

フッ素樹脂コート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

ALST 研究レポート 28

2012 年 9 月

日本軽金属(株)グループ技術センター
萩澤亘保, 長尾隆史

大阪大学大学院工学研究科
大倉一郎

概要

本研究では、最初にフッ素樹脂コート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ボルト軸力低下試験により、ボルト軸力と経過時間の関係を明らかにする。次に、フッ素樹脂コート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を実施し、同継手のすべり係数を明らかにする。最後に、フッ素樹脂コート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を求める試験法を提案する。

謝辞

本研究は、日本アルミニウム協会 土木構造物委員会のもとで行われた。委員各位のご協力ならびに有益な助言に対して、感謝の意を表します。

目次

第1章	序論	1
第2章	フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの軸力低下試験	2
2.1	試験片	2
2.2	ボルト軸力の低下	3
第3章	フッ素樹脂コート鋼製高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験	6
3.1	試験片	6
3.2	すべり荷重	7
第4章	フッ素樹脂コート鋼製高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数	10
第5章	フッ素樹脂コート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を求める試験法の提案	12
第6章	結論	18
参考文献		19
付録A	ブラスト処理後の連結板の表面粗さの測定結果	20
付録B	試験片の温度	21
付録C	荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係	22
付録D	荷重と母材・連結板間の相対変位の関係	24

第1章 序論

アルミニウム合金製の大型構造物の現場施工においては、鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手が用いられる。アルミニウム合金部材を鋼製高力ボルトで締結する場合、鋼製高力ボルトとアルミニウム合金板との異種金属接触腐食を防止するために、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案¹⁾およびアルミニウム建築構造設計規準²⁾では、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトを使用することが規定されている。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 は熱処理によってその強度が得られ、焼戻し温度は約 420℃である。溶融亜鉛めっきは 480℃で実施されるので、溶融亜鉛めっき高力ボルトは、その熱影響により F10T の強度が保証されない場合があるために、F8T として使用することが規定されている。

近年、表面にフッ素樹脂を焼付けた鋼製高力ボルトが開発されている³⁾。このボルトは耐食性に優れ、フッ素樹脂被膜によってアルミニウム合金板と高力ボルトが電氣的に絶縁されるので、ボルト自身の腐食とともに異種金属による接触腐食を防ぐことができる。これまでは、フッ素樹脂の被膜の硬度が低いために摩擦接合用のボルトとして使用されなかったが、高硬度の被膜を有し、摩擦接合用ボルトとしても使用できるものが実用化されている⁴⁾。

フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトは、被膜形成に必要な温度が 150～200℃であるため、フッ素樹脂処理する前と同じボルト等級の軸力の導入が可能である。したがって、F10T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトを使用すれば、F8T として使用される亜鉛めっき鋼製高力ボルトより、ボルト本数を減らすことができる。

フッ素樹脂コートが施されない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ボルト軸力低下と経過時間の関係、温度変化によるボルト軸力の変化、初期導入ボルト軸力とアルミニウム合金板の表面の変形特性の関係が既に明らかにされている⁵⁾。しかし、フッ素樹脂コートが施された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ボルト軸力の低下については未だ明らかにされていない。この場合、アルミニウム合金板のクリープに起因するボルト軸力の低下の他に、ボルト表面のフッ素樹脂皮膜のクリープに起因するボルト軸力の低下を考慮しなければならない。

本研究では、最初にフッ素樹脂コート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ボルト軸力低下試験により、ボルト軸力と経過時間の関係を明らかにする。次に、フッ素樹脂コート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を実施し、同継手のすべり係数を明らかにする。最後に、フッ素樹脂コート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を求める試験法を提案する。

第2章 フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの軸力低下試験

2.1 試験片

図 2.1 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 (F10T) のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトセット (タケコート 1000, 竹中製作所製) で締結された試験片を 2 本製作した。フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトセットのコートは 2 層から成っており、2~5 μm の下地皮膜の上に、30~45 μm の特殊フッ素樹脂塗料が焼き付けられている⁴⁾。板厚 15mm の中央の板は母材、板厚 8mm の両側の 2 枚の板は連結板を想定している。母材と連結板の材質と質別は A6061P-T651 である。これらの化学成分と機械的性質をそれぞれ表 2.1, 2.2 に示す。

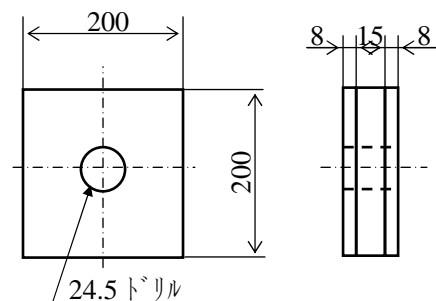


図 2.1 試験片

表 2.1 母材と連結板の化学成分 (ミルシート記載値)

板	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)
母材	0.63	0.43	0.28	0.03	1.03	0.12	0.01	0.03
連結板	0.60	0.41	0.28	0.02	0.99	0.12	0.01	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 母材と連結板の機械的性質

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	325	294	21
		JIS 規格値	295 以上	245 以上	9 以上
連結板	8	ミルシート	319	290	16
		JIS 規格値	295 以上	245 以上	10 以上

アルミニウム建築構造設計規準²⁾においては、すべり係数 0.45 を確保するために、母材と連結板の接触面の片面あるいは両面の表面粗さを Rz 20 μm 以上にしなければならないと規定されている。そこで、表 2.3 に示すブラスト条件に従って、2 枚の連結板の、母材に接する面に対してブラスト処理を施した。各試験片のボルト頭側の連結板およびナット側の連結板の表面粗さを表 2.4 に示す。表 2.4 に示す表面粗さは、各面の中央部一個所の測定値である。

表 2.3 連結板のブラスト条件

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 連結板の表面粗さ

試験片	R _Z (μm)	
	ボルト頭側	ナット側
1	31.2	39.1
2	41.7	34.7

M22 のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの等級は F10T で、その首下長さは 70mm である。図 2.2 に示すように、高力ボルトに 2 枚のひずみゲージが貼付された、東京測器研究所製の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。使用したナットは F10、使用した座金は F35 で外径 44mm、内径 23mm、板厚 6mm である。

室温 25°C の状態で、図 2.1 の試験片を高力ボルトで締結した直後から高力ボルトの軸力測定を開始すると同時に、試験片を恒温槽に入れた。各試験片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、温度が 23°C～26°C になるように恒温槽の温度を制御した。

高力ボルトに導入した初期軸力は、一方の試験片に、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 182 kN、他方の試験片に、F10T の設計ボルト軸力 205kN の 10% 増しの 226 kN を目標として与えた。これらの初期導入軸力の識別を容易にするために、182 kN および 226 kN の初期導入軸力をそれぞれ F8T、F10T と呼ぶ。高力ボルトの軸力測定期間は 35 日である。高力ボルトの軸力の測定間隔を表 2.5 に示す。

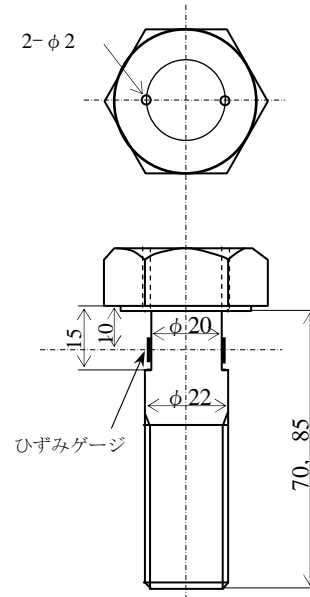


図 2.2 ボルト軸力計

表 2.5 フッ素樹脂コート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	7～35 日
測定間隔	5 秒	1 分	10 分	1 時間	6 時間

2.2 ボルト軸力の低下

フッ素樹脂コート鋼製高力ボルト締結後のボルト軸力 N の測定結果およびボルト軸力 N を初期導入軸力 N_0 で除したボルト軸力残存率 N/N_0 を図 2.3 に示す。同図の推定式については後述する。各図の横軸 t は日を単位とするボルト締結後の経過時間である。ボルトの軸力および軸力残存率は、ボルト締結直後、急激に低下し、その後は穏やかに低下する。ボルト軸力残存率は、初期導入軸力が大きい F10T が F8T より大きい。

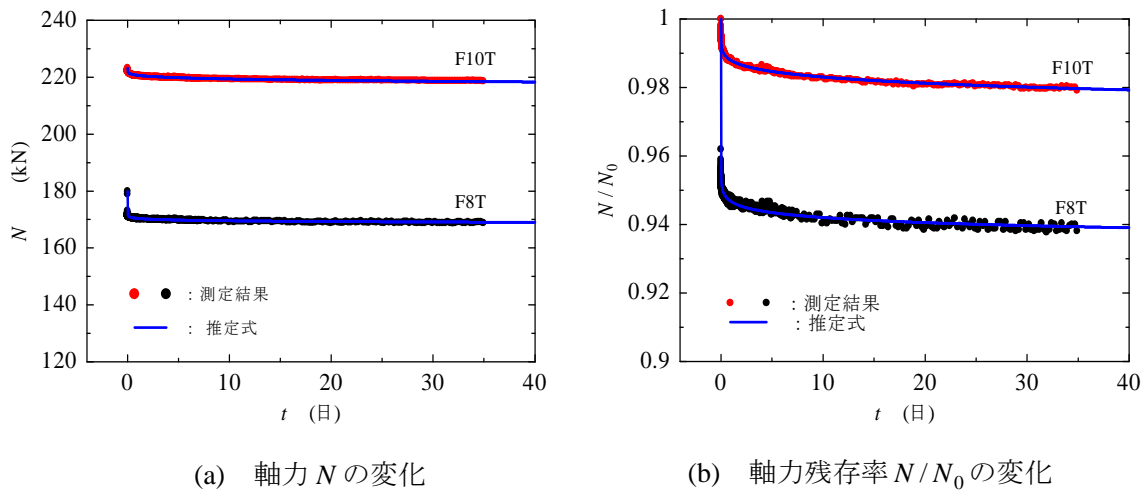


図 2.3 フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの軸力および軸力残存率の変化

フッ素樹脂コートが施されない鋼製高力ボルトの軸力残存率と時間経過の関係が次式で定式化されているので⁵⁾，フッ素樹脂コートが施された，今回の鋼製高力ボルトの軸力残存率と時間経過の関係に対しても次式を仮定する。

$$\frac{N}{N_0} = 10^{-\alpha t^\beta} \quad (2.1)$$

ここに， α ， β ：定数

図 2.3(b)の関係に対して，文献 5) で与えられた方法により求められた α と β の値を表 2.6 に示す。同表には，文献 5) のフッ素樹脂コートが施されない鋼製高力ボルトの結果も記載されている。図 2.3(a)と(b)に示す推定式は，式(2.1)を用いて，フッ素樹脂コートありに対するボルト軸力残存率と経過時間の関係を描いたものである。フッ素樹脂コートありおよびなしの高力ボルトの軸力残存率の推定式を与える，ボルト軸力残存率の比較を図 2.4 に示す。F10T に関して，コートありのボルト軸力残存率がコートなしのそれより大きい。ボルト軸力残存率は，コートなしの方がコートありより大きくなるはずである。これは，コートありの試験片とコートなしの試験片の製作に使用されたアルミニウム合金板および鋼製高力ボルトが別の材料であることによる違いと考えられる。

表 2.6 α と β の値

初期導入軸力	ボルト軸力残存率 N/N_0			
	フッ素樹脂コートあり		フッ素樹脂コートなし	
	α	β	α	β
F8T	0.0238	0.0374	0.01179	0.0525
F10T	0.0053	0.1463	0.01197	0.0649

注記： α と β の値は、時間の単位を日とする場合の値である。

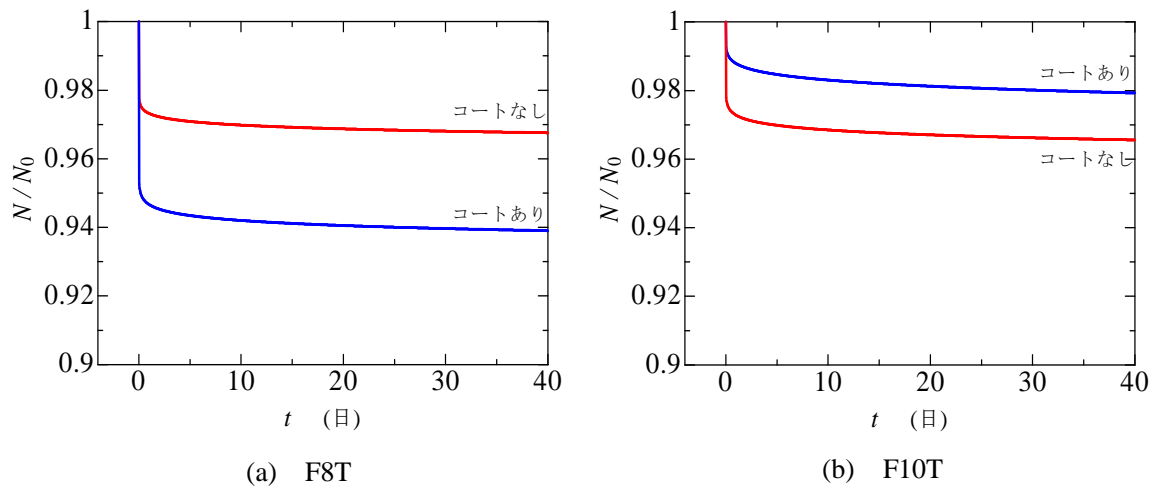


図 2.4 フッ素樹脂コートありおよびなしに対するボルト軸力残存率の比較

第3章 フッ素樹脂コート鋼製高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験

3.1 試験片

すべり試験に用いる試験片の形状と種類をそれぞれ図 3.1, 表 3.1 に示す. 試験片は D と E の 2 種類であり, 各 5 本作製した. 試験片 D には F8T 相当のボルト軸力, 試験片 E には F10T 相当のボルト軸力を与えた. 使用したフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトは, M20 (F10T) である. 試験片の母材と連結板に用いられた材料は文献 7) と同じ材料 (A6061P-T651) であり, その形状と寸法も, 同文献で使用された試験片と同じである. 母材に接する連結板表面へのブラスト条件も同文献と同じであり, ブラスト後の連結板の表面粗さは $25.1 \sim 39.8 \mu\text{m Rz}$ であった (付録 A 参照). 試験片の片側を試験側, 反対側を固定側とし, 設計ボルト軸力 N_d の 10% 増しの軸力を初期ボルト導入軸力 N_0 として, 試験側に与えた. 固定側に対しては, 設計ボルト軸力 N_d の 20% 増しの軸力を初期ボルト導入軸力として与えた.

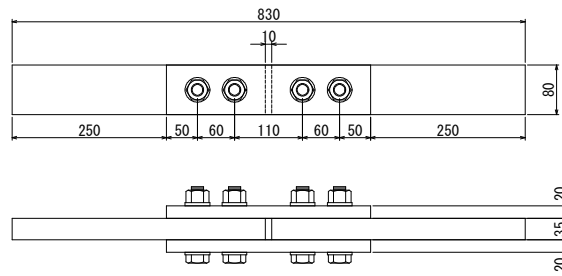


図 3.1 試験片

表 3.1 試験片の種類

試験片	ボルト軸力	設計ボルト軸力 N_d (kN)	初期ボルト導入軸力 N_0 (kN)
D	F8T 相当	133	146
E	F10T 相当	165	182

フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトのトルク係数についても文献 7) と同様の方法で測定した. 得られたトルク係数を表 3.2 に示す. トルク係数のばらつきは小さく, 道路橋示方書⁶⁾に規定される, ボルトセットのトルク係数値 $0.110 \sim 0.160$ の範囲内にある.

すべり試験は, 文献 7) の片側 2 本ボルトの方法に従って実施した. 表 2.6 に示すフッ素樹脂コートありに対する α と β の値を式(2.1)に用いて得られるボルト軸力残存率は, F8T に対してボルト締結後 33 日から 50 日の間 0.939 で変化せず, F10T に対してボルト締結後 27 日から 37 日の間 0.980 で変化しない. したがって, F8T 相当のボルト軸力が導入される

試験片 D に対してボルト締結後 33 日目と 36 日目，F10T 相当のボルト軸力が導入される試験片 E に対してボルト締結後 34 日目にすべり試験を実施した。

ボルト締結後の試験片は，すべり試験が実施される日まで，室温 28℃の部屋で保管した。ボルト締結時とすべり試験時の試験片の温度ならびに両者の温度差を表 3.3 に示す（付録 B 参照）。試験片の温度は，ボルトと連結板の温度の平均値である。

表 3.2 フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトのトルク係数の測定結果

目標軸力 (kN)	No.	締付軸力 (kN)	締付トルク (N・m)	トルク係数	トルク係数 平均値
146	1	147	387	0.132	0.136
	2	147	390	0.133	
	3	146	415	0.142	
	4	146	408	0.140	
	5	146	388	0.133	
182	1	182	527	0.145	0.146
	2	181	515	0.142	
	3	181	555	0.153	
	4	182	520	0.143	
	5	182	530	0.146	

表 3.3 ボルト締結時とすべり試験時の試験片の温度ならびに両者の温度差

試験片		(°C)		
		ボルト締結時 T_1 (°C)	すべり試験時 T_2 (°C)	$\Delta T = T_2 - T_1$ (°C)
D	D-1	26.0	27.5	1.5
	D-2	26.0	27.8	1.8
	D-3	26.1	28.0	1.9
	D-4	26.0	28.6	2.6
	D-5	26.1	27.0	0.9
E	E-1	26.3	27.4	1.1
	E-2	26.0	27.5	1.5
	E-3	26.1	27.5	1.4
	E-4	26.1	27.7	1.6
	E-5	26.1	28.1	2.0

3.2 すべり荷重

荷重と，引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係，および荷重と母材・連結板間の相対変位の間を試験片 D-1 と E-1 に対して，それぞれ図 3.2，図 3.3 に示す（各試験片の荷重と，引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係を付録 C，荷重と母材・連結板間の相対変位の間を付録 D に示す）。

図 3.2(a)と 3.3(a)から分かるように，荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係においては，荷重の増加とともに変位差も増加し，荷重が極値に達した後，少し下降し，

その後再び上昇する。この極値を、荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係から得られるすべり荷重と定義し、各試験片の値を表 3.4 に示す。

図 3.2(b) と 3.3(b) から分かるように、荷重と母材・連結板間の相対変位の関係においては、荷重が極値に達した後、相対変位が急増する。この極値を、荷重と母材・連結板間の相対変位の関係から得られるすべり荷重と定義し、各試験片の値を表 3.4 に示す。同表には、すべり荷重に達した時のボルトの頭側とナット側の相対変位の値が示してある。

Eurocode 9⁸⁾では、母材・連結板間の相対変位が 0.15mm に達したときの荷重をすべり荷重と定義している。そこで、ボルト頭側の相対変位とナット側の相対変位のどちらかが 0.15mm に達したときの荷重も表 3.4 に示す。母材・連結板間の相対変位が 0.15mm に達した時のすべり荷重は、荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係から得られるすべり荷重、および荷重と母材・連結板間の相対変位の関係から得られるすべり荷重にほぼ等しい。

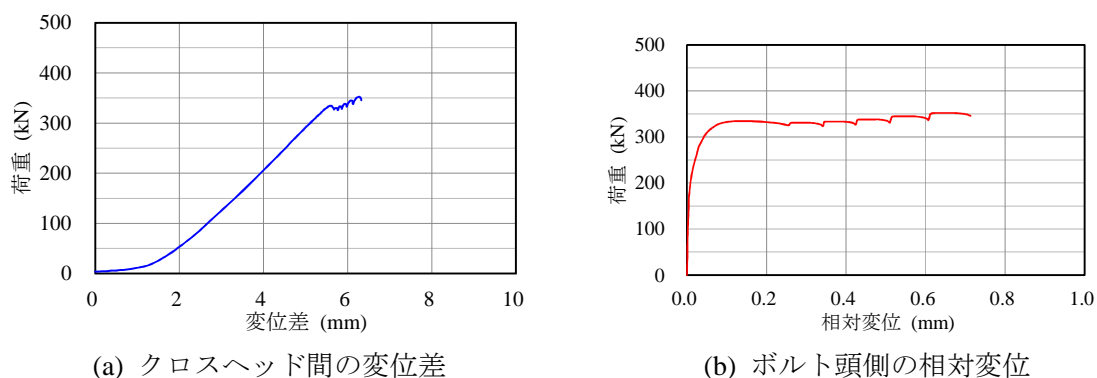


図 3.2 試験片 D-1 のすべり試験

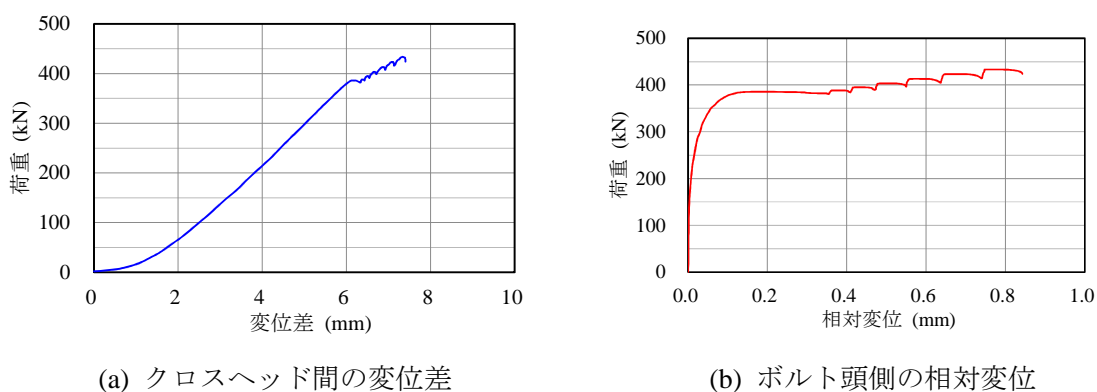


図 3.3 試験片 E-1 のすべり試験

表 3.4 すべり荷重

試験片	クロスヘッド間 の変位差	母材・連結板間の相対変位				
		すべり荷重 (kN)	すべり荷重 (kN)	ボルト頭側変位 (mm)	ナット側変位 (mm)	0.15mm 時の 荷重 (kN)
D	1	333	333	0.12	0.12	333
	2	344	345	0.12	0.20	343
	3	327	328	0.07	0.20	328
	4	320	320	0.11	0.09	320
	5	306	305	0.10	0.15	303
	平均値	326	326	—	—	325
E	1	388	387	0.15	0.15	387
	2	423	422	0.12	0.20	422
	3	400	400	0.10	0.20	400
	4	430	430	0.11	0.20	430
	5	383	383	0.15	0.15	383
	平均値	405	404	—	—	404

第4章 フッ素樹脂コート鋼製高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数

すべり試験時およびボルト締結時の温度差に起因するボルト軸力の変化が次式で与えられる⁷⁾.

$$\Delta N_s = 6.50 \times 10^{-4} A_s \Delta T \quad (4.1)$$

ここで、 ΔN_s はすべり試験時とボルト締結時の温度差に起因するボルト軸力の変化 (kN)、 A_s は高力ボルトの有効断面積 (mm^2)、 ΔT はすべり試験時とボルト締結時の温度差 ($^{\circ}\text{C}$) である。

ΔN_s に対して設計ボルト軸力 N_d の 1%、すなわち $\Delta N_s = N_d/100$ を採用すれば、すべり試験時とボルト締結時の温度差に対する許容値 ΔT_a として次式を得る。

$$\Delta T_a = \pm \frac{N_d}{6.50 \times 10^{-2} A_s} \quad (4.2)$$

M20 の高力ボルト ($A_s=245 \text{ mm}^2$) に対して、試験片 D (F8T, $N_d=133\text{kN}$) と試験片 E (F10T, $N_d=165\text{kN}$) に対する温度差の許容値 ΔT_a は、それぞれ $\pm 8.4^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 10.4^{\circ}\text{C}$ である。表 3.3 から分かるように、各試験片の温度差は、これらの許容値より十分小さい。

すべり試験時とボルト締結時の温度差が許容値以下の場合には、温度変化に起因するボルト軸力の変化を無視することができる。この場合、すべり試験で得られたすべり荷重を用いて、すべり試験以降のすべり荷重は、式(2.1)より次式で与えられる。

$$P = P_1 10^{-\alpha(t^{\beta} - t_1^{\beta})} \quad (t \geq t_1) \quad (4.3)$$

ここに、
 P : すべり試験以降のすべり荷重
 P_1 : すべり試験で得られたすべり荷重
 t_1 : ボルト締結からすべり試験までの時間
 α, β : 表 2.6 に示す値

設計ボルト軸力 N_d に対するフッ素樹脂コート鋼製高力ボルト摩擦接合継手の、ボルト締結から t 時間後のすべり係数 μ は式(4.3)を用いて次式で与えられる。

$$\mu = \frac{P}{mnN_d} = \frac{P_1 10^{-\alpha(t^{\beta} - t_1^{\beta})}}{mnN_d} \quad (4.4)$$

ここに、
 m : 接合面の数 (=2)
 n : 片側ボルト本数 (=2)

例として、本研究で使用した M20 のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトに対するボルト締結 100 年後のすべり係数を計算する。設計ボルト軸力 N_d に対して表 3.1 に示す値、 P_1 に対して表 3.4 に示す、母材・連結板間の相対変位から得たすべり荷重の平均値、 α と β に対して表 2.6 に示す値を式(4.4)に用いて得られる結果を表 4.1 に示す。

表 4.1 フッ素樹脂コート鋼製高力ボルト摩擦接合継手の
100年後のすべり荷重とすべり係数

試験片	P_1 (kN)	P (kN)	μ
D	326	320	0.602
E	404	390	0.591

第5章 フッ素樹脂コート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を求める試験法の提案

文献7)で提案された「アルミニウム合金板摩擦接合継手の摩擦係数を求める試験法の提案」と本研究の成果に基づいて、フッ素樹脂コート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を求める試験法を提案する。

1. 適用範囲

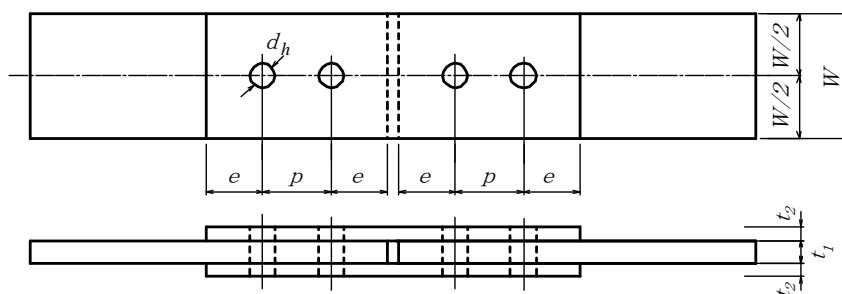
フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数を求める試験法について規定する。

2. 試験片

- (1) F10T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトが用いられた試験片の形状寸法の例を表-1に示す。表-1(a)は、片側のボルト本数が2本の場合に対応し、表-1(b)は、片側のボルト本数が1本の場合に対応する。試験片は2面摩擦接合とし、母材と連結板には、A6061-T6の板あるいは押出型材を用いる。表-1(b)の片側のボルト本数が1本の場合には、試験片の軸線が直線になるようにボルト締結を行う。
- (2) 試験片の本数は5本以上とする。
- (3) 接合面の処理は、実際に使用される継手と同じにする。
- (4) ボルトの締結はトルク法によって行い、所定のボルト軸力（初期導入ボルト軸力）を導入する。

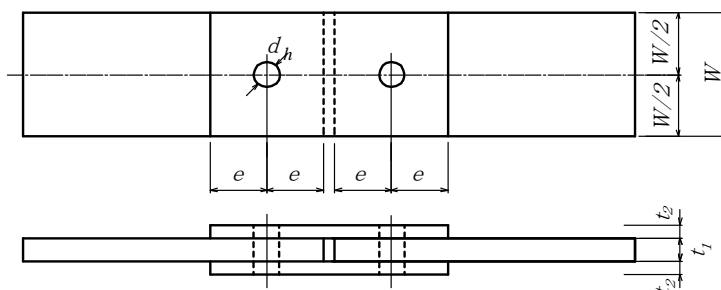
表-1 試験片の形状寸法の例

(a) 片側のボルト本数が2本の場合



ボルトの呼び径 d (mm)	ボルトの孔径 d_h (mm)	母材厚 t_1 (mm)	連結板厚 t_2 (mm)	板幅 W (mm)	e (mm)	p (mm)
12	15	12	8	75	35	40
16	19	20	12	90	40	50
20	23	25	15	110	50	60
22	25	30	20	110	55	70
24	27	35	20	110	60	80

(b) 片側のボルト本数が 1 本の場合



ボルトの呼び径 d (mm)	ボルトの孔径 d_h (mm)	母材厚 t_1 (mm)	連結板厚 t_2 (mm)	板幅 W (mm)	e (mm)
12	15	8	6	60	35
16	19	10	8	90	40
20	23	12	8	110	50
22	25	15	10	110	55
24	27	20	12	110	60

3. 試験方法

- (1) アルミニウム合金板とフッ素樹脂皮膜のクリープに起因する、ボルト締結直後のボルト軸力の急激な低下が終了した後にすべり試験を実施する。
- (2) ボルト締結からすべり試験を実施するまでの時間、およびボルト締結時の試験片の温度とすべり試験実施時の試験片の温度を計測する。
- (3) すべり試験実施時の試験片の温度とボルト締結時の試験片の温度の差を±10℃以内にする。
- (4) 試験片には、引張試験機の片側のクロスヘッドを一定の速度で移動させることにより引張荷重を与える。クロスヘッドの移動速度は2 mm/min以下とする。
- (5) 荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係、荷重と引張試験機内蔵の変位計が示す変位の関係、または荷重と経過時間との関係を記録する。各関係において、最初に荷重が下がる直前の荷重をすべり荷重とする。

4. すべり係数

- (1) 各試験片のすべり係数を次式によって算出する。

$$\mu = \frac{P}{2nN_d} \quad (1)$$

ここに、 μ : すべり係数

P : すべり荷重

n : 片側ボルト本数 (=1 または 2)

N_d : 設計ボルト軸力

- (2) 各試験片に対して算出されたすべり係数の平均値をすべり係数とする。

解説

2. (1)

F10T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの使用本数に対して、F8T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの使用本数は多くなる。したがって後者の高力ボルトが現実に使用されることはないと考えられるので、F8T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトに対する試験片の形状寸法は示してない。

表-1 に示す試験片の形状寸法は、次式で定義されるすべり耐力比 γ が 0.45~0.6 になるように決められている。

$$\gamma = \frac{2\mu_d n N_d}{(W - d_h) t \sigma_{0.2}} \quad (\text{解 1})$$

$$N_d = \xi \sigma_{s0.2} A_s \quad (\text{解 2})$$

ここに、

- μ_d : 設計すべり係数 (=0.45)
- n : 継手の片側のボルト本数 (=2 または 1)
- N_d : 設計ボルト軸力
- d_h : ボルトの孔径
- W : 試験片の幅
- t : 試験片の母材の板厚
- $\sigma_{0.2}$: A6061-T6 の 0.2% 耐力 (=245MPa)
- ξ : F10T の鋼製高力ボルトの 0.2% 耐力を低減させる係数 (=0.75)
- $\sigma_{s0.2}$: F10T の鋼製高力ボルトの 0.2% 耐力 (=900 MPa)
- A_s : ボルトのねじ部の有効断面積

2. (4)

所定のボルト軸力（初期導入ボルト軸力）は、式(解 2)で与えられる設計ボルト軸力、あるいはアルミニウム合金板とフッ素樹脂皮膜のクリープに起因するボルト軸力の低下を見込んで、式(解 2)で与えられる設計ボルト軸力を幾分増加させた値である。

3. (1)

アルミニウム合金板とフッ素樹脂皮膜のクリープに起因するボルト軸力の低下は、ボルト締結直後急激で、その後は非常に穏やかである。フッ素樹脂コートが施されない鋼製高力ボルトの場合、クリープに起因する急激なボルト軸力の低下はボルト締結後 30 時間で終了する⁷⁾。フッ素樹脂コートが施された鋼製高力ボルトの場合、急激なボルト軸力の低下が終了するためにはさらに時間が必要である。この時間は、使用されるフッ素樹脂被膜によって異なる。

3. (3)

すべり試験時とボルト締結時の温度差に起因するボルト軸力の変化に対して，式(解2)で与えられる設計ボルト軸力の1%を許容した場合に対する，すべり試験時とボルト締結時の温度差に対する許容値 ΔT_a (°C) が次式で与えられる。

$$\Delta T_a = \pm \frac{N_d}{6.50 \times 10^{-2} A_s} \quad (\text{解 3})$$

ここに， N_d : 設計ボルト軸力 (kN)

A_s : ボルトの有効断面積 (mm²)

式(解2)を式(解3)に代入し，単位をそろえて次式を得る。

$$\Delta T_a = \pm \frac{\xi \sigma_{s0.2}}{65} \quad (\text{解 4})$$

ξ と $\sigma_{s0.2}$ にそれぞれ 0.75 と 900MPa を代入して， $\Delta T_a = \pm 10.4^\circ\text{C}$ を得る。

3. (4)

500kN 油圧万能試験機で与えられる最低の移動速度が 1~2mm/min であることから，引張試験機のクロスヘッドの移動速度を 2 mm/min 以下としている。

3. (5)

荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係から得られるすべり荷重は，荷重と母材・連結板間の相対変位の関係から得られるすべり荷重にほぼ等しい。したがって，すべり荷重を求める方法として，荷重と母材・連結板間の相対変位の関係から求める方法^{3),8)}に加えて，荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係から求めることができる。これは，荷重と，引張試験機内蔵の変位計が示す変位の関係，または荷重と経過時間の関係からすべり荷重を求めてもよいといえる。

4. (1)

式(1)は，すべり試験が実施された時のすべり係数である。これ以降のすべり係数の予測は次のようになされる。

フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの，ボルト締結後のボルト軸力と経過時間の関係は次の形式で与えられる。

$$\frac{N}{N_0} = 10^{-\alpha t^\beta} \quad (\text{解 5})$$

ここに， N : ボルト締結後のボルト軸力

N_0 : 初期導入ボルト軸力

t : ボルト締結後の経過時間

α, β : フッ素樹脂被膜によって異なる値を採る定数

すべり試験で得られたすべり荷重を用いて、すべり試験以降のすべり荷重は式(解 5)から次式で与えられる。

$$P = P_1 10^{-\alpha(t^\beta - t_1^\beta)} \quad (t \geq t_1) \quad (\text{解 6})$$

ここに、
 P : すべり試験以降のすべり荷重
 P_1 : すべり試験で得られたすべり荷重
 t_1 : ボルト締結からすべり試験までの時間

設計ボルト軸力 N_d に対するフッ素樹脂コート鋼製高力ボルト摩擦接合継手の、ボルト締結から t 時間後のすべり係数 μ は式(解 6)を用いて次式で与えられる。

$$\mu = \frac{P}{2nN_d} = \frac{P_1 10^{-\alpha(t^\beta - t_1^\beta)}}{2nN_d} \quad (\text{解 7})$$

ここに、 n : ボルト本数 (=2 または 1)

第6章 結論

本研究では、フッ素樹脂コート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ボルト軸力低下試験とすべり試験を実施し、次の結論を得た。

- (1) フッ素樹脂コート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ボルト軸力残存率と経過時間の関係は式(2.1)の形式で与えられる。
- (2) 荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係から得られるすべり荷重は、荷重と母材・連結板間の相対変位の関係から得られるすべり荷重にほぼ等しい。したがって、すべり荷重を求める方法として、荷重と母材・連結板間の相対変位の関係から求める方法に加えて、荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係から求めることができる。
- (3) すべり試験で得られたすべり荷重を用いて、すべり試験以降のすべり荷重とすべり係数は、それぞれ式(4.3)と式(4.4)で与えられる。
- (4) 文献7)で提案された「アルミニウム合金板摩擦接合継手の摩擦係数を求める試験法の提案」と本研究の成果に基づいて、フッ素樹脂コート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を求める試験法を提案した。

参考文献

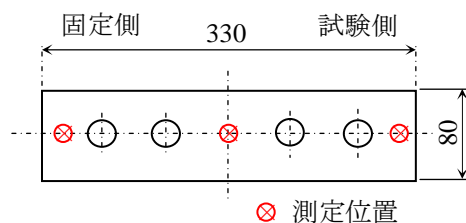
- 1) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案 第1次改訂試案，1998.
- 2) アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造設計規準・同解説，2003.
- 3) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2008.
- 4) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋—設計・製作・施工ガイドライン，2011.
- 5) 大倉一郎，萩澤亘保，長尾隆史：アルミニウム合金板摩擦接合継手における鋼製高力ボルトの軸力低下，構造工学論文集，Vol.56A，pp.827-837，2010.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，2012.
- 7) 萩澤亘保，長尾隆史，大倉一郎：アルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり試験におけるボルト本数が摩擦係数に与える影響，ALST 研究レポート 27，2012.
- 8) Eurocode 9 : Design of aluminium structures—Part 1-1:General rules—General rules and rules for buildings, 2007.

付録 A ブラスト処理後の連結板の表面粗さの測定結果

付表 A1 表面粗さの測定値

Rz (μm)

試験片	ボルト頭側の連結板			ナット側の連結板			平均値
	固定側	中央	試験側	固定側	中央	試験側	
D	D-1	27.2	26.7	32.5	30.4	25.2	—
	D-2	34.6	29.3	28.0	30.2	32.6	
	D-3	31.3	32.4	28.2	26.9	30.0	
	D-4	29.0	35.7	29.0	29.2	33.0	
	D-5	32.4	33.1	29.2	31.3	29.9	
	平均値	30.9	31.4	29.4	29.6	30.1	31.2
E	E-1	33.9	38.1	29.9	30.4	38.4	—
	E-2	30.9	28.4	26.0	30.9	28.7	
	E-3	31.1	33.6	32.0	37.4	33.2	
	E-4	28.4	27.3	30.8	30.5	26.3	
	E-5	26.0	38.2	28.8	32.6	31.2	
	平均値	30.1	33.1	29.5	32.4	31.6	30.6



付録 B 試験片の温度

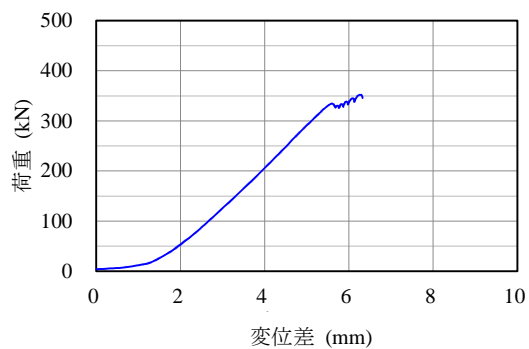
付表 B1 ボルト締結時の温度

試験片		気温 (°C)	ボルト温度 (°C)	連結板温度 (°C)	ボルトと連結板の平均温度 (°C)
D	D-1	26.0	26.1	25.9	26.0
	D-2	26.3	25.9	26.1	26.0
	D-3	26.2	25.9	26.3	26.1
	D-4	26.5	25.9	26.1	26.0
	D-5	26.0	25.9	26.3	26.1
E	E-1	26.0	26.1	26.4	26.3
	E-2	26.1	25.9	26.1	26.0
	E-3	26.5	25.9	26.2	26.1
	E-4	26.6	25.9	26.3	26.1
	E-5	26.3	25.9	26.2	26.1

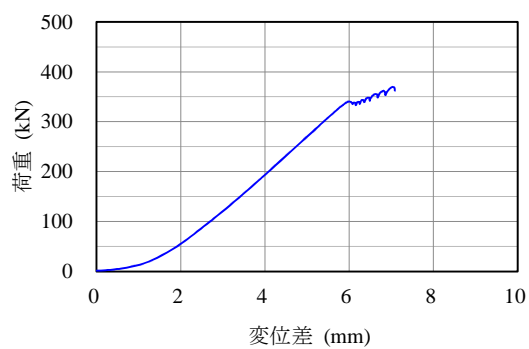
付表 B2 すべり試験時の温度

試験片		気温 (°C)	ボルト温度 (°C)	連結板温度 (°C)	ボルトと連結板の平均温度 (°C)
D	D-1	28.2	27.6	27.4	27.5
	D-2	28.6	27.9	27.7	27.8
	D-3	29.1	28.1	27.9	28.0
	D-4	29.7	28.7	28.5	28.6
	D-5	27.0	27.0	26.9	27.0
E	E-1	27.7	27.5	27.3	27.4
	E-2	27.4	27.5	27.4	27.5
	E-3	27.6	27.5	27.4	27.5
	E-4	28.2	27.8	27.6	27.7
	E-5	28.8	28.2	28.0	28.1

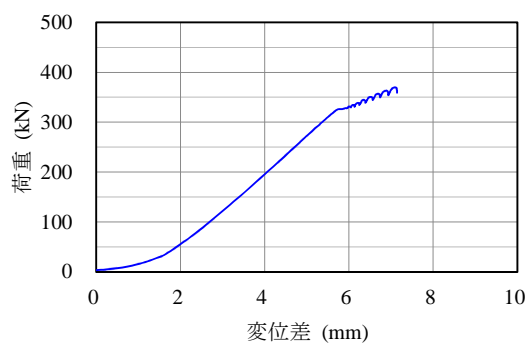
付録 C 荷重と引張試験機のカロスヘッド間の変位差の関係



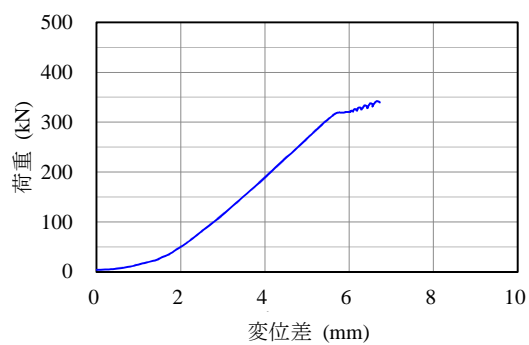
(a) D-1



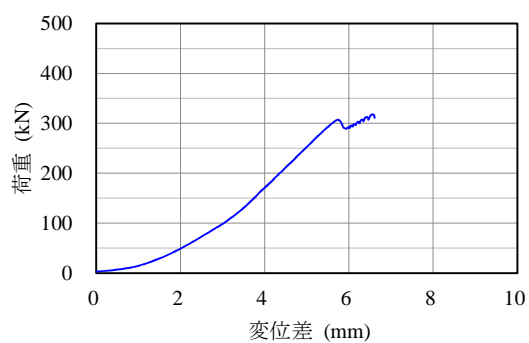
(b) D-2



(c) D-3

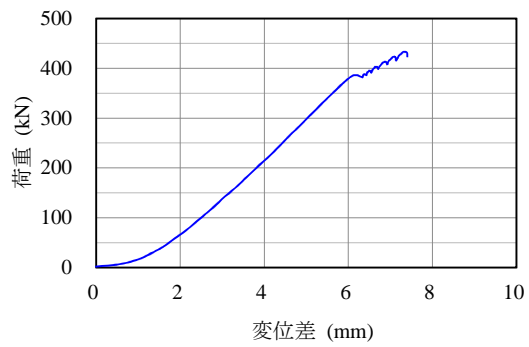


(d) D-4

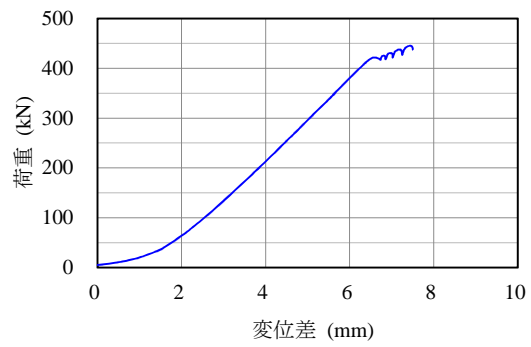


(e) D-5

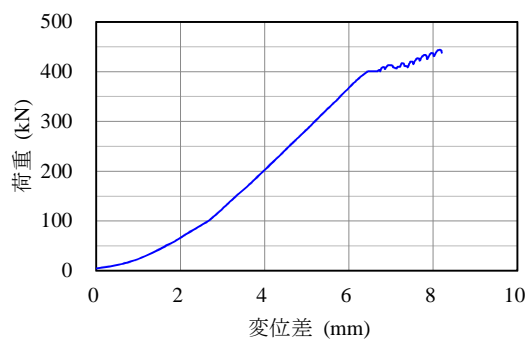
付図 C1 荷重と引張試験機のカロスヘッド間の変位差の関係 (試験片 D)



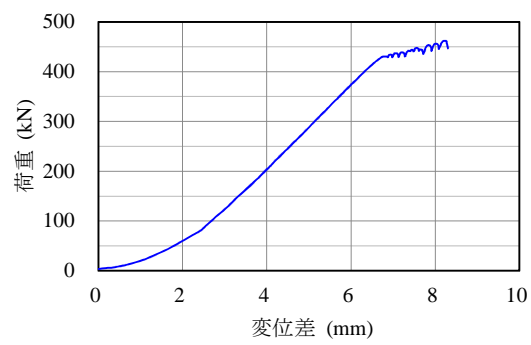
(a) E-1



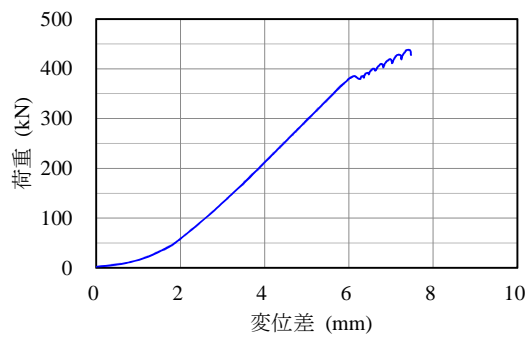
(b) E-2



(c) E-3



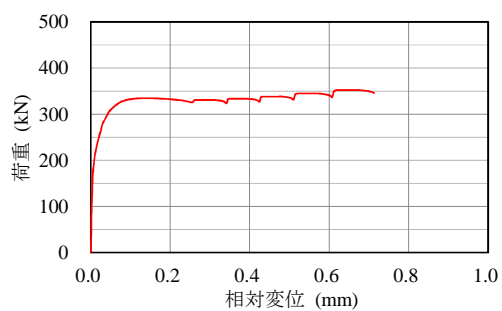
(d) E-4



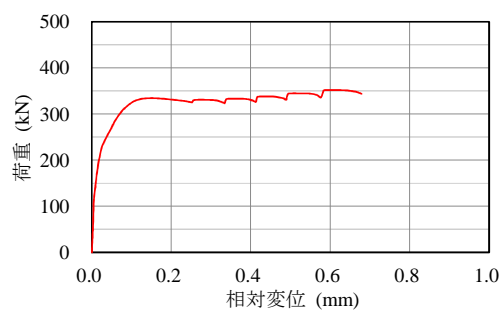
(e) E-5

付図 C2 荷重と引張試験機のカロスヘッド間の変位差の関係 (試験片 E)

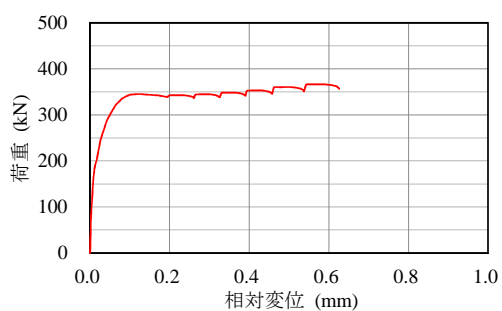
付録D 荷重と母材・連結板間の相対変位の関係



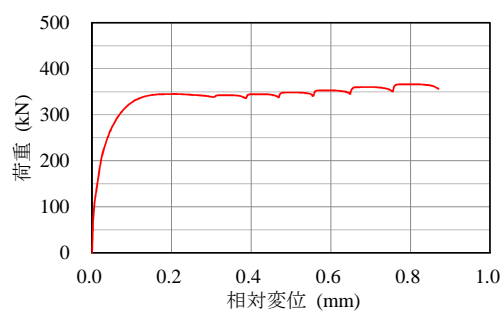
(a) D-1 頭側



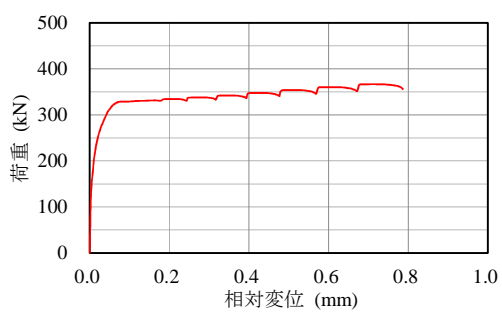
(b) D-1 ナット側



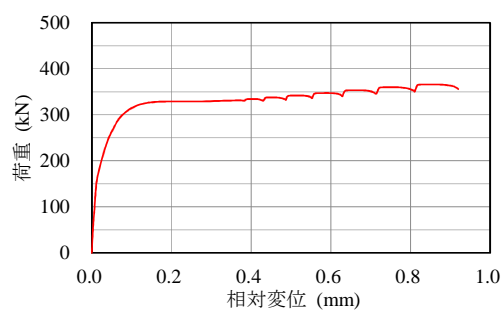
(c) D-2 頭側



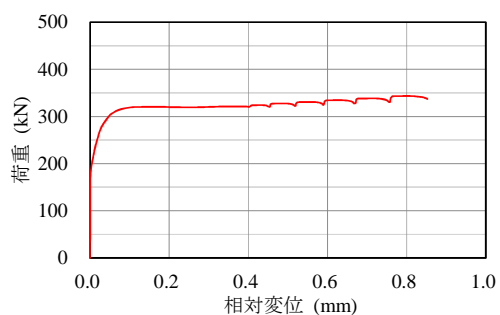
(d) D-2 ナット側



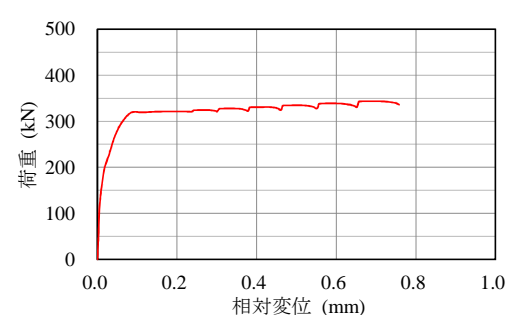
(e) D-3 頭側



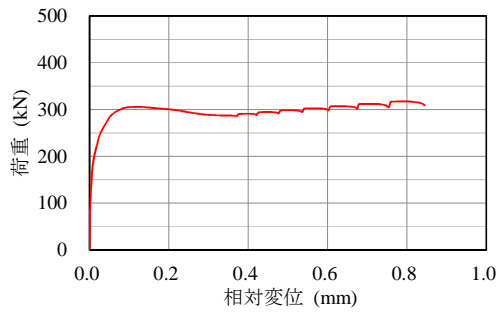
(f) D-3 ナット側



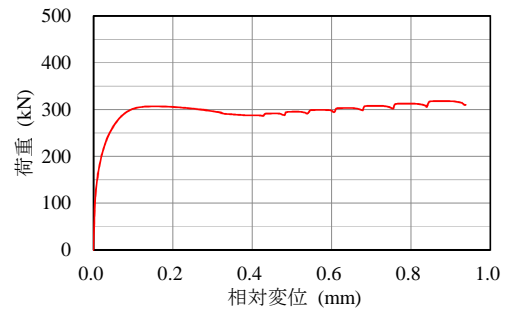
(g) D-4 頭側



(h) D-4 ナット側

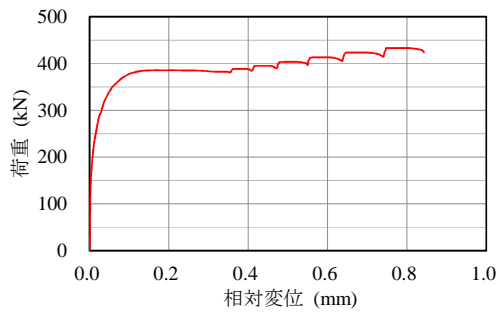


(i) D-5 頭側

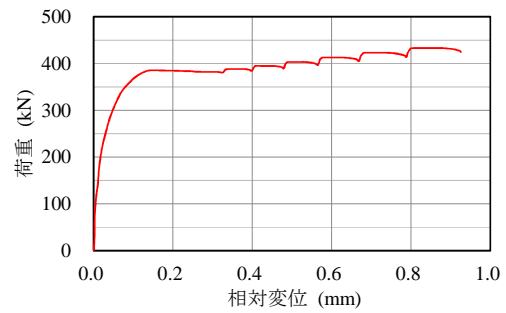


(j) D-5 ナット側

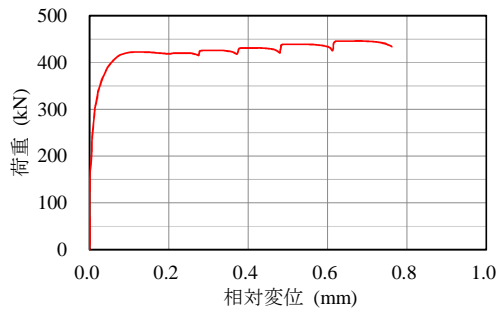
付図 D1 荷重と母材・連結板間の相対変位の関係 (試験片 D)



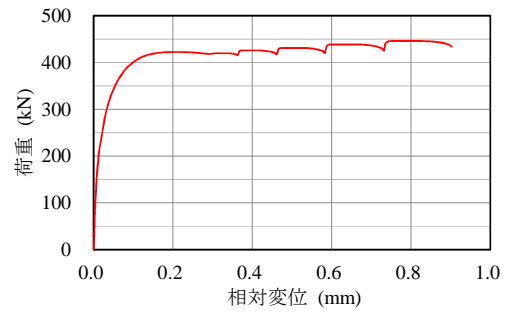
(a) E-1 頭側



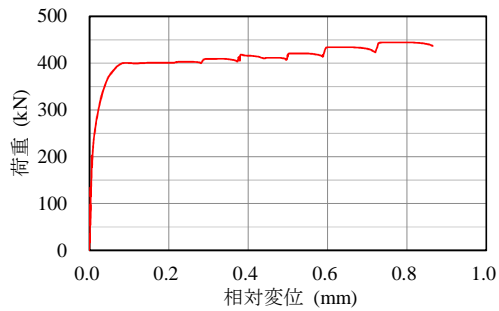
(b) E-1 ナット側



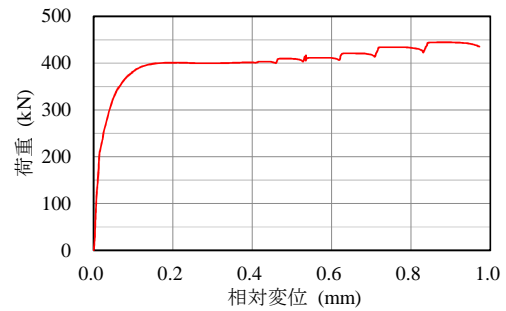
(c) E-2 頭側



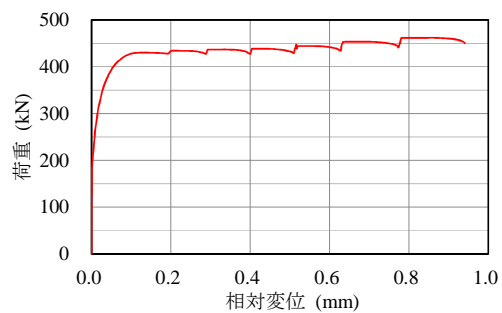
(d) E-2 ナット側



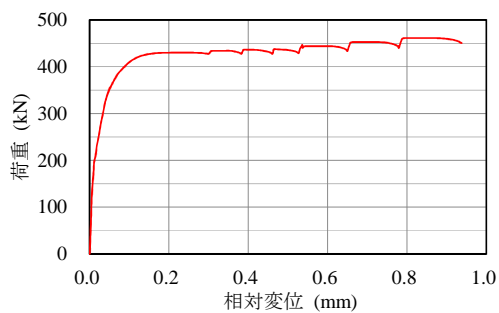
(e) E-3 頭側



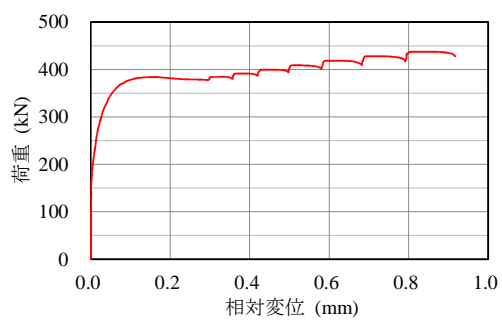
(f) E-3 ナット側



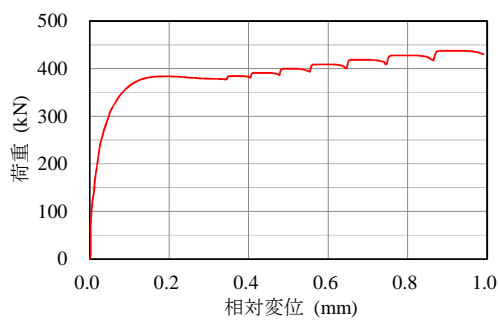
(g) E-4 頭側



(h) E-4 ナット側



(i) E-5 頭側



(j) E-5 ナット側

付図 D2 荷重と母材・連結板間の相対変位の関係 (試験片 E)