

(33) GFRP部材の摩擦接合および支圧接合に関する実験的研究

橋本 国太郎¹・杉浦 邦征²

¹正会員 京都大学大学院助教 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:hashimoto.kunitaro.6s@kyoto-u.ac.jp

²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@kyoto-u.ac.jp

本研究では、GFRP部材の接合方法として、高力ボルト摩擦接合および支圧接合に関する実験的な検討を行った。摩擦接合では、母材にGFRP、連結板にGFRPまたはステンレスを用いた供試体を用意し、すべり実験を行った。また、支圧接合では、通常の支圧接合に加え、施工性の改善を試み、ボルト孔とボルトの隙間を樹脂で充填した供試体とくさび状の金属で隙間を充填した供試体を用意し、引張実験を行った。さらに、摩擦接合時のボルト軸力抜けを検討するためにリラクセーション実験も行った。これらの実験の結果、摩擦接合では、連結板にステンレスを用いることで、すべり係数が0.4以上となり、ボルト軸力抜けも小さいことがわかった。また、支圧接合では、樹脂を充填した供試体が通常の支圧接合した供試体と同等の性能があることを確認した。

Key Words : *glass fiber-reinforced polymer, frictional bolted joints, bearing bolted joints relaxation test*

1. はじめに

現在、炭素繊維強化プラスチック (CFRP)、ガラス繊維強化プラスチック (以下、GFRP) およびアラミド繊維強化プラスチック (AFRP) など繊維強化プラスチック系の材料が土木分野でも多く使用されるようになってきている。その中でもGFRPは、他の繊維材料に比べ、より安価であり、その強度特性も鋼材とほぼ同等であることから、現在、日本においても鋼で作られていた水門や歩道橋に代わりGFRP製の水門や歩道橋^{1) ~3)} が建設され始めている。GFRP材を使用することで、腐食や塗装の劣化を検討する必要がなく、メンテナンスコスト面で非常に有利である。また、材料が軽量であるため、施工時に比較的小さい重機で建設でき、施工コスト面においても、他の土木材料を使用した場合に比べ有利である。しかしながら、鋼材に比べ剛性が小さいことで、たわみやそれに伴う振動の問題があり、道路橋などの大きな土木構造物に対しては、いまだに使用されていない。しかしながら、FRPを床版に用いたFRP合成床版が道路橋に使用されるなど⁴⁾、その需要は高まりつつある。

一方で、そのような大型の土木構造物に使用される場合の問題の一つとして、GFRP部材同士をどのように接合するかということが挙げられる。機械や航空分野では、既に多くのFRP部材が使用されてお

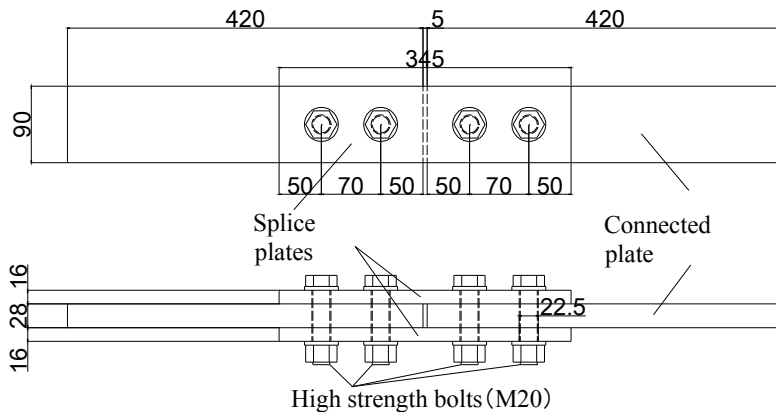
り、その部材同士の接合に関する設計方法も確立されている⁵⁾。しかし、その多くが、接着接合や冷間リベット、ボルト支圧接合など、土木分野で使用されている構造物の接合ではあまり用いられていない接合方法である。土木構造物に作用する荷重が航空分野や機械分野の製品に比べ、大きいことから、土木鋼構造物の接合方法としては高力ボルト摩擦接合もしくは溶接接合が主流である。また、最近建設されたGFRP製の歩道橋に関しては、そのほとんどがFRP構造物で使用実績のある高力ボルト支圧接合を使用している。今後、大型の土木構造物への適用を考えると、このようなGFRP部材のボルト接合に関する研究が必要であると考えられる。

現在、日本の土木分野におけるGFRP部材のボルト接合に関する研究としては、木嶋⁶⁾ や小林ら⁷⁾ による摩擦接合継手の実験などがされている。しかし、いまだに、その検討事例が少ないと言える。

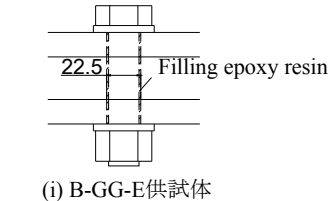
そこで本研究では、GFRP部材の高力ボルト摩擦接合および支圧接合継手に対し、土木構造物に使用されるような実構造レベルにより近い寸法の高力ボルト継手で引張力載荷実験を行い、それら継手の弾性挙動や強度に着目した力学的挙動に関する考察を行った。また、本研究では、支圧接合の施工性を改善する接合手法を提案し、その継手性能の検討も合わせて行った。さらに、摩擦継手で問題となるボルト軸力のリラクセーションに関しても計測を行った。

表-1 実験供試体の種類

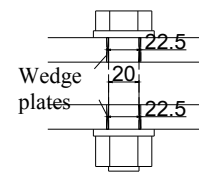
Connection Type	Specimen Name	Connected plate	Splice plate	Notice
Friction	F-GG	GFRP	GFRP	-
	F-GS	GFRP	SUS	-
	F-SS	SUS	SUS	-
Bearing	B-GG-N	GFRP	GFRP	Normal bearing joint
	B-GG-E	GFRP	GFRP	Using epoxy resin for bearing
	B-GG-W	GFRP	GFRP	Using wedge steel plate for bearing



(a) 寸法



(i) B-GG-E供試体



(ii) B-GG-W供試体

(b) 支圧接合供試体の支圧化方法

図-1 実験供試体 (寸法単位: mm)

2. GFRP部材のボルト接合実験

(1) 引張力载荷実験供試体

本研究では、大きく分けて、①摩擦接合供試体、および②支圧接合供試体の2つの実験供試体で引張力载荷実験（以下、载荷実験）を行った。表-1に示すように、摩擦接合供試体では、母材および連結板ともにGFRPを用いた供試体（F-GG供試体）、母材にはGFRPを使用し、実際の使用状況を考慮して連結板にはステンレス材（SUS316L材）を用いた供試体（F-GS供試体）を用意し、さらにステンレス材自体のすべり係数を把握するために、母材および連結板ともにステンレス材を使用した供試体（F-SS供試体）の3種類の供試体を用意した。供試体の寸法は、図-1(a)に示すとおりである。

次に、支圧接合供試体は、すべての供試体で母材および連結板ともにGFRP材を使用し、ボルト孔をφ20mmとして、ボルト呼び径と同じとした通常の支圧接合供試体（B-GG-N供試体）、また、図-1(b)に示すように、ボルト孔は摩擦接合供試体と同様とし、ボルトで締めつけた後に、座金にあらかじめ加工した孔から注射器により、エポキシ樹脂を孔とボルトとの隙間に充填させ支圧化した供試体（B-GG-E供試体）、および連結板のボルト孔のみ摩擦接合供試体と同じとし、その孔とボルトとの隙間をくさび状の特殊な金具（図-2参照）を用い支圧化させた供試体（B-GG-S供試体）の3種類の供試体を用意した。供試体のボルト孔以外の大まかな寸法は、図-1(a)に示す摩擦接合供試体と同じである。

摩擦接合供試体を設計するにあたって、文献8)に記載されている標準試験体を参考として、さらに文献7)での供試体設計思想も参考とし、すべりが先行するようにすべり耐力/引張耐力比0.6として設計した。なお、支圧接合供試体は、最大強度を比較するという意味で摩擦接合供試体と同様の寸法とした。

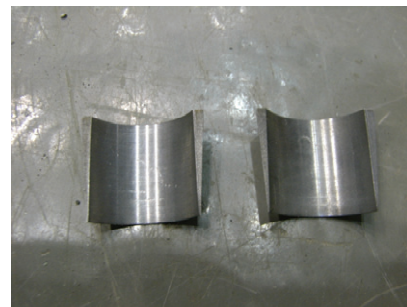


図-2 ボルトを支圧化させるためのくさび型金具

表-2 GFRP部材の層構成

GFRP Member		Connected plate	Splice plate
Thickness(mm)		28	16
Laminated Constitution	SFM	1	1
	CSM	1	1
	#580	1	1
	#800	40	20
	#580	1	1
	CSM	1	1
	SFM	1	1

なお、実際の使用を考えると、ボルトにはF10T相当のステンレスボルト（SUS630）などの高強度材で高耐食性のボルトを使用することが望ましいと考えられるが、今回はすべり強度や支圧強度など継手の力学的な挙動を検討するため、鋼製のF10TM20摩擦接合用高力ボルトを使用した。また、支圧接合供試体に使用したボルトも摩擦接合用のボルトを使用した。

今回実験を行った供試体で使用したGFRP材は、ハンドレイアップによって製作した。母材および連結板の層構成を表-2に示す。

実験供試体の接合面処理は、ステンレス材に関しては、ショットブラスト処理とした。GFRP材に関しては、通常の接着接合と同様の処理方法で、サンドペーパーで継手の表面が若干粗くなる程度に処理した。表面粗さの測定結果を表-3に示す。表-3はすべての供試体の平均値である。表-3より、ステンレスに関しては、粗さパラメータRaが $5\mu\text{m}$ 程度であり、GFRPでは、 $0.5\mu\text{m}$ 程度であり、その差が10倍程度となっていることがわかる。

(2) 荷重実験方法

荷重実験は、①ボルトのキャリブレーション、②実験供試体の組立て（ボルトの締め付け）、③引張力の荷重という手順で行った。

a) ボルトのキャリブレーション

ボルト締め付け時の軸力を把握するために、ボルト軸力とひずみとの関係を調べた。実験供試体の組立ての前にすべてのボルトに対し、キャリブレーションを行った。ボルトのひずみは、ボルト頭部に2軸ゲージもしくはボルト軸部に1軸ゲージを貼付し、キャリブレーション用の引張治具を用い、ボルトを弾性範囲内で引っ張った。図-3には、その結果の一例として荷重-ひずみ関係を示している。図-3に示すひずみ値は平均値である。図-3より、荷重-ひずみ関係は線形的であることがわかる。

b) 実験供試体の組立て

摩擦接合供試体は、M20高力ボルトの標準軸力である181kNを導入した。導入の際は、一次締め付けとしてすべてのボルトに対し、設計軸力の6割程度を導入し、その後、二次締め付けとして標準軸力に達するまで導入した。締め付け中は、ボルトに貼付したひずみゲージの値を読み取り、軸力はそのひずみ値で管理した。

支圧接合供試体では、同様にM20高力ボルトを使用した。純粋な支圧強度を検討するために、軸力はほとんど入れず（ラチェットレンチで手締め程度）に組み立てを行った。なお、エポキシ樹脂を充填するB-GG-E供試体に関しては、ラチェットレンチによる締め付け後に樹脂注入を行った。

c) 引張力の荷重

荷重実験は、図-4に示すように100トン万能試験機を用い、すべての供試体に対し引張力を荷重した。なお、荷重実験は、ボルト軸力導入後24時間経過してから開始した。ただし、F-GG供試体の1体のみ

表-3 表面粗さ測定結果（平均値）

Specimen Name	Roughness Parameter Ra (μm)	
	Connected plate	Splice plate
F-GG	0.49	
F-GS	0.47	4.87
F-SS	5.12	

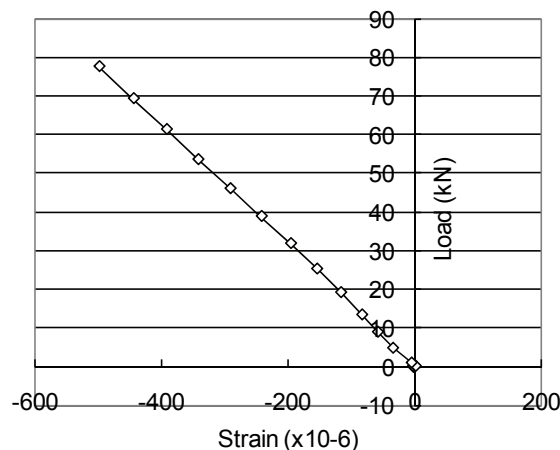


図-3 荷重-ひずみ関係の一例

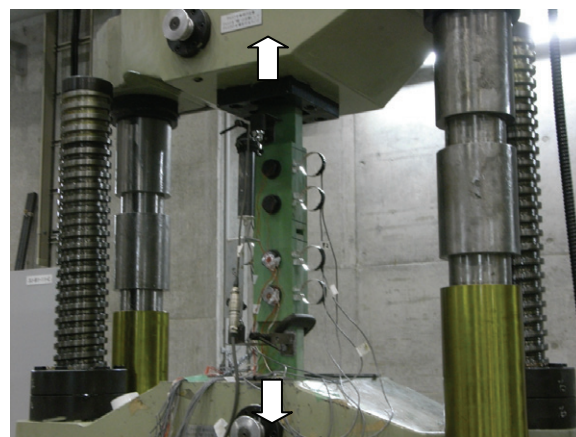


図-4 荷重実験状況（F-GG供試体）

表-4 材料試験結果

	Elastic Modulus (kN/mm^2)	Yielding Point (N/mm^2)	Tensile Strength (N/mm^2)
GFRP	17.1	-	313
SUS316L	-	175	480

（F-GG-3），軸力の抜けを観察するため、48時間後に荷重実験を開始した。

(3) 計測項目

主な測定項目は、①荷重、②継手全体の変位、③母材と連結板との相対変位、④ボルトひずみ、⑤母材および連結板のひずみである。また、摩擦接合供試体に関しては、前述したように実験前に摩擦接合

面（主にボルト孔付近）の粗さを測定している。

(4) 材料試験結果

材料試験結果としてGFRP材とステンレス材の機械的性質を表-4に示す。GFRP材の材料試験は、連結板に使用した16mmおよび28mmの板材で行ったが、28mmの板材では、材料試験機のつかみ位置で、試験片がせん断破壊したため、引張強度を得ることができなかった。また、ステンレス材については、ミルシートの値である。表-4より、GFRP材、ステンレス材ともに、SS400材に比べると若干強度が小さい。また、GFRP材は、弾性係数が一般的な鋼材の弾性係数（205kN/mm²）の1/10以下であることがわかる。

(5) リラクゼーション実験

GFRPを用いた摩擦接合継手の場合、文献7)でGFRPのクリープおよびボルトのリラクゼーションによりボルト軸力の抜けが報告されており、本研究でも、その軸力抜けの経時変化を計測することにした。計測は、図-5に示すように別途供試体を製作し、その供試体に上述と同様の方法で、ボルト軸力を導入し、そのひずみの経時変化を計測した。計測は1年間継続して行った。

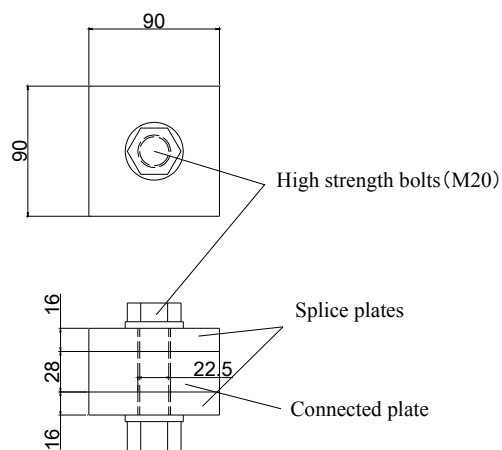


図-5 リラクゼーション実験の実験供試体

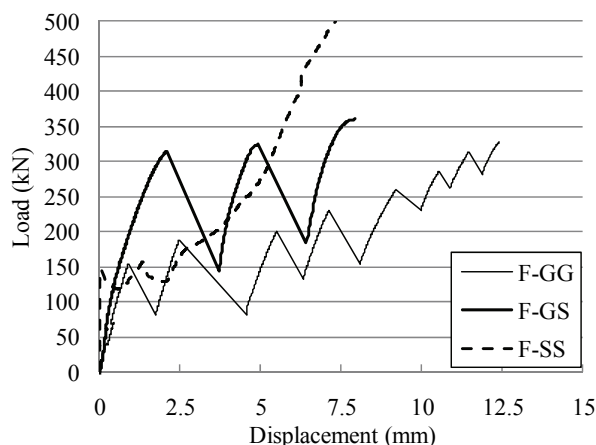


図-6 荷重-継手全体変位関係

3. 実験結果および考察

(1) 摩擦接合継手

摩擦接合継手の実験結果として、図-6および図-7に荷重と継手全体の変位との関係および荷重と母材-連結板間の相対変位との関係を示す。また、表-5には、実験結果のまとめを示している。図-6および図-7は各3体の供試体のうち、1体の例を示している。また、表-5の結果は、3体の上下の接合面のそれぞれのすべり荷重、ボルト軸力、設計すべり係数、すべり係数の平均値を示している。なお、表中の設計すべり係数は、実験で得られたすべり荷重に対し、M20高力ボルトの設計軸力165kNで算定した値であり、すべり係数は載荷実験直前の軸力で算定した値である。

図-6より、F-GG供試体およびF-GS供試体では、大きな荷重の減少が何度か見られる。これは、図-7に示す母材と連結板との相対変位（上側の接合面をU、下側の接合面をLとしている）より、接合面のすべりが発生したときに、大きく荷重低下しているためである。F-GG供試体では、150kN付近で上接合面がすべり、180kN付近で下接合面がすべり、その後、両面ですべりが数回生じている。なお、図-7中の変位が5mm以上一気に変化しているものは、すべり時の衝撃で、変位計が外れたためである。そして、最終的には、340kN付近で、図-8(a)に示すように、外側のボルト孔付近で母材が破断し、載荷を終了し

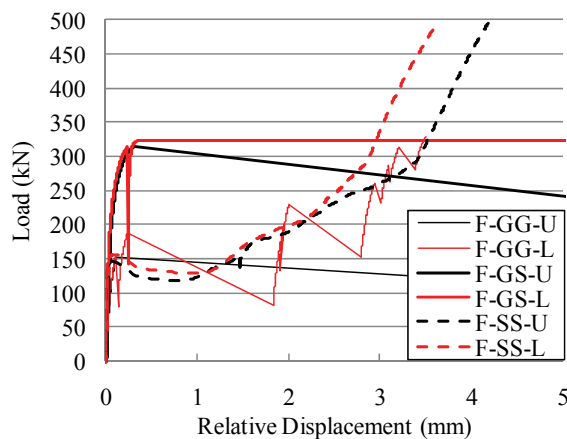


図-7 荷重-相対変位関係

た。また、F-GS供試体でも、310～320kN付近で上下の接合面ですべりがそれぞれ1回ずつ生じ、その後、350kNを超えたあたりで、図-8(b)に示すように、外側のボルト孔付近で母材が破断し、載荷を終了した。一方、F-SS供試体では、F-GSやF-GG供試体に比べるとすべり時の荷重低下が小さいものの、すべりが発生した時点で荷重が低下していることがわかる。また、そのすべり荷重も3種類の供試体の中では一番小さいことがわかる。この供試体では、すべりが発生したのち、支圧状態に入り、荷重が上昇したが、母材を破断させることなく500kNまで荷重をかけ、実験を終了した。

表-5 摩擦接合供試体の実験結果

Specimen Name	Slip load (kN)	Design slip Coefficient	Bolt force (Before test) (kN)	Slip Coefficient	Maximum Load (kN)
F-GG	187.5	0.284	136.6	0.343	329.6
F-GS	308.5	0.467	171.7	0.449	357.5
F-SS	152.2	0.230	177.0	0.215	-

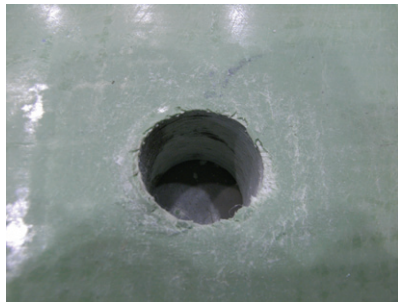


(a) F-GG 供試体



(b) F-GS 供試体

図-8 終局状態



(a) F-GG供試体



(b) F-GS供試体



(c) F-SS供試体

図-9 実験終了後の接合面状態（母材）

表-5より、それぞれの供試体を比較すると、設計すべり係数およびすべり係数が、F-GS供試体のみ道路橋示方書の規定値である0.4以上となっており、F-GGおよびF-SS供試体は、0.3前後の小さい値となっていることがわかる。特に、F-SS供試体は、ショットブラストを施した鋼材のすべり係数（0.4以上）に比べかなり小さい値となっていることがわかる。これは、表面処理が十分でなかったためと考えられる。F-GS供試体のすべり係数が大きくなった理由として、母材のGFRPは、ステンレスに比べ柔らかい材料であり、ステンレス表面の凹凸が母材のGFRPの表面に食い込むことで、すべり抵抗が増加したためと考えられる。図-9には、載荷実験終了後の各実験供試体の接合面を示している。この図-9や図-8より、F-GS供試体では、GFPR母材の表面にすべり痕が残っており、連結板のステンレス表面の凹凸部が食い込み、GFRP表層を削り取るような形ですべったと考えられる。

また、表-5より、F-GG供試体では、設計すべり係数に比べ、実験直前で得られたボルト軸力で割ったすべり係数の値が大きいことがわかる。これは他の供試体に比べ、軸力の抜けが顕著に表れたため

ある。特に、1つの供試体では、ボルトの締め付けから48時間後に実験を開始したが、このときの軸力が目標導入軸力182kNに対し、40%程度抜けていた。全体の平均でも25%程度抜けていることがわかる。それに対し、F-GS供試体では、24時間経過した状態では、標準軸力に対し5%程度の値であり、F-GG供試体に比べると、ほとんど軸力抜けはないものの、F-SS供試体に比べると、若干軸力が抜けていることがわかる。図-8や図-9より、F-GG供試体では、あまりすべり痕らしきものがないが、ボルト孔周辺で表層の樹脂をはがれたような状態となっていることがわかる。これは、軸力導入により、FRP樹脂同士が固着し、すべり時に、樹脂ごと剥がれたためと考えられる。

次に、表-5より、最大荷重を比較すると、F-GS供試体の方がF-GG供試体に比べ、最大荷重が大きいことがわかる。これは、F-GS供試体の方がすべり係数が大きく、すべり後も、母材による支圧・引張抵抗以外に、摩擦力が引張力に対して抵抗しているため、すべり係数の大きいF-GS供試体では、最大荷重も大きくなったと考えられる。しかし、材料の引張強度に純断面積を掛け合わせた設計上の最大荷

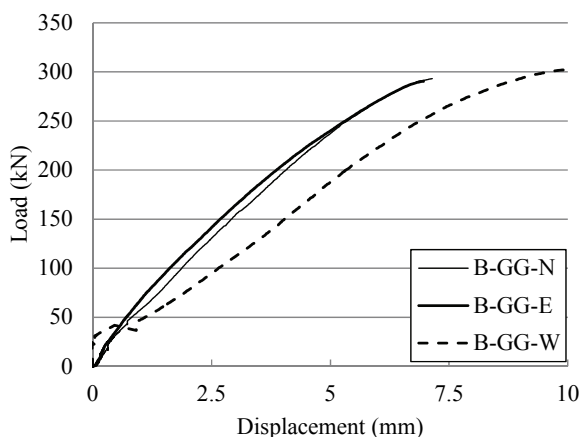


図-10 荷重-継手変位関係

表-6 支圧接合供試体の実験結果のまとめ

Specimen Name	Tensile strength (kN)
B-GG-N	293.0
B-GG-E	290.3
B-GG-W	302.2

重は、 $313 \times (90 - 22.5) \times 28 / 1000 = 592 \text{ kN}$ となり、実験で得られた最大荷重と大きな差があることがわかる。このことから、FRP部材が鋼材のように単純に孔引きの純断面積と引張強度を掛け合わせるだけでは正確に最大強度を評価できないことがわかる。このような現象が生じた原因としては、GFRPが繊維材料であり、金属に比べ、亀裂の発生を誘発するボイドが大きく、応力集中によって、亀裂が発生しやすくなるためと考えられる。また、応力集中係数も一般的な金属材料より大きいことが示されている⁵⁾。さらに亀裂が発生すると、金属材料とは違い、延性的な挙動やひずみ硬化などの挙動がなく、脆性的に破壊するため、最大荷重が小さくなったと考えられる。

(2) 支圧接合継手

支圧接合継手の実験結果として、図-10に荷重-継手全体変位関係を示す。また、表-6には、実験結果のまとめを示している。なお、各供試体は1体ずつのみの製作である。

図-10より、B-GG-W供試体では、その他の供試体に比べ、初期の剛性が大きく、ある荷重となった時点で剛性が小さくなっていることがわかる。これは、初期の段階では、くさび状の特殊金具が孔の隙間を完全に埋めることができず、若干の隙間が空き、継手がすべったためと考えられる。100kN以降では、その他の供試体と同等の剛性を有している。また、樹脂を充填したB-GG-E供試体とボルトのみで支圧されたB-GG-N供試体では、その挙動にほとんど差異はなく、樹脂を充填することで、ボルトによる支圧と同等の特性が得ることができると示すことができた。

また、表-6より、各供試体間を比較すると最大荷

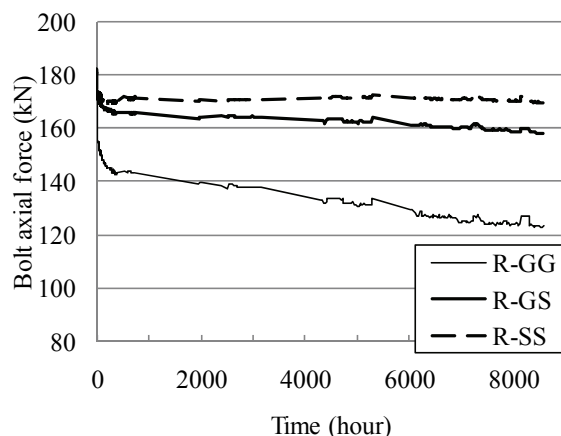


図-11 ボルト軸力の経時変化(1年間)

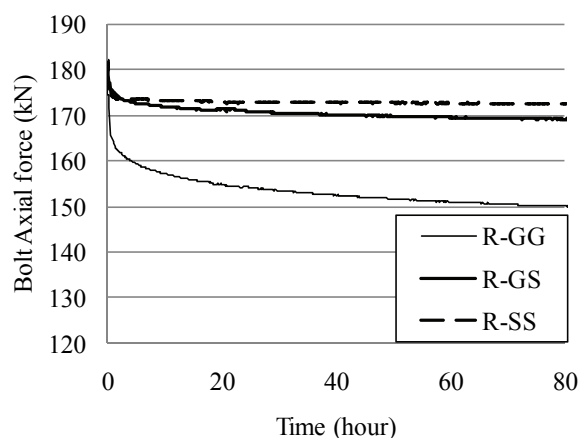


図-12 ボルト軸力の経時変化(初期の3日間)

表-7 リラクセーション実験のまとめ

Specimen Name	Residual bolt force (%)		
	1 day	7days	365days
R-GG	15.1	20.0	32.1
R-GS	6.1	8.3	13.2
R-SS	5.0	6.7	6.9

重にほとんど差異がないことがわかる。これは、各供試体で最大荷重時には、ほぼ同等の支圧状態であるためと考えられる。しかし、前節の摩擦接合継手に比べ、全体的に強度が小さいことがわかる。これは、支圧接合供試体では、ボルト軸力によって発生する摩擦力による抵抗がないため、GFRP板のみの純粋な支圧強度であるためと考えられる。

(3) リラクセーション実験

1年間のリラクセーション実験結果として、ボルト軸力の経時変化を図-11に示す。また、初期の3日分の軸力の経時変化を図-12に示す。さらに、リラクセーション実験の結果のまとめを表-7に示す。

図-11より、1年間経過すると、すべての供試体で、軸力の減少がほぼ収束する傾向を示していることがわかる。図-12や表-7の結果より、R-GG供試体においては、前々節のすべり実験のボルト軸力の減少量（F-GG供試体の平均値では、20%以上のボルト軸力抜け）に比べ、本試験結果のほうがボルト軸力減少量が小さいことがわかる。これは、このリラクセーション実験ではボルト1本のみで実験を行っており、摩擦接合継手実験では、片側2本のボルトを使用しており、隣接するボルト軸力の影響があったためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、GFRP部材の高力ボルト摩擦接合および支圧接合に関する実験的な検討を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 摩擦接合継手に関して、母材にGFRP、連結板にステンレスを用いた場合で、すべり係数が0.4以上を確保できることがわかった。また、ステンレス同士（ $Ra \approx 5.0\mu m$ ）の場合、0.25以下であり、GFRP同士（ $Ra \approx 0.25\mu m$ ）の場合、0.35程度であった。
- 2) 支圧接合継手では、孔径を摩擦接合継手と同等とし、ボルト孔とボルトの隙間に樹脂を充填することで十分に支圧化できることがわかった。
- 3) リラクセーション実験により、母材、連結板ともにGFRPを用いることで、1年間でボルト軸力が32%程度抜けるが、連結板にステンレスを用いることで、13%程度の抜けに抑えることができた。

今後の課題として、摩擦接合に関しては、継手内に複数本のボルトがある場合のボルト軸力の抜けに関する詳細な検討を行う必要がある。また、支圧接

合に関しては樹脂充填方法をより簡便化し施工性を向上させることが挙げられる。

謝辞：本研究の実験供試体の製作は(株)ヒビの日比英樹社長をはじめ同社スタッフ一同に多大なご支援・ご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。また、実験の実施には、京都大学技術職員である有馬博人氏および研究当時、京都大学学生であった山内弘之氏（現：(株)鴻池組）にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 北山暢彦，佐伯彰一，山城和男：沖縄ロードパーク歩道橋の設計，土木学会第1回 FRP 橋梁に関するシンポジウム，pp.103-106，2001.
- 2) 中島和俊，安波博道，細沼宏之：全 FRP 橋梁 自転車13号橋の設計，製作および架設，土木学会第3回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.183-194，2009.
- 3) 日比英樹，岩本弘幸，藤本良則，古蔵均：離島における FRP 管理橋および FRP 水門の施工事例，土木学会第3回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.169-174，2009.
- 4) 望月秀次，花田克彦，石崎茂，久保圭吾，松井繁之：FRP 合成床版の実橋への適用例と疲労耐久性評価，土木学会第1回 FRP 橋梁に関するシンポジウム，pp.65-72，2001.
- 5) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，1994.
- 6) 木嶋健，渡邊哲也，明嵐政司：FRP ボルト接合における軸力の効果に関する実験的検討，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，I-510，pp.1017-1018，2004.
- 7) 小林憲治，日野伸一，山口浩平，大本透：接着剤および高力ボルトを用いた GFRP・鋼接合部の強度特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.55A，p1140-1149，2009.3.
- 8) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)，2006.

EXPERIMENTAL STUDY ON FRICTIONAL AND BEARING BOLTED CONNECTION FOR GFRP MEMBERS

Kunitaro HASHIMOTO and Kunitomo SUGIURA

In this paper, experimental study of high strength bolted frictional and bearing joint for GFRP members is carried out. In frictional joint, specimens which are consist of GFRP for connected plates and GFRP or Stenless for splice plates are prepared. In bearing joint, specimens which are varied filling method of gaps between bolts and holes by epoxy resin or wedge plates are prepared. Relaxation test is also executed to investigate decreasing of bolt axial force. It is obtained that slip coefficient of GFRP-SUS specimen is lager than 0.4 and decreasing of bolt axial force is few. It is found that the specimen of filling epoxy resin has same beaing strength as strength of the ordinal baering specimen.