

アルミニウム合金土木構造物への 鋼製高力ボルト摩擦接合の適用

萩澤 亘保¹, 大倉一郎²

¹正会員 日本軽金属株式会社 グループ技術センター (〒421-3291 静岡県清水区蒲原 1-34-1)

²正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

要旨

アルミニウム合金板を鋼製高力ボルトで締結する摩擦接合継手には、アルミニウム合金の強度、ヤング係数および線膨張係数が鋼のそれらと異なることにより生じる問題点がある。それらの問題点とは、アルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数、アルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの軸力低下、温度による鋼製高力ボルトの軸力変化、および鋼製高力ボルト締結によるアルミニウム合金板表面の変形である。これらを解明するための試験から次の結果を得た。アルミニウム合金板摩擦接合継手の、母材と接する添接板の面に所定のブラスト処理を行うことにより 0.45 以上のすべり係数が得られる。継手の板に 0.2%耐力が高い A6061-T6 アルミニウム合金を用いることによって、鋼板の場合と同じ条件で F10T 鋼製高力ボルトを施工することができる。

キーワード：アルミニウム合金、摩擦接合継手、鋼製高力ボルト、すべり係数、軸力低下

1. はじめに

アルミニウム床版やアルミニウム桁などの大型アルミニウム構造物の製作においては、工場では摩擦攪拌接合と MIG 溶接が用いられ、現場では鋼製高力ボルトによる摩擦接合が用いられる¹⁾。鋼製高力ボルトで締結された摩擦接合継手において、被締結材としてアルミニウム合金板が用いられた場合に考慮しなければならない問題として、次が挙げられる。

- (1) 大きな軸力を板厚方向に受けるアルミニウム合金板に対して要求される機械的性質
- (2) 摩擦面のすべり係数
- (3) アルミニウム合金板のクリープによる鋼製高力ボルトの軸力低下
- (4) 鋼とアルミニウム合金の線膨張係数 (鋼の線膨張係数 $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, アルミニウム合金の線膨張係数 $23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) が異なることに起因する、温度変化による鋼製高力ボルトの軸力変化
- (5) アルミニウム合金板と鋼製高力ボルトとの異種金属接触腐食

これらの問題に対して、アルミニウム構造に関する国内外の設計基準^{2)~5)}の比較を表-1に示す。この表から、各項目において、規定内容が設計基準間で異なっていることが分かる。

わが国では、アルミニウム合金板摩擦接合継手の締結材に鋼製高力ボルトが使用される場合、異種金属接触腐食を防ぐために溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトが使用される²⁾³⁾。一般に使用される摩擦接合用鋼製高力ボルトは F10T である。F10T は熱処理により、その強度が得られ、焼き戻し温度は約 430°C である。溶融亜鉛めっきは約 500°C で実施されるので、熱影響により F10T の強度が保証されない場合があるため、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトには F8T 相当の軸力が導入される。

表-1 鋼製高力ボルトによるアルミニウム合金板摩擦接合継手に対するアルミニウム構造設計基準の比較

比較項目	アルミニウム合金 土木構造物設計・ 製作指針案 ²⁾	アルミニウム建築構造設 計規準・同解説 ³⁾	AA ⁴⁾	Eurocode 9 ⁵⁾
(1) アルミニウム 合金板に必要な機 械的性質	規定なし	規定なし	アルミニウム合金板 の 0.2% 耐力が 105MPa 以上あること	アルミニウム合金板 の 0.2% 耐力が 200MPa 以上あること
(2) すべり係数	0.2	規定された摩擦面処理 ⁶⁾ が施され、添接板の総厚 または母材の板厚のうち の小さい方の厚さがボルト 呼び径の 1/4 以上の場 合 0.45 無処理の場合 0.15	中心線平均粗さ R_a ⁷⁾ が $50\mu\text{m}$ 以上の摩擦 面処理が施された場 合 0.5 上記以外の場合、 RCSC 基準 ⁸⁾ に規定さ れる試験法に基づい て決める	中心線平均粗さ R_a ⁷⁾ が $12.5\mu\text{m}$ の摩擦面 処理が施された場合、 板厚の総和が厚くな るに従って 0.27 から 0.40 まで増加させる
(3) 鋼製高力ボルト の軸力低下	規定なし	設計すべり耐力に対して 1.25 倍以上のすべり耐力 があることをすべり耐力 試験で確認しなければな らない ⁶⁾	これらを考慮しなけれ ばならないとの記述は あるが、具体的な規定 なし	これらを考慮しなけれ ばならないとの記述は あるが、具体的な規定 なし
(4) 温度による鋼 製高力ボルトの軸 力変化	規定なし			
(5) 鋼製高力ボルト の防食	溶融亜鉛めっき	溶融亜鉛めっき	溶融亜鉛めっき 亜鉛コート	亜鉛コート

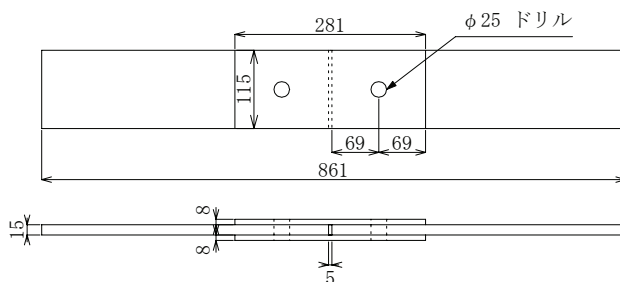


図-1 試験体

近年、表面にフッ素樹脂皮膜が焼き付けられた鋼製高力ボルトが開発されている⁹⁾。このボルトは耐食性に優れ、フッ素樹脂皮膜によってアルミニウム合金板と鋼製高力ボルトが電氣的に絶縁されるので、両者間の異種金属接触腐食を防ぐことができる。フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトは強度区分がF10Tであり、これをアルミニウム合金板摩擦接合継手に用いることにより、ボルト本数を減らすことができる。

このような背景の下に、本研究では、鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数の測定を行う。次に、アルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの軸力低下と経過時間の関係、鋼製高力ボルトの軸力変化と温度変化の関係、鋼製高力ボルトの初期導入軸力とアルミニウム合金板の表面の変形特性の関係を明らかにする。

2. すべり試験

(1) 試験体

すべり試験に用いた試験体を図-1 に示す。試験体は、厚さ 15mmの母材の両面が厚さ 8mmの添接板で連結された 2 面摩擦接合継手である。直径 25mmのドリル孔を開け、M22 の鋼製高力ボルトで締結した試験体を 5 体用意した。母材と添接板のアルミニウム合金材は A6061P-T6 であり、その化学成分と機械的性質をそれぞれ表-2 と表-3 に示す。

表-2 母材と添接板の化学成分（ミルシート記載値）

板	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)
母材	0.61	0.42	0.28	0.02	0.99	0.11	0.01	0.03
添接板	0.59	0.41	0.27	0.04	0.98	0.23	0.03	0.04
JIS 規格値	0.40~0.8	0.7 以下	0.15~ 0.40	0.15 以下	0.8~1.2	0.04~ 0.35	0.25 以下	0.15 以下

表-3 母材と添接板の機械的性質

板	板厚 (mm)	参 照	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)
母材	15	ミルシート	319	289	22
		JIS 規格値	295 以上	245 以上	9 以上
添接板	8	ミルシート	325	290	17
		JIS 規格値	295 以上	245 以上	10 以上

表-4 添接板のブラスト条件

ブラスト材	アルミナグリット F60
空気圧力	0.4 MPa
使用ノズル	内径 9 mm
吹付距離	150 mm
吹付角度	75 度
吹付時間	120 秒 / (281×115)mm ² = 3.71×10 ⁻³ 秒/mm ²

表-5 添接板の表面粗さ (Rz)

試験体	ボルト頭側	ナット側
1	45.8	43.0
2	37.7	48.5
3	36.6	40.5
4	46.7	33.6
5	31.4	36.7

アルミニウム建築構造製作要領⁶⁾においては、添接板として使用する際の摩擦面の表面処理方法として、摩擦接合継手において 1 つのせん断面の相対する両方の摩擦面、または一方の摩擦面をブラスト処理により表面粗さを Rz 20μm 以上の粗面とすることが標準とされ、このとき、すべり係数は 0.45 と規定されている。そこで、添接板の摩擦面を表-4 に示すブラスト条件で処理した。母材の摩擦面にはブラスト処理が施されていない。各試験体のボルト頭側の添接板とナット側の添接板の表面粗さを表-5 に示す。同表の表面粗さは、各面任意の 3 箇所での測定値の平均値である。各試験体の添接板の表面粗さは Rz 20μm 以上ある。ここで、Rz は十点平均粗さである⁷⁾。

1 章に述べたように、アルミニウム合金板摩擦接合継手には溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトが使用されることを考慮して、M22 (F10T) の鋼製高力ボルトに、道路橋示方書¹⁰⁾で規定される F8T の設計ボルト軸力 165kN の 10%増し、すなわち 181.5 kN を導入することを目標とした。

試験体のボルト締結を行う前に、高力ボルト施工マニュアル¹¹⁾に従って所定の軸力とトルクの関係を求めるキャリブレーションを行い、次式によってトルク係数を算出した。

$$K = \frac{T}{dN_0} \quad (1)$$

ここに、 K : トルク係数

T : トルク

d : ボルトの呼び径

N_0 : 初期導入軸力

キャリブレーションは、5 本のボルトに対して行った。測定結果および算出されたトルク係数を表-6 に示す。同表のトルク係数の平均値 0.122 とボルトの呼び径 22mm を式(1)に代入し、初期導入軸力とトルクの関係が次式で与えられる。

$$N_0 = 0.373T \quad (2)$$

ここで、 N_0 と T の単位は、それぞれ kN、N・m である。

図-1 の試験体のボルト締結の際、式(2)に従って、初期導入軸力 181.5kN を目標値としてトルクを与えた。

表-6 トルク係数

試行	N_0 (kN)	T (N・m)	K
1	179	470	0.119
2	178	480	0.123
3	180	495	0.125
4	179	500	0.127
5	178	460	0.117
平均値			0.122

表-7 すべり係数

試験体	T (N・m)		N_0 (kN)	P (kN)	μ
	左ボルト	右ボルト			
1	465	480	173.4	221	0.637
2	490	470	175.3	221	0.630
3	470	470	175.3	213	0.608
4	490	480	179.0	215	0.601
5	500	500	186.5	203	0.544

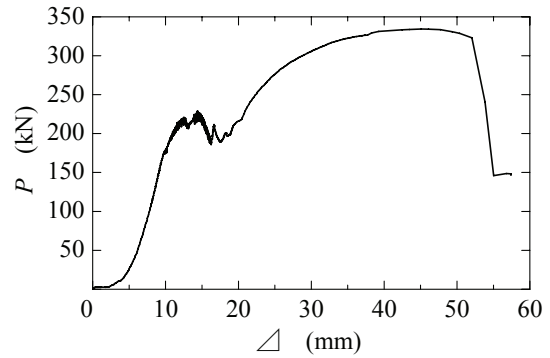


図-2 荷重と変位の関係 [試験体 1]

(2) 引張試験

図-1の試験体の引張試験で得られた荷重 P と変位 Δ の関係の一例を図-2に示す。変位 Δ は、万能試験機のクロスヘッド間の変位である。図-2において、荷重が最初に下がった時にすべりが発生したと考えられるので、すべり荷重 P として、最初の極大点の荷重を採用した。各試験体の締付けトルク T 、初期導入軸力 N_0 、すべり荷重 P を表-7に示す。初期導入軸力 N_0 は、2つのボルト締付けトルクのうち低い方に対して、式(2)を用いて計算した。すべり係数は次式で算出される。

$$\mu = \frac{P}{2N_0} \quad (3)$$

ここに、 μ ：すべり係数

表-7に示す各試験体のすべり係数 μ の値は、0.45を十分に上回っていることがわかる。したがって表-4に記載の条件でブラスト処理された添接板の表面粗さは Rz が $20\mu\text{m}$ 以上あり、この添接板が用いられた摩擦接合継手は0.45を十分に超えるすべり係数が確保されている。

表-1に示す各設計基準のすべり係数に対する表面粗さは、Eurocode 9⁵⁾、アルミニウム建築構造設計規準・同解説³⁾、AA⁴⁾の順で大きくなり、これに従ってすべり係数の規定値も大きくなる。本研究の試験体の表面粗さは、表-5に示すように、 $Rz31.4\sim 48.5\mu\text{m}$ で、AAの平均粗さ $Ra50\mu\text{m}$ より小さいが、すべり係数は0.544~0.637であり、AAの規定値0.5より大きい。各設計基準のすべり係数の規定値が、そのばらつきを考慮して低めに設定されていることを考えるならば、設計基準間のすべり係数の違いは表面粗さの違いによるものと考えられる。

3. アルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの軸力低下

(1) 試験体

図-3に示すように、3枚で1組のアルミニウム合金板を重ね、それらに直径24.5mmのドリル孔を開け、M22の鋼製高力ボルトで締結した。板厚15mmの中央の板は母材を想定し、板厚8mmの両側の2枚の板は添接板を想定している。本章以降、板厚15mmの中央の板を母材、板厚8mmの板を添接板と呼ぶ。試験体は6体製作した。試験体1~3のA5083P-Oおよび試験体4~6のA6061P-T6の母材と添接板の引張試験結果を表-8、応力-ひずみ曲線を図-4に示す。ここで、アルミニウム合金名に記されたPは圧延板であることを示す。

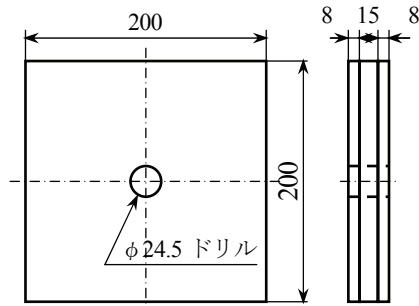


図-3 試験体

表-8 アルミニウム合金板の機械的性質 (3本の引張試験片の平均値)

試験体	アルミニウム合金	板厚 (mm)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
1~3	A5083P-O	8	309	146	23.6	72.7	0.31
		15	309	160	22.4	72.7	0.34
4~6	A6061P-T6	8	329	311	16.4	70.7	0.32
		15	324	310	14.9	71.6	0.32

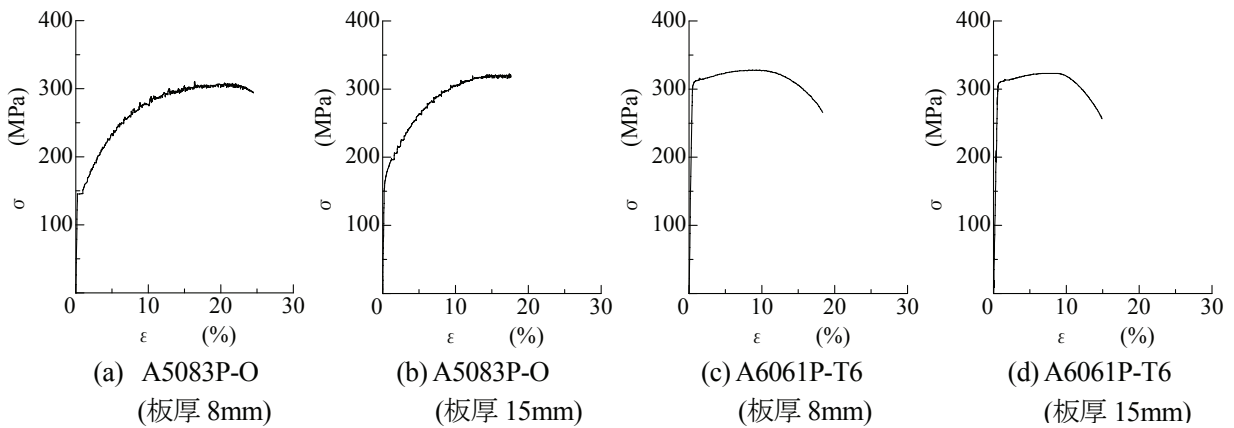


図-4 アルミニウム合金板の応力-ひずみ曲線

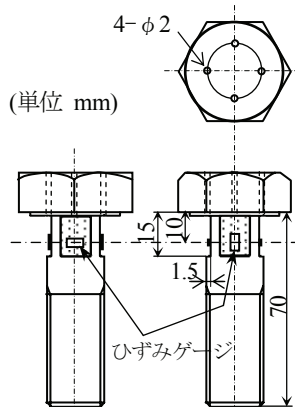


図-5 ボルト軸力計

2枚の添接板の、母材に接する面に対して、アルミニウム建築構造製作要領⁶⁾に従って表-4に示すブラスト処理を施した。ブラスト後の添接板の表面粗さはRz 31.3~47.4 μ mであった。母材の表面にはブラスト処理を施していない。ボルト軸力の測定には、ひずみゲージ専門メーカーから購入した、図-5に示すボ

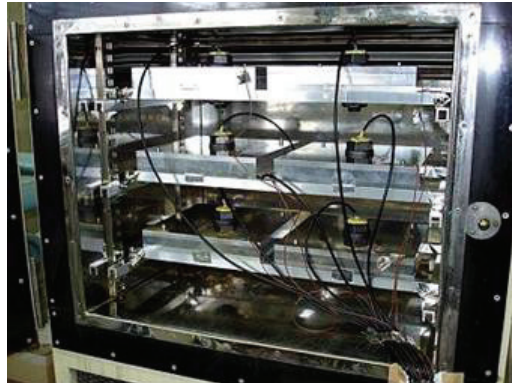


図-6 試験体が置かれた恒温槽

ルト軸力計を用いた。ボルト軸力計の呼びは M22 で、機械的性質による等級は F10T である。図-5 に示すように、ボルト軸力計には、軸方向に 2 枚、その直角方向に 2 枚、合計 4 枚のゲージ長 2mm のひずみゲージが貼付されており、使用環境温度は 0～50℃である。使用したナットの機械的性質による等級は F10 で M22、使用した座金の機械的性質による等級は F35 で、外径 44mm、内径 23mm、板厚 6mm である。

室温 25℃の状態、図-3 の試験体を鋼製高力ボルトで締付けた直後から鋼製高力ボルトの軸力測定を開始すると同時に、図-6 に示す恒温槽に試験体を入れ、各試験体のアルミニウム合金板の表面に設置された熱電対により計測された温度が 23℃～26℃になるように恒温槽の温度を制御した。

鋼製高力ボルトに導入した初期軸力は、試験体1と4に、道路橋示方書¹⁰⁾で規定されるF8Tの設計ボルト軸力165kNの10%増しの181.5 kN、試験体3と6に、F10Tの設計ボルト軸力205kNの10%増しの225.5 kN、および試験体2と5に、F8TとF10Tに対する初期導入軸力の平均値の203.5 kNである。これらの初期導入軸力の識別を容易にするために、181.5 kN、203.5 kNおよび225.5 kNの初期導入軸力をそれぞれF8T、F9T、F10Tと呼ぶ。

鋼製高力ボルトの軸力測定を393日間にわたって行った。試験途中、試験開始70日後と321日後の2回、恒温槽の温度を0℃から50℃の範囲で変化させて鋼製高力ボルトの軸力を測定した。

(2) 鋼製高力ボルトの軸力低下

a) 測定結果

鋼製高力ボルト締結後の軸力 N の測定結果を図-7 に示す。同図の推定式については次項で述べる。軸力 N を初期導入軸力 N_0 で除した軸力残存率 N / N_0 を図-8 に示す。各図の横軸 t は、日を単位とする鋼製高力ボルト締結後の経過時間である。さらに、鋼製高力ボルト締結後 0, 1, 10, 100, 200, 300 および 393 日後の鋼製高力ボルト軸力残存率を表-9 に示す。0 日に対する値は初期導入軸力であり、393 日は試験終了日である。

図-8(a) に示す A5083P-O の F9T および図-8(b) に示す A6061P-T6 の F10T の軸力残存率が、前者では第 1 回目の温度変化試験後、後者では第 1 回目と第 2 回目の温度変化試験後に不安定な挙動を示している。この原因については不明である。両者に対して、次項で与える表-12 に示す鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式から得られる関係を破線で示している。

同様に、表-9 の A5083P-O の F9T と A6061P-T6 の F10T に対しては、100 日以降の軸力残存率として、表-11 に示す鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式が与える値を記載している。これらの 2 ケースに対して推定式を用いることの妥当性については次項で述べる。

図-7 と 8 が示すように、鋼製高力ボルトの軸力 N および軸力残存率 N / N_0 は、ボルト締結直後、急激に低下し、その後は非常に穏やかに低下する。鋼製高力ボルトの軸力残存率は、表-9 に示すように、ボルト締結 393 日後、A5083P-O においては 0.925～0.956、A6061P-T6 においては 0.960～0.968 であり、A5083P-O の軸力残存率の低下が A6061P-T6 のそれより大きい。そして A5083P-O においては、初期導入軸力が大きくなるに従って軸力残存率の低下が大きくなるが、A6061P-T6 においては、軸力残存率が初期導

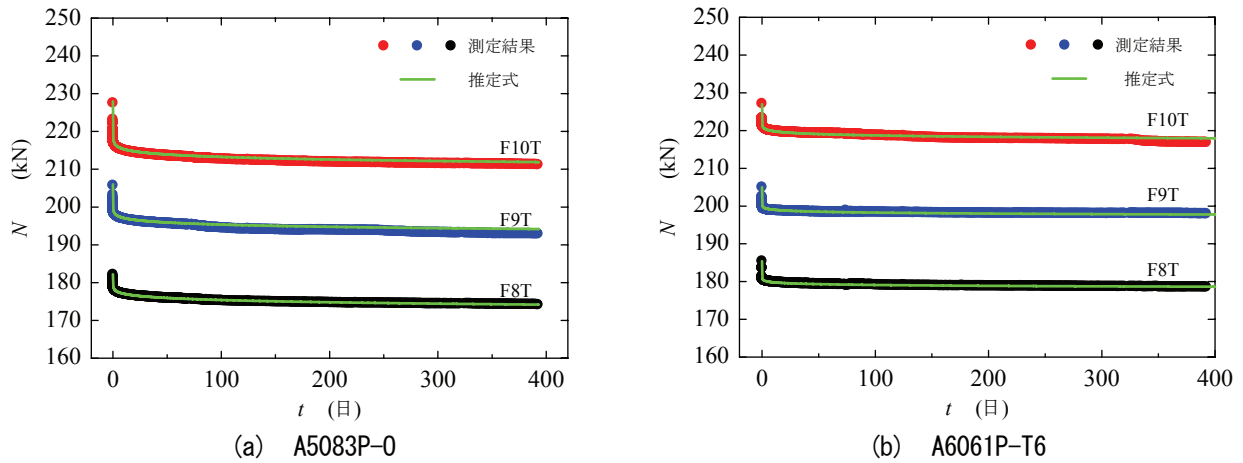


図-7 鋼製高力ボルトの軸力 N の変化

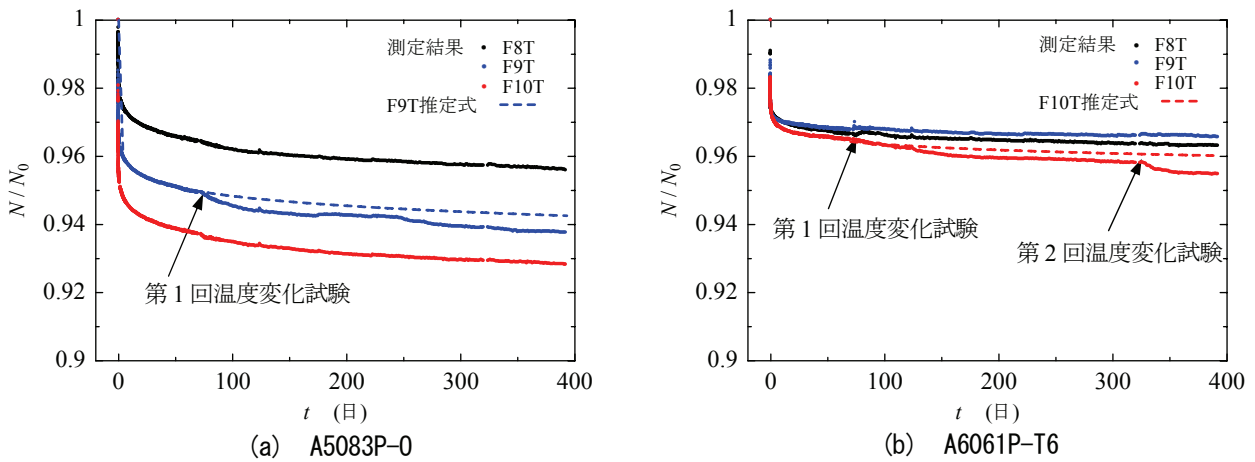


図-8 鋼製高力ボルトの軸力残存率 N/N_0 の変化

表-9 鋼製高力ボルトの軸力残存率

日数	A5083P-O			A6061P-T6		
	試験体 1	試験体 2	試験体 3	試験体 4	試験体 5	試験体 6
	F8T	F9T	F10T	F8T	F9T	F10T
0	1	1	1	1	1	1
1	0.978	0.961	0.952	0.978	0.970	0.974
10	0.973	0.956	0.943	0.973	0.970	0.969
100	0.962	0.947*	0.934	0.968	0.970	0.960*
200	0.962	0.947*	0.930	0.968	0.966	0.960*
300	0.956	0.942*	0.930	0.968	0.966	0.960*
393	0.956	0.942*	0.925	0.968	0.966	0.960*

* : 表-12 の鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式が与える値

入軸力の大きさに依存する度合いが小さい。A5083P-Oにおいて、初期導入軸力が大きくなるに従って軸力残存率の低下が大きくなる原因は、5章で述べるように、初期導入軸力が大きくなるに従って深くなるへこみが添接板に生じるからである。

b) 鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式

図-7に示す鋼製高力ボルトの軸力残存率と経過時間の傾向から、両者に対して次式を仮定する。

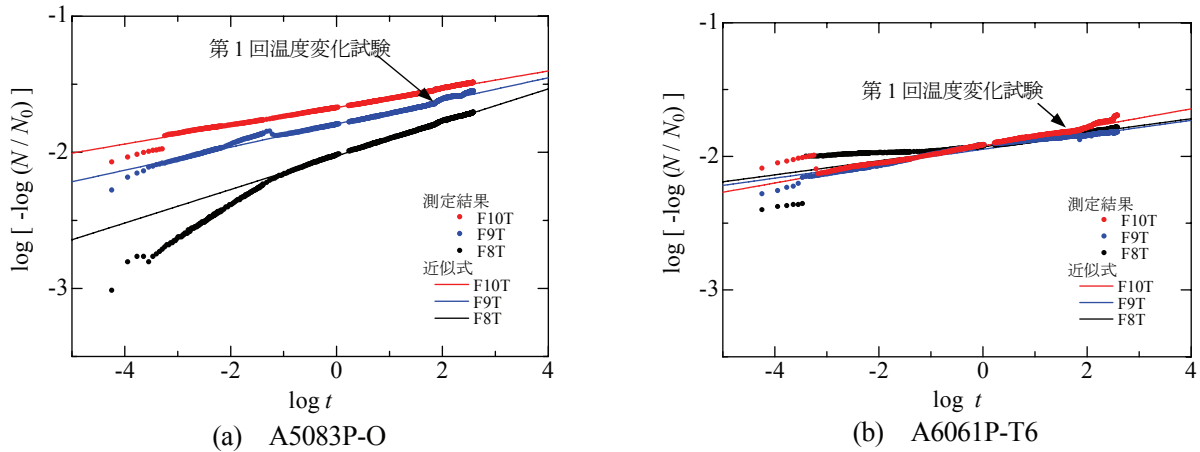


図-9 $\log[-\log(N/N_0)]$ と $\log t$ の関係

表-10 α と β の値ならびに t_1 と t_2 の値

アルミニウム合金	試験体	初期導入軸力	α	β	t_1 (日)	t_2 (日)
A5083P-O	1	F8T	9.39×10^{-3}	1.231×10^{-1}	7.68×10^{-2}	393
			9.39×10^{-3}	1.223×10^{-1}		69.7
	2	F9T	1.599×10^{-2}	7.93×10^{-2}	8.68×10^{-4}	69.7
			2.13×10^{-2}	6.71×10^{-2}		393
3	F10T	2.12×10^{-2}	6.44×10^{-2}	5.79×10^{-4}	69.7	
		1.179×10^{-2}	5.25×10^{-2}		393	
A6061P-T6	4	F8T	1.183×10^{-2}	4.95×10^{-2}	1.452×10^{-1}	393
			1.130×10^{-2}	5.41×10^{-2}		69.7
	5	F9T	1.143×10^{-2}	5.96×10^{-2}	3.47×10^{-4}	393
			1.197×10^{-2}	6.49×10^{-2}		69.7
	6	F10T	1.179×10^{-2}	5.25×10^{-2}	7.52×10^{-4}	393
			1.143×10^{-2}	5.96×10^{-2}		69.7

$$\frac{N}{N_0} = 10^{-\alpha t^\beta} \quad (4)$$

ここに、 α, β : 定数
 t : 経過時間 (日)
 この式は次のように変形される。

$$\log\left(-\log\frac{N}{N_0}\right) = \log\alpha + \beta \log t \quad (5)$$

$\log[-\log(N/N_0)]$ と $\log t$ をそれぞれ縦軸と横軸に採った図上に、鋼製高力ボルトの軸力の測定値をプロットした結果を図-9に示す。図-9において、直線性を示すプロット点に対して最小自乗法を適用することによって得られる α と β の値を表-10に示す。同表には、最小自乗法を適用した部分の経過時間の最初 t_1 と最後 t_2 も示してある。図-8に示すように、A5083P-OのF9TとA6061P-T6のF10Tの軸力残存率が第1回目の温度変化試験後に不安定な挙動を示したので、両者の t_2 は、第1回目の温度変化試験を行う前までの経過時間69.7日である。A5083P-OのF8TとF10TおよびA6061P-T6のF8TとF9Tの t_2 に対しては、試験終了日393日と第1回目の温度変化試験を行う前までの経過時間69.7日の両者に対して最小自乗法を適用した結果を示す。A5083P-OのF8TとF10TおよびA6061P-T6のF8TとF9Tの各場合において、 t_2 が69.7日に対する α と β の値は、 t_2 が393日に対するそれらの値にほぼ等しい。したがって、A5083P-OのF9TとA6061P-T6のF10Tについて、69.7日までの経過時間に対して最小自乗法を適用して得られた α と β

表-11 鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式

アルミニウム合金	試験体	初期導入軸力	N_0 (kN)	$0 \leq t \leq 393$ (日)
A5083P-O	1	F8T	182.2	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.00939t^{0.1231}}$
	2	F9T	206	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.01599t^{0.0793}}$
	3	F10T	228	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.0213t^{0.0671}}$
A6061P-T6	4	F8T	185.4	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.01179t^{0.0525}}$
	5	F9T	205	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.01130t^{0.0541}}$
	6	F10T	227	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.01197t^{0.0649}}$

の値を用いて経過時間 393 日までを推定することができる。

表-10 の α と β の値を式(4)に代入して得られる鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式を表-11 に示す。表-11 の鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式と測定結果の比較を図-7 に示す。図-9 において、 t が t_1 より小さい領域で、表-10 の α と β の値を代入した式(5)が与える直線が測定値から離れているが、図-7 では、鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式が測定結果をよく近似している。これは、図-9 では縦軸と横軸に対数が採られ、ゼロに近い値が対数表示によって強調されるが、対数を外した数値の差は小さいからである。

A6061-T6 のアルミニウム合金押出型材（母材の厚さ 15mm，添接板の厚さ 10mm）が、M20 の溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルト F8T を用いてナット回転法により締結された場合の、アルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの 50 年後の軸力残存率が 0.9 であることが報告されている¹²⁾。この値は、21 ヶ月の軸力残存率の測定結果を外挿することによって得られたものである。

表-11 の鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式の適用範囲は 393 日までであるが、50 年後の軸力残存率を推定できると仮定すると、A6061P-T6 の 50 年後の鋼製高力ボルトの軸力残存率は F8T に対して 0.956 である。既往の研究¹²⁾の軸力残存率が本研究の軸力残存率より低いのは、既往の研究では鋼製高力ボルトが溶融亜鉛めっきされており、座金とボルト・ナットの接触部、座金とアルミニウム合金板の接触部、およびボルトのねじとナットのねじの接触部に亜鉛の膜が存在することによる鋼製高力ボルト自身のリラクセーションによる軸力低下が、アルミニウム合金のクリープによる軸力低下に加わったためであると考えられる。

4. 温度変化による鋼製高力ボルトの軸力変化

3 章の(1)節で述べたように、試験開始 70 日後と 321 日後の 2 回、恒温槽の温度を 0~50°C の範囲で変化させて、鋼製高力ボルトの軸力を測定した。各試験体のアルミニウム合金板の表面に設置した熱電対により温度測定を行った。

試験開始 70 日後の第 1 回目の設定温度の履歴と試験開始 321 日後の第 2 回目の設定温度の履歴を図-10 に示す。図の縦軸と横軸にそれぞれ設定温度 T (°C) と経過時間 t (h) が採ってある。恒温槽の温度を設定した後、試験体の温度が安定するまで待ち、次の温度に設定する直前に鋼製高力ボルトの軸力を測定した。

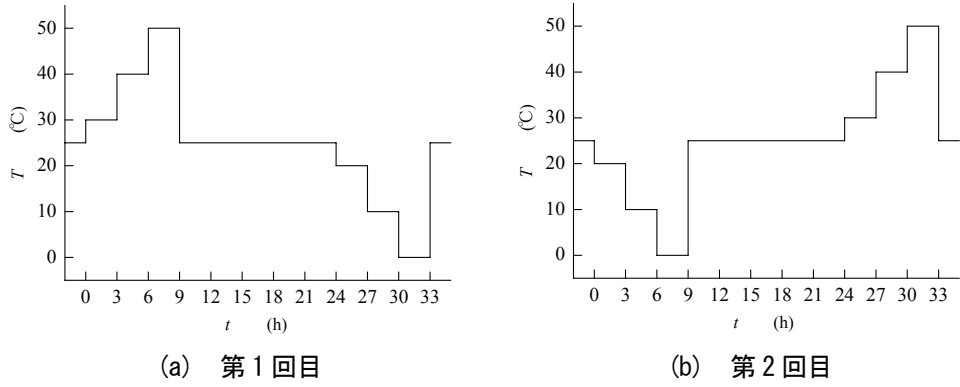


図-10 設定温度の履歴

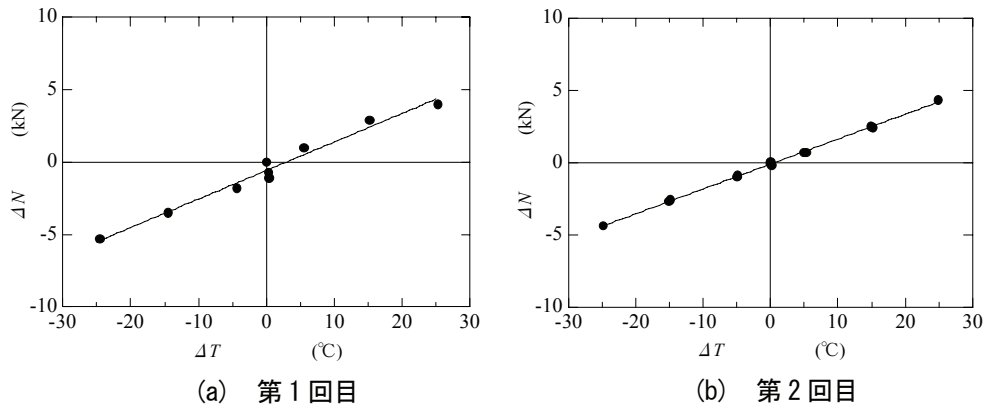


図-11 鋼製高力ボルトの軸力変化と温度差の関係 [試験体 3]

表-12 係数 a と b の値および決定係数の値

アルミニウム合金	試験体	初期導入軸力	第1回目			第2回目		
			a (kN/°C)	b (kN)	R^2	a (kN/°C)	b (kN)	R^2
A5083P-O	1	F8T	0.177	-0.40	0.994	0.165	-0.11	0.999
	2	F9T	0.193	-0.69	0.981	0.170	-0.10	0.997
	3	F10T	0.197	-0.57	0.978	0.172	-0.11	0.999
A6061P-T6	4	F8T	0.187	-0.51	0.988	0.172	-0.02	1.000
	5	F9T	0.187	-0.02	0.931	0.138	0.00	0.999
	6	F10T	0.195	-0.17	0.992	0.181	-0.17	0.998

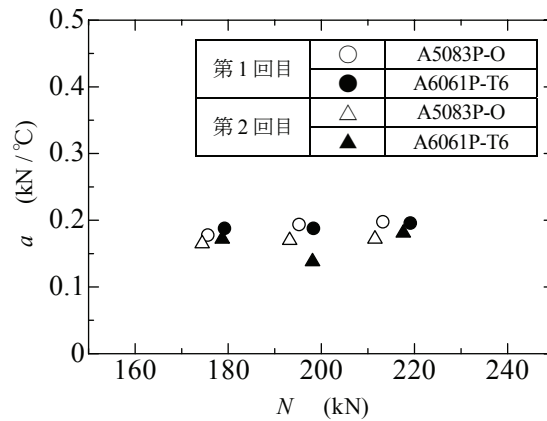


図-12 a と N の関係

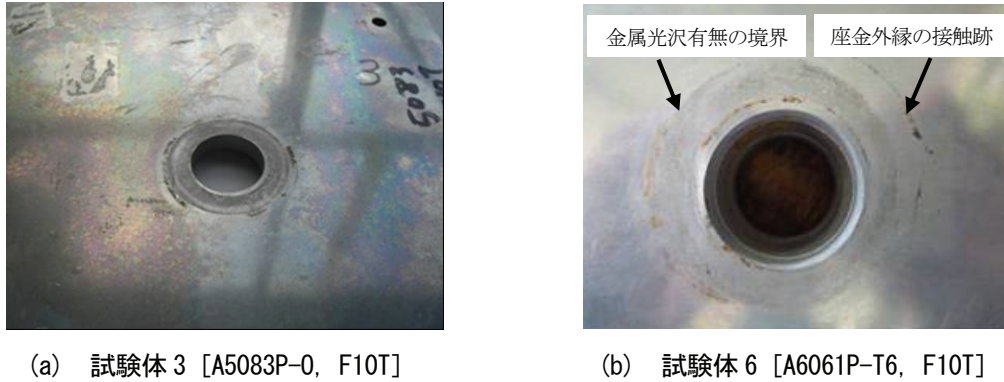


図-13 添接板のボルト頭側表面

鋼製高力ボルトの軸力変化 ΔN および温度差 ΔT の関係の一例を図-11に示す。両者は直線性を示すので、両者の関係に次式を仮定し、最小自乗法によって算出された係数 a と b の値および決定係数 R^2 の値を表-12に示す。

$$\Delta N = a\Delta T + b \quad (6)$$

式(6)の a は単位温度の変化に対する鋼製高力ボルトの軸力変化率である。 a と温度変化試験開始直前の導入軸力 N の関係を図-12に示す。試験体5の第2回目の温度変化試験の a の値が他の値より幾分低いですが、これを除けば、 a の値に大きな差は見られない。すなわち、単位温度の変化に対する軸力変化率は、A5083P-OとA6061P-T6の材料の違いに影響されず、F8TからF10Tまでの初期導入軸力の大きさの違いによっても影響されない。

表-12において、 a の最大値は $0.197 \text{ kN/}^\circ\text{C}$ である。したがって、M22の鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手の単位温度の変化に対する軸力の変化率として $0.197 \text{ kN/}^\circ\text{C}$ を採用する。

温度変化に対して鋼製高力ボルトの導入軸力が低下するのは、鋼製高力ボルトが締結されたときの温度から温度が低下する場合である。いま温度低下として 50°C を考えると、この温度低下に対する鋼製高力ボルトの軸力低下は 9.85 kN である。この値は、A5083P-OおよびA6061P-T6にかかわらず、F8T、F9T、F10Tの初期導入軸力に対してそれぞれ 0.054 、 0.048 、 0.043 になる。3章の(2)節b)項で述べたように、A6061P-T6のアルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの50年後の軸力残存率が、F8Tの初期導入軸力に対して 0.956 、すなわち軸力低下率が 0.044 であった。したがって、この場合、 50°C の温度低下に対する鋼製高力ボルトの軸力低下率は、アルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの軸力低下率と同程度であるといえる。

5. アルミニウム合金板の表面の変形特性

鋼製高力ボルトの軸力低下試験が終了した後、ボルトを除去して、添接板の座金側表面および添接板と母材との接触表面を観察した。初期導入軸力が最も大きいF10Tについて、添接板のボルト頭側表面の写真を図-13に示す。図-13(a)に示すように、A5083P-Oの添接板には、座金と接触する表面に円形のへこみが観察された。そこで、接触式の輪郭形状測定機の接触子を、円孔の中心を通過して添接板の表面を直線状に移動させることによって、添接板のへこみの形状を計測した。へこみが始まる場所とへこみが最大の場所の、表面に垂直な方向の距離をへこみの深さと定義する。使用した輪郭形状測定器は変形の深さを $1.25 \mu\text{m}$ の精度で測定することができる。添接板の変形の測定結果を表-13に示す。

同表の挿入図に示すように、 ϕA の内側で δ_A の変形が生じ、 ϕA から ϕB の δ_B の変形まで急激に減少し、 ϕB から外側ではわずかな傾斜が観察された。 ϕA と ϕB は、F8T、F9T、F10Tの初期導入軸力の大きさに

表-13 A5083P-0 の添接板の座金側表面の変形

試験体	初期導入軸力	部 位	ϕA (mm)	ϕB (mm)	δ_A (μm)	δ_B (μm)
1	F8T	ボルト頭側	36.9	39.9	70	0
		ナット側	37.3	40.8	100	6
2	F9T	ボルト頭側	35.9	40.4	120	9
		ナット側	36.5	40.4	100	3
3	F10T	ボルト頭側	35.3	41.2	170	5
		ナット側	36.4	41.7	170	7

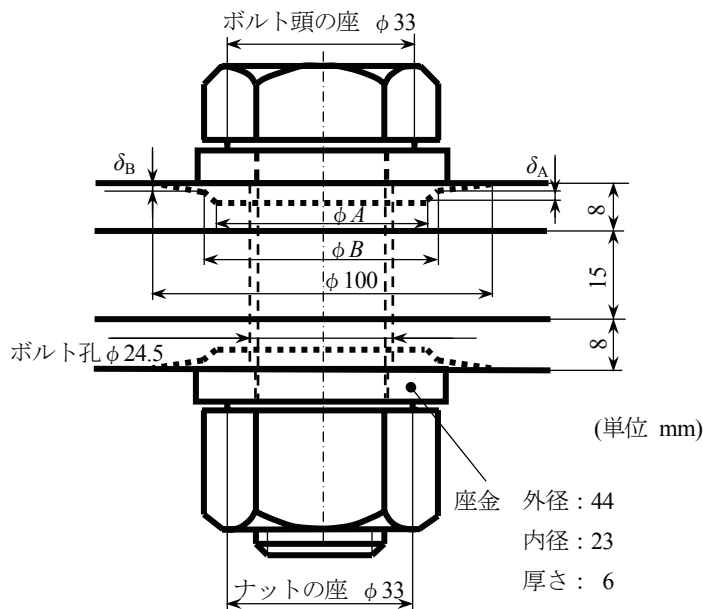


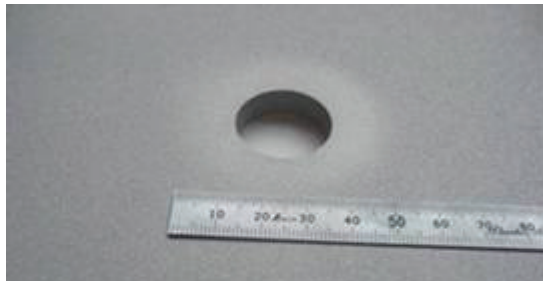
表-14 A6061P-T6 の添接板の、座金側表面の金属光沢が失われた領域の外径

試験体	初期導入軸力	部 位	外形 (mm)
4	F8T	ボルト頭側	40.3
		ナット側	39.0
5	F9T	ボルト頭側	39.1
		ナット側	39.0
6	F10T	ボルト頭側	39.6
		ナット側	39.4

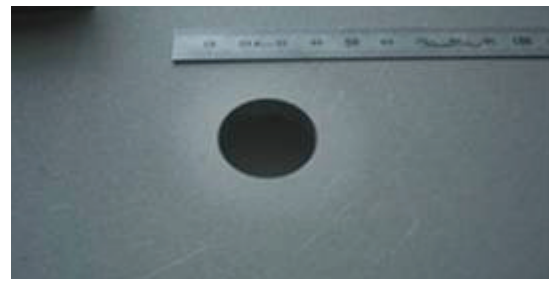
よってそれぞれほとんど変化しないが、 δ_A と δ_B は初期導入軸力が大きくなるに従って大きくなる。 ϕB は約 40mm であり、座金の外形 44mm より小さい。これは、座金が曲げ変形することによって、座金の表面全体が添接板に接触していないためである。

A6061P-T6 の添接板では、輪郭形状測定機による計測でへこみは検出されなかった。図-13(b) に示すように、ボルト孔周りに金属光沢が失われた円形の領域があり、その外側に金属光沢が存在する。座金の外径に相当する部分に、ボルト締結時に座金の外縁によって付けられたと考えられる接触キズが見られる。表-14 に示すように、金属光沢が失われた領域の外径は、初期導入軸力の大きさに影響されず、約 39.5mm である。前述したように、A5083P-O の添接板が座金と接触する領域の外径が約 40mm であったことを考えると、A6061P-T6 の添接板のボルト孔周りの金属光沢が失われた領域は、座金との接触によって生じたものである。

一方、添接板と母材との接触面に関しては、A5083P-O の試験体および A6061P-T6 の試験体ともにへこみは観察されなかった。しかし、図-14 に示すように、添接板のブラスト面の、ボルト孔を中心として約 50mm の直径内が、それ以外の部分と光沢が異なっていた。



(a) 試験体 3 [A5083P-O, F10T]



(b) 試験体 6 [A6061P-T6, F10T]

図-14 添接板のブラスト表面 [ボルト頭側]

表-15 平均接触面圧

アルミニウム合金	試験体	初期導入軸力	添接板と座金との接触部		添接板と母材との接触部	
			接触面積 (mm ²)	平均接触面圧 (MPa)	接触面積 (mm ²)	平均接触面圧 (MPa)
A5083P-O	1	F8T	779	234	1492	122
	2	F9T	810	254		138
	3	F10T	862	265		153
A6061P-T6	4	F8T	723	256	1492	124
	5	F9T	723	284		137
	6	F10T	748	303		152

添接板と座金との平均接触面圧および添接板と母材との平均接触面圧を表-15に示す。前者の平均接触面圧を算出する際の接触部の外径として、A5083-Oの試験体については、表-13のボルト頭側とナット側の ϕB の値のうちの小さい方の値、A6061-T6の試験体については、表-14のボルト頭側とナット側の値のうちの小さい方の値を採用している。後者の平均接触面圧を算出する際の接触部の外径は、A5083P-Oの試験体およびA6061P-T6の試験体ともに50mmとしている。接触部の内径については、座金の内径が23mm、ボルト孔の径が24.5mmであるので、両者とも24.5mmとしている。

表-15に示すように、A5083P-Oの試験体では、添接板と座金との平均接触面圧が234MPa~265MPaであり、表-8に示すA5083P-Oの添接板の0.2%耐力146MPaをはるかに超えている。そのために、A5083P-Oの試験体では、座金直下の添接板にへこみが生じたと考えられる。

他方、A6061P-T6の試験体では、平均接触面圧が256MPa~303MPaであり、表-8に示すA6061P-T6の添接板の0.2%耐力311MPaを超えない。そのために、A6061P-T6の試験体では、座金直下の添接板にへこみが生じなかったと考えられる。

A5083P-Oの試験体では、添接板と母材との平均接触面圧が、表-8に示す添接板および母材の0.2%耐力程度であり、A6061P-T6の試験体では、それが、表-8に示す添接板および母材の0.2%耐力よりはるかに低い。そのために、添接板と母材との接触部には、A5083P-Oの試験体とA6061P-T6の試験体ともにへこみが生じなかったと考えられる。

表-1に示すアルミニウム合金板に対する機械的性質で、AA⁴⁾が105MPa以上、Eurocode 9⁵⁾が200MPa以上の0.2%耐力を要求している。本研究の試験体で使用されたA5083P-OとA6061P-T6の添接板の0.2%耐力はそれぞれ146MPa、311MPaである。A5083P-Oの0.2%耐力が、AAに規定される105MPaの0.2%耐力より高いにもかかわらず、添接板にへこみが生じた。添接板のへこみは、鋼製高力ボルトの座金を曲げ変形させるので、座金を塑性化させる可能性がある。さらに、添接板のへこみは添接板の疲労強度を低下させる恐れがある。したがって、今後、鋼製高力ボルトの初期導入軸力と添接板のへこみの関係を明らかにし、添接板に対して要求される機械的性質を設定する必要がある。

6. 結論

本研究では、鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり試験、アルミニウム合金のクリープに対する鋼製高力ボルトの軸力低下試験、温度変化に対する鋼製高力ボルトの軸力変化試験を実施した。

試験体は、鋼製高力ボルト M22 (F10T) によって、厚さ 15mm の母材の両面を厚さ 8mm の添接板で挟んだ 2 面摩擦接合継手である。考慮したアルミニウム合金は A5083-O と A6061-T6 である。さらに、考慮した鋼製高力ボルトの初期導入軸力は、道路橋示方書¹⁰⁾で規定される F8T および F10T の設計ボルト軸力の 10% 増し、およびこれらの平均値の 3 水準である。本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 表-4 に記載の条件でブラスト処理された添接板の表面粗さは Rz が 20 μ m 以上あり、この添接板が用いられたアルミニウム合金板摩擦接合継手では 0.45 を超えるすべり係数が確保される。
- (2) アルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの軸力は、ボルト締結直後、急激に低下し、その後は非常に穏やかに低下する。鋼製高力ボルトの軸力残存率は、ボルト締結 393 日後、A5083P-O においては 0.925~0.956、A6061P-T6 においては 0.960~0.968 であり、A5083P-O の軸力残存率の低下が A6061P-T6 のそれより大きい。そして A5083P-O においては、初期導入軸力が大きくなるに従って軸力残存率の低下が大きくなるが、A6061P-T6 においては、軸力残存率が初期導入軸力の大きさに依存する度合いが小さい。A5083P-O において、初期導入軸力が大きくなるに従って軸力残存率の低下が大きくなる原因は、初期導入軸力が大きくなるに従って深くなるへこみが座金直下の添接板に生じるからである。
- (3) 鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式を表-11 に与えた。
- (4) 単位温度の変化に対する鋼製高力ボルトの軸力の変化率は、A5083P-O と A6061P-T6 の材料の違い、および初期導入軸力の大きさに影響されず、M22 の鋼製高力ボルトに対して 0.197 kN/°C である。
- (5) 鋼製高力ボルトによる締結によって、A5083P-O の添接板の座金直下に円形のへこみが生じる。へこみの直径は初期導入軸力の大きさによってほとんど変化しないが、へこみの深さは初期導入軸力が大きくなるに従って大きくなる。A6061P-T6 の添接板にへこみは生じないが、ボルト孔周りに、座金との接触によって金属光沢が失われた円形の領域が発生し、その直径は、初期導入軸力の大きさによってほとんど変化しない。A5083P-O の添接板のへこみの直径および A6061P-T6 の添接板の金属光沢が失われた領域の直径はともに約 40mm であり、座金の外形 44mm より小さい。これは、座金が曲げ変形することによって、座金の表面全体が添接板に接触していないためである。
- (6) A5083P-O の添接板の座金直下にへこみが発生した原因は、添接板と座金との平均接触面圧が添接板の 0.2% 耐力をはるかに超えたことである。

謝辞：本研究は、大阪大学大学院工学研究科附属フロンティア研究センターの戦略的研究テーマ「アルミニウム橋の実現」(2005年度~2006年度)の下で行われた。

参考文献

- 1) 大倉一郎, 萩澤亘保, 花崎昌幸: アルミニウム構造学入門, 東洋書店, 2006.
- 2) 日本アルミニウム協会: アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案 第1次改訂試案, 1998.
- 3) アルミニウム建築構造協議会: アルミニウム建築構造設計規準・同解説, 2003.
- 4) The Aluminum Association: Aluminum design manual, 2005.
- 5) Eurocode 9: Design of aluminium structures—Part 1-1: General rules—General rules and rules for buildings, 1999.
- 6) アルミニウム建築構造協議会: アルミニウム建築構造製作要領 アルミニウム建築構造物製作工場認定規程および基準・同解説, pp.39-50, 2003.

- 7) JIS B 0601 : 製品の幾何特性仕様 (GPS) —表面性状：輪郭曲線方式—用語, 定義及び表面性状パラメータ, 2001.
- 8) The Research Council on Structural Connections: Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, 2004.
- 9) 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), pp.64-65, 2006.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 2002.
- 11) 日本橋梁建設協会：高力ボルト施工マニュアル, 2007.
- 12) 市川祐一, 見波進, 山田丈富, 中込忠男, 橋本篤秀：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究 (その 14)高力ボルト摩擦接合のリラクゼーション試験とその適正孔径, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.695-696, 1998.