

GFRP 構造部材接合の強度特性に関する研究

菱明技研株式会社 正会員 ○永田 拓也 広島工業大学 正会員 皆田 理
 中電技術コンサルタント 正会員 水津 育男 広島工業大学 正会員 村中 昭典
 旭硝子マテックス 正会員 林 耕四郎

1. はじめに 周囲を海に囲まれた日本は土木構造物に対する腐食環境が厳しい。そこで、特に腐食環境の厳しい海沿岸地域や塩分を多く含む融雪剤が散布される寒冷地などにおいて、軽量、高強度、優れた耐腐食性を有するFRP（Fiber Reinforced Plastic、以下FRPと略称）材料を橋梁部材として使用するための研究開発が実施されている。本研究は、施工の容易性を考慮して、鋼橋の現場接合として実績のある高力ボルト摩擦接合を、GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastic、以下GFRPと略称）構造物の接合方法として用いるための基礎資料を得る事を目的として実施したものである。なお、ここでいう高力ボルト摩擦接合（以下高力ボルト接合と略称）とは主板上にGFRP材料、添接板に鋼板を用いた継手である。

2. GFRP 材料の力学的特性

本研究で使用したGFRP材料は、内部が長手方向に引き揃えたガラス繊維ロービング、表層部がガラス繊維のコンティニュアストランドマット、及びヤーンクロス、ガラスクロス積層構造からなる厚肉引抜き材である。表-1、及び表-2に有孔板及び、高力ボルト接合の疲労試験、及び曲げ試験に用いたGFRP材料の物性値を示す。ただし、材軸直角方向の層間せん断強さは曲げ破壊を起こした時の強度である。

表-1 疲労試験に用いた GFRP 材料の物性値(N/mm²)

	引張強さ	引張弾性率	圧縮強さ	圧縮弾性率	層間せん断強さ
材軸方向	598.2	38145.2	443.6	12048.6	31.5
材軸直角方向	21.1	10730.6	99.2	5083.9	8.2

表-2 曲げ試験に用いた GFRP 材料の物性値(N/mm²)

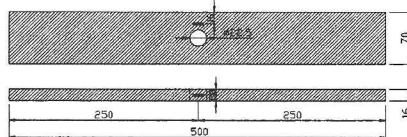
フランジ、0° 方向				ウェブ、45° 方向	
引張強度	引張弾性率	曲げ強度	曲げ弾性率	せん断強度	せん断弾性率
393.0	32200.0	405.3	19233.3	44.2	4136.7

3. 疲労試験

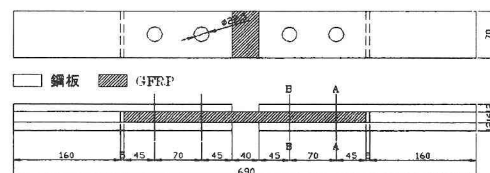
図-1に供試体の形状、及び寸法を示す。GFRP有孔板、及びGFRP高力ボルト接合の疲労試験を実施するに先立ち、GFRP有孔板の静的引張試験を実施した。写真-1、及び図-2にGFRP有孔板の引張破壊状況、及び純断面作用応力-ひずみ

関係を示す。図-2より、純断面作用応力が約310N/mm²で塑性変形を起こしているのは、GFRP材料の表層部が引張破壊したためである。よって、この値が表層部の引張強度と考えられる。孔部表層の破壊後も供試体は破壊に至らず載荷荷重は上昇し、361.4N/mm²で面内せん断破壊を起こす。破壊荷重と板厚方向のせん断面積（500mm×16mm）から算定した面内せん断応力は約34.3N/mm²であり、GFRP材料の面内せん断強さとほぼ同等となる。

図-3は縦軸に純断面作用応力、横軸に破壊までの繰返し数を取って描いたS-N線図である。GFRP有孔板の疲労破壊形式は静的引張試験と同様であった。従って、以下において検討する有孔板の純断面応力は純断面でGFRP材料の表層部が破壊し、その後供試体が荷重軸方向にせん断破壊したときの作用荷重を純断面積で除した応力である。図中にはJSSC疲労設計強度線¹⁾（C等級）を併記している。これは疲労試験により得られた多数のデータから求めた非超過確率97.7%に対応するP-S-N曲線である。本試験において得られた疲労データから同様に求めた97.7%P-S-N曲線を図中一点鎖線で示す。これより、GFRP有孔板の2×10⁶回疲労強

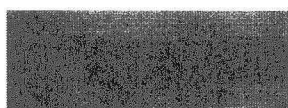


(a) GFRP 有孔板

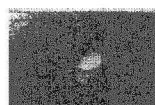


(b) GFRP 高力ボルト接合

図-1 供試体の形状、及び寸法



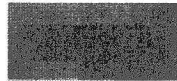
(a) 平面破壊状態(全体)



(b) 平面破壊状態(孔部)



(c) 側面破壊状態



(d) 断面破壊状態

写真-1 GFRP 有孔板の引張破壊状況

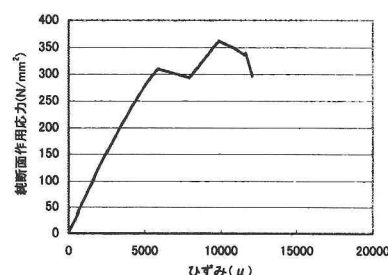


図-2 作用応力-ひずみ関係

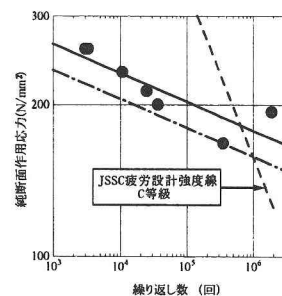


図-3 S-N線図

度 (151.5 N/mm^2) は鋼有孔板のそれに比して高く、 2×10^6 回疲労強度比 (2×10^6 回疲労強度 / 静的引張強さ) は約 0.47 となる。文献²⁾によると、SS400 の疲労強度比は約 0.26 であり、GFRP 有孔板の強度保持率は鋼板の場合に比して高いといえる。

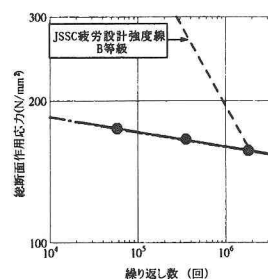
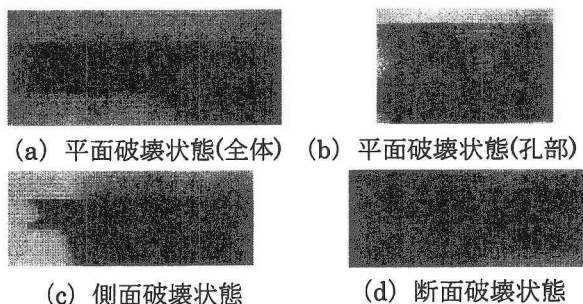


図-4 S-N 線図

写真-2 に高力ボルト接合の疲労破壊状況を示す。疲労破壊は断面 B-B において、ボルト軸力の導入によって生ずる主板圧縮力の分布域³⁾の境界付近で GFRP 表層部が引張破壊し、その後、GFRP 板のボルト孔端部から板端部に至る層間せん断亀裂が進展して起こる。図-4 は縦軸に総断面作用応力を取って描いた S-N 線図である。本試験において得られた疲労データから求めた 97.7%P-S-N 線から、 2×10^6 回疲労強度 (156.3 N/mm^2) は主板に鋼板を用いた摩擦接合のそれとほぼ同等となる。ここで、図-3、及び図-4 に見られるように、GFRP 有孔板、及び高力ボルト接合の S-N 線図の勾配は鋼材料の場合に比して緩傾斜となる。これは GFRP 材料の破壊形式が孔端部からの面内せん断破壊であり、孔による応力集中効果の影響が消失したためと考えられる。

4. GFRP 単純 I 桁曲げ試験

GFRP 単純 I 桁の高力ボルト接合に対する道路橋示方書の適用性を検討するために、GFRP 単純 I 桁接合部に曲げモーメントが作用する供試体を作製し 4 点曲げ試験を実施した。図-5 に供試体の形状、及び寸法を示す。なお、この I 桁の支間長は 2.405 m である。継手は現行道路橋示方書に基づきフランジの接合線の片側にあるボルト本数は 2 列 4 本とし、フランジの全強に対応する軸力 ($N = 42 \text{ kN/本}$) を導入した。腹板接合線の片側にあるボルト本数は 3 本 ($N = 84 \text{ kN/本}$) とした。使用した高力ボルトは F10T, M16 である。図-6 に断面 A-A の荷重-ずれ変位関係を示す。図より、すべり荷重は 168.4 kN となり、設計すべり荷重 (144.3 kN) に対して約 1.2 倍となる。図-7 は継手部がすべりを生ずるときの断面 A-A における曲げ応力分布を示す。なお、曲げ応力は表-2 に示す引張弾性率より求めた。下フランジに生じる曲げ応力 (83.0 N/mm^2) から次式より算定したすべり係数は 0.65 となった。

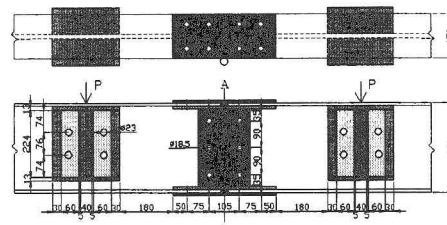


図-5 供試体の形状、及び寸法

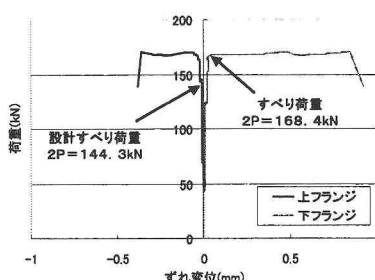


図-6 荷重-ずれ変位関係

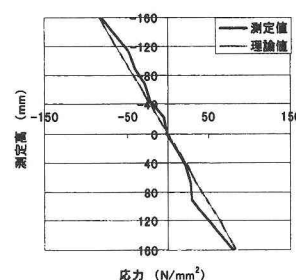


図-7 曲げ応力分布図

$$\mu = \frac{\sigma \cdot A_f}{m \cdot n \cdot N}$$

σ : 曲げ応力 m : 摩擦面の数(2)
 n : ボルト本数(4) N : 導入軸力

ここで得られたすべり係数は設計時に用いるすべり係数 0.4 を上回り、本試験の範囲において現行道路橋示方書に規定する設計法が GFRPI 桁にも適用できるものと思われる。

5. おわりに

本研究は、GFRP 橋梁に高力ボルト接合を導入するための基礎資料を得ることを目的として実施したものである。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。①GFRP 有孔板の S-N 線図の勾配は鋼有孔板のそれに比して緩傾斜となる。これは GFRP 材料の破壊形式が孔端部からの面内せん断破壊であり、孔による応力集中効果が消失したためと考えられる。②GFRP 有孔板の 2×10^6 回疲労強度比は孔あき鋼板に比して高い。③GFRP 有孔板、及び GFRP 高力ボルト接合の 2×10^6 回疲労強度はそれぞれ 151.5 、及び 156.3 N/mm^2 であった。④道路橋示方書に準じて設計した GFRP 桁のフランジ部のすべり係数は約 0.6 程度を確保した。

〈参考文献〉(1) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，pp.6・7, 1993-4.

(2) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，pp.111-112, 1966-5.

(3) 北後ら：高力ボルト接合の性状に関する実験(その1) - 高張力鋼と F11T, F13T 高力ボルトの迂り試験，日本建築学会 関東支部第 36 回学術研究発表会，PP.205~208, 1965-6.