

## (49) GFRP部材の高力ボルト摩擦接合に関する 実験的検討

栗津 和弘<sup>1</sup>・小野寺 諒<sup>2</sup>・中村 一史<sup>3</sup>・小林 拳祐<sup>4</sup>・新倉 利之<sup>5</sup>

<sup>1</sup>株式会社栗本鐵工所 コンポジットプロジェクト室 技術部（〒527-0108 滋賀県東近江市小八木町1番地）

E-mail: k\_awazu@kurimoto.co.jp

<sup>2</sup>学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 博士前期課程2年

（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

E-mail: onodera-ryo2@ed.tmu.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 准教授（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

<sup>4</sup>株式会社IHI インフラ建設 橋梁事業部 鋼保全技術部（〒135-8710 東京都江東区豊洲3丁目1-1）

E-mail: kobayashi0523@ihi-g.com

<sup>5</sup>パシフィックコンサルタンツ株式会社（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

E-mail: toshiyuki.niikura@os.pacific.co.jp

本研究は、GFRP板と鋼板との高力ボルト摩擦接合の実構造物への適用性を目指して、実験的な検討を行った。接合面の静止摩擦力に及ぼす表面処理の影響を簡便に評価するためのスクリーニング法（以下、すべり傾向試験という）を考案した。表面処理の組み合わせをすべり傾向試験により検討して、施工性を考慮した3パターンを絞り込んだ後、摩擦接合継手試験を行い、すべり係数を取得した。その結果、FRP板側と鋼板側には、硬度が同種となる無機ジンクリッチペイントを施工して、摩擦接合面を形成するケースが最も高いすべり係数を得ることができた。

FRP材料の接合時にボルト軸力の低下の要因となるFRP板のクリープ現象については、本締め時の設計ボルト軸力以上の軸力を予備締めの工程で導入することで、ボルト軸力の低下の抑制に寄与する可能性が示唆された。

**Key Words:** GFRP member, Steel splice plate, high-strength bolted friction joint, Surface treatment, Relaxation test

### 1. はじめに

ガラス繊維強化プラスチック（以下、GFRP）は、軽量、かつ耐食性に優れた性質を有しており、橋梁付属物としてのFRP検査路など土木構造物への適用が拡大している。FRP部材では、鋼部材のように接合設計法が確立されておらず、FRP構造物の大型化に伴い、合理的な接合構造の検討は益々重要性を増している。

土木構造用FRP部材の接合構造に関する研究では、接着接合、支圧接合、摩擦接合、接着・摩擦併用接合などの接合方式が報告されている<sup>1)2)</sup>。連結板の材質がパラメータに設定されており、鋼材などの硬い材料を用いることで、FRPの粘弾性挙動を抑えることができ、必要なすべり耐力を確保できることが報告されている<sup>1)3)</sup>。当研究グループにおいても、GFRP板と補強鋼板をエポキ

シ樹脂を用いて接着接合したのち、補強鋼板と鋼添接板とを高力ボルト摩擦接合により締結することで十分なすべり耐力が得られることを確認している<sup>4)</sup>。しかしながら、接合構造上、接着接合部の初期はく離が支配的であることや、連続生産時の接着工数増加の観点では、改善の余地がある。

本研究では、FRP構造物の接合構造に対してより合理的な施工方法についての基礎的検討を行った。接合方法には、継手部に接着接合される補強鋼板を用いることなく、FRP板と鋼添接板の高力ボルト摩擦接合を選択した。すべり耐力を得るために必要なGFRPおよび鋼添接板の各表面処理の組み合わせをパラメトリックに検討した。また、FRP板のクリープ挙動によりボルト軸力が低下する<sup>5)</sup>リラクセーション現象に対して、初期導入軸力の影響についての検討を実施した。

## 2. すべり傾向試験

本章では、各表面処理をパラメータとしてすべり係数を測定し、後述する摩擦接合試験に適用する表面処理を選択することを目的としている。

### (1) 材料

本研究で使用した FRP 材料の力学特性を表-1 に示す。FRP 板は、ガラス繊維とエポキシ樹脂から構成される複合材料として引抜成形法を用いて作製した。添接板（鋼板）に使用した鋼材の材質は SS400 であり、挟締金具の材質は S45C のため、弾性係数は公称値（200kN/mm<sup>2</sup>）を用いた。

表-1 FRP 材料の仕様

| GFRP          |                       | 繊維種   | ガラス繊維  |
|---------------|-----------------------|-------|--------|
|               |                       | 樹脂種   | エポキシ樹脂 |
| 繊維体積含有率 $V_f$ | (%)                   | 63.3  |        |
| 引張弾性率         | 0°                    | 29.9  |        |
|               | 90°                   | 23.8  |        |
| 引張強度          | 0°                    | 547.1 |        |
|               | 90°                   | 365.7 |        |
| 面内せん断弾性率      | (kN/mm <sup>2</sup> ) | 7.5   |        |
| 面内せん断強度       | (N/mm <sup>2</sup> )  | 138.8 |        |

### (2) 接合面の表面処理

図-1 に接触面の表面処理状況を、表-2 にすべり傾向試験表面処理の組み合わせを示す。各 FRP 板の表面は、①未処理、②サンディング処理、③無機ジンクリッチペイント（ゼッター OL-HB、大日本塗料社製）処理の3種類とした。FRP 表面のサンディング処理は、A#60 のサンディング材を設置した連続式 FRP 平面研削装置に2回通過させることにより、所定の表面粗さに調整した。

添接板側は、①ブラスト処理、②発錆剤処理、③無機ジンクリッチペイント処理の3種を用いた。ブラスト仕上げは Sa2.5 で実施した。発錆処理は、ブラスト処理を行った鋼板に発錆促進剤（ヒットロック K、駒井ハルテック社製）の塗布後に1週間の静置期間を設けて、発錆状況を安定させた。無機ジンクリッチペイント処理は、サンディングまたはブラスト処理後の各部材に 75 $\mu$ m の膜厚になるように塗装処理を実施した。

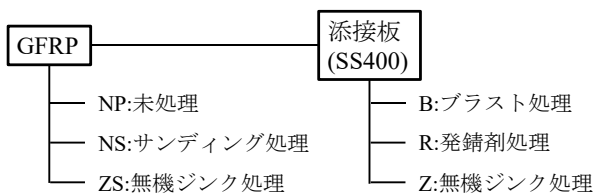


図-1 接触面の表面処理状況

表-2 すべり傾向試験の供試体表面処理と実験パラメータ

| 供試体  | GFRP     |       | 添接板   |       |
|------|----------|-------|-------|-------|
|      | サンディング処理 | ジンク処理 | 発錆剤処理 | ジンク処理 |
| NP-B | —        | —     | —     | —     |
| NP-R | —        | —     | あり    | —     |
| NP-Z | —        | —     | —     | あり    |
| NS-B | あり       | —     | —     | —     |
| NS-R | あり       | —     | あり    | —     |
| NS-Z | あり       | —     | —     | あり    |
| ZS-Z | あり       | あり    | —     | あり    |

### (3) 実験供試体

本試験は M16 の高力ボルト (F10T、対応座金直径 32mm) を用いた摩擦接合継手に用いることを想定した構造とし、供試体の構造図を図-2 に記載する。所定の表面処理を実施した FRP 板の両面に厚さ 9mm の添接板（鋼板）を配置し、締付面となる  $\phi 32$ mm ( $t=7$ mm) の鋼板を介して、挟締金具を用いて所定の軸力を導入する。供試体の幅は、締付面 ( $\phi 32$ mm) から厚さ 9mm の添接板を 45°方向に伝達力が広がることを想定し、50mm とした。

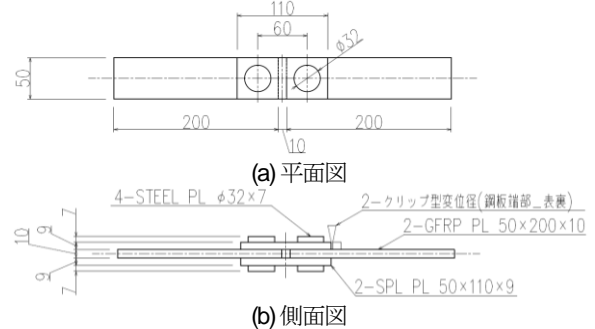


図-2 すべり傾向試験供試体図 (単位: mm)

### (4) 挟締金具による締付力の校正方法

挟締金具による導入軸力の校正は以下の方法で実施した。図-3 に示すとおり、挟締金具胴部の内外縁にゲージ長 3mm のひずみゲージを設置した。導入軸力は、材料定数が既知である校正用丸棒 ( $\phi 13$ mm, SBPR1080/1230) の中心 4 か所に設置したひずみゲージの検出値と挟締金具胴部の検出値の直線回帰から校正係数を求めることで、設定した。

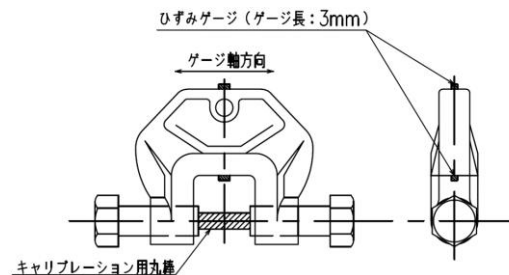


図-3 挟締金具の校正図

## (5) すべり傾向試験条件

挟締金具での導入軸力は、固定側を110kN、すべり側を100kNに設定した。写真-1にすべり傾向試験のセットアップを示す。実験にはアムスラー型万能試験機（容量1000kN UH-F1000 kNI, 島津製作所社製）を使用した。制御方式は変位制御、載荷速度は2.5mm/minとして引張荷重の載荷を行った。

供試体のすべり側となる鋼添接板の端部には、クリップ型変位計（UB-2, 東京測器研究所社製）を設置した（図-2）。FRP板と鋼添接板間の相対変位を計測して、主すべりの判定を行った。

すべり係数 $\mu$ は、式(1)を用いて算出した。ここで、 $P_s$ ：すべり荷重、 $m$ ：接合面数、 $N$ ：導入締付力（軸力）であり、 $P_s$ は、主すべり現象が発生した荷重を、 $M$ は主すべり現象が発生したときの導入軸力を用いている。

$$\mu = \frac{P_s}{m \cdot N} \quad (1)$$

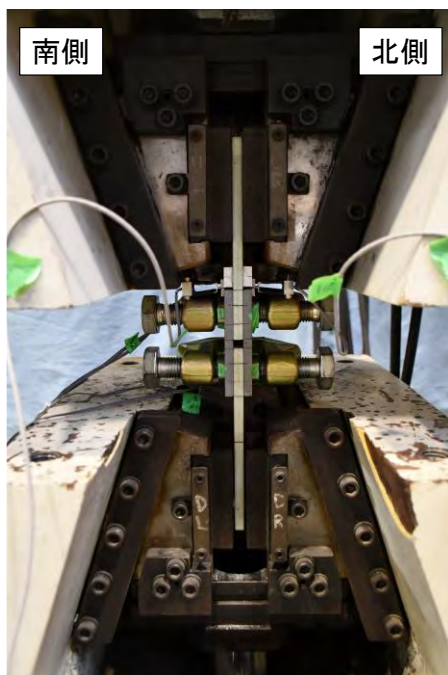


写真-1 すべり傾向試験のセットアップ

## (6) 検討結果と考察

図-4 に計測した NS-B-1 の荷重-相対変位曲線の代表例を示す。写真-1に示す南側のクリップゲージの変位を相対変位 1、北側のクリップゲージの変位を相対変位 2 とした。いずれのケースにおいても、載荷荷重の増加とともに相対変位は増加した。作用荷重はピーク値を示したのち、低下するとともに相対変位は大きくなった。最大値を示すまでの区間では、部分すべりなどの現象により、作用荷重が一時的に低下する現象は確認されておらず、最大荷重を示す点を主すべり点とみなした。

表-3および写真-2にFRP板、添接板の表面処理を組み合わせさせたときのすべり傾向試験の結果を示す。本試験で得られたすべり係数は0.454~0.666であり、すべての組み合わせにおいて、道路橋示方書における摩擦接合の規定値であるすべり係数0.40以上の数値が得られる可能性が示唆された。FRP表面のサンディング処理のすべり係数に及ぼす影響については、添接板側の表面処理状況により相違する結果であった。

### a) ブラスト添接板とFRP板の表面粗さ

ブラスト添接板と接触させるFRP板の表面状態の影響を調べるために、FRP板の表面をサンディング処理を用いて調整した。NP-BとNS-Bの比較より、サンディング処理を実施することで、ややすべり耐力が低下する供試体が観察されたものの、大きな差異は確認されなかった。いずれの組み合わせもFRP板表面のサーフェス層がすべりの起点となっており、FRP表面のサンディング処理がすべり係数に及ぼす影響は軽微であることが確認された（写真-2(a), (d)）。

### b) 発錆剤処理添接板とFRP板の表面粗さ

FRP表面のサンディング処理の状況により、接触面のすべり耐力を支配する因子は相違する結果であった。FRP表面のサンディング処理を実施していないケース（NP-R）では、ブラスト添接板を使用した場合（NP-B）と同様に、FRP板表面のサーフェス層が破壊した痕跡が広域にわたり観察された（写真-2(b)）。すべり係数もブラスト添接板のケースと比較して大きな差異は確認されなかった。一方、NS-Rより、FRP表面にサンディング処理を実施すると、赤錆層の破壊がすべり耐力の支配因子となり、すべり係数は、NS-Bと比べてやや低下する傾向になることが確認された（写真-2(e)）。

### c) 無機ジंकリッチペイント施工添接板とFRP板

サンディング処理を実施したFRP板を使用した場合（NS-Z）、添接板-無機ジंकリッチペイントの界面が破壊起点となることが確認された（写真-2(f)）。実施したすべり傾向試験では最もすべり係数が低下する結果であった。NP-Zより、サンディング処理を実施していないFRP板を用いることで、すべり係数が増加する傾向が確認された。すべり耐力の観点からは、ブラスト添接板、発錆添接板、無機ジंकリッチペイント施工添接板のいずれのケースに対しても、FRP板にサンディング処理を実施することにより、有効な処理効果は得られないことが示唆された。

### d) 無機ジंकリッチペイント施工添接板と無機ジंकリッチペイント施工FRP板

FRP板の表面に無機ジंकリッチペイント処理を行い、無機ジंकリッチペイント施工添接板と組み合わせたケース（ZS-Z）が、最も高いすべり耐力が得られた。試験後の供試体の表面には、添接板側、FRP板側の双方の全

面に無機ジンクリッチペイントが残存しており（写真-2 (g)），他の試験ケースで観察されたような表面処理の界面またはその近傍からのすべりの発生は確認されなかった。

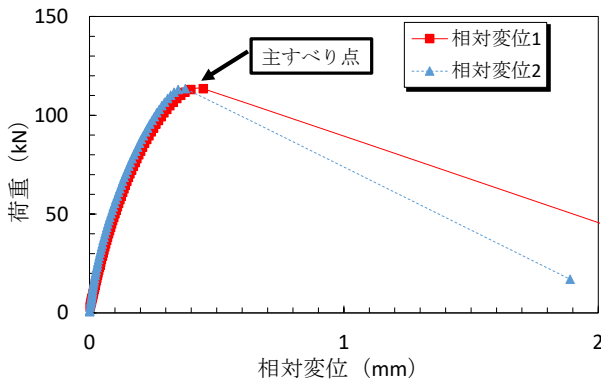
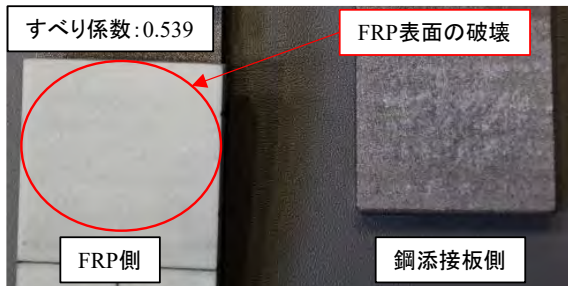


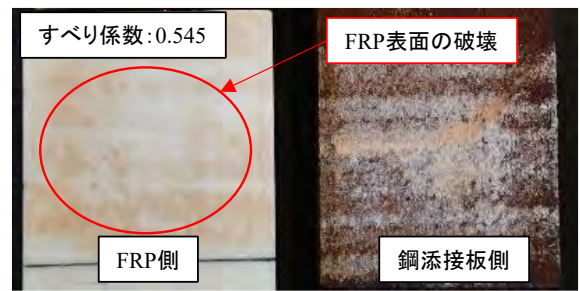
図-4 荷重—相対変位曲線 (NS-B-1)

表-3 すべり傾向試験の供試体表面処理条件と試験結果

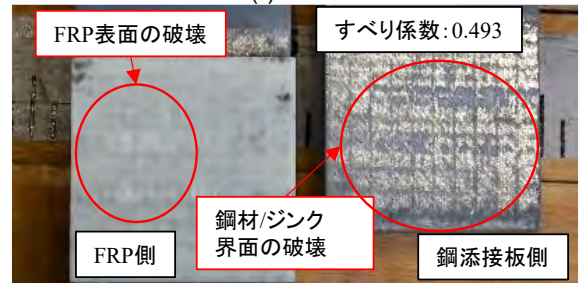
| 試験体名 | GFRP        |      |                               | 添接板 |      | すべり時<br>締付力<br>(kN) | すべり<br>荷重<br>(kN) | すべり<br>係数<br>(-) | 平均<br>すべり<br>係数<br>(-) |                               |
|------|-------------|------|-------------------------------|-----|------|---------------------|-------------------|------------------|------------------------|-------------------------------|
|      | Sand<br>ing | Zinc | 平均<br>Ra<br>( $\mu\text{m}$ ) | 発錆  | Zinc |                     |                   |                  |                        | 平均<br>Ra<br>( $\mu\text{m}$ ) |
| NP-B | -1          | -    | 1.81                          | -   | -    | 12.06               | 100.1             | 113.5            | 0.567                  | 0.539                         |
|      | -2          | -    | 2.36                          | -   | -    | 10.36               | 95.6              | 101.9            | 0.533                  |                               |
|      | -3          | -    | 2.12                          | -   | -    | 13.15               | 96.2              | 99.3             | 0.516                  |                               |
| NP-R | -1          | -    | 1.88                          | -   | -    | 13.13               | 96.9              | 104.2            | 0.538                  | 0.545                         |
|      | -2          | -    | 1.94                          | あり  | -    | 10.32               | 97.2              | 107.7            | 0.554                  |                               |
|      | -3          | -    | 2.27                          | -   | -    | 12.35               | 97.9              | 106.4            | 0.544                  |                               |
| NP-Z | -1          | -    | 2.09                          | -   | -    | 4.84                | 98.7              | 94.4             | 0.478                  | 0.493                         |
|      | -2          | -    | 1.68                          | -   | あり   | 5.25                | 95.9              | 90.1             | 0.470                  |                               |
|      | -3          | -    | 2.18                          | -   | -    | 4.35                | 91.7              | 97.2             | 0.530                  |                               |
| NS-B | -1          | あり   | 3.18                          | -   | -    | 10.96               | 97.0              | 98.8             | 0.509                  | 0.512                         |
|      | -2          | あり   | 3.27                          | -   | -    | 11.53               | 97.4              | 103.4            | 0.531                  |                               |
|      | -3          | -    | 3.45                          | -   | -    | 11.11               | 100.1             | 99.4             | 0.496                  |                               |
| NS-R | -1          | -    | 3.74                          | -   | -    | 12.03               | 101.2             | 97.7             | 0.483                  | 0.486                         |
|      | -2          | あり   | 3.68                          | あり  | -    | 11.10               | 97.8              | 96.9             | 0.495                  |                               |
|      | -3          | -    | 3.63                          | -   | -    | 11.56               | 96.7              | 92.5             | 0.478                  |                               |
| NS-Z | -1          | -    | 3.99                          | -   | -    | 5.38                | 96.6              | 83.4             | 0.431                  | 0.454                         |
|      | -2          | あり   | 4.28                          | -   | あり   | 4.97                | 97.5              | 90.2             | 0.462                  |                               |
|      | -3          | -    | 3.99                          | -   | -    | 4.86                | 96.2              | 90.2             | 0.469                  |                               |
| ZS-Z | -1          | -    | -                             | -   | -    | 4.92                | 93.6              | 127.5            | 0.681                  | 0.666                         |
|      | -2          | あり   | あり                            | -   | あり   | 5.46                | 95.5              | 138.3            | 0.724                  |                               |
|      | -3          | -    | -                             | -   | -    | 5.78                | 103.7             | 123.0            | 0.593                  |                               |



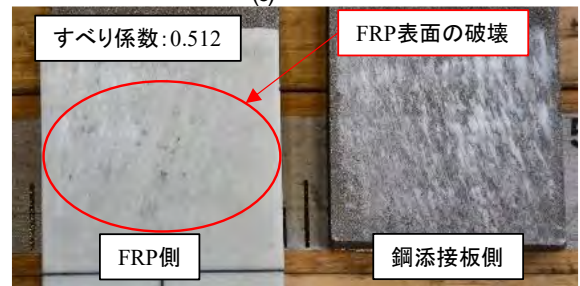
(a) NP-B-1



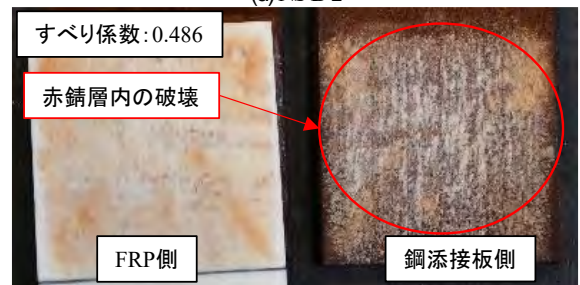
(b) NP-R-1



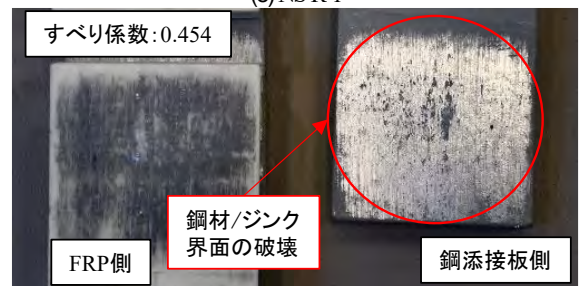
(c) NP-Z-1



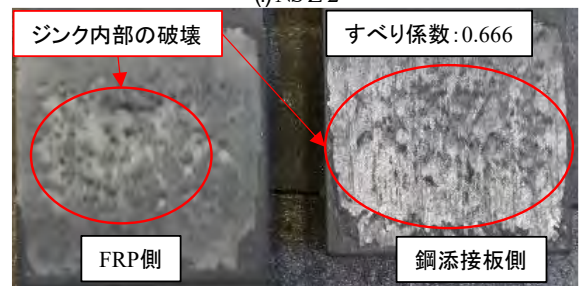
(d) NS-B-2



(e) NS-R-1



(f) NS-Z-2



(g) ZS-Z-3

写真-2 すべり傾向試験後の供試体の表面

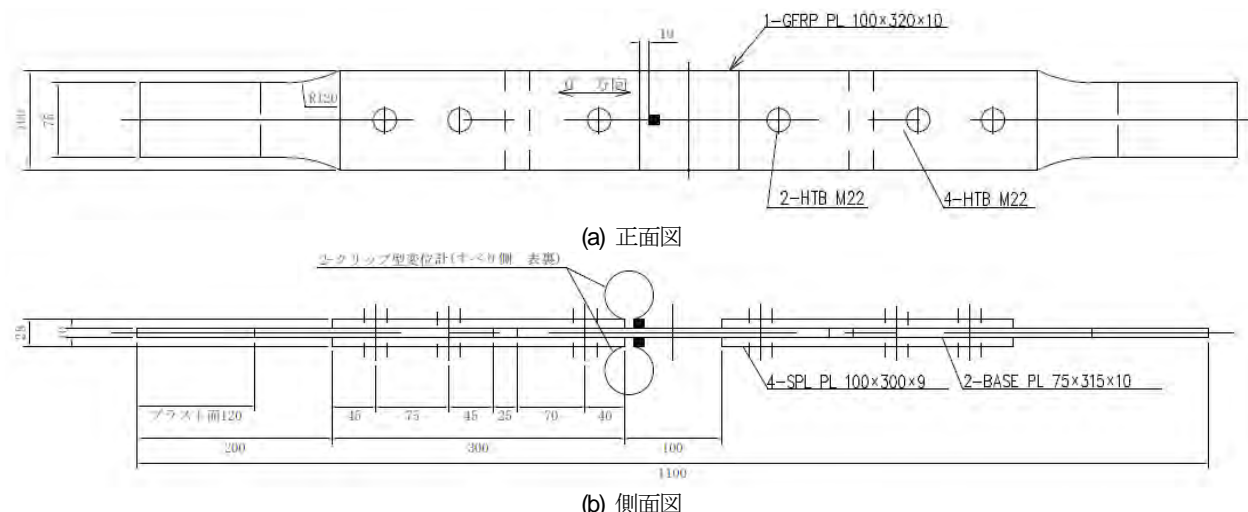


図-5 摩擦接合継手試験における供試体図 (単位: mm)

### 3. 摩擦接合継手の引張試験

#### (1) 実験供試体

図-5に示す摩擦接合継手の実験供試体を対象に、継手強度を引張試験により比較、検討した。接合対象は、FRP 桁のウェブと鋼部材との接合を想定しているため、実験供試体のボルト列数は1列とし、縁端距離は70mmとした。FRP板 ( $t=10\text{mm}$ ) と鋼添接板 ( $t=9\text{mm}$ ) の接合にはひずみゲージ付きの摩擦接合用高力六角ボルト (M22, F10T) を用いた。

本試験に適用した継手試験材料の組み合わせを表-4に示す。上述したすべり傾向試験の結果より継手耐力の向上の観点において大きな効果が期待できないことが想定される。①FRP板の表面にサンディング処理を施すこと、②添接板側への発錆処理の実施することは、摩擦接合継手試験に用いる検討ケースからは除外した。FRP板は、上述のすべり傾向試験と同様の積層構成である。

表-4 摩擦接合継手試験の表面処理と実験パラメータ

| 供試体   | GFRP     |       | 添接板   |
|-------|----------|-------|-------|
|       | サンディング処理 | ジンク処理 | ジンク処理 |
| F_N-B | -        | -     | -     |
| F_N-Z | -        | -     | あり    |
| F_Z-Z | あり       | あり    | あり    |

#### (2) 実験方法

設計ボルト軸力は205kNとして、高力ボルトの締結は、FRP板のクリープ現象によるボルト軸力の低下および軸力のばらつきを抑制するため以下の手順で実施した。FRP板-鋼添接板および鋼添接板-鋼母板ともに、予備締めとして、設計ボルト軸力の60%となる123kNの軸力を導入した。その後、鋼添接板-鋼母板側のみ、本締め工程として226kNの軸力(設計ボルト軸力の110%)を導入したのち、供試体の保管を行った。FRP板-鋼添接

板の本締めは、引張試験の直前に実施しており、固定側に226kNの軸力(設計ボルト軸力の110%)、すべり側は設計ボルト軸力である205kNの軸力の導入した。

供試体のすべり側となる鋼添接板の端部には、図-5に示すとおりクリップ型変位計(RA-5, 東京測器研究所社製)を設置することで、FRP板と鋼添接板の相対変位の計測を行い、主すべりの判定を行った。ボルト軸力の変化は摩擦接合用高力六角ボルトの内部(軸部)に設置されたひずみゲージを用いて算出した。

写真-3に摩擦接合継手の引張試験のセットアップを示す。すべり傾向試験と同様に、アムスラー型万能試験機(容量1000kN UH-F1000kN, 島津製作所社製)を使用して主すべりが発生する荷重の計測を行った。制御方式は変位制御、載荷速度は2.5mm/minとして引張荷重を載荷した。すべり係数およびみなしすべり係数の算出には、式(1)を用いて行い、導入軸力 $N$ には、すべり係数では主すべりが生じたときのボルト軸力を、みなしすべり係数では設計軸力(205kN)を用いた。



写真-3 摩擦接合継手の引張試験のセットアップ

### (3) 実験結果と考察

各供試体の荷重-ストローク変位曲線を図-6に示す。いずれの試験ケースにおいても、主すべりが発生するまでの区間（ストローク変位 2mm~4mm）は、線形的に増加しており、摩擦接合継手の剛性は、FRP板と鋼添接板の各表面処理に関わらず同等であることが確認された。また主すべりが発生するまでの区間にて作用荷重が低下する部分すべりの現象も確認されなかった。

表-5に摩擦接合継手試験からすべり係数およびみなしすべり係数を、写真-4に摩擦接合継手試験後の供試体状況を示す。

実測のボルト軸力から算出したすべり係数の平均値は0.377~0.512、設計ボルト軸力から算出したみなしすべり係数の平均値は0.347~0.449であった。接合面の破壊はいずれのケースでもFRP板のサーフェス層で発生していた。道路橋示方書の規定値である0.40以上のみなしすべり係数が得られたのは、FRP板および鋼添接板の両表面に無機ジンクリッチペイントを施工した(F\_Z-Z)組み合わせのみであり、そのみなしすべり係数は、0.449であった。

両接合面に無機ジンクリッチペイントを施すことで、FRP板と鋼添接板の密着性が高まり、FRP板のサーフェス層の破壊の先行を抑制し、圧着面全体で抵抗する効果があったと推測される。

図-7にすべり傾向試験のすべり係数の平均値と本試験で得られたすべり係数の平均値との比較を示す。本試験で得られたすべり係数の平均値は、上述したすべり傾向試験で得られたすべり係数の平均値に対して23~25%程度低下していることが確認された。これは、供試体形状や接合面の違いによる影響であると推測されるが、全ての試験ケースを用いて算出した相関係数が0.996であることから、一様な低下率であり、上述のすべり傾向試験はスクリーニング試験としては適切な手法であったと考えられる。

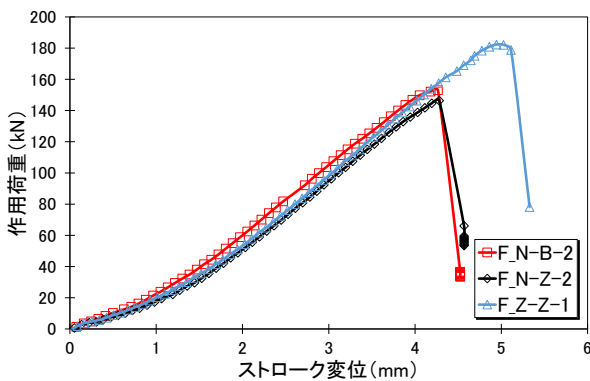
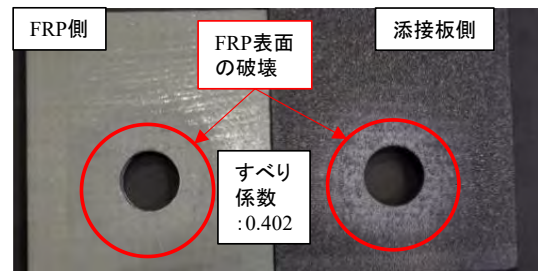


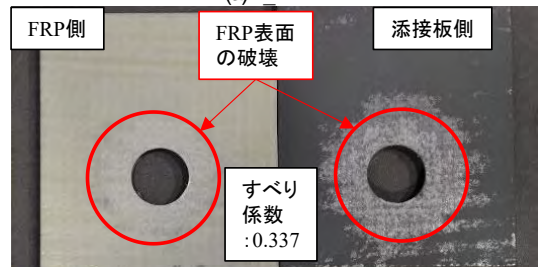
図-6 荷重-ストローク変位曲線

表-5 摩擦接合継手試験の結果

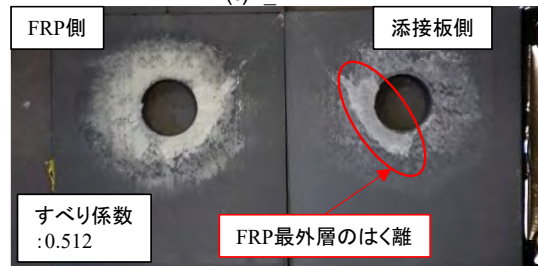
| 試験体名    | ボルト軸力       |               |                | 最大荷重<br>(すべり荷重)<br>(kN) | すべり係数<br>(-) | 平均すべり係数<br>(-) | みなしすべり係数<br>(-) | みなし平均すべり係数<br>(-) |
|---------|-------------|---------------|----------------|-------------------------|--------------|----------------|-----------------|-------------------|
|         | 設計値<br>(kN) | 試験開始時<br>(kN) | すべり時軸力<br>(kN) |                         |              |                |                 |                   |
| F_N-B-1 | 205         | 205.5         | 189.7          | 146.4                   | 0.386        | 0.402          | 0.356           | 0.368             |
| F_N-B-2 |             | 204.7         | 188.3          | 153.0                   | 0.406        |                | 0.374           |                   |
| F_N-B-3 |             | 205.8         | 186.5          | 154.2                   | 0.413        |                | 0.375           |                   |
| F_N-Z-1 | 205         | 205.0         | 188.3          | 140.3                   | 0.373        | 0.377          | 0.342           | 0.347             |
| F_N-Z-2 |             | 205.5         | 188.0          | 146.4                   | 0.389        |                | 0.356           |                   |
| F_N-Z-3 |             | 205.2         | 191.0          | 141.0                   | 0.369        |                | 0.344           |                   |
| F_Z-Z-1 | 205         | 204.6         | 181.0          | 182.3                   | 0.504        | 0.512          | 0.446           | 0.449             |
| F_Z-Z-2 |             | 204.2         | 177.8          | 184.3                   | 0.518        |                | 0.451           |                   |
| F_Z-Z-3 |             | 205.4         | 180.1          | 185.5                   | 0.515        |                | 0.452           |                   |



(a) F\_N-B-1



(b) F\_N-Z-1



(c) F\_Z-Z-1

写真-4 摩擦接合継手の引張試験後の供試体表面

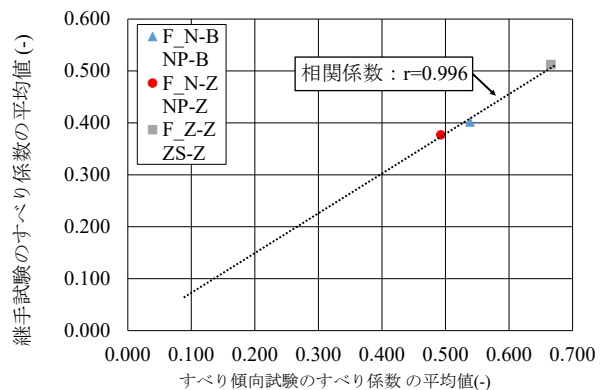


図-7 すべり傾向試験のすべり係数の平均値と摩擦接合継手試験のすべり係数の平均値との比較

#### 4. リラクゼーション試験

FRP 構造物の接合において、FRP 材や接着層の粘弾性変化は重要な要素であり、そのクリープ現象によりボルト軸力の低下が発生することが報告されている。本研究グループでは、工場製作時の軸力管理と施工現場での本締めめのタイミングについての検討を行い、初期ボルト軸力の挙動について報告を実施してきた<sup>9)</sup>。

本章では、既報の FRP 板に補強鋼板を接着させた後、鋼添接板と摩擦接合を行った接着・摩擦併用接合でのその後の軸力挙動を報告する。また、新たに接着補強鋼板を適用せずに FRP 板-鋼板の摩擦接合を実施した供試体を加えて、初期導入軸力の影響について検討した結果を考察する。

##### (1) 実験供試体

図-8 に供試体図を示す。寸法は 80mm×80mm として、エポキシ樹脂をマトリックスとした GFRP 板 (t=10mm) を用いた。FRP 板は上述のすべり傾向試験、継手試験と同様の積層構成である。

##### a) 接着・摩擦併用接合供試体 (既報)

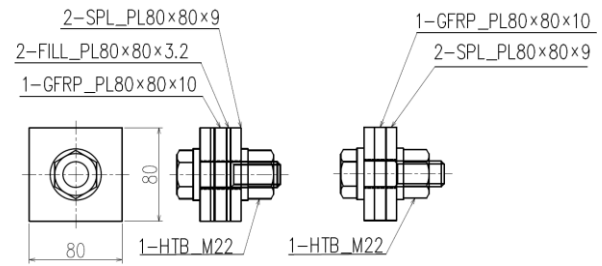
接着補強鋼板 (SS400, t=3.2mm) はブラスト処理を実施した後、アセトンを用いて脱脂を実施した。FRP 板はサンディング処理および脱脂処理を実施したのち、エポキシ樹脂接着剤 (E258R, コニシ社製) を用いて、FRP 板と補強鋼板の接着を行った。接着層の厚さは 0.4mm としてガラスビーズ (直径 0.4mm) を用いた層厚管理を実施した。約 40°C, 24 時間の加温条件にて養生を実施した。

硬化・養生後、鋼添接板と補強鋼板を接着した FRP 板の両面から摩擦接合用高力六角ボルトにより締結を行い、供試体を製作した。接着補強鋼板の摩擦接合面、鋼添接板の両面には無機ジンクリッチペイントの塗装処理を施した。表-6 に使用したエポキシ樹脂接着剤 (E258R, コニシ社製) の材料物性値を示す。

##### b) 摩擦接合供試体

FRP 板の接合面はサンディング処理を、鋼添接板の表面はブラスト処理を施した。各接合面はアセトンを用いて脱脂処理を実施した。

FRP 板に鋼添接板を両側からひずみゲージ付きの摩擦接合用高力六角ボルト (M22, F10T) を用いて、軸力の管理および接合を行った。すべての供試体には φ 24.5mm の孔明け加工を実施した。



(a) 接着補強鋼板あり (b) 接着補強鋼板なし  
図-8 リラクゼーション試験の供試体図 (単位: mm)

表-6 エポキシ樹脂接着剤の材料物性値

| 項目        | 記号       | 単位                | 値     |
|-----------|----------|-------------------|-------|
| 弾性係数      | $E_a$    | N/mm <sup>2</sup> | 3,400 |
| ポアソン比     | $\nu_a$  | -                 | 0.38  |
| 引張せん断接着強さ | $\tau_2$ | N/mm <sup>2</sup> | 25    |

##### (2) 実験方法

図-9 および表-7 に工場内での製作と現地施工の工程で想定する施工期間と実験シリーズをそれぞれ示す。工場内で FRP 材を製作するとき、接着時の軸力管理を行い、予荷重によりクリープ変形を促進させる (以下、予備締め)。現地での現場接合時には一旦、予荷重を開放した後、本締め (摩擦接合) を実施するシナリオである。工場内で実施する管理軸力として、既報では設計軸力 (Nd) に対して 0.63Nd (130kN)、本締めは 1.1Nd (226kN) で実施している。新たに追加した摩擦接合のシナリオ F では、接着する補強鋼板を用いない摩擦接合時のリラクゼーション挙動を把握するために、予備締めを行わず、ボルト軸力 1.1Nd (226kN) の本締めを実施した。シナリオ G では、予備締め軸力の影響を明らかにするため、工場で実施する管理軸力を 1.4Nd (287kN) として、クリープ現象を促進させる養生期間 (N1) を 3 日間とした。予備締めボルト軸力を解放後、直ちにボルト軸力 1.1Nd (226kN) の本締めを実施した。

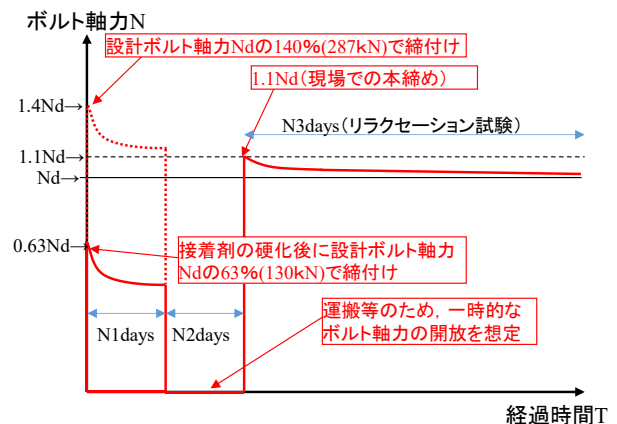


図-9 ボルト軸力の入力・解放のタイムチャート

表-7 リラクゼーション試験条件と検討ケース

| ケース | 鋼板<br>接着 | 導入予<br>備軸力 | 日数 |    |    | 試験<br>体数 | 試験<br>片名 | 開始時期   |
|-----|----------|------------|----|----|----|----------|----------|--------|
|     |          |            | N1 | N2 | N3 |          |          |        |
| A   | あり       | 0.63Nd     | 1  | 7  | 継続 | 2        | A1,A2    | 2022/7 |
| B   | あり       | 0.63Nd     | 3  | 7  | 継続 | 2        | B1,B2    | 2022/7 |
| C   | あり       | 0.63Nd     | 7  | 7  | 継続 | 2        | C1,C2    | 2022/7 |
| D   | あり       | 0.63Nd     | 1  | 1  | 継続 | 2        | D1,D2    | 2022/7 |
| E   | あり       | 0.63Nd     | 3  | 1  | 継続 | 2        | E1,E2    | 2022/7 |
| F   | なし       | /          | 0  | 0  | 継続 | 2        | F1,F2    | 2023/6 |
| G   | なし       | 1.4Nd      | 3  | 0  | 継続 | 2        | G1,G2    | 2023/6 |

(3) 結果と考察

図-10に本締め後のボルト軸力の経時変化（720時間）を示す。すべてのシナリオケースに対して、本締め後1時間以内に急激なボルト軸力の低下が発生することが確認された。予備締めボルト軸力を0.63Ndで実施したシナリオA～Eと予備締めを実施していないシナリオFを比較すると本締め後の軸力の低下挙動に大きな差異は確認されなかった。シナリオA～Fにおいて、720時間（1ヶ月）の経過後のボルト軸力は、194～202kNであり、設計軸力（1.0Nd, 205kN）をやや下回る結果であった。本締め軸力（1.1Nd）より高いボルト軸力で予備締めを行ったシナリオGのケースでは720時間後のボルト軸力は約215kNであり、設計値（205kN）以上の軸力を保持できることが確認された。本結果より工場で実施する予荷重管理は、本締めを行うボルト軸力より高く設定することで、クリープ現象を効果的に促進させることが可能であり、効率的なシナリオが構築できる可能性が示唆された。

図-11に1年間のボルト軸力の経時変化を示す。表-8は設計軸力に対する軸力の導入率の経時変化を表したものである。ボルトの軸力は気温とともに徐々に低下する傾向が観察されたが、外気温が上昇に転じた184日目（4382時間）以降再びボルト軸力が増加することが確認され、ボルト軸力は外気温の影響を受けることがわかる。1年間を通じての計測ではいずれのシナリオでも90%以

上の導入軸力を保持しており、最小となるボルト軸力は90.5%であった。温度変化の影響も考慮し、長期的には20%程度のボルト軸力の低下を考慮した接続部の設計が必要と考えられる。

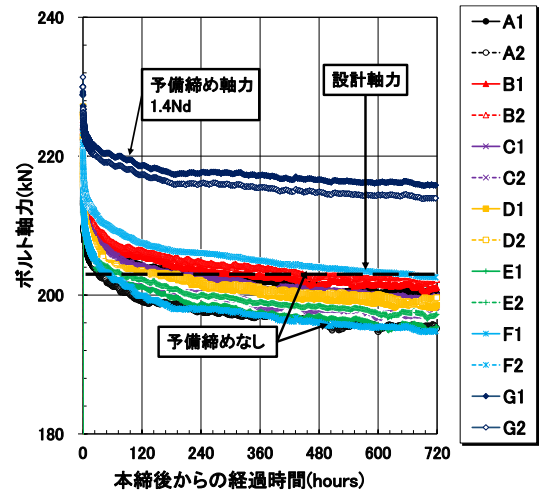


図-10 ボルト軸力の経時変化（初期720時間）

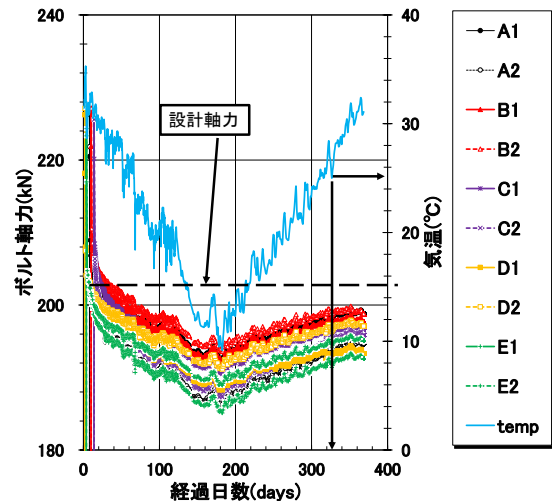


図-11 ボルト軸力の経時変化（1年間）

表-8 ボルト軸力の導入率（%, 100%：設計ボルト軸力）

| 試験片 | 直後     | 1時間    | 30日    | 60日    | 90日   | 120日  | 150日  | 180日  | 210日  | 240日  | 270日  | 300日  | 330日  | 365日  |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1  | 107.80 | 105.10 | 97.70  | 97.20  | 96.00 | 95.60 | 94.20 | 93.90 | 94.60 | 95.62 | 96.35 | 96.49 | 97.02 | 96.86 |
| A1  | 108.20 | 102.80 | 95.20  | 94.50  | 93.10 | 92.70 | 91.10 | 90.90 | 91.80 | 92.92 | 93.83 | 94.10 | 94.84 | 94.81 |
| B1  | 110.80 | 105.60 | 98.20  | 97.20  | 95.90 | 95.40 | 94.10 | 94.00 | 94.50 | 95.64 | 96.00 | 96.30 | 96.60 | 96.27 |
| B2  | 110.80 | 106.40 | 98.80  | 97.90  | 96.70 | 96.20 | 94.90 | 94.70 | 95.20 | 96.38 | 96.63 | 96.98 | 97.30 | 96.81 |
| C1  | 110.60 | 104.90 | 97.90  | 96.60  | 95.30 | 94.80 | 93.40 | 93.20 | 93.80 | 95.17 | 95.17 | 95.72 | 96.09 | 95.61 |
| C2  | 110.00 | 103.90 | 96.50  | 95.40  | 94.00 | 93.40 | 91.90 | 91.60 | 92.30 | 93.95 | 94.19 | 94.94 | 95.65 | 95.34 |
| D1  | 110.40 | 104.80 | 96.40  | 95.60  | 94.30 | 93.80 | 92.30 | 92.00 | 92.70 | 93.51 | 93.88 | 94.31 | 94.41 | 94.31 |
| D2  | 110.80 | 104.20 | 97.00  | 96.40  | 95.30 | 94.90 | 93.70 | 93.40 | 94.10 | 94.82 | 95.41 | 95.78 | 96.18 | 96.21 |
| E1  | 108.90 | 103.30 | 95.10  | 94.40  | 93.00 | 92.40 | 90.90 | 90.50 | 91.20 | 92.16 | 92.78 | 93.26 | 93.95 | 93.91 |
| E2  | 109.40 | 103.50 | 96.10  | 95.40  | 94.30 | 93.90 | 92.60 | 92.30 | 92.80 | 93.72 | 94.24 | 94.60 | 95.25 | 95.15 |
| F1  | 110.15 | 104.18 | 94.98  | 93.46  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| F2  | 110.88 | 106.28 | 98.76  | 97.25  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| G1  | 111.86 | 110.04 | 105.27 | 104.25 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| G2  | 112.87 | 109.72 | 104.33 | 103.19 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

## 5. まとめ

本研究では、FRP 構造物と鋼部材のより合理的な接合構造を目指して FRP 板への接着補強鋼板を使用しない摩擦接合の適用に向けた実験的な検討を行った。得られた成果は以下のとおりである。

- (1) FRP 板の表面処理が相違する鋼板を直接摩擦接合する場合、FRP 板のサーフェス層のすべり破壊が支配的になることが確認された。
- (2) 最も高いすべり係数が得られたのは、FRP 板側、鋼添接板側とも同種の無機ジンクリッチペイントを施した接合面であり、摩擦接合継手試験にて、0.4 以上のすべり係数が得られた。
- (3) FRP 板のクリープ現象による長期のボルト軸力の低下を抑制する効果は予備締め時のボルト軸力が大きく影響することが確認された。本締めで導入するボルト軸力以上の導入率で予備締めを実施することが、ボルト軸力の低下率の抑制に寄与する可能性が示唆された。

**謝辞：**本研究は、東京都立大学、株式会社 IHI インフラ建設、パシフィックコンサルタンツ株式会社、株式会社栗本鐵工所による共同研究として実施された。検討にあたり、松井繁之大阪大学名誉教授には、貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 複合構造委員会 FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会：複合構造レポート 09, FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 土木学会, 2013.
- 2) 岩崎初美, 松井孝洋, 小林拳祐, 中村一史：ハイブリッド FRP 部材と鋼部材の高力ボルト接合に関する強度特性, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.769-778, 2018.3
- 3) 関本将貴, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海：高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手の表面処理がすべり耐力に及ぼす影響, 第 9 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.146-155, 2022.11
- 4) 小野寺諒, 中村一史, 小林拳祐, 花村光一, 新倉利之：鋼板接着で補強された GFRP 板の高力ボルト継手に関する引張試験, 土木学会, 土木学会論文集, Vol.79, No.14, 22-14006, 2023.
- 5) 山崎敏宏, 小林拳祐, 小野寺諒, 中村一史, 栗津和弘, 新倉利之：補強鋼板を接着した GFRP 板と鋼板の高力ボルト接合部のリラクゼーション試験, 土木学会全国大会第 78 回年次学術講演概要会, CS6-11, 2023.9

(Received August 25, 2023)

## EXPERIMENTAL STUDY ON HIGH-STRENGTH BOLTED FRICTION JOINT OF GFRP MEMBER

Kazuhiro AWAZU, Ryo ONODERA, Hitoshi NAKAMURA, Kensuke KOBAYASHI and Toshiyuki NIIKURA

In this study, we conducted a basic research aimed at designing an efficient friction bond between a GFRP plate and a steel plate. We have developed a screening method (slip tendency test) that allows easier experimental investigation of the effect of surface treatment on static friction force of joint surfaces and conducted friction welding joint tests on three test cases selected using the screening method. The highest slip coefficient was obtained in the case where the FRP plate side and the steel plate side were coated with inorganic zinc-rich paint.

From the perspective of relaxation behavior, it is suggested that it may be efficient to input a larger bolt axial force during pre-tightening than the bolt axial force during main tightening.