

## 高剛性化・大断面化した GFRP 桁の曲げ耐荷力に関する検討

建設技術研究所 正会員○壽田健一

首都大学東京 正会員 中村一史

ジェイテック 正会員 柳沼謙一, 東レ 正会員 松井孝洋

## 1. はじめに

近年, 土木構造物における架設作業および維持管理などの合理化の重要性が指摘されるなか, 成形性に優れ, 軽量で耐食性を有する繊維強化プラスチック (FRP) が新素材として注目されている. しかしながら, 製作能力や材料コスト面での課題があり, 製作や材料のコストを削減しつつ, 所要剛性を得る手法の確立が不可欠である. そこで, 本研究では, これまでの検討結果<sup>1,2)</sup>を踏まえて, ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) 桁の高剛性化と大断面化について, こ線人道橋の試設計を行って, 実用性を検討する. さらに, その曲げ耐荷力に対する安全性を, 縮小模型桁による曲げ載荷実験, クーポン試験片の圧縮試験により検証する.

## 2. 試設計による歩道橋への実用性の検討

実用性の検討は, 国内最大断面 ( $1600 : H 600 \times B 300 \times t_w 12 \times t_f 18\text{mm}$ ) の GFRP 桁 (TGN とよぶ) を基本形状とした. また, 高強度 (S), 高弾性 (M) タイプの炭素繊維強化プラスチック板 (以下, CFRP 板とよぶ, 厚さ 2mm) をフランジ部に接着し, 高剛性化 (それぞれ TGS, TGM とよぶ) を図ること, また, 2つの GFRP 桁を縦に重ね合わせ接着することで, 大断面化 (TGL とよぶ) を図ることとした. 表-1 に, FRP 部材の材料物性値を示す. 設計条件<sup>3)</sup>は, 活荷重  $3.5\text{kN/m}^2$  に対するたわみ制限  $L/500$  以下を満足すること, また, 振動使用性として固有振動数が  $1.5 \sim 2.3\text{Hz}$  に抵触しないことである. 高剛性化では有効幅員 4.0m の鉸桁形式, 大断面化では有効幅員 1.5m の中路形式として, 単径間に対してたわみ制限以下となるように, 最大支間長  $L_{\max}$  を算定した. たわみの算出には Timoshenko はり理論により, せん断変形による付加たわみを考慮した. 表-2 に, 最大支間長と最低次の固有振動数を示す. 高剛性化では, 主桁本数 3 本とし, 大断面化では, 主桁本数を 2 本として, 最大支間長を求めた. 高剛性化, 大断面化ともに, TGN より, 最大支間長を伸ばすことができることがわかる. また, それぞれ桁の最大支間長のとき, 最低次の固有振動数は, 振動使用性を満たすものの, 支間長が長くなる TGL では, 余裕がないこともわかる.

## 3. クーポン試験による圧縮強度と終局ひずみの検討

一般に, GFRP 桁の場合, 曲げ圧縮破壊により終局となる. そこで, 圧縮強度を検討するために, 縮小模型の GFRP 桁 (桁高 300mm) のフランジから切り出した試験片 ( $L 165 \times B 25 \times t 10\text{mm}$ , FGN とよぶ) と, それに高強度および高弾性 CFRP 板を片面に接着した試験片 (それぞれ, FGS, FGM とよぶ) について, JIS K7018 その 3 を参考に, それぞれ 3 体の圧縮試験を行った (写真-1). 材料物性値は, 表-1 に示した通りである. 3 体平均の圧縮試験結果を表-3 に示す. 図を略したが, FGS と FGM は CFRP 板と GFRP 部材のひずみが一致なくなった時点を終局ひずみとした. なお, FGN は最大荷重時のひずみを終局ひずみとした. 表より, FGN の圧縮強度が最も高いこと, また, FGM の圧縮強度は, FGS と比べて低く, 弾性係数が高くなると圧縮強度が低下することがわかる.

## 4. 模型実験による GFRP 桁の高剛性化の検討

## 4.1 実験方法

桁高 300mm とした縮小模型の GFRP 桁 ( $H 300 \times B 150 \times t_w 14 \times t_f 10\text{mm}$ , GN) に, 高強度 CFRP 板 ( $L 2600 \times B 50 \times t 2\text{mm}$ ) 接着による高剛性化 (GS) や, GFRP 桁の重ね合わせによる大断面化 (GL) が別項<sup>1,2)</sup>で検討されている. ここでは, 高剛

表-1 FRP 部材の材料物性値

|         |       | GFRP 桁 |      | CFRP 板 |       |
|---------|-------|--------|------|--------|-------|
|         |       | フランジ   | ウェブ  | 高強度 S  | 高弾性 M |
| 弾性係数    | (GPa) | 35.0   | 28.8 | 167    | 286   |
| せん断弾性係数 | (GPa) | —      | 3.65 | —      | —     |
| 引張強度    | (MPa) | 407    | 253  | 2466   | 1847  |

表-2 最大支間長と必要本数

| 桁の種類 (主桁数) | GN に対する<br>曲 剛性比 | 最大支間長 $L_{\max}$ (m) |      | 固有振動数<br>(Hz) |
|------------|------------------|----------------------|------|---------------|
|            |                  | 鉸桁形式                 | 中路形式 |               |
| TGN (3 主桁) | 1.00             | 10.2                 | —    | 4.9           |
| TGS (3 主桁) | 1.49             | 11.6                 | —    | 4.5           |
| TGM (3 主桁) | 1.84             | 12.4                 | —    | 4.6           |
| TGL (2 主桁) | 3.67             | —                    | 21.3 | 2.5           |



写真-1 圧縮試験のセットアップ状況

表-3 圧縮試験の結果

| 試験片名 | 長さ<br>(mm) | 幅<br>(mm) | 厚さ<br>(mm) | 断面積<br>(mm <sup>2</sup> ) | 圧縮強度<br>(MPa) | 終局ひずみ<br>( $\times 10^3$ ) |
|------|------------|-----------|------------|---------------------------|---------------|----------------------------|
| FGN  | 165.2      | 24.7      | 9.8        | 242.1                     | 486           | -8954                      |
| FGS  | 165.0      | 24.9      | 14.2       | 355.5                     | 336           | -4910                      |
| FGM  | 165.0      | 24.9      | 14.9       | 374.3                     | 303           | -2279                      |

Key Words : FRP 桁, CFRP 板, 高剛性化, 大断面化, 接着接合

連絡先\* : 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.042-677-1111 内線(4564)

性化について、高弾性CFRP板の適用性を検討した。高弾性CFRP板(L2600×B50×t2mm)を上下フランジに3枚ずつ合計6枚接着したGFRP桁(GM)を作製した。図-1に、セットアップ状況を示す。載荷実験では、支持条件を単純支持とし、支間長を3,000mm、純曲げ区間長を1,000mmとして、4点曲げ載荷実験を行った。

#### 4.2 実験結果と考察

図-2に、荷重と鉛直変位の関係を示す。GMでは、約200kNで上フランジに接着したCFRP板で層間はく離が発生した(図-3)。層間はく離が発生するまでは、実験値と理論値はよい一致を示すこと、また、GSより剛性が高くなることがわかる。図-4に、荷重と上縁ひずみの関係を示す。GMの層間はく離は、約 $2200 \times 10^{-6}$ で発生したことがわかった。GMでは、上フランジで層間はく離が発生しても荷重が増加し、終局は、GFRP桁フランジの曲げ圧縮破壊であったのに対して、GSでは、上フランジのCFRP板の層間はく離と、GFRP桁上フランジの曲げ圧縮破壊がほぼ同時に発生した。GSの層間はく離は約 $5000 \times 10^{-6}$ で発生した。したがって、CFRP板の弾性率が高いほど、曲げ耐力が低下することがわかった。さらに、GSとGMの終局ひずみは、それぞれ、FGSとFGMのクーポン試験片による結果とほぼ一致することも確かめられた。

#### 4.3 桁の曲げ圧縮ひずみと曲げ耐力に対する安全性の照査

試設計で求めた各最大支間長 $L_{max}$ における最大曲げモーメントから曲げ圧縮ひずみを求め、さらに、載荷実験から得られた終局ひずみと比較し、安全性の照査を行った。このとき、GLは、載荷位置で圧壊が先行したため<sup>1)</sup>、連結構造を有する大断面化したGFRP桁(GL-J)の載荷試験(図-4に併記)<sup>2)</sup>から得られた終局ひずみと比較した。表-3に、照査の結果を示す。TGSとTGMを比較すると、曲げモーメントが大きく、終局ひずみの小さかったTGMの安全率が低いことがわかる。TGLでは、曲げモーメントが大きく、終局ひずみも大きいため、安全率がTGSよりも低いことがわかる。しかし、TGMでも、曲げモーメントに対して、安全率3.3を確保することができ、十分な安全性を有していることがわかった。

#### 5. まとめ

クーポン試験片の圧縮試験および高剛性化に関する曲げ載荷実験からは、CFRP板の弾性係数に関わらず、圧縮応力によってCFRP板の層間はく離で終局となること、また、CFRP板の弾性係数が高いほど、剛性が高くなるものの、曲げ耐力は低下することが確かめられた。さらに、高剛性化と大断面化の手法を適用して、こ線人道橋の試設計を行った結果、高弾性のCFRP板を鉸桁形式に適用した場合であっても、実験で得られた圧縮強度は、作用曲げモーメントに対して、十分な安全性を有すること、また、GFRP桁を重ねて大断面化した場合も、十分安全な中跨式こ線人道橋となることが確かめられた。

#### 参考文献

- 1) O.D. Obedi, S. Sugai, H. Nakamura, K. Maeda and K. Yaginuma: Feasibility Study on Increasing Bending Stiffness of FRP Girders by Bonding CFRP Strips and Bonding Girder Sections, The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, APFIS2012, 8 pages, CD-ROM, 2012.
- 2) 中村大希, 壽田健一, 中村一史, 柳沼謙一: 大断面化したGFRP桁の連結構造とこ線人道橋への適用に関する検討, 土木学年次学術講演会, 第68回全国大会, 2013. (投稿中)
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社: 旅客・保守施設構造物設計マニュアル, 2004.

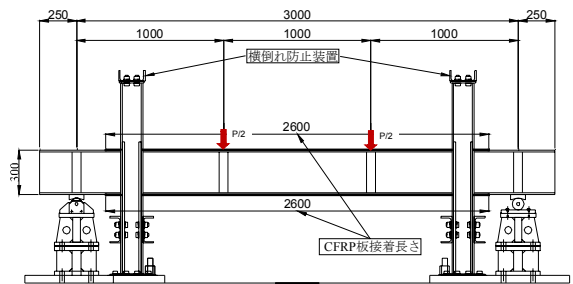


図-1 4点曲げ載荷実験のセットアップ状況 (GM)

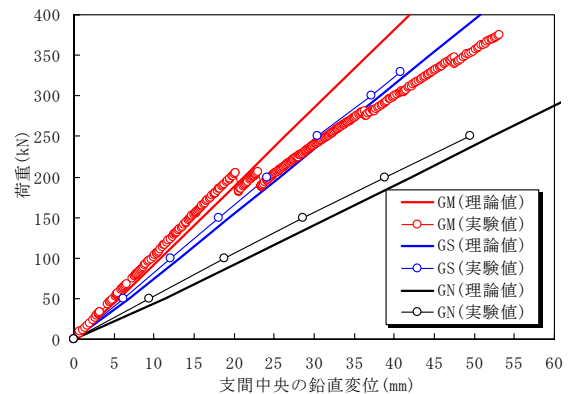


図-2 荷重と支間中央部の鉛直変位の関係



図-3 上フランジに接着したCFRP板の層間はく離

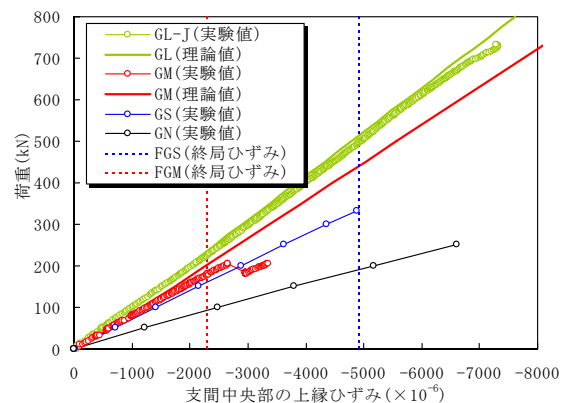


図-4 荷重と上縁ひずみの関係

表-3 曲げ圧縮破壊に対する安全性の照査結果

| 桁の種類 | 主桁本数(本) | 最大支間長(m) | 最大曲げモーメント(kN・m) | 曲げ応力(MPa) | 曲げひずみ(×10 <sup>6</sup> ) | 仮定した終局ひずみ(×10 <sup>6</sup> ) | 設計荷重に対する安全率 |
|------|---------|----------|-----------------|-----------|--------------------------|------------------------------|-------------|
| TGN  | 3       | 10.2     | 304.3           | -28.6     | -818                     | -7000                        | 8.6         |
| TGS  | 3       | 11.6     | 393.6           | -119.5    | -716                     | -4500                        | 6.3         |
| TGM  | 3       | 12.4     | 449.7           | -189.5    | -662                     | -2200                        | 3.3         |
| TGL  | 2       | 21.3     | 680.0           | -34.9     | -996                     | -7000                        | 6.7         |