引抜成形 GFRP 積層材によるボルト接合の軸力リラクセーション[†]

木 嶋 健* 勝 野 壽 男** 小 林 憲 治***
日 野 伸 一*** 西 崎 到****

Relaxation Behavior of Clamping Force in Bolted Joints of Pultruded GFRP Laminates

by

Takeshi KISHIMA*, Toshio KATSUNO**, Kenji KOBAYASHI***,
Shin-ichi HINO*** and Itaru NISHIZAKI****

The relaxation behavior of clamping force in friction-type FRP bolted joints is one of the significant subjects in application of FRP to structures. The aim of this paper is to obtain the factors of relaxation behaviors in the GFRP bolted joints based on the experimental results. The relaxation behaviors are due to both steel bolt and GFRP laminate. Steel bolt dominates the relaxed force immediately after initial loading but not reloading. The relaxation factors of GFRP laminate except matrix polymer could be both laminate surface geometry and laminate bond, considering the variance of relaxed force and more relaxed force for bonded laminate than single laminate observed in the experimental results. Boltzmann superposition principle can be hardly applicable to the relaxed forces for initial loading and reloading, suggesting that less relaxed force for reloading could be obtained by the strain hardening of bolt threads through the decrease of cross section area due to shear plastic deformation and that surface geometry could be modified by plastic and irreversible viscous deformation considering the viscoplastic property of matrix polymer. More relaxed force could be obtained for the surface geometry farther from the flat surface and the surface geometries could be categorized into the surface with either equal height protuberances or random height ones. Laminate bond dominates the relaxed force and its lower viscosity could give relaxed force more. The viscosity of laminate bond could be more variable than matrix polymer and increase through the modification of structure by plastic and irreversible viscous deformation. The minimum elapsed time could be required to complete the relaxation behavior for the flat surface and the bond viscosity as high as matrix polymer.

Key words : Relaxation, Steel bolt, GFRP laminate, Boltzmann superposition principle, Strain hardening, Surface geometry, Laminate bond, Viscosity

1 緒 言

ボルト接合は鋼構造物で多用されている接合方法であり、FRP 構造物においても有力な接合方法とされている。しかし、FRP は繊維と樹脂から構成される粘性材料であるため、ボルト軸力は経時的に低減する。そのため、ボルト軸力を摩擦力として利用する摩擦接合の場合には、その特性を十分に把握することが重要となる。ボルト軸力が接合強度に及ぼす影響は、支圧接合の破壊モードに依存する。破壊モードが圧壊の場合には、ボルト軸力を加えることでせん断破壊へと移行する場合がある。これは、圧壊に伴う面外破壊の抑制が大きな要因と考えられており、¹⁾面外破壊の抑制に伴うボルト軸力の増加は実験的にも確認されている。²⁾この場合には、ボルト軸力の経時的な低減が接合強度に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。一方、破壊モードがせん断破壊の場合には、面内破壊であることから面外破壊の抑制に伴うボルト軸力の増加はないと判断される。この場合には、ボルト軸

力の経時的な低減が接合強度に及ぼす影響は大きくなる。

FRP を構成する樹脂のリラクセーションに関する研究は、解析方法の確立や基本特性の把握が主な対象とされている。線形粘弾性材料の場合には、リラクセーションの解析方法は既に確立されており、基本特性が様々なモデルにより把握されている。しかし、樹脂は一般的に弾粘塑性材料と考えられており、リラクセーションの評価方法は未だに確立されていない状況にある。Plaseid et al.³⁾は、線形粘弾性モデルをビニルエステル樹脂のリラクセーションに援用し、試験結果と比較的良く一致するとの結果を得ている。Kitagawa et al.⁴⁾および Bordonaro et al.⁵⁾は、超過応力に基づく粘塑性の流動則をポリプロピレン樹脂やナイロン 6/6 の塑性領域でのリラクセーションに適用し、試験結果と比較的良く一致するとの結果を得ている。また、Krempel⁶⁾は、塑性領域でのリラクセーションの基本特性を整理している。

一方、FRP によるボルト接合のリラクセーションは、

[†] 原稿受理 平成 21 年 10 月 8 日 Received Oct. 8, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 (独)土木研究所 〒305-8516 つくば市南原, Public Works Res. Inst., Minamihara, Tsukuba, 305-8516

** エス・エフエンジニアリング(株) 〒231-0012 横浜市中区相生町, S. F. Eng. Co. Ltd., Naka-ku, Yokohama, 231-0012

*** 九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 〒819-0395 福岡市西区元岡, Dept of Civil Eng., Kyushu Univ., Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395

**** (独)土木研究所 〒305-8516 つくば市南原, Public Works Res. Inst., Minamihara, Tsukuba, 305-8516

これまでに様々な試験結果や FEM 解析事例が報告されている。Thoppul et al.⁷⁾は、CFRP 積層材を対象とした 30 時間程度の試験を行い、導入時のボルト軸力で正規化した低減量が、初期軸力の増加に伴って減少するとの結果を得ている。さらに、試験結果と FEM 解析とを比較し、適合度を向上させるには細部構造を考慮したモデル化が必要であるとした。Caccese et al.⁸⁾は、GFRP 積層材を対象とした 2000 時間の試験結果に基づき、ボルト軸力の低減量が応力分布や温湿度に依存すると共に、軸力の再導入が低減量の縮小に有効であるとした。しかし、これまでの研究は、リラクセーションの基本特性を調査するに止まっており、低減要因に関する詳細な検討は行われていない。本論文では、引抜成形 GFRP 積層材と鋼製添接板で構成されるボルト接合の軸力変化を 363 日間にわたって測定し、その低減要因を試験結果に基づいて把握する。

2 リラクセーション試験

2・1 GFRP 積層材

リラクセーション試験では、成形精度が高いとされる引抜成形 GFRP 積層材 (AGC マテックス(株)製造) を使用した。GFRP 積層材は、厚さ l_g の異なる L12 ($l_g = 12\text{mm}$), L16 ($l_g = 16\text{mm}$), L24 ($l_g = 24\text{mm}$), L32 ($l_g = 32\text{mm}$) の 4 種類である。この中で、L12 と L16 は単一の GFRP 積層材であるが、L24 は 2 枚の L12 を、L32 は 2 枚の L16 をマットイン接着で貼り合せている。GFRP 積層材は、ガラス繊維に E-glass、樹脂に耐候性の高いビスフェノール型ビニルエステル (エポキシアクリレート) 樹脂を用いており、積層構成は CSM (コンティニューアストランドマット) / Roving (ロービング) / CSM の 3 層構成である。また、マットイン接着は、接着部に挿入した CM (チョップドストランドマット) の積層にビニルエステル樹脂を含浸させた接着方法である。供試体の体積繊維含有率は、L12 および L16 が 56.5%, L24 および L32 が 54.75% である。構成層の繊維含有率は、L12 および L16 では、CSM が 10%, Roving が 90%, L24 および L32 では、CSM と CM の合計が 15%, Roving が 85% である。

2・2 試験方法

Fig. 1 は、本試験で対象としたボルト接合試験体の概要である。接合試験体は、鋼材 SS400 を添接板として GFRP 積層材の上下に配置し、上下の添接板を通して GFRP 積層材をボルトで締め付けたものである。ボルトは高力ボルト M20 (F10T)、ボルト孔径は $\phi 22.5$ であり、ボルトと添接板との間に鋼製ワッシャーを挟んでいる。Fig. 2 は、本試験で使用したボルト (東京測器研究所(株)製造) の概要であり、内蔵したひずみゲージが接着剤で充填されている。ひずみゲージは、接着剤のクリープひずみが測定値に及ぼす影響をできる限り回避するため、空孔最下部に設置している。Fig. 3 は、L12 ~ L32 を用いた接合試験体に対するひずみゲージの設置位置である。ボルト軸力の測定値は、ひずみゲージの測定値を事前に把握している荷重-ひずみ関係で変換した値とした。

本試験は、1) 接合試験体を治具に固定してボルト軸

Fig. 1 Geometry of GFRP bolted joints.

Fig. 2 Schematic description of bolt structure.⁹⁾

Fig. 3 Strain gage set-up in GFRP bolted joints.

力を導入、2) 接合試験体を治具から解放してボルト軸力の経時変化を測定、から構成される。ボルト軸力の測定は、1) 軸力の導入から 363 日間の測定 (Case A), 2) 軸力の導入から 183 日間の測定を行った後、初期軸力と一致するまで軸力を再導入し、再導入から 180 日間の測定 (Case B), の 2 ケースを対象とした。L12 ~ L32 の供試体数は、Case A および Case B に対して各々 2 体で、合計 16 体となる。ボルト軸力の導入はトルクレンチにより行い、導入速度は供試体や初期導入時と再導入時の別によらずほぼ一定とした。

2・3 試験結果

2・3・1 ボルト軸力の導入直後 Table 1 (a), (b) は、導入時のボルト軸力、測定開始時のボルト軸力、および、導入時から測定開始時までのボルト軸力の低減量を、初期導入直後と再導入直後の別に示したものである。これによると、ボルト軸力は導入から測定開始までの短時間の間に大きく低減し、再導入直後の低減量は初期導入直後の 1/7 ~ 1/4 である。これは、導入直後の低減量が、導入時の軸力だけでなく、導入軸力にも依存することを

Table 1 Clamping force immediately after initial loading and reloading in GFRP bolted joints.

(a) Initial loading				
Specimen	Case	Clamping force (kN)		
		Loaded	Sited	Relaxed
L12	A-1	198.7	186.1	12.6
	A-2	228.9	208.5	20.4
	B-1	191.4	174.6	16.8
	B-2	221.2	200.9	20.3
L16	A-1	193.2	174.6	18.6
	A-2	192.3	174.6	17.7
	B-1	189.1	170.7	18.4
	B-2	183.2	166.6	16.6
L24	A-1	174.2	158.2	16.0
	A-2	176.2	161.0	15.2
	B-1	190.8	172.1	18.7
	B-2	179.9	164.6	15.3
L32	A-1	203.3	185.8	17.5
	A-2	195.8	181.2	14.6
	B-1	202.0	184.1	17.9
	B-2	204.0	187.4	16.6

(b) Reloading				
Specimen	Case	Clamping force (kN)		
		Loaded	Sited	Relaxed
L12	B-1	195.7	193.4	2.3
	B-2	224.8	222.0	2.8
L16	B-1	189.4	185.4	4.0
	B-2	188.6	185.6	3.0
L24	B-1	198.2	193.3	4.9
	B-2	184.4	180.7	3.7
L32	B-1	203.4	199.7	3.7
	B-2	205.8	202.3	3.5

示唆している。導入から測定開始までの時間は、初期導入時で5～60分、再導入時で5～30分と供試体により異なるが、これが導入直後の低減量に及ぼす影響は比較的軽微と考えられる。また、単一材であるL12, L16とマットイン接着材であるL24, L32を比較すると、マットイン接着の影響は、初期導入直後では軽微であるが、再導入直後では比較的大きい。

2・3・2 ボルト軸力の計測開始後 Fig. 4 (a), (b)は、ボルト軸力の経時的な低減量をCase AとCase Bの別に示したものである。ボルト軸力は、初期導入時や再導入時のボルト軸力で正規化している。

Fig. 4 (a), (b)によると、初期導入後のボルト軸力は、一定値に収束する傾向が見られる。単一材の低減量は材厚と共に増大する傾向にあるが、マットイン接着材の低減量は、単一材より大きいものの、材厚との関係が不明確である。また、低減量は供試体による相違が見られ、L12やL24では大きく現れる場合がある。

再導入後のボルト軸力は、初期導入後と同様に一定値に収束する傾向にあるが、低減量が初期導入後に比べて大きく縮小している。これは、導入後の低減量が、導入直後の低減量と同様に、導入時の軸力だけでなく、導入軸力にも依存することを示唆している。

3 ボルト軸力の低減要因

3・1 鋼製ボルト

リラクセーションは、材料の粘性に伴って生じる超過応力が経時的に低減する現象である。Table 1 (a), (b)を比較すると、初期導入直後の低減量は供試体による相違

(a) Case A

(b) Case B

Fig. 4 Relaxation behavior of normalized clamping force in GFRP bolted joints.

がほとんど見られないが、再導入直後の低減量は供試体により異なっていることが確認される。したがって、初期導入直後の低減量はボルトが支配し、再導入直後の低減量は、ボルトではなく、GFRP積層材が支配したと判断される。これは、ボルトの超過応力が再導入時に大きく減少したことを示唆している。

鋼材の超過応力は、線形弾性に従う領域ではほぼ0となるが、塑性領域ではひずみ速度と共に増加すると考えられている。ボルトの引張強度は900MPa以上とされており、導入時のボルト応力を上回っている。一方、ボルトのねじ山は、ナットのねじ山より強度が低く、断面積が先端ほど縮小することから、せん断塑性変形が生じやすいと考えられる。その結果、ボルトの超過応力は、鋼材のせん断強度が引張強度より低いことを考慮すると、ねじ山のせん断塑性変形により生じたと判断される。また、再導入時の超過応力は、ねじ山の断面積がせん断塑性変形に伴って縮小する場合には、ひずみ硬化によりほぼ0になると考えられる。

3・2 GFRP積層材の表面

Fig. 4 (a), (b)によると、ボルト軸力の低減量は、供試体により異なっており、供試体固有の属性に依存すると考えられる。Fig. 5 (a), (b)は、GFRP積層材と鋼製添接板の代表的な表面形状を示したものである。Fig. 5 (a)は、GFRPと添接板の表面が平面である場合、Fig. 5 (b)は、GFRPの表面が凹凸、添接板の表面が平面である場合を

示している。GFRP 積層材と鋼製添接板の表面形状は、GFRP の成形精度が鋼材より低いことを考慮すると、Fig. 5 (a) よりも Fig. 5 (b) に近似する。また、GFRP 積層材の表面は、供試体により形状が異なると考えられるため、一定の導入速度に対する断面ひずみ速度が供試体により変化する。その結果、GFRP 積層材の表面は、ビニルエステル樹脂の超過応力がひずみ速度に依存することを考慮すると、ボルト軸力の低減要因であると判断される。

3・3 GFRP 積層材の材厚

導入速度を一定とした場合には、GFRP 積層材の断面ひずみ速度は材厚の減少と共に増加する。また、ビニルエステル樹脂の超過応力は、一定ひずみに対してはひずみ速度と共に増加し、一定応力に対してはひずみ速度と共に増加する傾向にある。³⁾ その結果、ボルト軸力の低減量は、断面の超過荷重を平均した値であることを考慮すると、材厚の減少と共に増大すると考えられる。

一方、ボルト軸力は集中载荷されるため、GFRP 積層材の応力分布は材厚に依存すると考えられる。表面中央に集中荷重が载荷された長方形等弾性板の場合には、断面中央の応力は、材厚の減少と共に周縁部に対して相対的に増加する。接合試験体は、等方性材料の鋼材と異方性材料の GFRP 積層材から構成されるが、応力の断面分布は等方性材料と同様の形状になると考えられる。その結果、ボルト軸力の低減量は、集中载荷を仮定すると、材厚の減少と共に増大すると考えられる。

Fig. 4 (a), (b) によると、単一材の低減量は材厚と共に増大しており、材厚の減少と共に増大するとした考察と一致しない。さらに、低減量は、材厚よりも供試体による相違が大きく見られる場合があり、表面の影響を大きく受けていると推察される。一定の導入速度に対する断面ひずみ速度は、断面積が表面で縮小することを考慮すると、表面が本体を大きく上回ると考えられる。したがって、単一材の低減量は、GFRP 積層材の材厚ではなく、表面が支配したと判断される。

3・4 マットイン接着

Fig. 4 (a), (b) によると、マットイン接着材の低減量は単一材を上回っている。一定の導入速度に対する表面の断面ひずみ速度は、単一材とマットイン接着材の表面が

ほぼ同等であり、マットイン接着による影響が無視できる場合には、両者の間に大きな相違が生じないと考えられる。その結果、マットイン接着は、断面の超過荷重が表面よりも大きいと考えられ、ボルト軸力の低減要因であると判断される。

マットイン接着は、ビニルエステル樹脂の特性が反映されると推察されるため、マトリックス樹脂よりも断面ひずみ速度が大きく、力学的に脆弱な構造であると考えられる。これは、マットイン接着の粘性がマトリックス樹脂よりも低くなることを示唆している。その結果、一定の導入速度に対する表面の断面ひずみ速度は、マットイン接着材が単一材より小さくなる。したがって、マットイン接着材の低減量は、単一材を上回っていることを考慮すると、GFRP 積層材の表面ではなく、マットイン接着が支配したと判断される。

4 GFRP 積層材の要因

4・1 Boltzmann の重ね合わせ原理

Boltzmann の重ね合わせ原理は、一般に線形粘弾性材料で成立し、瞬時ひずみによる低減量がひずみ履歴に無関係であることを前提としている。¹⁰⁾ この場合には、導入応力で正規化した初期導入時と再導入時の超過応力は、導入開始から終了までの低減量が軽微であることを考慮すると、導入速度や導入時の応力が一定の条件では、両者がほぼ一致すると判断される。Fig. 6 (a) は、導入軸力で正規化した再導入後のボルト軸力 $f_r(t)$ と初期導入後のボルト軸力 $f_i(t)$ との差を示したものである。これによると、 $f_r(t)$ と $f_i(t)$ との差は、供試体によらず経時的に 0 から乖離しており、Boltzmann の重ね合わせ原理を満足していないことが確認される。

一方、 $f_r(t)$ と $f_i(t)$ との差は、供試体によらず導入直後では正值となる。その結果、初期導入直後の低減量を支配するボルトの超過応力は、ねじ山のひずみ硬化により再導入時にほぼ 0 になったと判断される。また、GFRP 積層材の表面形状は、 $f_r(t)$ と $f_i(t)$ との差が供試体により異なることから、ビニルエステル樹脂を線形粘弾性材料と仮定した場合には、初期導入後の非可逆的な粘性変形により、形状が変化すると考えられる。

ビニルエステル樹脂は、超過応力がひずみ履歴に依存し、粘性がひずみ速度の増加と共に減少すると考えられる。³⁾ この場合には、ビニルエステル樹脂を粘塑性材料と仮定すると、導入応力で正規化した初期導入時と再導入時の超過応力は、導入速度や導入時の応力が一定の条件では、再導入時が初期導入時を上回ると考えられる。⁶⁾ これは、ボルトの超過応力が再導入時にほぼ 0 になることを考慮すると、Fig. 6 (a) の結果と整合しており、GFRP 積層材が粘塑性材料であることを示唆している。その結果、GFRP 積層材の表面は、再導入時の塑性変形や初期導入後の非可逆的な粘性変形により、形状が変化すると考えられる。

4・2 単一材の低減特性

Fig. 4 (a), (b) によると、初期導入後や再導入後の低減量は L16 が L12 を上回っている。断面の超過荷重を平均した値である低減量は、導入速度や導入時のボルト軸

Fig. 5 Representative surface geometries of GFRP laminate and steel attached plate.

(a) Time evolution

(b) Maximum and minimum value

Fig. 6 Difference of clamping force normalized by loading force between initial loading and reloading.

力が一定の条件では、超過応力がひずみ速度と共に増加することを考慮すると、断面積の縮小に伴って増大すると考えられる。その結果、表面の断面積が単調に変化すると仮定できる場合には、低減量は表面が平面から乖離するほど増大すると判断される。この場合には、表面先端の断面積は L16 が L12 を下回ると推察される。

Fig. 6 (b)は、 $f_c(t)$ と $f_l(t)$ との差を、特異と考えられる 70 日後のデータを除外して、最大値と最小値の別に示したものである。これによると、最大値や最小値は L12 が L16 を上回っている。導入応力で正規化したビニルエステル樹脂の超過応力は、塑性領域で再導入時が初期導入時を大きく上回る。したがって、L12 と L16 の表面形状は、ボルトの超過応力が再導入時にほぼ 0 になることも考慮すると、初期導入時と再導入時ではほぼ同等であると考えられる。

想定可能な表面形状は、高さが均一な Fig. 7 (a) と高さがランダムな Fig. 7 (b) に大別される。Fig. 7 (a)は、表面先端で断面積が比較的大きく、平面に近似した形状である。Fig. 7 (b)は、表面先端で断面積が比較的小さく、平面から乖離した形状である。Fig. 7 (a) と Fig. 7 (b) との相対的な関係は、再導入時の塑性変形や初期導入後の非可逆的な粘性変形が生じた後も変化しないと考えられ、表面形状に関する考察と整合することが確認される。

導入直後の低減速度は、断面の超過荷重をひずみ速度

Fig. 7 Typical surface geometries of GFRP laminate.

の増加と共に減少する粘性で除した値の平均であり、低減量と共に増加する。この場合には、低減速度や低減量は導入後の時間経過と共に減少すると考えられる。したがって、リラクセーションの収束時間は、低減量と共に増加すると考えられ、表面の断面積が単調に変化する場合には、表面が平面に近似するほど縮小し、平面の場合に最小になると判断される。

4・3 マットイン接着材の低減特性

Fig. 4 (a), (b)によると、初期導入後の低減量は供試体により異なっている。マットイン接着は、初期導入後の低減量を支配し、成形精度がマトリックス樹脂より低いと考えられることから、構造や粘性が供試体により異なっていると判断される。一方、Fig. 6 (b)によると、最大値や最小値は L24 と L32 の間で顕著な相違が認められない。これは、単一材の最大値や最小値が表面形状により大きく異なることを考慮すると、初期導入後と再導入後の別によらず、マットイン接着が低減量を支配したことを示唆している。また、マットイン接着は、ビニルエステル樹脂の特性が反映されると推察されるため、粘性の減少と共に超過応力が増加すると考えられる。したがって、低減量は、マットイン接着の粘性が減少すると共に増大すると判断される。

Fig. 4 (b)によると、L32 の低減量は、初期導入後では供試体によらずほぼ一致するが、再導入後では供試体により異なっている。これは、表面の超過応力が再導入時に増加したことを示唆しており、表面形状が初期導入時と再導入時ではほぼ同等である場合には、マットイン接着の粘性が再導入時に増加することを示している。さらに、Fig. 6 (b)によると、最大値や最小値は L12 に近似するが、L16 とは乖離している。これは、導入軸力で正規化した超過応力の増加が、表面先端で粘性の低い L16 より小さく、マットイン接着の粘性が再導入時に増加した可能性を示唆している。したがって、マットイン接着は、再導入時の粘性が初期導入時より高く、再導入時の塑性変形や初期導入後の非可逆的な粘性変形により、構造が改善したと判断される。

リラクセーションの収束時間は、マットイン接着の粘性が低減量を支配することを考慮すると、表面が平面であり、マットイン接着の粘性がマトリックス樹脂と一致する場合に最小になると考えられる。

5 結 言

引抜成形 GFRP 積層材と銅製添接板で構成されたボルト接合のリラクセーション試験を実施した結果、下記の結論が得られた。

(1) 初期導入直後の低減量はボルトが支配するが、再導入直後の低減量は GFRP 積層材が支配すると判断された。また、導入後の低減量は、単一材では GFRP 積層材の表面が支配し、マットイン接着材ではマットイン接着が支配すると判断された。

(2) ボルトの超過応力は、ねじ山のせん断塑性変形により生じ、断面積の縮小に伴うひずみ硬化により、再導入時にほぼ 0 になると判断された。また、GFRP 積層材の表面は、再導入時の塑性変形や初期導入後の非可逆的な粘性変形により、形状が変化すると考えられた。

(3) 単一材の低減量は、表面が平面から乖離するほど増大すると判断された。また、表面形状は初期導入時と再導入時でほぼ同等となり、高さが均一な表面と高さがランダムな表面に大別できると考えられた。

(4) マットイン接着材の低減量は、マットイン接着の粘性が低いほど増大すると判断された。また、マットイン接着は、再導入時の粘性が初期導入時より高く、再導入時の塑性変形や初期導入後の非可逆的な粘性変形により、構造が改善すると判断された。

(5) リラクセーションの収束時間は、表面が平面であり、マットイン接着の粘性がマトリックス樹脂と一致する場合に最小になると考えられた。

参 考 文 献

- 1) T. Kishima, "Effect of clamping force on the strength of bolted joints in pultruded GFRP laminates", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.56, No.11, pp.529-547 (2007).
- 2) H. -T. Sun, F. -K. Chang and X. Qing, "The response of composite joints with bolt-clamping loads, Part II : Model verification", *Journal of Composite Materials*, Vol.36, No.1, pp.69-92 (2002).
- 3) A. Plaseid and A. Fatemi, "Deformation response and constitutive modeling of vinyl ester polymer including strain rate and temperature effects", *Journal of Materials Science*, Vol.43, pp.1191-1199 (2008).
- 4) M. Kitagawa, T. Mori and T. Matsutani, "Rate-dependent nonlinear constitutive equation of polypropylene", *Journal of Polymer Science : Part B*, Vol.27, pp.85-95 (1989).
- 5) C. M. Bordonaro and E. Krempl, "The effect of strain rate on the deformation and relaxation behavior of Nylon 6/6 at room temperature", *Polymer Engineering and Science*, Vol.32, pp.1066-1072 (1992).
- 6) E. Krempl, "Relaxation behavior and modeling", *International Journal of Plasticity*, Vol.17, pp.1419-1436 (2001).
- 7) S.D.Thoppul, R.F.Gibson and R. A. Ibrahim, "Phenomenological modeling and numerical simulation of relaxation in bolted composite joints", *Journal of Composite Materials*, Vol.42, No.17, pp.1709-1729 (2008).
- 8) V. Caccese, K. A. Berube, M. Fernandez, J. D. Melo and J. P. Kabche, "Influence of stress relaxation on clamp-up force in hybrid composite-to-metal bolted joints", *Composite Structures*, Vol.89, pp.285-293 (2009).
- 9) <http://www.tokyosokki.co.jp/>
- 10) I. M. Ward and J. Sweeney, "The mechanical properties of solid polymers", pp.59-70 (2004) John Wiley & Sons.