

ガラス繊維積層材及び炭素繊維とガラス繊維複合積層材のクリープ諸特性

新井 崇裕¹・古市 耕輔²・吉澤 弘之³・林田 道弥⁴・糸久 智⁵

^{1,2}正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

¹E-mail:arai-tak@kajima.com, ²E-mail:furuichi-k@kajima.com

^{3,4}正会員 新日鉄マテリアルズ株式会社 社会資本材料事業部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)

³E-mail:h-yoshizawa@nck.nsmat.co.jp, ⁴E-mail:m-hayashida@nck.nsmat.co.jp

⁵正会員 芦森工業株式会社 パルテム技術部 (〒566-0001 大阪府摂津市千里丘7-11-61)

⁵E-mail:satoshi_itohisa@ashimori.co.jp

FRP部材の連結部は、FRPがクリープ変形してボルト軸力が低下するため、摩擦接合ではなく支圧接合による設計が合理的になる場合がある。支圧接合においては、ボルトの支圧力による円孔周りのクリープが部材の変形や終局耐力に大きく影響することから、これを設計で考慮することが重要となる。そこで、今回、筆者らはガラス繊維積層材、及び炭素繊維とガラス繊維複合積層材を対象として、5年間の持続荷重が作用した場合の連結部の耐力、及び変形について検討することを目的にボルトの支圧力による円孔周りのクリープ、並びにクリープ実験後の残存支圧強度に関するデータを採取した。また、円孔周りのクリープ実験に先立ち、クリープによるボルト軸力の低下に関するデータを採取した。

Key Words : FRP, carbon fiber, connecting part, bearing connection, creep

1. はじめに

FRP部材を高力ボルトでH形鋼等と連結して構造部材を構築しようとした場合、FRPがクリープ変形してボルト軸力が低下することが知られている。このため、FRP部材の連結部は、摩擦接合ではなく支圧接合による設計が合理的になる場合がある。支圧接合においては、ボルトの支圧力による円孔周りのクリープが部材の変形や終局耐力に大きく影響することから、これを設計で考慮することが重要となる。そこで、今回、筆者らはガラス繊維積層材（以下、GF積層材と称す）、及び炭素繊維とガラス繊維複合積層材（以下、CG複合積層材と称す）を対象として、5年間の持続荷重が作用した場合の連結部の耐力、及び変形について検討することを目的にボルトの支圧力による円孔周りのクリープ、並びにクリープ実験後の残存支圧強度に関するデータを採取した。また、円孔周りのクリープ実験を行うにあたり、実験時のボルト軸力を設定する目的でFRP部材のクリープによるボルト軸力の低下に関するデータを採取した。本稿では、これらの一連のクリープデータについて報告する。

2. ボルト軸力のクリープ特性

(1) 実験概要

FRP部材のクリープによるボルト軸力の挙動に関する実験のパラメータ、及びFRPの積層構成を表-1に、実験概要を図-1にそれぞれ示す。

実験パラメータは、FRPの種類（GF積層、CG複合積層）、及び部材厚さ（16、80mm）の4水準とした。また、試験体数は、各々2体ずつとして合計8体とした。積層は、GF積層材については、ガラス繊維を、また、CG複合積層材については、炭素繊維とガラス繊維とバイアスクロスを表-1に示す積層で組合わせた（繊維の詳細は表-1の脚注に記載）。ここで、部材厚さを16mmと80mmに設定したのは、円孔周りのクリープ実験での部材厚さを16mmを想定していること、木嶋らの検討¹⁾に16mmのケースがあることから、基本ケースとして、まず、16mmを選定した。また、80mmは、現在適用対象と想定している構造物のうち、最大のもので部材厚さが80mm程度となることから設定した。試験体は、150×150mmの平面形状を有するものとした。これは、ボルトの軸力が45°の角度で分布するものと仮定して応力状態が均一となるように部材厚さとの関係から設定した。使用したボルトは、M22の高力ボルトで

あり、部材厚さが16,80mmに対して長さをそれぞれ75,160mmとした。ボルト孔は、 $\phi 23.5\text{mm}$ とした。また、FRP板の局所応力を低減する、あるいは、実際の支圧接合においても連結板が設置されることを想定し、厚さ9, 19mmの鉄板を両端に設置した。ボルト軸力は、標準値として226kNを導入するものとした。FRP部材に高力ボルトで軸力を導入する場合、トルク係数が異なることが想定されたため、ボルトを削孔してその内部にひずみゲージを配置し接着剤で一体化してひずみを評価する方法¹⁾により、導入ボルト軸力を管理した。ボルト軸力の経時変化は、2008年9月より3時間ピッチで測定を開始し、2012年8月現在で約4年間のデータを得ている。試験体の環境条件は、20°C、60%で一定とした。

表-1 実験パラメータ、及びFRPの積層構成

Case	厚さ [mm]	積層構成*	試験体数
GF-A-16	16	GF/GF/GF/GF/GF/GF	2
GF-A-80	80	GF/GF/GF/GF/GF/GF×5	2
CG-A-16	16	CF3/BC/CF3/BC/GF/BC/CF3/BC/CF3	2
CG-A-80	80	CF3/BC/CF3/BC/GF/BC/CF3/BC/CF3×5	2

※ GF:ランダム方向ガラス短繊維+軸方向ガラス長繊維入り樹脂シート(厚さ約3.0mm), CF:軸方向炭素長繊維入り樹脂シート(厚さ約0.8mm), BC:45°方向ガラスクロス入り樹脂シート(厚さ約1.0mm), 数値は積層数を示す。

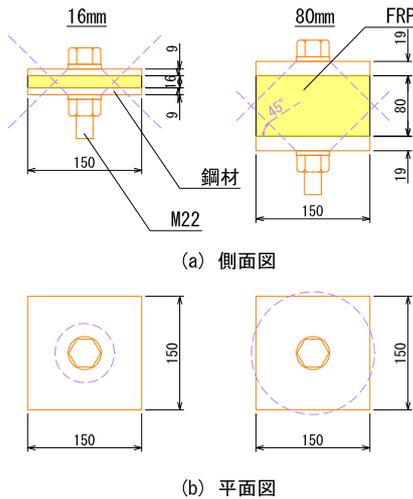


図-1 実験概要

(2) 実験結果

各試験体のボルト軸力の経時変化を図-2に、主要経過時間におけるボルト軸力と低減率の値(2体の平均値)を表-2にそれぞれ示す。これより、得られた知見を以下に示す。

- 4年経過後のボルト軸力の低減率は、77~83%であり、低減率のうち、約半分は荷重初期の約1ヶ月で生じる。
- FRPの種類(GF積層, CG複合積層)を比較すると、厚さ16mmについてはGF積層に比べてCG複合積層の方がボルトの低減率が大きい、厚さ80mmについては大きな差は見られない。2体でばらつきが生じているケースも見られることから、この結果がばらつきによるものなのか材料特性によるものなのかは判断できない。試験

- 部材厚さを比較すると80mmに比べて16mmの方がボルトの低減率が大きい。これは、ボルトの軸力が図-1(a)に示すように45°の角度でボルトの座金、鉄板(連結板)及びFRP部材中に伝達していくと仮定した場合、厚さ16mmでは軸力を受けるFRP部の範囲が厚さ80mmに比べて少なく、軸力を保持しているFRP部材がボルト近傍のみに限定される。このため、厚さ16mmは80mmに比べて局所的に板厚方向の圧縮応力が高くなる影響によるものと考えられる。

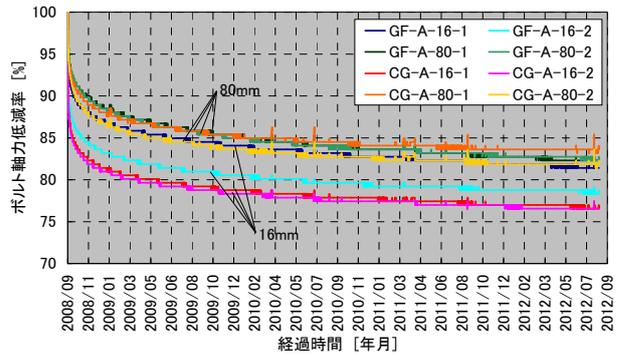


図-2 ボルト軸力の経時変化

表-2 ボルト軸力と低減率の値(平均値)

日付	経過年月	GF-A-16		GF-A-80		CG-A-16		CG-A-80	
		軸力 [kN]	低減率 [%]						
2008/9/19	載荷日	226	100.0	226	100.0	226	100.0	226	100.0
2008/10/19	1ヵ月後	206	90.9	206	90.9	189	83.4	203	89.8
2008/11/19	2ヵ月後	203	89.6	203	89.6	186	82.1	200	88.3
2008/12/19	3ヵ月後	201	88.7	201	88.7	184	81.2	198	87.4
2009/3/19	6ヵ月後	197	87.2	197	87.2	182	80.3	195	86.1
2009/9/19	1年後	194	85.6	194	85.6	179	79.0	192	85.0
2010/9/19	2年後	190	84.1	190	84.1	176	77.7	189	83.6
2011/9/19	3年後	188	83.0	188	83.0	174	77.0	188	83.0
2012/8/22	約4年後	186	82.3	186	82.3	173	76.5	187	82.7

3. ボルト円孔周りのクリープ特性

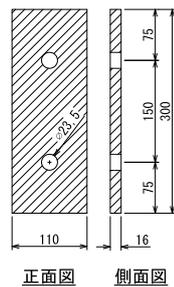
(1) 実験概要

ボルトの支圧力による円孔周りのクリープ実験に用いた試験体の形状を図-3に、実験装置を図-4にそれぞれ示す。試験体の形状は、幅110mm×長さ300mm×厚さ16mm、縁端距離を75mmとし、M22の高力ボルトに対して $\phi 23.5\text{mm}$ の孔を有するものとした。今回の検討では、5年間(43,800時間)の持続荷重が作用した場合を想定し、クリープ実験に用いた荷重(支圧力)、及び荷重時間は、以下の手順で設定した。

- 検討対象とする持続荷重は、許容支圧力 R_{aa} とする。
- 無荷重の試験体を用いて支圧強度試験により支圧耐力 R_a を求め、 R_a の1/3を R_{aa} とする。
- 5年間の荷重時間を短縮するために、荷重荷重と荷重時間に対数関係が成り立つものと仮定する(図-5)。
- 図-5より、荷重時間を約2,190時間(約3ヶ月)とした場合の荷重 F を算定する。

ここで、支圧強度試験より、 $R_a=140.3\text{kN}$ 、**図-5**より、 $F=0.52 \times R_a$ が得られた。以上より、載荷荷重 $F=0.52 \times R_a=73.0\text{kN}$ 、載荷時間2,190時間とした。

高力ボルトの軸力は、2章の結果を考慮し、ここでは低下量を50%と見込み、M22の標準ボルト軸力226kNに対して、113kNを導入した。ボルトの軸力を導入する際には、円孔縁にボルトを接地させ載荷荷重方向への滑りのないようにした。載荷は、油圧ジャッキをコントロールすることにより、 $73.0 \pm 2.2\text{kN}$ ($\pm 3\%$)で制御した。実験時には、載荷荷重、及び**図-5**に示す標点間の変形量を計測した。試験体数は4体で、このうち、No.1,3において変形量の計測を行った。**表-3**にガラス繊維積層、及び炭素・ガラス複合積層の積層構成と試験体数を示す。



正面図 側面図
図-3 試験体

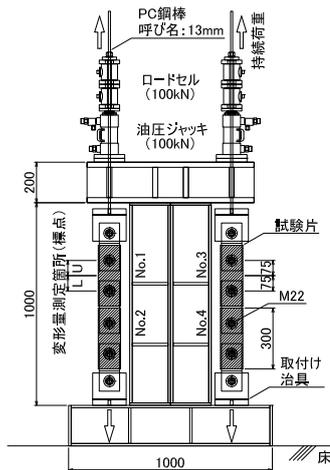


図-4 クリープ実験装置 (正面図)

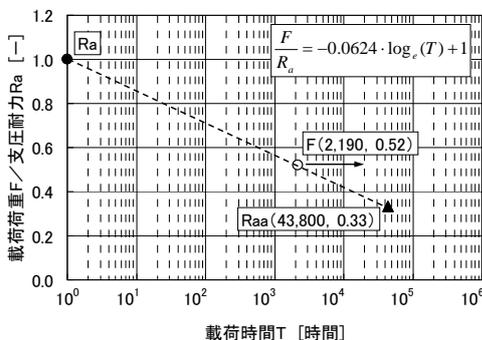


図-5 載荷荷重と載荷時間の関係

表-3 実験パラメータ、及びFRPの積層構成

Case	厚さ [mm]	積層構成*	試験体数
GF-B-16	16	GF/GF/GF/GF/GF/GF	4
CG-B-60	16	CF3/BC/CF3/BC/GF/BC/CF3/BC/CF3	4

* GF:ガラス繊維, CF:炭素繊維, BC:ハイアスクロス, 数値は積層数を示す。繊維の詳細は表-1を参照。

(2) 実験結果

載荷時間と変形量の増分の関係としてGF-B-16-1、及びCG-B-16-1の結果を**図-6**に、クリープ実験後のボルト円孔周りの試験体の状況を**写真-1**にそれぞれ示す (No.1とNo.3で変形量に大きな差はなく、4体の試験体ともボルト円孔周りの状況に大きな差は見られなかったため代表値を示す)。**図-6**より、持続載荷により変形量は増加するものの概ね600時間以降は安定しており、2,190時間の時点においても変形量は漸増する傾向はなく、クリープ破壊する兆候は見られなかった (短時間の凹凸は荷重制御の影響である)。持続載荷期間内における最大変形量は、それぞれGF-B-16-1は0.060mm、CG-B-16-1は0.022mmであり、GF-B-16-1とCG-B-16-1を比較するとCG-B-16-1の方が変形量は小さかった。また、**写真-1**に示すように、クリープ実験後の円孔周りには亀裂や層間剥離等の損傷は見られなかった。

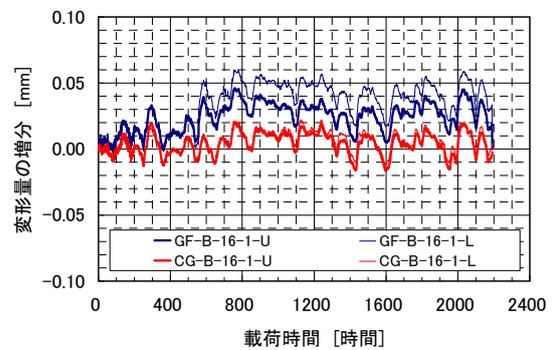
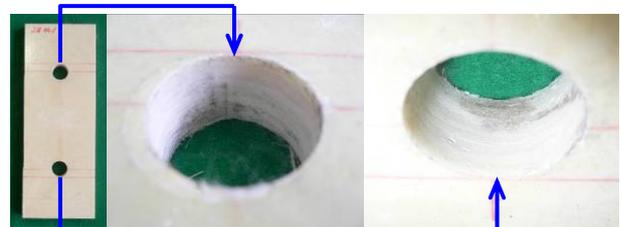
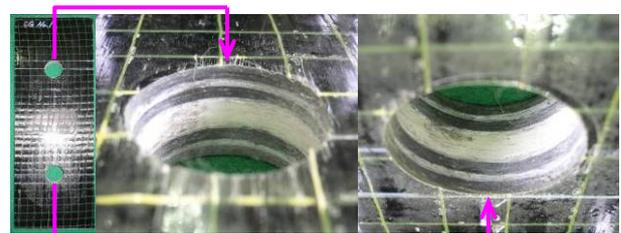


図-6 載荷時間と変形量の増分の関係



(a) GF-B-16-1



(b) CG-B-16-1

写真-1 クリープ実験後のボルト円孔周りの状況

4. クリープ実験後の残存支圧強度試験

(1) 試験概要

クリープ実験が終了した試験体、並びに無載荷の試験体を用いて支圧強度試験を行った。試験方法を**図-7**に、試験状況を**写真-2**にそれぞれ示す。

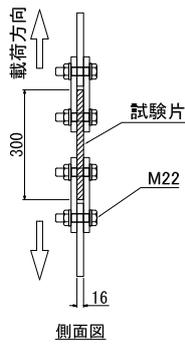


図-7 試験方法



写真-2 試験状況

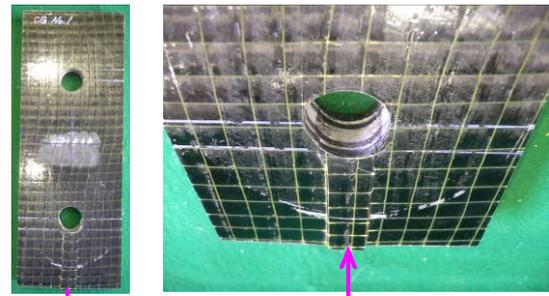


写真-3 支圧破壊の状況 (CG-B-16-1)

(2) 試験結果

クリープ実験後の残存支圧強度，並びに無載荷の試験体による支圧強度試験の結果を表-4に，試験後の試験体の状況としてクリープ実験後のCG-B-16-1の結果を写真-3にそれぞれ示す。これより，支圧強度についてクリープ実験後の平均値と無載荷の平均値を比較すると，GF積層においては強度比は $381.7/376.3 = 1.01$ ，CG複合積層においては $444.5/403.2 = 1.10$ であり，いずれも大きな差はなくクリープによって強度低下が生じていないことが確認された。また，破壊は写真-3に示すような支圧破壊であった。

表-4 支圧強度試験結果

CASE		幅平均	板厚	破壊荷重	支圧強度	破壊形態	
		[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]		
GF積層	残存強度	No.1	110.0	17.2	143.4	378.7	支圧
		No.2	110.3	17.3	130.9	344.9	支圧
		No.3	109.2	17.4	148.5	387.3	支圧
		No.4	109.4	17.3	157.9	416.0	支圧
		平均値	109.7	17.3	145.2	381.7	
	無載荷	No.1	109.9	17.0	134.9	361.4	支圧
		No.2	109.9	16.7	136.1	371.2	支圧
		No.3	110.0	17.0	147.6	393.8	支圧
		No.4	109.9	17.1	143.0	380.7	支圧
		平均値	110.2	17.0	139.9	374.6	支圧
CG複合積層	残存強度	No.1 [*]	109.9	16.1	151.1	426.0	支圧
		No.2	110.0	16.0	156.9	446.0	支圧
		No.3	110.1	16.0	163.5	464.3	支圧
		No.4	109.7	16.0	155.8	441.8	支圧
		平均値	109.9	16.0	156.8	444.5	
	無載荷	No.1	109.7	16.0	139.5	396.1	支圧
		No.2	110.0	15.6	135.5	394.4	支圧
		No.3	110.2	16.1	143.6	406.7	支圧
		No.4	110.1	15.8	147.8	425.9	支圧
		平均値	110.0	16.1	139.2	393.1	支圧
	平均値	110.0	15.9	141.1	403.2		

※ 写真-3に支圧破壊の状況を示す。

5. おわりに

本検討における実験条件で得られた知見を以下に示す。

- ボルト軸力のクリープ特性として，4年経過後のボルト軸力の低減率は，77～83%であり，低減率のうち，約半分は載荷初期の約1ヶ月で生じる。
- ボルト円孔周りのクリープ特性として，ボルト円孔周りに亀裂や層間剥離等の損傷は見られず，残存支圧強度の低下も見られなかった。また，ガラス繊維積層においては最大で0.060mm，炭素繊維・ガラス繊維複合積層においては最大で0.022mmの変形量が見られた。

今後は設計手法の構築に資するボルト円孔周りのクリープデータ採取として，①クリープ破壊が生じるような荷重レベル，②ボルト軸力を導入しないケースにおける実験を行いたいと考えている。

参考文献

- 木嶋，勝野，小林，日野，西崎：FRPボルト接合における軸力の経時変化に関する実験的検討，土木学会第61回年次学術講演会，CS10-004，2006.9
- 新井，古市，吉澤，林田，糸久，櫻木：直接発進到達に用いるH形SZパイルのH形鋼との連結部に関する検討，土木学会第65回年次学術講演会，CS2-013，2010.9

STUDY ON CREEP PROPERTIES OF LAMINATED PLATES WITH CARBON FIBER AND GLASS FIBER

Takahiro ARAI, Kosuke FURUICHI, Hiroyuki YOSHIZAWA, Michiya HAYASHIDA and Satoshi ITOHISA

As for the connection part of the FRP member, it is known that bolt axial tension will decline. For this reason, the design by not friction grip connection but bearing connection is rational. In bearing connection, the creep by bearing force influences deformation and ultimate strength of a member greatly. Then, the creep data based on bearing force when the sustaining load for five years acts for glass fiber laminated material, and carbon fiber and glass fiber compound laminated material was obtained. Moreover, the creep data about the bolt axial tension by creep was obtained.