解を求める算出式<sup>12)</sup>も存在するが、今回は、各面における積層構成や引抜方向の引張弾性係数に大きな違いが見られないことから、近似解<sup>13)</sup>を用いた。また、今回対象とした供試体では、各面において引抜方向の引張試験しか行っていないため、引抜方向の弾性係数および引張強度以外の材料定数は得られていない。そこで複合則<sup>14)</sup>を用いてその他の面内材料定数を算出した。計算に用いる CSM, ROV, 及びビニエスエステル樹脂の弾性係数及びポアソン比は既往の文献<sup>10,13,15)</sup>を参考にし、せん断弾性係数は等方性材料における弾性係数とポアソン比の関係式から算出した。それらの材料定数を表-4(a)に示す。また、各面における CSM 及び ROV の繊維割合は、繊維の配分を確認するための焼成試験が行われ、その結果から表-4(b)の値とした。ここで、暴露供試体を対象とした焼成試験は行っていないため、NE 供試体と同じ繊維体積含有率を用いている。複合則により得られた面内材料定数(部材軸直角方向の弾性係数およびせん断弾性係数)を表-4(c)に示す。表中の部材軸方向の弾性係数及びポアソン比は引抜方向の引張試験から得られた値とし、RSE 供試体では引張試験を行っていないため、RLE 供試体の値を用いた。

NE 供試体及び暴露供試体の破壊時の写真を図-8・図-9に、実験によって得られた支間中央部の荷重たわみ関係を、式(1)による計算値と合わせて図-10に示す。まず NE-1 供試体の破壊性状について述べる。支間中央部におけるたわみは、 $P=8.0\text{kN}$  付近まで線形的に増大し、 $P=8.0\text{kN}$  付近で繊維の微細な破壊音が徐々に発生し始め、

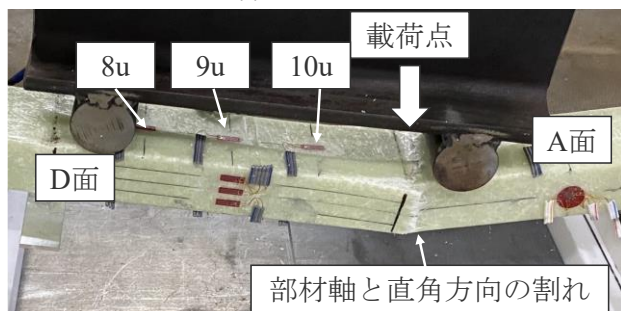
剛性がわずかに低下し始めた。その後、 $P=11.5\text{kN}$  付近から繊維の微細な破壊音の発生頻度が多くなり始め、 $P=13.0\text{kN}$  で大きな破壊音とともに、図-8(a)に示すように、D 面の中立軸付近で水平方向の割れを伴い、脆性的に破壊した。破壊性状から、せん断区間における面内せん断破壊により終局に至ったと判断できる。

次に、NE-2 供試体の破壊性状について述べる。NE-2 供試体では、 $P=7.8\text{kN}$  で繊維の微細な破壊音と剛性の低下が生じ始め、 $P=11.3\text{kN}$  から繊維の破壊音の発生頻度上昇が見られた。その後、 $P=13.3\text{kN}$  で  $0.14\text{kN}$  荷重が低下した直後、 $P=13.2\text{kN}$  で図-8(b)に示すように、载荷点位置の C・D 面(ウェブ)及び A 面(圧縮フランジ)に部材軸と直角方向の割れを伴い、大きな破壊音とともに脆性的に破壊した。圧縮曲げ支間におけるひずみ(図-6の  $8u \sim 10u$ )の計測結果から、破壊直前において、 $8u$  及び  $9u$  ではひずみの増加が確認されたのに対し、 $10u$  ではひずみの減少が確認されたことから、圧縮フランジの局部座屈の兆候が表れていると考えられる。類似の破壊形態が、土木研究所<sup>10)</sup>が行ったモルタル充填箱形 GFRP の四点曲げ実験でも確認されており、その際も破壊直前にわずかな荷重低下が見られている。

次に、暴露供試体の破壊性状について述べる。まず、RNE 供試体では、 $P=6\text{kN}$  で微細な破壊音と剛性の低下が発生し始め、 $P=7.7\text{kN}$  から繊維の破壊音が頻繁に発生し、 $P=8.4\text{kN}$  で一際大きな破壊音とともに荷重が  $0.15\text{kN}$  が低下し、その直後に大きな破壊音とともに、図-9(a)に示すように、a 面における c 面との境界部に部材軸方向への

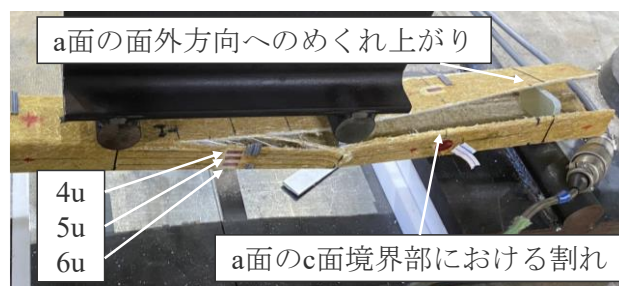


(a) NE-1 供試体

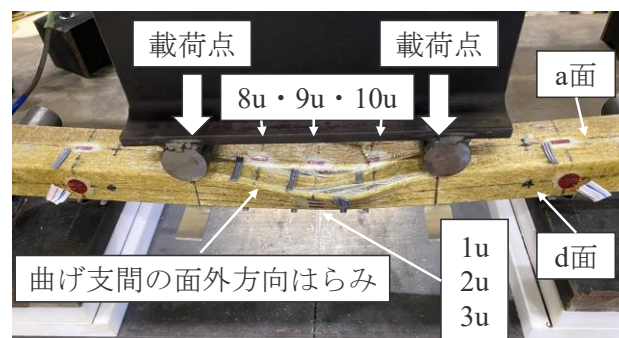


(b) NE-2 供試体

図-8 未暴露供試体破壊性状



(a) RNE 供試体



(b) RSE 供試体

図-9 暴露供試体破壊性状

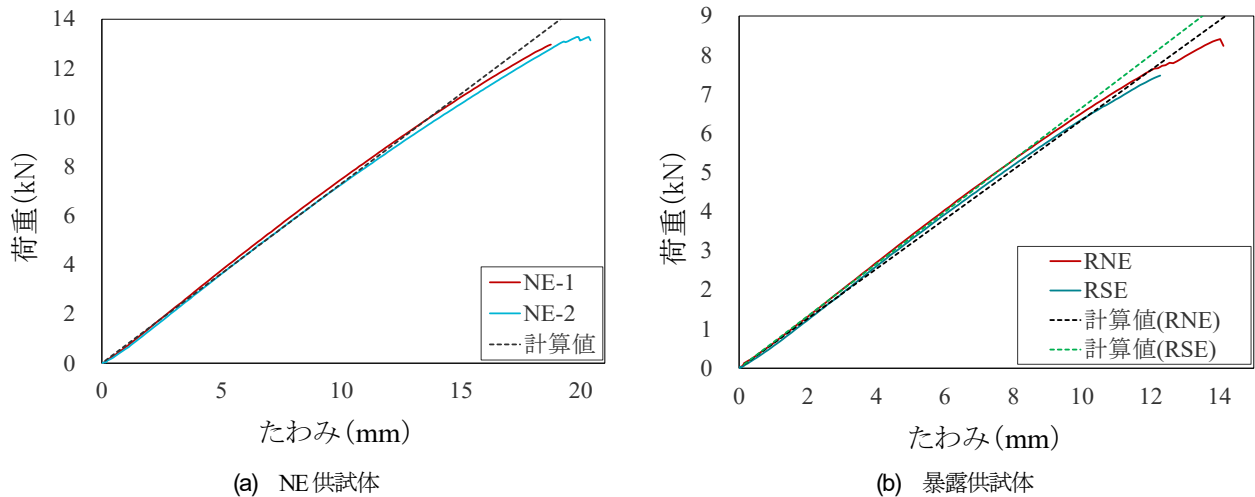


図-10 荷重－たわみ関係

割れと a 面の面外方向へのめくれ上がりを伴い、脆性的に破壊した。この破壊形態について、Prakash Kumar<sup>11)</sup>らは箱形断面の引抜成形 GFRP を対象とした静的 4 点曲げ実験を行い、供試体が圧縮フランジの局部座屈を生じた直後に、ウェブとフランジの結合部における部材軸方向への割れを生じ、ウェブとフランジの分離がウェブに弱軸周りの曲げを引き起こし破壊したと報告している。この破壊性状は、今回の破壊性状と酷似していることから、破壊は曲げ区間における局部座屈が原因となって生じたと考えられる。また、破壊直前における圧縮フランジの等曲げ区間におけるひずみから、9u ではひずみの増加が確認されたのに対し、8u 及び 10u ではひずみの減少が確認されたことから、圧縮フランジの局部座屈の兆候が表れていると考えられる。

最後に、RSE 供試体では、P=5kN で微細な破壊音と剛性の低下が発生し始め、P=6.12kN で繊維の破壊音の頻度が多くなり、P=7.9kN で大きな破壊音とともに、図-9(b)に示すように、等曲げ区間の a 面が面外方向にはらみ出し、脆性的に破壊した。破壊性状から局部座屈により終局に至ったと考えられ、破壊直前における圧縮フランジの等曲げ区間のひずみ測定結果からも、9u でのひずみの増加に対し、8u 及び 10u ではひずみの減少が確認された。

次に、変形状態について述べる。図-10 より NE 供試体、暴露供試体ともに、载荷に伴う単層レベルにおけるガラス繊維の破壊により、わずかに剛性が低下していくものの、ほとんど線形的にたわみが増大し脆性的に破壊した。また、図-10(a)より NE 供試体では、たわみの計算値が実験値によく一致しており、図-10(b)より RNE 供試体における剛性の計算値は約 5%小さく、RSE 供試体における計算値は約 3%大きい評価となるものの、その差は小さく概ね一致している。よって、暴露後の供試体においてもチモシェンコのはり理論を用いて、剛性を評価

できた。ここで、RSE 供試体においてわずかに剛性の計算値が大きくなったのは、小規模に ROV 露出するレベルでは、暴露による弾性係数の低下の影響が、CSM 層の脱落によって積層板内の ROV 層の割合が増加することによる弾性係数上昇の影響より大きかったためと考えられる。

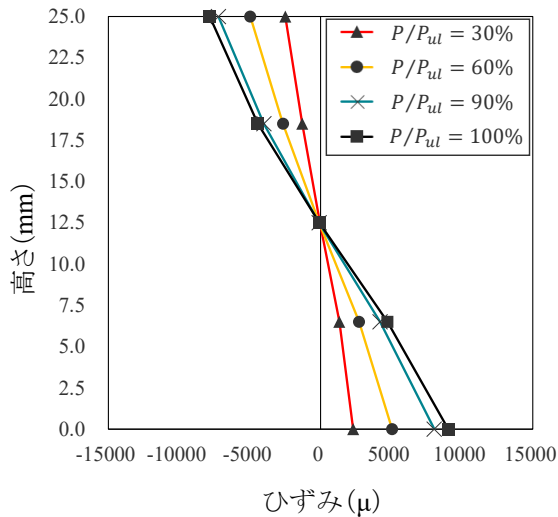
次に、図-11 に NE 供試体の、図-12 に暴露供試体の支間中央断面におけるひずみ分布を示す。図-11 より NE 供試体はいずれも、最大荷重付近まで断面高さ方向に平面保持則がほぼ成立していることがわかる。また、図-12 より暴露供試体では引張側のフランジにおけるひずみがウェブひずみの延長よりやや小さくなる傾向が見られたものの、最大荷重付近まで平面保持則が概ね成り立っていると考えられる。また、図-12(b)より RSE 供試体では最大荷重時のひずみ分布が、明確に線形性を失っているが、これは他の局部座屈で終局に至った供試体と異なり、支間中央部で腹となるような明確な座屈モードを伴い破壊したためと思われる。

#### b) 最大荷重

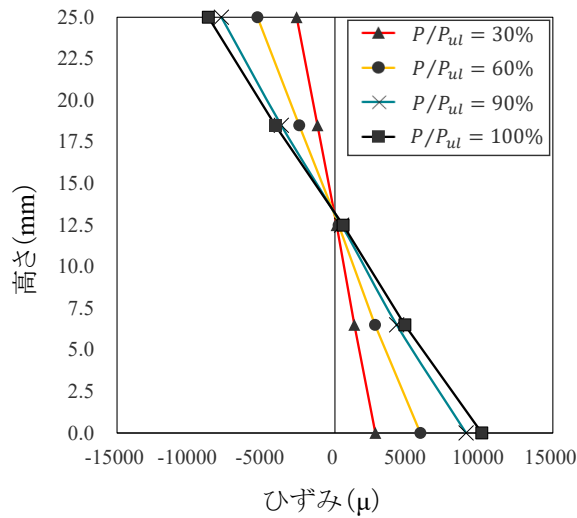
今回見られた破壊形態は、NE 供試体においては面内せん断破壊及び局部座屈、暴露供試体においては局部座屈破壊であったと推定される。そこでせん断破壊耐力及び局部座屈耐力の計算値を算出し、実験値と比較する。

まず、せん断破壊耐力は初等はり理論に従い算出した。ここで、せん断弾性係数は表-4(c)で示した C・D 面のせん断弾性係数を用いた。また、本供試体では面内せん断試験を行っていないため、せん断強度は既往の文献<sup>13)</sup>に記載されている繊維体積含有率が 40%の、未暴露の引抜成形材のせん断強度である 48MPa を用いて、NE 供試体の計算値のみ算出した。

次に、局部座屈耐力の計算は、まず式(2)<sup>16)</sup>により各供試体の局部座屈応力を計算し、その後得られた応力を初等はり理論に従い、荷重に変換することにより算出した。



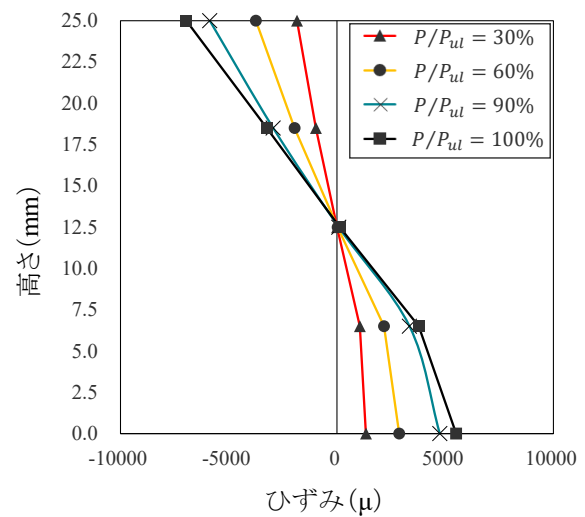
(a) NE-1 供試体



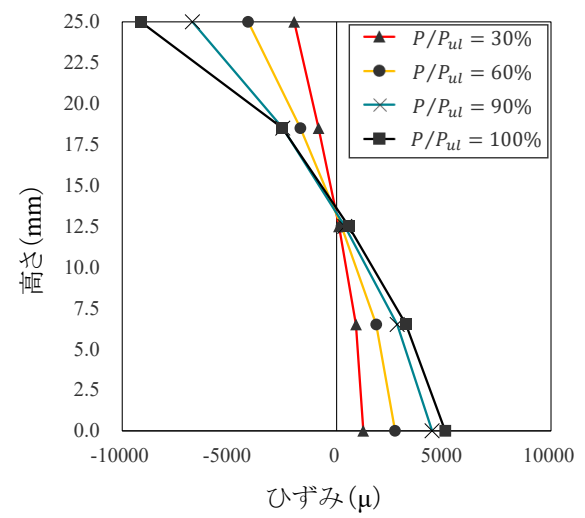
(b) NE-2 供試体

※ $P_{ul}$  : 最大荷重

図-11 NE 供試体のスパン中央における曲げひずみ分布



(a) RNE 供試体



(b) RSE 供試体

※ $P_{ul}$  : 最大荷重

図-12 暴露供試体のスパン中央における曲げひずみ分布

また計算には表-4(c)の面内材料定数を用いた。

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2}{t_f \cdot b_f^2} \left[ 2\sqrt{1 + 4.139\xi} \sqrt{(D_{11})_f (D_{22})_f} + (2 + 0.62\xi^2) \{ (D_{12})_f + 2(D_{66})_f \} \right] \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{1}{1 + 10\zeta} \\ D_{11} &= \frac{E_1 t^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \\ D_{22} &= \frac{E_2 t^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \\ D_{12} &= \nu_{12} D_{22} = \nu_{21} D_{11} \\ D_{66} &= \frac{G_{12} t^3}{12} \end{aligned}$$

さらに、

$$\zeta = \frac{(D_{22})_f b_w}{4(D_{22})_w b_f} \cdot \frac{h_w^2 b_f^2}{h_w^2 b_f^2 - h_f^2 b_w^2}$$

$\sigma_{cr}$  : 局部座屈応力 (GPa)

$t$  : 板厚 (mm)

$b$  : 隣接する板の板厚中心間距離 (mm)

※1 :  $f$ はフランジ,  $w$ はウェブを表す。

※2 : 下付き文字は, その面における値を表す。

ここで、式(2)において $\xi$ を0とすると、FRP水門設計・施工指針 (案)<sup>3)</sup>に記されている、4辺が単純支持された板材を仮定した最小座屈応力となる。しかし、ウェブの座屈耐荷力がフランジの座屈耐荷力より大きい場合、ウェブがフランジに回転拘束を与えるため、4辺単純支持の仮定は安全側の評価となることが知られている。式(2)は Kollár<sup>10)</sup>によって示された、ウェブがフランジに与

える回転拘束を考慮した算出式であり、今回は比較のために、ウェブとフランジの境界条件を回転拘束で与えた場合と、単純支持で与えた場合の両方を検討する。

表-5 にせん断破壊耐力及び局部座屈耐力の実験値及び計算値の比較を示す。まず、NE 供試体について述べる。NE 供試体のせん断破壊耐力の計算値と、ウェブとフランジの境界条件を回転拘束で与えた場合の局部座屈耐力の計算値が近く、実験値も計算値によく一致している結果となった。このことから、本供試体では両破壊形態の終局荷重が近傍に位置していたため、異なる破壊形態が見られたと考えられる。

次に暴露供試体では RNE 供試体、RSE 供試体共に、ウェブとフランジの境界条件を回転拘束で与えた場合の局部座屈耐力より 14~16%低い荷重での破壊となった。一方でウェブとフランジの境界条件を単純支持で与えた場合の局部座屈耐力より 18%~27%高い荷重での破壊となった。ここで、RSE 供試体において、図-9(b)に示した、 $1u$  でのひずみ計測結果から、破壊荷重の 0.2kN 前から荷重に対するひずみの減少が確認されており、a 面（圧縮フランジ）における d 面（ウェブ）との境界部（角部）において内部の繊維の破壊が進行し、d 面による回転拘束効果が弱まっていたと推測される。RNE 供試体では、破壊の前に荷重が 0.15kN 低下したことからこの現象は確認できなかったが、同様の理由であったと思われる。境界部において破壊が先行する理由としては、本供試体では周方向に繊維を有さず、また、引抜成形 GFRP では角部の強度が低い傾向がある<sup>17)18)</sup>ためと思われる。

最後に、NE 供試体と暴露供試体の曲げ耐力力の比較について記す。NE 供試体の最大荷重の平均値を初期値とすると、RNE 供試体の保持率は 0.64、RSE 供試体の保持率は 0.57 であり、いずれも 35%以上の低下が見られた。RSE 供試体の保持率が RNE 供試体を下回った理由としては、RSE 供試体は RNE 供試体と比べ減肉量が大きく板厚が薄いこと、及び 2.3 の図-5 で示したように、ROV の露出程度と強度に関連性があり、RSE 供試体では角部の内部破壊が進行する荷重が低かったことなどが原因と考えられる。ここで、これらの破壊形態はいずれも局部座屈であったと推測されることから、強度に対する減肉の影響が大きい。そのため、塗装などの表面保護層を設けることにより樹脂および CSM 層の減肉を防ぎ、局部座屈耐力の低下を抑制することができると考えられる。また、暴露供試体においてはせん断破壊により終局に至った供試体は見られなかったため、暴露によるせん断強度の低下より、局部座屈強度の低下の方が大きかったと推測されるが、本供試体では面内せん断試験を実施していないため、長期後暴露後の面内せん断強度の検討は今後の課題である。

表-5 実験値及び計算値（単位：kN）

| 供試体  | 実験値  | 計算値     |        |      |
|------|------|---------|--------|------|
|      |      | せん断破壊耐力 | 局部座屈耐力 |      |
|      |      |         | 回転拘束   | 単純支持 |
| NE-1 | 13.0 | 12.2    | 12.1   | 8.6  |
| NE-2 | 13.3 | 12.1    | 13.0   | 9.5  |
| RNE  | 8.4  |         | 10.0   | 7.1  |
| RSE  | 7.5  |         | 8.7    | 5.9  |

#### 4. まとめ

本研究では、土木構造部材として適用される GFRP 引抜成形材の、長期暴露後の部材としての残存曲げ耐力力を明らかにすることを目的として、約 20 年間暴露された無塗装の引抜成形 GFRP 角パイプと、同期間室内に保管されていた同部材を対象に静的 4 点曲げ試験を行った。また、外観上の ROV の露出程度と材料特性との関連を検討するため、引張材料試験も合わせて行った。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 引抜 0 度方向の引張材料試験より、暴露面において ROV が大規模に露出している試験片の強度保持率は 0.44、ROV の露出が認められない試験片の強度保持率は 0.54 と差が認められ、ROV の露出程度と引張残存強度に関連が見られた。
- (2) 部材レベルの残存曲げ耐力力を得るために実施した静的 4 点曲げ試験において、未暴露供試体及び暴露供試体共に、最大荷重直前までおおそ線形的な荷重－変形関係を示し、チモシェンコのはり理論によって概ね評価されることが確認された。
- (3) 未暴露供試体ではせん断破壊及び局部座屈によって脆性的に破壊したと推測され、その最大荷重は推定されるせん断強度や、回転拘束を考慮した局部座屈応力の計算値を初等はり理論を用いて荷重に変換した値とよく一致した。一方で、暴露供試体ではいずれも局部座屈によって脆性的に破壊したと思われるが、その最大荷重は回転拘束を考慮した局部座屈応力から得られる最大荷重より約 15%低く、これは角部における破壊進行により回転拘束効果が低下し破壊したことが推定される。
- (4) 暴露供試体の曲げ耐力力は、未暴露供試体の曲げ耐力力に対して、ROV の露出が認められない供試体では 0.64、ROV が小規模に露出している供試体では 0.57 であり、耐力力の大幅な低下が認められた。

以上のことから、約 20 年間の暴露により、塗装等の表面保護層の無い GFRP 引抜成形材では、曲げ耐力力にも大幅な低下が見られた。しかし、その強度は、材料試験や焼成試験結果からおおむね推定できることが明らかとなった。実構造物において材料試験を実施するには破

壊試験を行う必要があるため、実構造物の維持管理において部材強度を推定するためには、材料特性を非破壊試験により推定する必要がある。

## 参考文献

- 1) 土木学会：FRP 橋梁，構造工学シリーズ 14，2004.
- 2) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09，2018.
- 3) 土木学会：FRP 水門設計・施工指針（案），複合構造シリーズ 06，2014.
- 4) 土木学会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），複合構造シリーズ 04，2011.
- 5) 土木学会：巨大地震に対する複合構造物の課題と可能性，複合構造レポート 08，2013.
- 6) 西崎到，櫻庭浩樹，富山禎仁：GFRP 引抜成形材の屋外環境における劣化と表面保護層塗膜による劣化抑制効果に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.5，II\_13-II-21，2015.
- 7) 辰田翔太，北根安雄，日比英輝，佐藤顕彦，五井良直，杉浦邦征，西崎到：材料試験及び非破壊検査による約 20 年間暴露された GFRP 引抜成形材の残存性能評価，第 14 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2021.
- 8) 日本規格協会：JIS K7052 ガラス長繊維強化プラスチックプリプレグ，成形材料及び成形品—ガラス長繊維及び無機充てん材含有率の求め方—焼成法，1999.
- 9) 日本規格協会：JIS K7164 プラスチック—引張特性の試験方法—第 4 部：等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件，2005.
- 10) 土木研究所：繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書（II），2000.
- 11) Kumar, P. , Chandrashekhara, K. and Nanni, A.: Testing and Evaluation of Components for a Composite Bridge Deck, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.22, No.5, pp.441-461, 2003.
- 12) Bank, L. C. and Bednarczyk, P. J.: Deflection of Thin-Walled Fiber-Reinforced Composite Beams, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.9, No.2, pp.118-126, 1990.
- 13) Bank, L. C.: *Composites for Construction – Structural Design with FRP Materials* -, John Wiley & Sons, 2006.
- 14) Jones, R. M.: *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, Taylor & Francis, 1999.
- 15) 社団法人強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，1994.
- 16) Kollár, L. P.: Local buckling of fiber reinforced plastic composite structural members with open and closed cross sections, *Journal of Structural Engineering*, Vol.129, No.11, pp.1503-1513, 2003.
- 17) 林厳，鈴木康夫，杉浦邦征，西崎到，北根安雄：土木構造物用 GFRP 溝形材における引張特性の統計的評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.75，No.3，293-304，2019.
- 18) 複合構造委員会・FRP 複合構造研究小委員会：土木構造物用 FRP 部材の力学性能に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.5，II\_50-II\_64，2015.

(Received August 26, 2022)

## STUDY ON BENDING LOAD CAPACITY OF GFRP PULTRUDED SQUARE PIPES WITH EXPOSURE FOR ABOUT 20 YEARS

Shota TATSUTA, Yasuo KITANE, Hideki HIBI, Akihiko SATO,  
Kunitomo SUGIURA, and Itaru NISHIZAKI

GFRP pultrusion-molded materials are widely used as civil engineering structural members, but they are not widely used as main structural members due to the lack of data after long-term exposure and unclear durability. In this study, to clarify the residual performance of GFRP pultrusion-molded members after long-term exposure, static four-point bending tests were conducted on GFRP pultruded square pipes exposed outdoors for approximately 20 years and on GFRP pultruded square pipes stored indoors for the same period, as a result that the residual bending load capacity of these members was obtained. It was also confirmed that the deformation behavior could be generally evaluated based on Timoshenko's beam theory even after long-term exposure. The obtained bending load capacities were compared with the calculated load capacities using the local buckling stress and elementary beam theory, and it was shown that the deterioration of the corners due to exposure may accelerate the progress of corner failure with loading and reduce the effect of rotational restraint, resulting in a smaller local buckling load capacity.