

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
のすべり係数と鋼製高力ボルトの軸力低下

ALST 研究レポート 7

2009 年 1 月

日本軽金属(株)グループ技術センター
萩澤亘保

大阪大学大学院工学研究科
大倉一郎

概 要

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る場合、解決されなければならない問題がいくつかある。本研究では、これら未解決の問題を明らかにすることを目的として、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する。

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 の添接板で締結した 2 面摩擦接合継手である。考慮したアルミニウム合金は A5083P-O と A6061P-T6 である。鋼製高力ボルトに導入した初期軸力は、道路橋示方書で規定される 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 通りである。

これらの試験により、アルミニウム合金板の表面粗さとすべり係数の関係、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表面の変形特性の関係を明らかにする。

謝 辞

本研究は、科学技術振興調整費充当戦略的研究拠点「阪大フロンティア研究機構」の研究プロジェクト（プロジェクト名：アルミニウム合金構造物実現のための基礎研究，2003～2005）の下で行なわれた。

ボルトの締め付けから，長期間にわたるボルト軸力の測定をしていただいた間宮志胖氏と望月浩行氏（日本軽金属株式会社 グループ技術センター）に深く感謝致します。

目 次

第1章 序 論	… 1
第2章 すべり係数	… 3
2.1 試験体	… 3
2.2 引張試験	… 5
第3章 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	… 7
3.1 試験体	… 7
3.2 鋼製高力ボルトの軸力低下	… 9
3.2.1 測定結果	… 9
3.2.2 鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式	… 10
第4章 温度変化による鋼製高力ボルトの軸力変化	… 13
第5章 アルミニウム合金板の表面の変形特性	… 18
第6章 結 論	… 21
参考文献	… 22

第1章 序 論

大型アルミニウム構造物においては、工場で輸送可能な大きさに部材が製作され、現場でそれらが組立てられる。アルミニウム床版やアルミニウム桁などの場合、工場製作においては摩擦攪拌接合が用いられ、現場においては鋼製高力ボルトによる摩擦接合が用いられる。摩擦接合は、ボルトに導入される軸力によって母材と添接板との間に摩擦力を発生させ、それによって両者のすべりを防いで荷重を伝達する接合法である。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る場合、次の問題が挙げられる。

- (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) すべり係数の値
- (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、アルミニウム構造物に関する国内外の設計基準における取扱いについて述べる。

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）¹⁾においては、同指針に規定されるアルミニウム合金に対して、大きな軸力を板厚方向に受けることに對して特別な機械的性質は規定されていない。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を防止するために、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルト F8T の使用が規定されている。すべり係数は 0.2 である。アルミニウム合金板のクリープ、および鋼とアルミニウム合金の線膨張係数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に対する規定はない。

アルミニウム建築構造設計規準・同解説²⁾においても、同指針に規定されるアルミニウム合金が摩擦接合継手に使用されることに對して、アルミニウム合金に対して特別な機械的性質は規定されていない。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）¹⁾と同様に、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルト F8T の使用が規定されている。アルミニウム建築構造製作要領³⁾に規定された摩擦面処理を行うことにより、すべり係数は 0.45 と規定されている。アルミニウム合金板のクリープ、ボルト締めの際の施工時期の温度からの温度変化、およびボルト締めの際の施工ばらつきを考慮して、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事前に確認しておくことが規定されている。

米国の AA⁴⁾では、被締結材として用いられるアルミニウム合金材は、その 0.2%耐力が 105MPa 以上あることが規定されている。鋼製高力ボルトとして、溶融亜鉛めっきボルト、および亜鉛の粉末を機械的に積層させた機械的亜鉛コートボルトが規定されている。アルミニウム合金材表面および厚さ 0.1mm の亜鉛塗料が塗られた鋼材表面と接触するアルミニウム合金材表面に、平均粗さが 50 μm の摩擦面処理が行われた場合、すべり係数は 0.50 と規定されている。これ以外の場合、RCSC 基準⁵⁾の Appendix A に記述された試験法に基づいてすべり係数を定めることが規定されている。アルミニウム合金板のクリープ、および鋼とアルミニウム合金の線膨張係数が異なることに起因する、温度変化による高力ボルトの軸力変化について考慮しなければならないと記述されているが、具体的な規定はない。

Eurocode 9⁶⁾においては、被締結材として用いられるアルミニウム合金の 0.2%耐力は 200MPa 以上でなければならないと規定されている。使用されるボルトは、欧州規格⁷⁾および ISO⁸⁾に準じる F10T までの亜鉛コートされた鋼製高力ボルトである。発注者、設計者および学識経験者の間の合意によりこれら以外のボルトも使用できることが規定されている。ショットブラストにより、中心線平均粗さ R_a （粗さ曲線を中心線から折り返し、その粗さ曲線と中心線によって得られた面積を長さで割った値をマイクロ

メートルで表示したもの) が 12.5 の摩擦面処理が行われた場合、すべり係数は、板厚の総和に依存して 0.27~0.40 と規定されている。AA⁴⁾と同様に、アルミニウム合金板のクリープ、および鋼とアルミニウム合金の線膨張係数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について考慮しなければならないと記述されているが、具体的な規定はない。

以上より、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について、アルミニウム構造に関する国内外の設計基準の要点を次にまとめる。

- (1) アルミニウム合金板の機械的性質に対して規定が設けられている設計基準^{4), 6)}と設けられていない設計基準^{1), 2)}がある。規定が設けられている設計基準では、いずれもアルミニウム合金の 0.2%耐力に対して規定が設けられている。しかし、AA⁴⁾に規定される 0.2%耐力は 105MPa 以上、Eurocode 9⁶⁾に規定される 0.2%耐力は 200MPa 以上であり、約 2 倍異なる。
- (2) すべり係数の値が設計基準の間で異なる。
- (3) アルミニウム建築構造設計規準・同解説²⁾を除いて、アルミニウム合金板のクリープ、および鋼とアルミニウム合金の線膨張係数が異なることに起因する、温度変化による高力ボルトの軸力変化に対する規定がない。
- (4) 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を防ぐために、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトと機械的亜鉛コート鋼製高力ボルトが用いられている。

我国では、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。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。

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。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。

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に関して、前述のアルミニウム構造に関する国内外の設計基準間で見られるいくつかの問題を解明すること、ならびにアルミニウム合金板摩擦接合継手に F10T の軸力を導入することができるフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの使用を目指して、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する。そして、アルミニウム合金板の表面粗さとすべり係数の関係、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。

第2章 すべり係数

2.1 試験体

すべり係数を求めるために用いた試験体を図-2.1に示す。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。

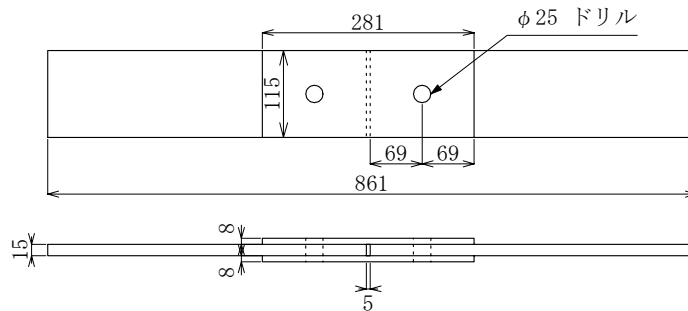


図-2.1 試験体

母材と添接板のアルミニウム合金材は A6061P-T651 であり、その化学成分と機械的性質をそれぞれ表-2.1と2.2に示す。

表-2.1 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-2.2 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

アルミニウム建築構造製作要領³⁾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 Rz 20 μ m 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-2.3に示すブラスト条件で処理した。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-2.4に示す。表-2.4の表面粗さは、各面任意の3箇所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 20 μ m 以上ある。

表-2.3 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 = 0.37 秒/cm ²

表-2.4 添接板の表面粗さ

試験体	表面粗さ (Rz)	
	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

ここで、Rz とは図-2.2 に示す粗さ曲線において、最高の山頂から高い順に 5 番目までの山高さの平均と、最深の谷底から深い順に 5 番目までの谷深さの平均との和のことであり、十点平均粗さと呼ぶ。

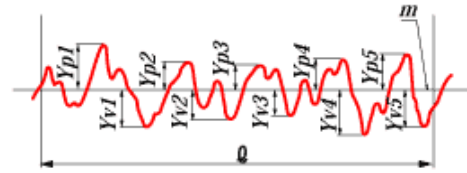


図-2.2 粗さ曲線

$$Rz = \frac{(Y_{p1} + Y_{p2} + Y_{p3} + Y_{p4} + Y_{p5}) + (Y_{v1} + Y_{v2} + Y_{v3} + Y_{v4} + Y_{v5})}{5} \quad (2.1)$$

第1章で述べたように、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、今回の試験体では、M22 (F10T) の鋼製高力ボルトに、道路橋示方書⁹⁾で規定されるF8Tの設計ボルト軸力165kNの10%増し、すなわち181.5kN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、日本橋梁建設協会の高力ボルト施工マニュアル¹⁰⁾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。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-2.5に示す。

$$K = \frac{T}{dN_0} \quad (2.2)$$

ここに、K : トルク係数
T : トルク
d : ボルトの呼び径
N₀ : 初期導入軸力

表-2.5の平均トルク係数0.122とボルトの呼び径22mmを式(2.2)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。

$$N_0 = 0.373T \quad (2.3)$$

ここで、N₀とTの単位は、それぞれkN、N・mである。

図-2.1の試験体のボルト締結の際、式(2.3)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-2.5 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

2.2 引張試験

図-2.1 の試験体の引張試験で得られた荷重 P と変位 δ の関係を図-2.3 に示す。変位 δ は、万能試験機のアムスラーの変位である。各図において、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。そこで、すべり荷重 P として、最初に荷重が下がる直前の荷重を採用した。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-2.6 に示す。初期導入軸力 N_0 は、表-2.6 に示した2つのボルト締付けトルクのうち低い方に対して、式(2.3)を用いて計算した。すべり係数は次式で算出される。

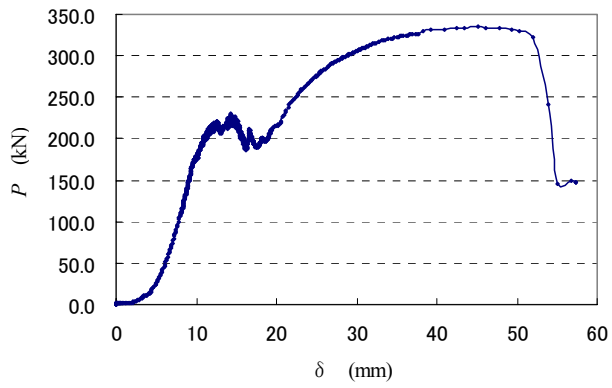
$$\mu = \frac{P}{2N_0} \quad (2.4)$$

ここに、 μ : すべり係数

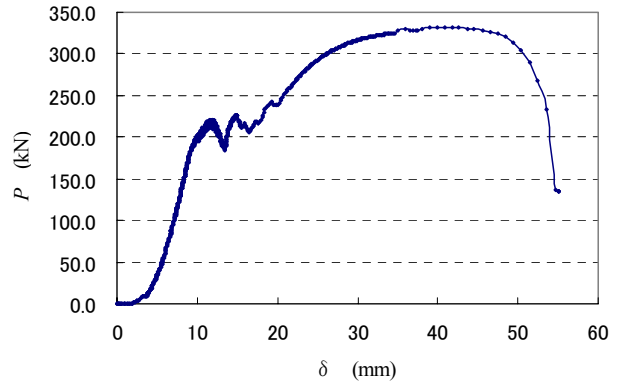
表-2.6 に示す各試験体のすべり係数 μ の値は、0.45 を十分上回っていることがわかる。したがって表-2.3 に記載の条件でブラスト処理された添接板の表面粗さは Rz20 μ m 以上あり、この添接板が用いられた摩擦接合継手は 0.45 を十分超えるすべり係数が確保されている。

表-2.6 すべり係数

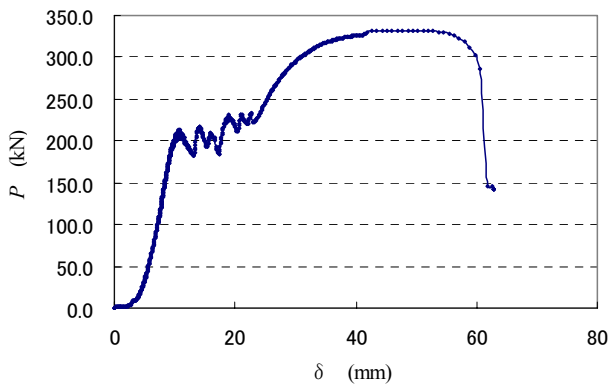
試験体	T (N・m)		N_0 (kN)	P (kN)	μ
	左ボルト	右ボルト			
1	465	480	173.4	221	0.637
2	490	470	175.3	221	0.630
3	470	470	175.3	213	0.608
4	490	480	179.0	215	0.601
5	500	500	186.5	203	0.544



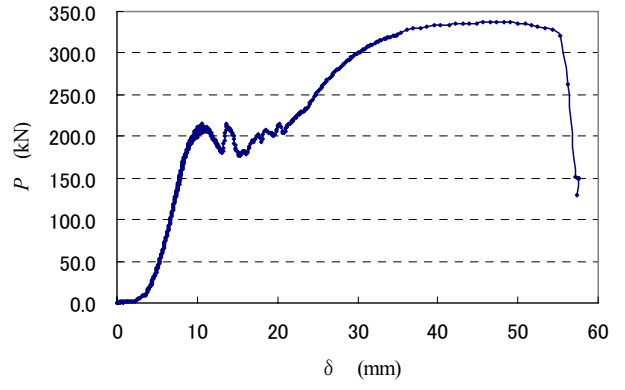
(a) 試験体 1



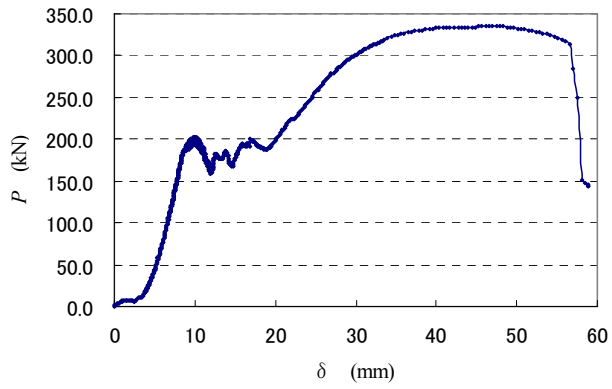
(b) 試験体 2



(c) 試験体 3



(d) 試験体 4



(e) 試験体 5

図-2.3 荷重と変位の関係

第3章 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

3.1 試験体

図-3.1 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、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1～3のA5083P-Oおよび試験体4～6のA6061P-T6の、3本のJIS 14B号の引張試験片による機械的性質を表-3.1に示す。

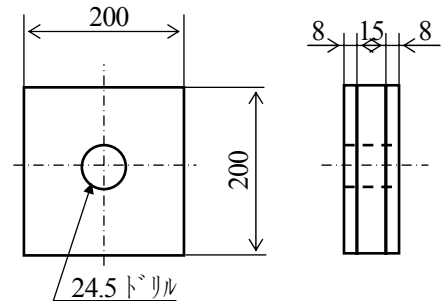


図-3.1 試験体

表-3.1 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	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

2枚の添接板の、母材に接する面に対してブラスト処理を施した。ブラスト条件は表-2.3と同じである。ブラスト後の各添接板の表面の任意の3箇所の粗さの測定結果を表-3.2に示す。

表-3.2 添接板の表面粗さ

試験体	R _Z (μm)				試験体	R _Z (μm)			
	1	2	3	平均値		1	2	3	平均値
1	39.4	32.4	36.8	36.2	4	45.5	36.6	34.6	38.9
	37.8	35.6	47.4	40.3		37.8	44.0	40.0	40.6
2	44.9	40.3	34.6	39.9	5	44.8	39.6	34.2	39.5
	31.3	44.8	36.8	37.6		37.3	31.6	34.8	34.6
3	35.8	40.4	45.2	40.5	6	37.1	37.8	35.6	36.8
	38.7	35.6	44.5	39.6		45.9	33.8	32.5	37.4

M22の鋼製高力ボルトの材質はF10Tで、その首下長さは70mmである。図-3.2に示すように、鋼製高力ボルトに4枚のひずみゲージが貼付されたボルト軸力計によって、高力ボルトに導入された軸力を計測した。ボルト軸力計の製作は共和電業に依頼した。使用されたひずみゲージと接着剤は、それぞれ共和電業製のKFG-2-120-C1-11N15C2とPC-6である。ボルト軸力計の使用環境温度は0℃～50℃である。

使用したナットは等級F10のM22、使用した座金は等級F35で、外径44mm、内径23mm、板厚6mmである。

室温 25℃の状態、**図-3.1** 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、試験体を恒温槽に入れた。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。恒温槽に設置された試験体を**図-3.3** に示す。

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⁹⁾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、試験体 2 と 5 に、F8T と F10T に対する初期導入軸力の平均値 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 2006 年 1 月 11 日に開始し、2007 年 2 月 8 日に終了した。試験の全日数は 393 日である。試験途中、試験開始 70 日後の 2006 年 3 月 22 日～25 日と、321 日後の 2006 年 11 月 28 日～12 月 1 日の 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。鋼製高力ボルトの軸力の測定間隔を**表-3.3** に示す。

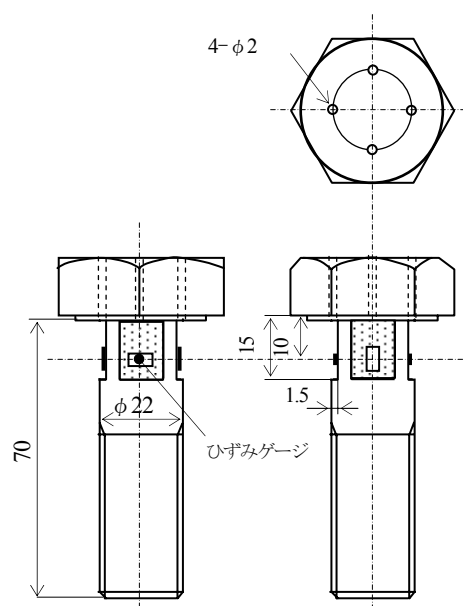


図-3.2 ボルト軸力計

表-3.3 鋼製高力ボルトの軸力の測定間隔

試験開始後	0～10分	10～60分	1～24時間	1～7日	7～90日	90日以降
測定間隔	5秒	1分	10分	1時間	6時間	24時間



図-3.3 恒温槽に設置された試験体

3.2 鋼製高力ボルトの軸力低下

3.2.1 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-3.4 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-3.5 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, 393 日後の鋼製高力ボルトの軸力の測定値と軸力残存率を表-3.4 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-3.5(a) に示す A5083P-O の F9T, および図-3.5 (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。そこで両者に対しては、次項で与える表-3.6 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-3.4 の A5083P-O の F9T と A6061P-T6 の F10T に対しては、100 日以降の軸力の測定値と軸力残存率を、表-3.6 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。

図-3.4 と 3.5 から分るように、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。表-3.4 (b) から分るように、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、第 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陥没が添接板に生じるからである。

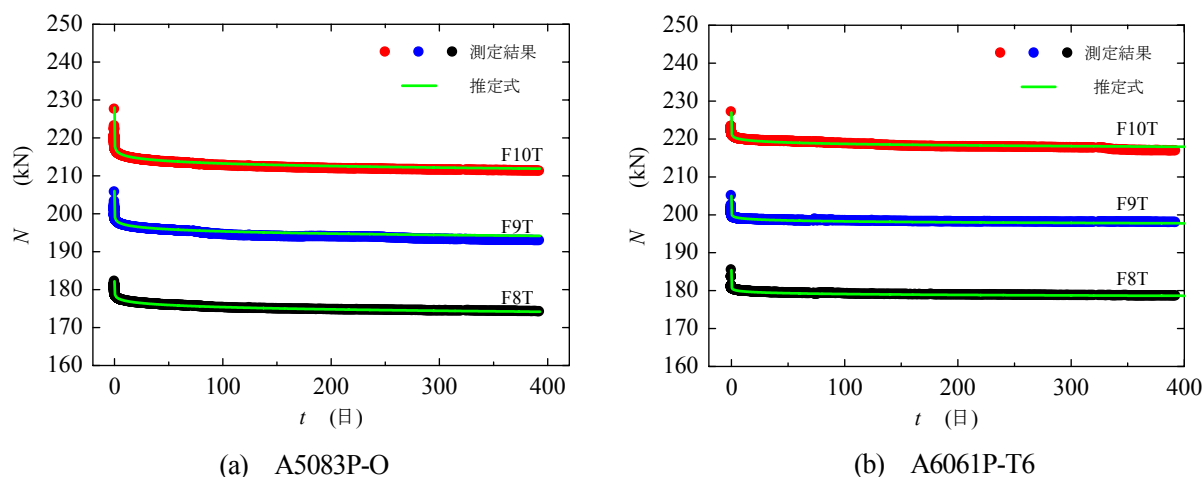


図-3.4 鋼製高力ボルトの軸力 N の変化

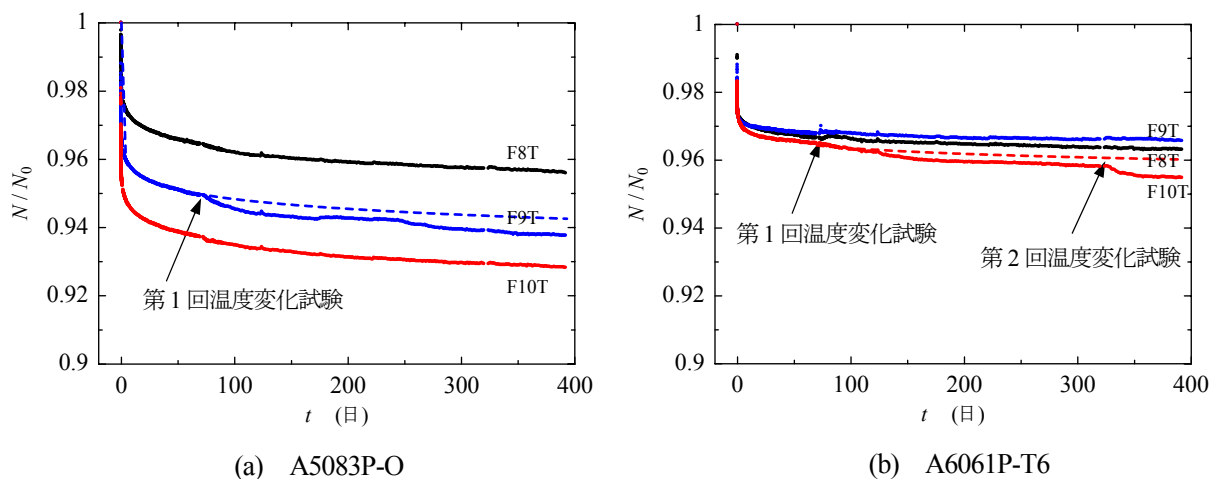


図-3.5 鋼製高力ボルトの軸力残存率 N/N_0 の変化

表-3.4 鋼製高力ボルトの軸力の測定値と軸力残存率

(a) 軸力の測定値

日数	A5083P-O			A6061P-T6		
	F8T (kN)	F9T (kN)	F10T (kN)	F8T (kN)	F9T (kN)	F10T (kN)
0	182	206	228	185	205	227
1	178	198	217	181	199	221
10	177	197	215	180	199	220
100	175	195*	213	179	199	218*
200	175	195*	212	179	198	218*
300	174	194*	212	179	198	218*
393	174	194*	211	179	198	218*

* : 表-3.6 の鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式が与える値

(b) 軸力残存率

日数	A5083P-O			A6061P-T6		
	F8T	F9T	F10T	F8T	F9T	F10T
0	1	1	1	1	1	227
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-3.6 の鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式が与える値

3.2.2 鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式

図-3.5 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。

$$\frac{N}{N_0} = 10^{-\alpha t^\beta} \quad (3.1)$$

ここに、 α, β : 定数

この式は次のように変形される。

$$\log\left(-\log\frac{N}{N_0}\right) = \log\alpha + \beta\log t \quad (3.2)$$

$\log\left(-\log\frac{N}{N_0}\right)$ 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-3.6 に示す。

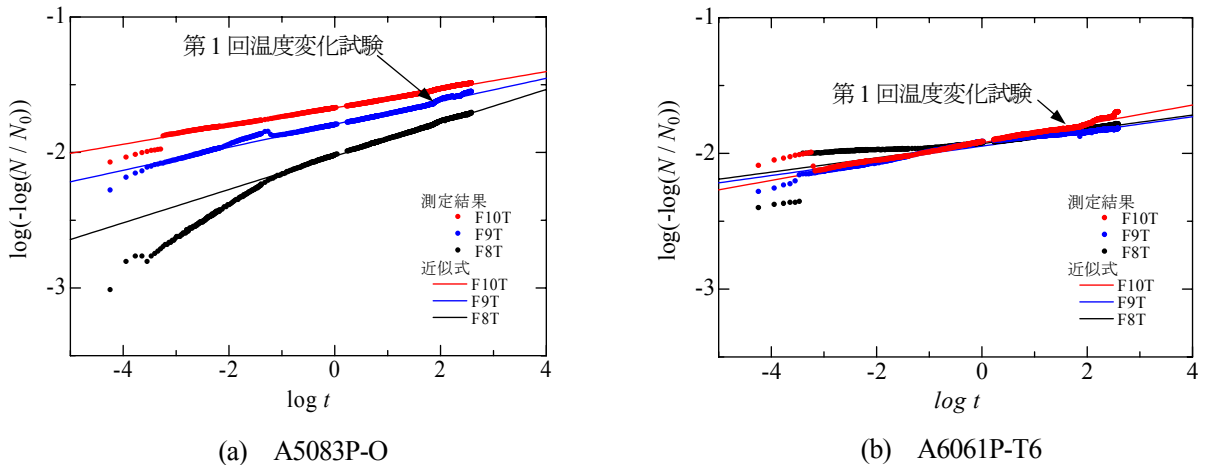


図-3.6 $\log\left(-\log\frac{N}{N_0}\right)$ と $\log t$ の関係

図-3.6 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-3.5 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-3.5 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 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-3.5 の α と β の値を式(3.1)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-3.6 に示す。

表-3.5 α と β の値ならびに t_1 と t_2 の値

アルミニウム合金	初期導入軸力	α	β	t_1 (日)	t_2 (日)
A5083P-O	F8T	9.39×10^{-3}	1.231×10^{-1}	7.68×10^{-2}	393
		9.39×10^{-3}	1.223×10^{-1}		69.7
	F9T	1.615×10^{-2}	8.49×10^{-2}	3.47×10^{-4}	69.7
	F10T	2.13×10^{-2}	6.71×10^{-2}	5.79×10^{-4}	393
		2.12×10^{-2}	6.41×10^{-2}		69.7
A6061P-T6	F8T	1.179×10^{-2}	5.25×10^{-2}	1.452×10^{-1}	393
		1.183×10^{-2}	4.95×10^{-2}		69.7
	F9T	1.130×10^{-2}	5.41×10^{-2}	3.47×10^{-4}	393
		1.143×10^{-2}	5.96×10^{-2}		69.7
	F10T	1.197×10^{-2}	6.49×10^{-2}	7.52×10^{-4}	69.7

表-3.6 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	初期導入軸力	N_0 (kN)	$0 \leq t \leq 393$ (日)
A5083P-O	F8T	182.2	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.00939t^{0.1231}}$
	F9T	206	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.01599t^{0.0793}}$
	F10T	228	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.0213t^{0.0671}}$
A6061P-T6	F8T	185.4	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.01179t^{0.0525}}$
	F9T	205	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.01130t^{0.0541}}$
	F10T	227	$\frac{N}{N_0} = 10^{-0.01207t^{0.0700}}$

表-3.6 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-3.4 に示す。図-3.6 において、 t が t_1 より小さい領域で、表-3.5 の α と β の値が代入された式(3.2)が与える直線が測定値から離れているが、図-3.4 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-3.6 では縦軸と横軸に対数が採られ、小さな t の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。

第4章 温度変化による鋼製高力ボルトの軸力変化

3.1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℃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および試験開始321日後の第2回目の設定温度の履歴を図-4.1に示す。各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) が採っている。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放置し、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。

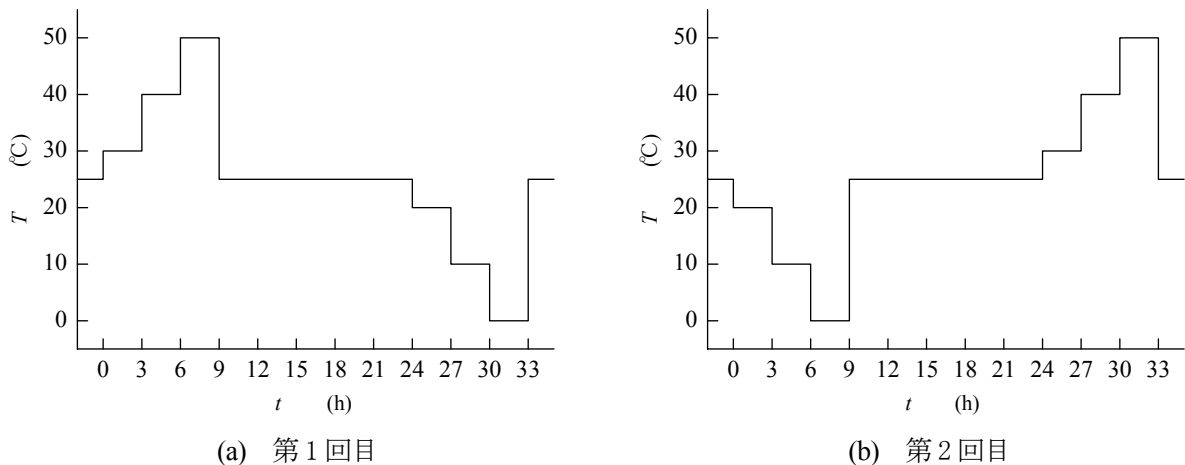


図-4.1 設定温度の履歴

温度変化の開始温度 25℃からの温度差 ΔT と、それに対応する鋼製高力ボルトの軸力変化 ΔN を表-4.1に示す。各試験体の軸力変化 ΔN と温度差 ΔT の関係を図-4.2～4.7に示す。軸力変化 ΔN と温度差 ΔT の関係に、次に示す直線を仮定し、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-4.2に示す。

$$\Delta N = a\Delta T + b \quad (4.1)$$

式(4.1)の a は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である。 a と温度変化試験開始直前の軸力 N の関係を図-4.8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の変化率は、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-4.2において、 a の最大値は 0.197 kN/°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 kN/°C を採用する。

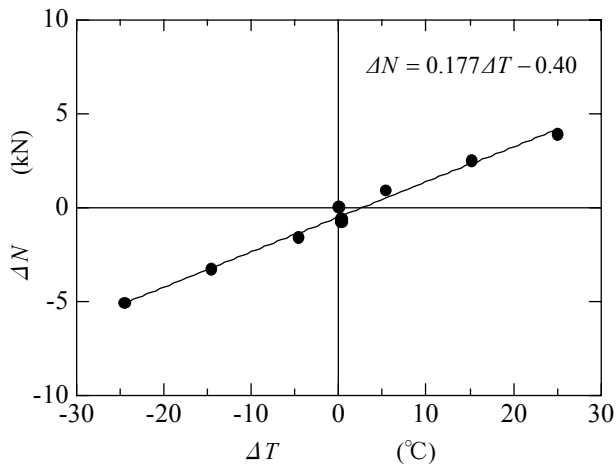
表-4.1 温度差と軸力変化

(a) 第1回目 (70日後)

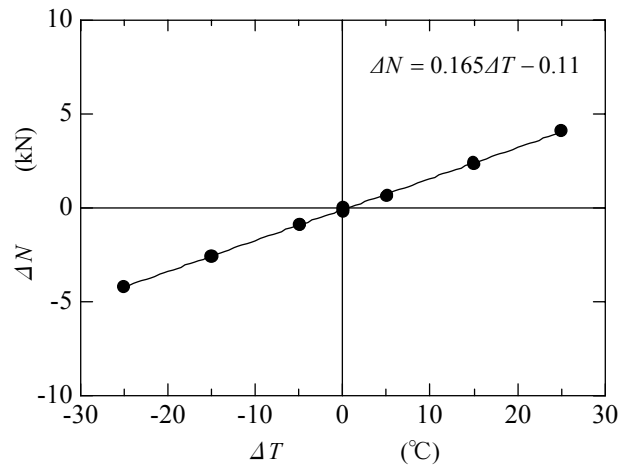
試験体 (A5083P-O)						試験体 (A6061P-T6)					
1		2		3		4		5		6	
ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.8	0.9	5.5	0.9	5.5	1.0	5.4	0.9	5.7	—	5.5	1.0
15.5	2.3	15.3	2.5	15.2	2.9	15.2	2.5	15.0	4.6	15.2	3.2
25.5	4.0	25.2	3.8	25.2	4.0	25.1	3.9	26.7	4.3	25.3	4.7
0.5	-0.3	0.3	-0.9	0.3	-0.7	0.3	-0.6	0.2	-0.1	0.2	-0.4
-4.5	-1.3	-4.7	-1.8	-4.4	-1.8	-4.6	-1.6	-4.5	-1.3	-4.8	-1.3
-14.5	-3.0	-14.6	-3.6	-14.5	-3.5	-14.6	-3.3	-14.6	-2.8	-14.9	-3.0
-24.5	-4.8	-24.6	-5.5	-24.5	-5.3	-24.5	-5.1	-24.8	-4.2	-24.7	-4.8
0.6	-0.6	0.3	-1.1	0.4	-1.1	0.3	-0.8	0.6	-0.6	0.5	-0.5

(b) 第2回目(321日後)

試験体 (A5083P-O)						試験体 (A6061P-T6)					
1		2		3		4		5		6	
ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)	ΔT (°C)	ΔN (kN)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-5.0	-0.9	-5.0	-0.9	-4.9	-0.9	-4.9	-0.9	-5.0	-0.7	-5.1	-0.8
-15.1	-2.6	-15.0	-2.6	-14.9	-2.6	-14.9	-2.6	-15.1	-2.0	-15.1	-2.5
-25.1	-4.2	-24.8	-4.3	-24.9	-4.4	-24.7	-4.2	-25.2	-3.4	-24.9	-4.2
-15.0	-2.6	-14.9	-2.6	-15.1	-2.7	-14.9	-2.6	-15.1	-2.1	-15.0	-2.5
-4.9	-0.9	-5.0	-0.9	-5.0	-1.0	-5.1	-0.9	-4.9	-0.7	-5.0	-0.8
0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.1	0.7	5.0	0.8	4.9	0.7	5.0	0.8	4.9	0.6	5.1	1.1
14.9	2.4	15.1	2.6	14.9	2.5	14.9	2.6	15.1	2.1	15.0	3.1
25.0	4.1	24.9	4.2	24.9	4.3	24.8	4.3	25.2	3.6	25.1	4.8
15.0	2.3	14.8	2.3	15.2	2.4	14.9	2.5	15.2	2.1	15.0	2.8
5.0	0.6	4.9	0.5	5.3	0.7	5.0	0.8	4.9	0.6	4.9	1.0
0.0	-0.2	-0.1	-0.4	0.2	-0.2	0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.0	0.2

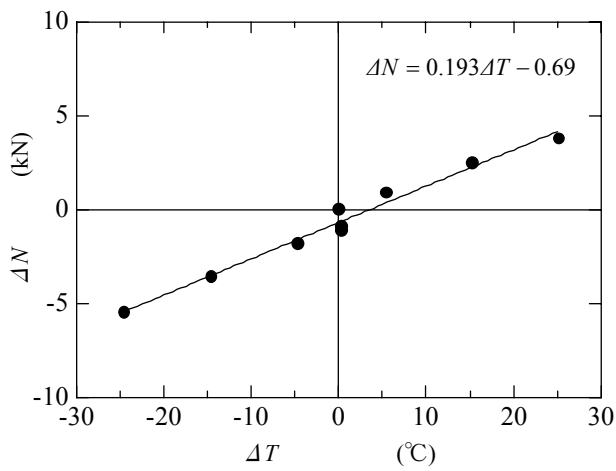


(a) 第1回目

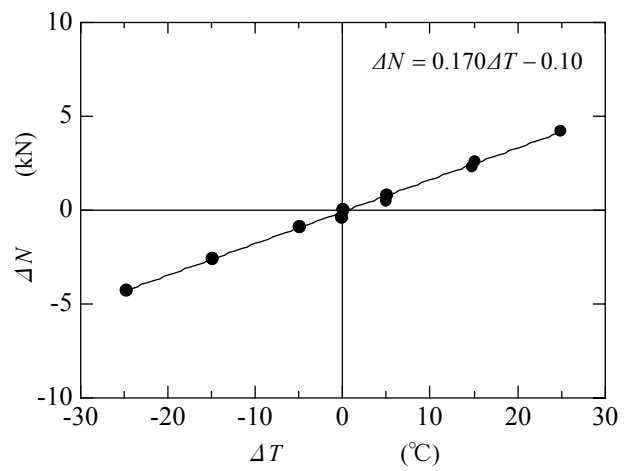


(b) 第2回目

図-4.2 軸力変化と温度差の関係 [試験体1]

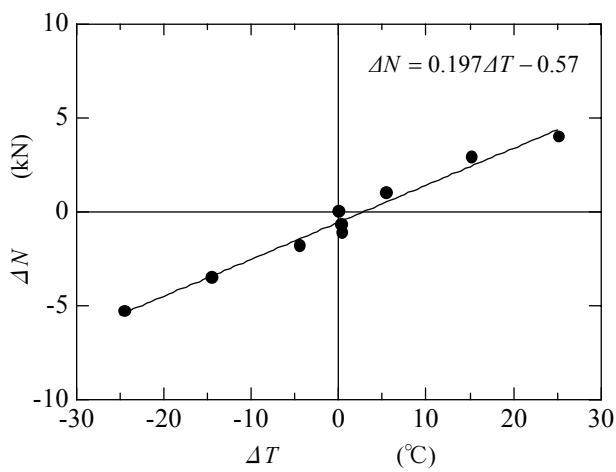


(a) 第1回目

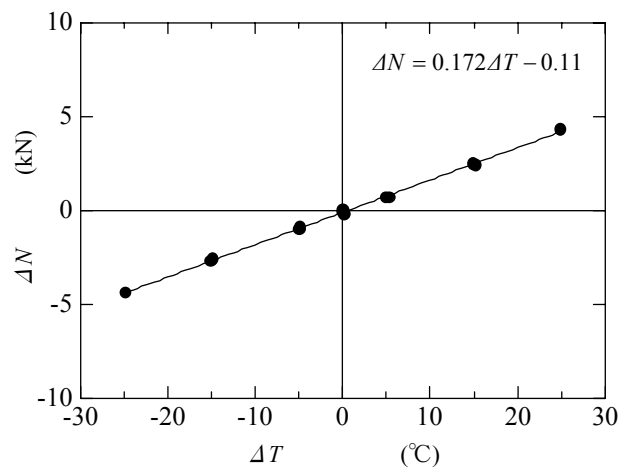


(b) 第2回目

図-4.3 軸力変化と温度差の関係 [試験体2]

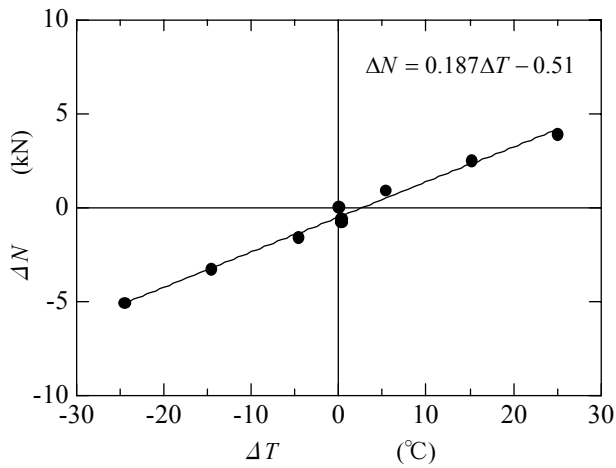


(a) 第1回目

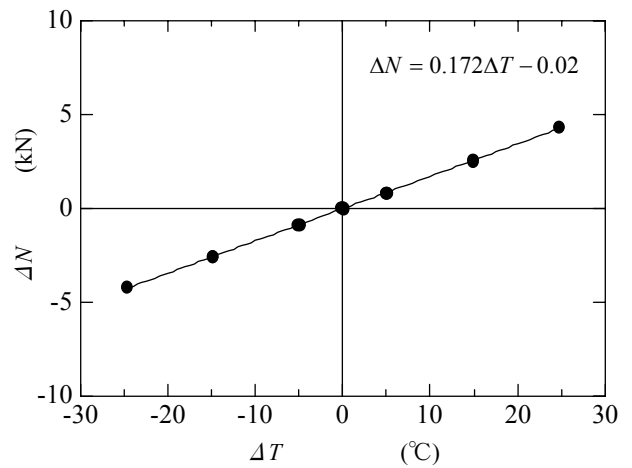


(b) 第2回目

図-4.4 軸力変化と温度差の関係 [試験体3]

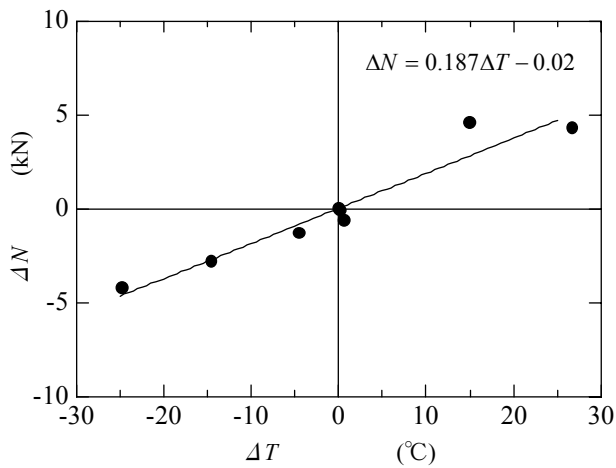


(a) 第1回目

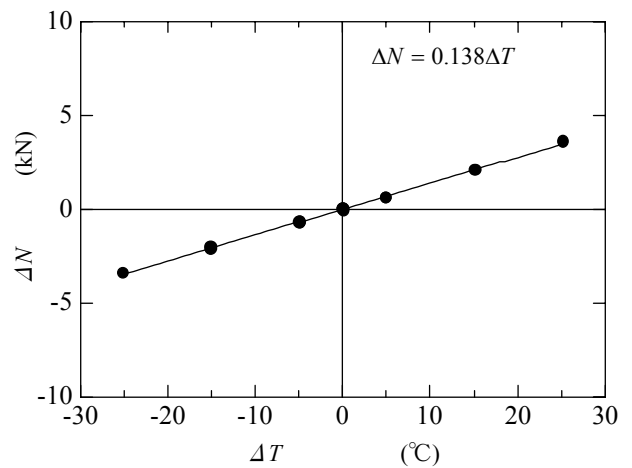


(b) 第2回目

図-4.5 軸力変化と温度差の関係 [試験体4]

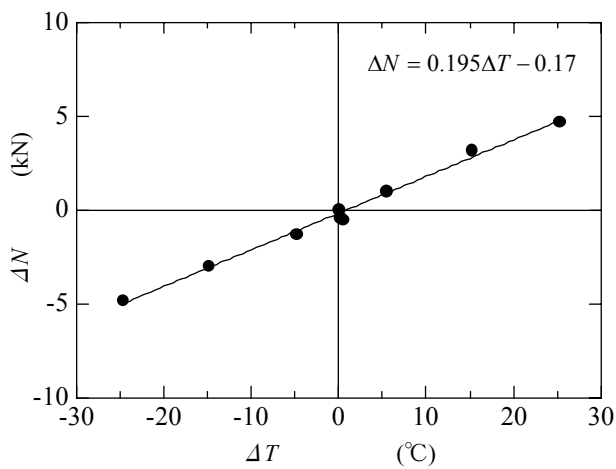


(a) 第1回目

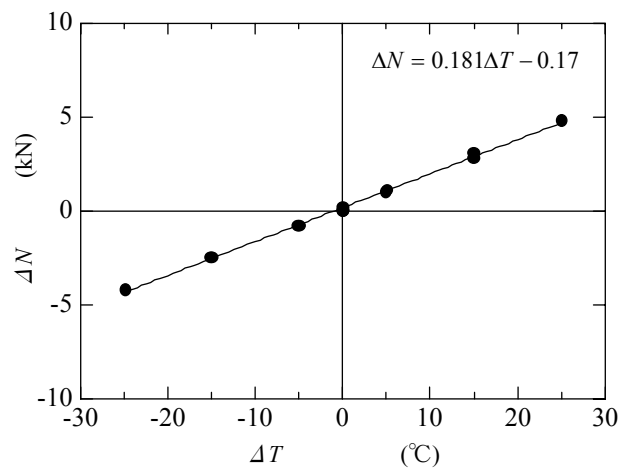


(b) 第2回目

図-4.6 軸力変化と温度差の関係 [試験体5]



(a) 第1回目



(b) 第2回目

図-4.7 軸力変化と温度差の関係 [試験体6]

表-4.2 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	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	0.177	-0.40	0.994	0.165	-0.11	0.999
	2	0.193	-0.69	0.981	0.170	-0.10	0.997
	3	0.197	-0.57	0.978	0.172	-0.11	0.999
A6061P-T6	4	0.187	-0.51	0.988	0.172	-0.02	1.000
	5	0.187	-0.02	0.931	0.138	0.00	0.999
	6	0.195	-0.17	0.992	0.181	-0.17	0.998

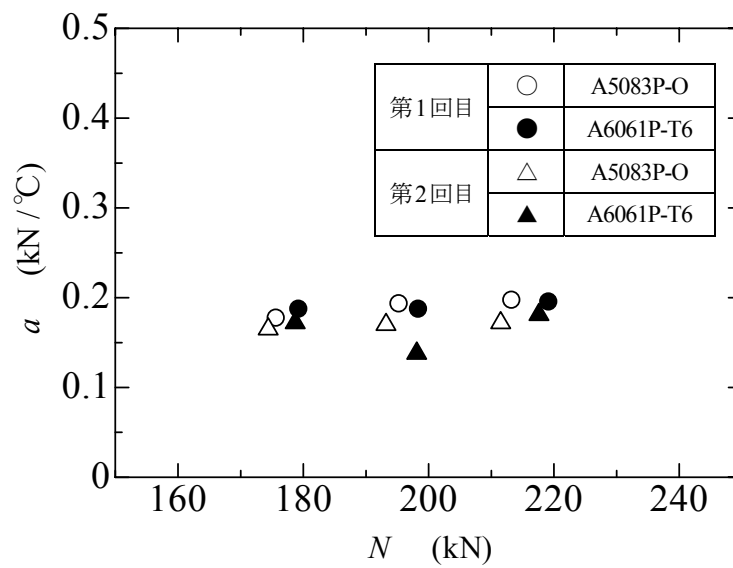


図-4.8 a と N の関係

第5章 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。添接板のボルト頭側表面の写真を図-5.1に示す。図-5.1(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陥没が観察された。そこで接触式の輪郭形状測定機のプローブを、円孔の中心を通して添接板の表面を直線状に移動させて、添接板の変形を測定した。使用した輪郭形状測定器はミットヨ製であり、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-5.1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 $\phi 100\text{mm}$ 付近まで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影響されないが、 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 あり、座金の外形 44mm より小さい。すなわち座金表面全体が添接板に接触しているわけではない。

図-5.1(b)に示すように、A6061P-T6の添接板では、陥没が観察されなかったが、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のバリ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-5.2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係わらず、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を失った領域は、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の試験体ともに陥没は認められなかったが、図-5.2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、それ以外の部分と色が異なっている。

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5.3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に対して、A5083-Oの試験体に関しては、表5.1のボルト頭側とナット側の ϕB の値のうち小さい方の値、A6061-T6の試験体に関しては、表5.2のボルト頭側とナット側の値のうち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に対して、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。

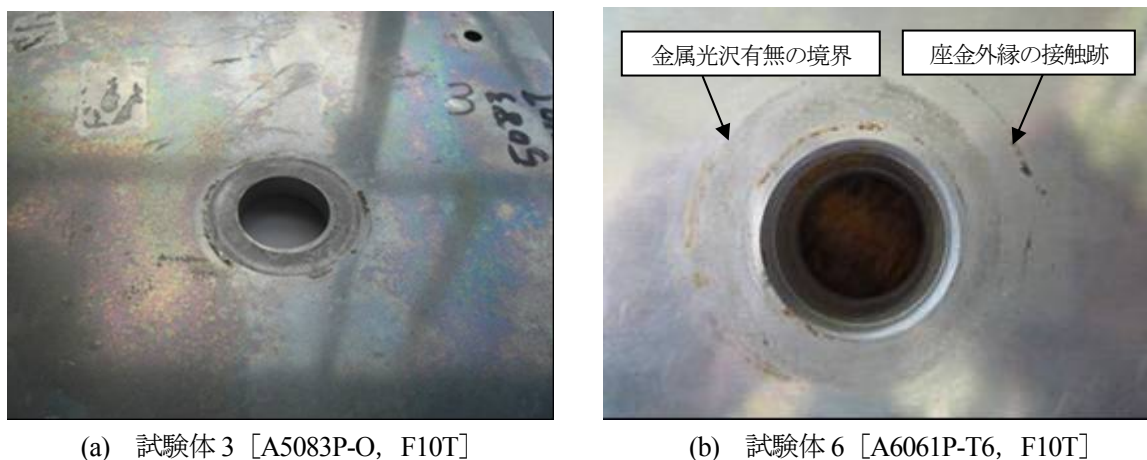


図-5.1 添接板のボルト頭側表面

表-5.1 A5083P-O 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

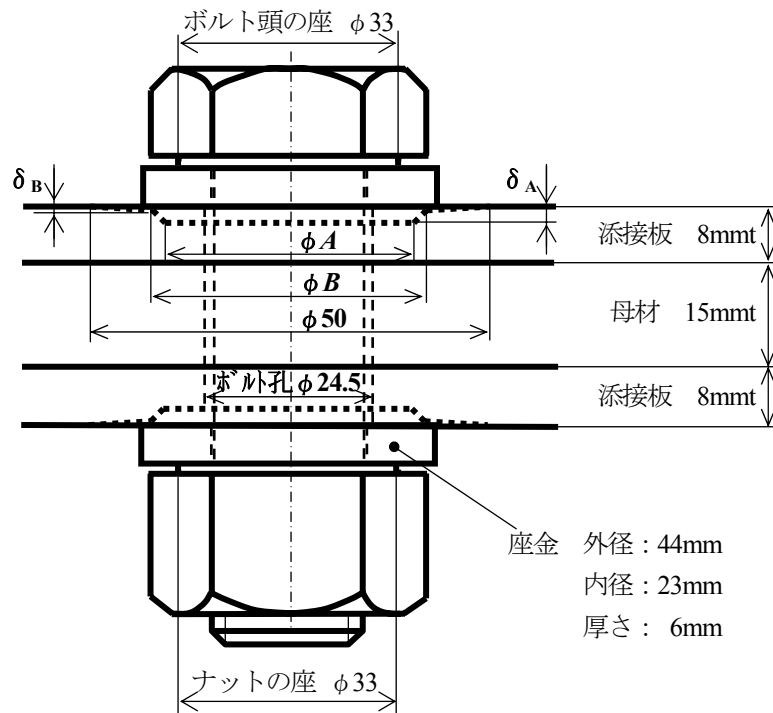
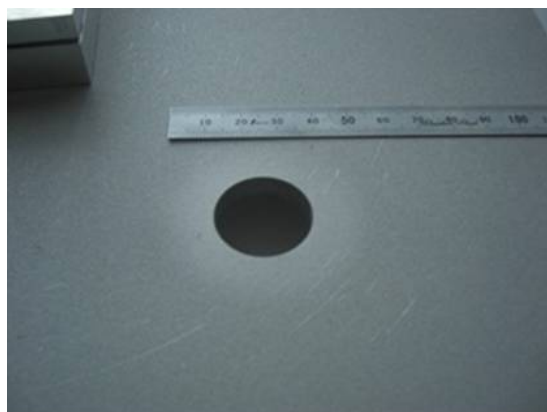


表-5.2 A6061P-T6 の添接板の金属光沢が失われた領域の外径

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



(a) 試験体 3 [A5083P-O, F10T]



(b) 試験体 6 [A6061P-T6, F10T]

図-5.2 添接板のブラスト表面 [ボルト頭側]

表-5.3 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

表-5.3 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、A5083P-O の添接板の 0.2%耐力 146 MPa (表-3.1 参照)をはるかに超える。したがって、A5083P-O の試験体では、座金直下の添接板に陥没が生じた。他方、A6061P-T6 の試験体では、平均接触面圧が 256MPa～303MPa であり、A6061P-T6 の添接板の 0.2%耐力 311 MPa (表-3.1 参照)を超えない。したがって、A6061P-T6 の試験体では、座金直下の添接板に陥没が生じなかった。

A5083P-O の試験体では、添接板と母材との平均接触面圧が添接板および母材の 0.2%耐力 (表-3.1 参照) 程度であり、A6061P-T6 の試験体では、それが添接板および母材の 0.2%耐力 (表-3.1 参照) よりはるかに小さい。したがって、添接板と母材との接触部には、A5083P-O の試験体と A6061P-T6 の試験体ともに陥没が生じなかった。

第7章 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係数試験、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の添接板で締結した 2 面摩擦接合継手である。考慮したアルミニウム合金は A5083P-O と A6061P-T6 である。鋼製高力ボルトの導入初期軸力は、道路橋示方書⁹⁾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 通りである。

本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) **表-2.3**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 Rz20 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は 0.45 を十分超えるすべり係数が確保されている。
- (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陥没が座金直下の添接板に生じるからである。
- (3) 試験結果に基づいて、鋼製高力ボルトの軸力残存率の推定式を与えた (**表-3.6** 参照)。
- (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) 鋼製高力ボルトの締結によって、A5083P-O の添接板の座金直下に円形の陥没が生じる。陥没の直径は初期導入軸力の大きさによって変わらないが、陥没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 (**表-5.1** 参照)。A6061P-T6 の添接板に陥没は生じないが、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変わらない (**表-5.2** 参照)。A5083P-O の添接板の陥没の直径および 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 より小さいので、座金表面全体が添接板に接触していない。
- (6) A5083P-O の添接板の座金直下に陥没が発生した原因は、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 (**表-5.3, 3.1** 参照)。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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，pp39-50，2003.
- 4) The Aluminum Association: Aluminum design manual, 2005.
- 5) The Research Council on Structural Connections: Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, 2004.
- 6) Eurocode 9: Design of aluminium structures—Part 1-1: General rules—General rules and rules for buildings, 1999.
- 7) pr ENV 1993-1: Eurocode 3, Design of steel structures—Part 1 General rules and rules for buildings, 1993.
- 8) ISO 1072-1: Steel structures—Part 1 Materials and design, 1997.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，II 鋼橋編，2002.
- 10) 日本橋梁建設協会：高力ボルト施工マニュアル，2007.