

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 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、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において、ボルト本数が摩擦係数に与える影響を明らかにする。本研究の成果に基づいて、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

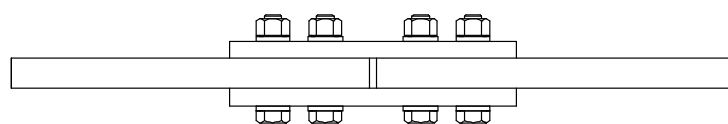
第1章	序論	1
第2章	すべり試験における留意事項	3
	2.1 締結後のボルト軸力の変化	3
	2.2 ボルト軸力残存率	3
	2.3 温度変化によるボルト軸力の変化	4
第3章	試験片	6
第4章	試験方法	9
第5章	試験結果	11
	5.1 トルク係数	11
	5.2 すべり試験時のボルト軸力	11
	5.3 すべり荷重	13
	5.4 摩擦係数	16
第6章	アルミニウム合金板摩擦接合継手の 摩擦係数を求める試験法の提案	18
第7章	結論	22
	参考文献	23
付録A	母材と連結板の応力-ひずみ関係	24
付録B	ブラスト処理後の連結板の表面粗さの測定結果	26
付録C	試験片の温度	27
付録D	荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係	28
付録E	荷重と母材・連結板間の相対変位の関係	31

第 1 章 序論

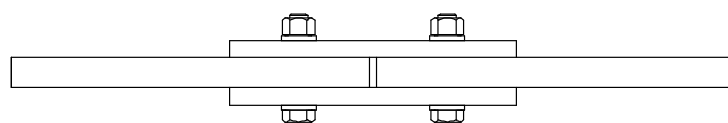
鋼板が鋼製高力ボルトで締結された摩擦接合継手のすべり試験では，図 1.1(a)に示す，片側のボルト本数が 2 本の試験片（片側 2 本ボルト試験片）が用いられ，図 1.1(b)に示す，片側のボルト本数が 1 本の試験片（片側 1 本ボルト試験片）は使用されない¹⁾。これに対する理由は明確ではないが，著者らが幾人かの研究者から聞いた主な理由として次が挙げられる。

- (1) 片側 1 本ボルト試験片の場合，試験片の製作の過程で試験片の軸線が直線にならない場合，試験片がすべる瞬間に，両側の母材が回転する。
- (2) 試験片がすべる瞬間に，連結板の端部が母材からめくれ上がる。
- (3) 高力ボルト継手においては，1 群として 2 本以上のボルトを配置しなければならないと道路橋示方書²⁾に規定されている。

(1) については，第 3 章で述べるように，締結方法を工夫することにより試験片の軸線を直線にすることができる。(2) については，片側 2 本ボルト試験片においても，試験片がすべる瞬間には，連結板の端部は母材からめくれ上がる。(3) については，これは実構造物の高力ボルト継手に対する規定であって，すべり試験と条件が異なる。



(a) 片側 2 本ボルト試験片



(b) 片側 1 本ボルト試験片

図 1.1 試験片

アルミニウム合金板が鋼製高力ボルトで締結された摩擦接合継手のすべり試験に関して，欧州の Eurocode 9³⁾では，片側 2 本ボルト試験片の使用が規定されている。米国の AA 基準⁴⁾では，試験片に対するボルト本数の規定はみられない。我が国の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定および基準・同解説⁵⁾では，アルミニウム合金材 A6061-T6, A6N01-T5, A6N01-T6 の場合，片側 2 本ボルト試験片，A5083P-O

と A5083P-H112 の場合、片側 1 本ボルト試験片の使用が規定されている。後者の場合、片側 1 本ボルト試験片が用いられる理由は、後者の合金の 0.2% 耐力が低いため、片側 2 本ボルト試験片を用いると試験片の板厚が厚くなるために、容量の大きな引張試験機が必要となるためである。

本研究では、片側 1 本ボルト試験片と片側 2 本ボルト試験片を製作し、両者のすべり試験を実施し、両者のすべり荷重を比較することより、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のすべり試験において、片側 1 本ボルト締結と片側 2 本ボルト締結が摩擦係数に与える影響を明らかにする。さらに、本研究の成果に基づいて、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を提案する。

第2章 すべり試験における留意事項

2.1 締結後のボルト軸力の変化

鋼製高力ボルト締結後の軸力は次式で与えられる⁶⁾.

$$N = \zeta N_0 + \Delta N_s \quad (1)$$

$$\zeta = 10^{-a t^b} \quad (2)$$

ここに、 N : 締結後のボルト軸力

N_0 : ボルトの初期導入軸力

ζ : ボルト軸力残存率 (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を考慮するための係数)

t : ボルト締結後の経過日数 (日)

a, b : 定数

ΔN_s : アルミニウム合金と鋼の線膨張係数が異なることに起因する、温度変化に起因するボルト軸力の変化

被締結材が A6061P-T651 に対する a と b の値を表 2.1 に示す⁶⁾.

表 2.1 被締結材が A6061P-T651 に対する a と b の値

ボルト軸力	a	b
F8T 相当	0.01179	0.0525
F10T 相当	0.01197	0.0649

2.2 ボルト軸力残存率

式(2)が与える、ボルト軸力残存率 ζ とボルト締結後の経過日数 t の関係を図 2.1 に示す。

ボルト軸力残存率は、ボルト締結後約 30 時間まで急激に低下し、その後は非常に緩やかに変化する。

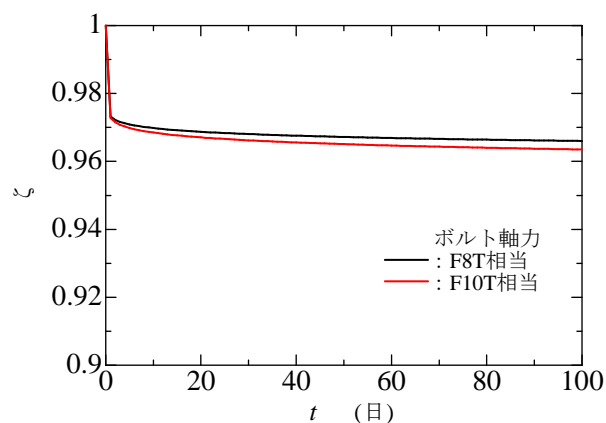


図 2.1 ζ と t の関係

式(2)から計算される，ボルト締結 30 日後および 40 日後のボルト軸力残存率を表 2.2 に示す．ボルト締結 30 日後と 40 日後のボルト軸力残存率は小数点以下 3 桁目まで同じである．したがってボルト締結後 30 日～40 日の間ですべり試験を実施する．

表 2.2 ボルト締結 30 日後と 40 日後のボルト軸力残存率

ボルト軸力	ボルト軸力残存率	
	ボルト締結 30 日後	ボルト締結 40 日後
F8T 相当	0.968	0.968
F10T 相当	0.966	0.966

2.3 温度変化によるボルト軸力の変化

アルミニウム合金と鋼の線膨張係数が異なることによる，温度変化に起因するボルト軸力の変化を推定するためのモデルを図 2.2 に示す．アルミニウム合金棒は被締結材，鋼棒は鋼製高力ボルトの幹に対応し，アルミニウム合金棒と鋼棒の両端は剛棒（高力ボルトの頭とナットを想定）で拘束されている．剛棒間の距離は被締結材の厚さに対応している．温度変化によってアルミニウム合金棒と鋼棒にはそれぞれ軸力が生じ，次式が成立する．

$$\Delta N_a + \Delta N_s = 0 \quad (3)$$

ここに， ΔN_a : 温度変化によってアルミニウム合金棒に生じる軸力

ΔN_s : 温度変化によって鋼棒に生じる軸力

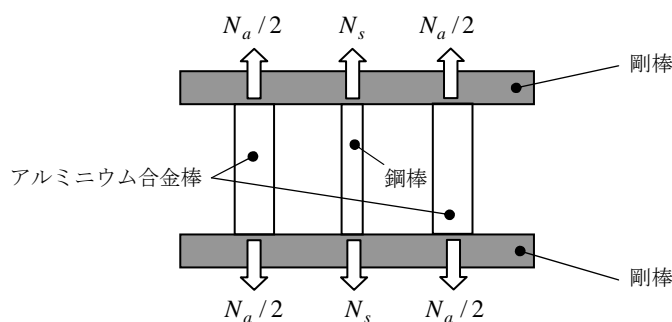


図 2.2 温度変化に対するボルト締結部のモデル

アルミニウム合金棒と鋼棒の両端が剛棒に連結されているので，アルミニウム合金棒に生じるひずみと鋼棒に生じるひずみは等しくなる．すなわち，

$$\frac{\Delta N_a}{E_a A_a} + \alpha_a \Delta T = \frac{\Delta N_s}{E_s A_s} + \alpha_s \Delta T \quad (4)$$

ここに， E_a, E_s : それぞれ，アルミニウム合金および鋼のヤング係数

A_a, A_s : それぞれ，アルミニウム合金棒および鋼棒の有効断面積

α_a, α_s : それぞれ，アルミニウム合金および鋼の線膨張係数

ΔT : アルミニウム合金棒および鋼棒の温度変化 (温度上昇を正とする)
式(4)の各辺の最初のひずみは, 軸力によって生じるひずみであり, 第2項は温度変化によって生じるひずみである.

式(3)と(4)から ΔN_a を消去して次式を得る.

$$\Delta N_s = A_s \frac{E_s}{1 + \frac{E_s A_s}{E_a A_a}} (\alpha_a - \alpha_s) \Delta T \quad (5)$$

この式は次式に変形できる.

$$\frac{E_s}{1 + \frac{E_s A_s}{E_a A_a}} (\alpha_a - \alpha_s) = \frac{\Delta N_s}{A_s \Delta T} \quad (6)$$

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-T651 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 0.197kN/°Cであることが明らかにされている⁶⁾. したがって, 式(6)において, 0.197kN/°C を $\Delta N_s / \Delta T$ に使い, M22 の鋼製高力ボルトのねじ部の有効断面積 303mm² を A_s に用いて⁷⁾, 次の数値を得る.

$$\frac{E_s}{1 + \frac{E_s A_s}{E_a A_a}} (\alpha_a - \alpha_s) = 6.50 \times 10^{-4} \text{ kN/°C/mm}^2 \quad (7)$$

ここで, 式(7)の数値がボルト径に係わらず一定であると仮定すると, 温度変化によるボルト軸力の変化 ΔN_s は次式で与えられる.

$$\Delta N_s = 6.50 \times 10^{-4} A_s \Delta T \quad (8)$$

ここで, 温度変化によるボルト軸力の変化 ΔN_s , 高力ボルトの有効断面積 A_s , 温度変化 ΔT の単位は, それぞれ, kN, mm², °Cである.

第3章 試験片

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 A, B, C の 3 種類であり, 各 5 本作製した. 試験片 A と B は片側ボルト本数が 2, 試験片 C は片側ボルト本数が 1 である. 試験片 A には F8T 相当のボルト軸力, 試験片 B と C には F10T 相当のボルト軸力を与えた. 使用した鋼製高力ボルトは, M20 (F10T) である. 試験片の母材および連結板のボルト孔の直径は 22.5mm である. 表 3.1 の設計ボルト軸力 N_d は次式で与えられる.

$$N_d = \alpha \sigma_{s0.2} A_e \quad (9)$$

ここに, α : 鋼製高力ボルトの 0.2%耐力を低減させる係数

F8T に対して 0.85

F10T に対して 0.75

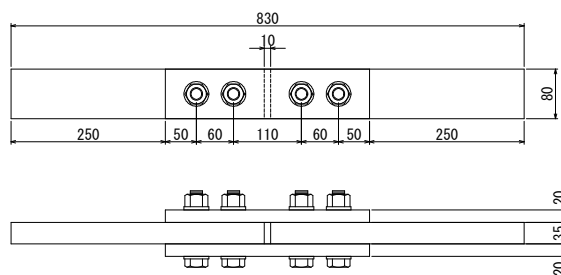
$\sigma_{s0.2}$: 鋼製高力ボルトの 0.2%耐力

F8T に対して 640 MPa

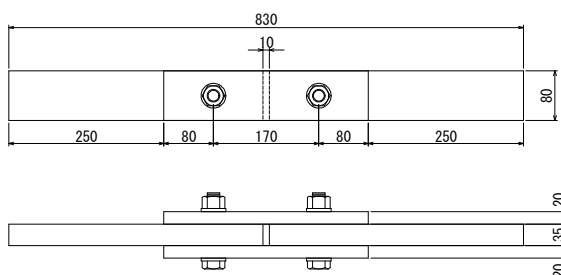
F10T に対して 900 MPa

A_e : ねじ部の有効断面積 (M20 に対して 245 mm²)

試験片の片側を試験側, 反対側を固定側とし, 各試験片の設計ボルト軸力 N_d の 10%増しの軸力を初期ボルト導入軸力 N_0 として, 試験側を与えた. 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.



(a) 試験片 A と B



(b) 試験片 C

図 3.1 試験片

表 3.1 試験片の種類

試験片	片側ボルト本数 (本)	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)	すべり耐力比 β
A	2	F8T 相当	133	146	0.416
B	2	F10T 相当	165	182	0.516
C	1	F10T 相当	165	182	0.258

試験片の母材と連結板の材料は A6061P-T651 である。両者の機械的性質を表 3.2 に示す (応力-ひずみ関係を付録 A に示す)。

表 3.2 母材および連結板の機械的性質 (JIS14A 号引張試験片)

部材	No.	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	ヤング係数 (GPa)
母材	1	307	288	15.9	69.2
	2	303	284	15.7	68.9
	3	306	287	16.0	69.6
	平均値	305	286	15.9	69.2
連結板	1	322	300	16.3	69.6
	2	322	299	17.7	69.9
	3	322	300	16.8	69.6
	平均値	322	300	16.9	69.7

次式で計算される、各試験片のすべり耐力比 β の値を表 3.1 に示す。

$$\beta = \frac{\text{すべり耐力}}{\text{降伏耐力}} = \frac{m n \mu_d N_d}{(B-d)t \sigma_{0.2}} \quad (10)$$

- ここに、
- m : 接合面の数 (=2)
 - n : 片側ボルト本数 (=1 または 2)
 - μ_d : 設計すべり係数 (=0.45)
 - B : 試験片の幅 (=80 mm)
 - d : ボルト孔径 (=22.5 mm)
 - t : 母材の板厚 (=35 mm)
 - $\sigma_{0.2}$: 母材の 0.2%耐力 (表 3.2 の母材の 0.2%耐力の平均値)

各試験片の β の値が 0.7 より小さいので、試験片はすべり先行型の継手である¹⁾。

試験片のボルト締結法を図 3.2 に示す。2本の H 形鋼を、その高さ方向を水平にして、軸方向に間隔を空けて平坦な床に置く。2本の H 形鋼の間に平板を置き、その上に母材と連結板を置き、両者のボルト孔の中心を合わせる。その後、左右の母材の端を H 形鋼にクランプで仮止した後、トルクレンチでボルトを締結する。

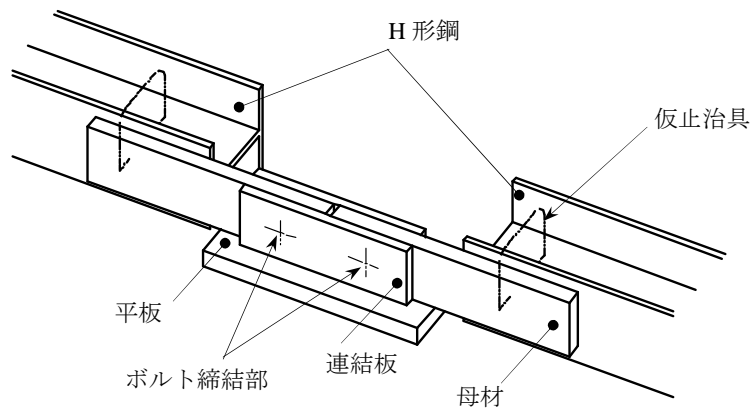


図 3.2 試験片のボルト締結法

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定および基準・同解説⁵⁾において、一方の面または両方の面をブラスト処理により表面粗さ $20\mu\text{mRz}$ 以上の粗面にした場合、すべり係数を0.45にとることができる規定されている。そこで、連結板の母材に接する面に表 3.3 に示すブラスト処理を施した。ブラスト後の連結板の表面粗さは $25.1\sim 39.8\mu\text{mRz}$ であった（付録 B 参照）。

表 3.3 連結板のブラスト条件

ブラスト材	アルミナ#46
使用ノズル	内径 9.9 mm
空気圧力	0.49 MPa
吹付距離	100~250 mm
吹付角度	70~90 度

第4章 試験方法

500kN 油圧万能試験機の上下のクロスヘッド間に試験片を取付け、下側のクロスヘッドを固定し、上側のクロスヘッドを速度 2mm/min で上方に移動させることによって、長手方向に引張荷重を与えた。試験状況を図 4.1 に示す。測定項目は、荷重、試験機のクロスヘッド間の変位差、試験片の試験側の母材と連結板の相対変位(ボルト頭側およびナット側)、気温、ボルトと連結板の各温度である。電気式変位計を取り付けたマグネットスタンドを下側のクロスヘッドに設置し、同変位計の接触子を上側のクロスヘッドに当てることによりクロスヘッド間の変位差を測定した。



(a) 試験片 A (片側 2 本ボルト試験片)



(b) 試験片 C (片側 1 本ボルト試験片)

図 4.1 すべり試験の状況

試験片 A と B においては、図 4.2(a)に示す点 G1 (ナット側連結板) と点 G2 (母材) の相対変位および点 G2 (母材) と点 G3 (ボルト頭側連結板) の相対変位を測定した。点 G1, G2, G3 は、試験片の試験側の 2 本のボルト位置の間である。試験片 C においては、図 4.2(b)に示す点 G4 (ナット側連結板) と点 G5 (母材) の相対変位および点 G6 (母材) と点 G7 (ボルト頭側連結板) の相対変位を測定した。図 4.2 の円は、クリップ型変位計の取付け部を示し、図 4.3 は、それらに対応する写真である。

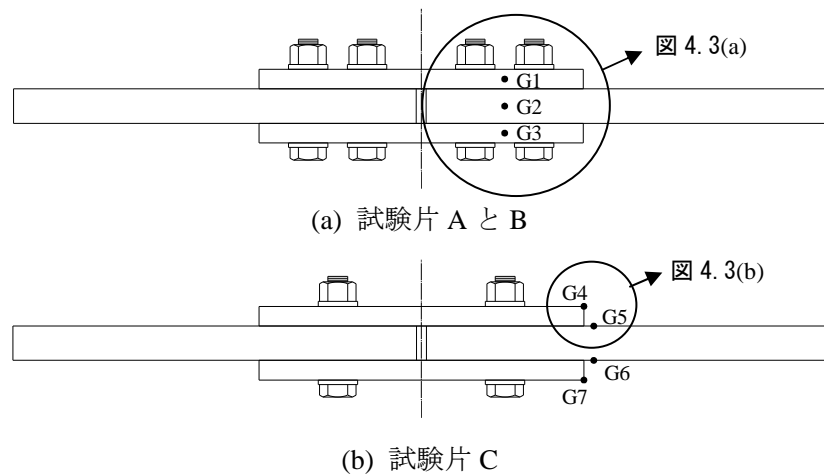


図 4.2 母材と連結板の相対変位を測定する位置

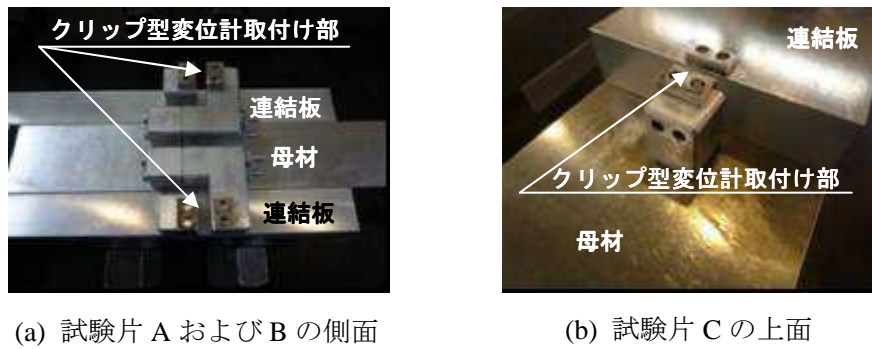


図 4.3 クリップ型変位計の取付け

ボルト締結から、試験片 A, B, C に対して、それぞれ 34 日後、35 日後、38 日後にすべり試験を実施した。

第5章 試験結果

5.1 トルク係数

トルク係数は次式から算出される。

$$k = \frac{T}{dN} \quad (11)$$

ここに、
 k : トルク係数
 T : 締付けトルク
 d : ボルトの呼び径
 N : 締付けボルト軸力

ボルト軸力の測定には、軸力計 TMC-400（前田金属工業）を用いた。鋼製高力ボルトのトルク係数の測定結果を表 5.1 に示す。測定されたトルク係数のばらつきは小さく、道路橋示方書²⁾に規定される、ボルトセットのトルク係数値 0.110～0.160 の範囲内にある。

表 5.1 すべり試験に用いた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	146	370	0.127	0.126
	2	146	373	0.128	
	3	146	365	0.125	
	4	146	368	0.126	
	5	146	361	0.124	
182	1	182	460	0.126	0.126
	2	182	463	0.127	
	3	182	450	0.124	
	4	181	468	0.129	
	5	182	450	0.124	

5.2 すべり試験時のボルト軸力

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 5.2 に示す（付録 C 参照）。ボルト締付け後の試験片は、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。

表 5.2 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)
A	A-1	26.3	26.6	0.3
	A-2	26.4	26.8	0.4
	A-3	26.2	26.9	0.7
	A-4	26.5	26.9	0.4
	A-5	27.0	27.0	0.0
B	B-1	26.7	26.6	-0.1
	B-2	26.9	26.7	-0.2
	B-3	26.8	26.8	0.0
	B-4	26.7	26.9	0.2
	B-5	27.2	27.1	-0.1
C	C-1	26.7	25.0	-0.3
	C-2	26.9	25.0	-1.9
	C-3	26.7	24.7	-2.0
	C-4	26.5	24.8	-1.7
	C-5	26.7	24.9	-1.8

試験片の温度変化によるボルト軸力の変化 ΔN_s は、試験片の製作に使用された M20 の鋼製高力ボルトの有効断面積 245mm^2 を式(8)の A_s に代入して次式で与えられる。

$$\Delta N_s = 0.159 \Delta T \quad (\text{kN}) \quad (12)$$

表 5.2 の ΔT を式(12)のそれに代入することにより得られる各試験片の ΔN_s の値を表 5.3 に示す。同表には、アルミニウム合金板のクリープに起因するボルト軸力が低下した後の残存ボルト軸力 ζN も示してある。残存ボルト軸力 ζN に対して、試験片の温度変化によるボルト軸力の変化 ΔN_s は無視できるほど小さい。これは、今回のすべり試験では、ボルト締結時とすべり試験時の試験片の温度差が小さかったためであり、常に、 ζN に対して ΔN_s が無視できるほど小さいということではないことに注意されたい。

表 5.3 すべり試験時のボルト軸力

試験片		N_0 (kN)	ζ	ζN_0 (kN)	ΔN_s (kN)	N (kN)
A	A-1	146	0.968	141	0.05	141
	A-2				0.06	141
	A-3				0.11	141
	A-4				0.06	141
	A-5				0.00	141
B	B-1	182	0.966	176	-0.02	176
	B-2				-0.03	176
	B-3				0.00	176
	B-4				0.03	176
	B-5				-0.02	176
C	C-1	182	0.966	176	-0.25	176
	C-2				-0.30	176
	C-3				-0.32	175
	C-4				-0.27	176
	C-5				-0.29	176

5.3 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関係を試験片 A-1, B-1, C-1 に対して、それぞれ図 5.1~5.3 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 D、荷重と母材・連結板間の相対変位の関係を付録 E に示す）。母材・連結板間の相対変位は、図 4.2 に示す位置のものである。

図 5.1(a), 図 5.2(a), 図 5.3(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 5.4 に示す。

図 5.1(b), 図 5.2(b), 図 5.3(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 5.4 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も示してある。試験片 A と B では、ナット側の相対変位がボルト頭側の相対変位より全体的に大きい。試験片 C では、ボルト頭側の相対変位とナット側の相対変位は同等である。試験片 C の相対変位が試験片 A と B の相対変位より大きいのは、試験片 C の相対変位には、連結板の端と母材の相対変位の他に母材の伸びが含まれるからである。

第1章で述べたように、Eurocode 9³⁾では、高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験において片側2本ボルト試験片の使用が規定され、2本のボルト位置の中間の位置の母材・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。試験片AとBに対して、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を表5.4に示す。

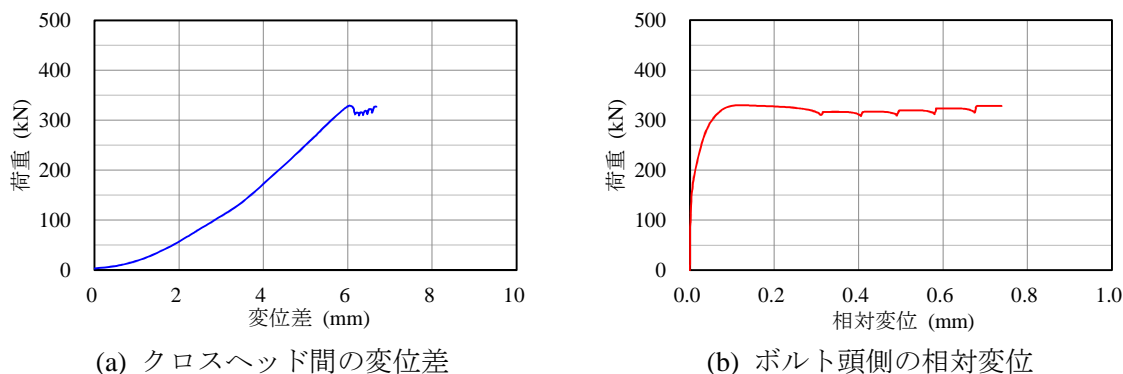


図 5.1 試験片 A-1 の試験結果

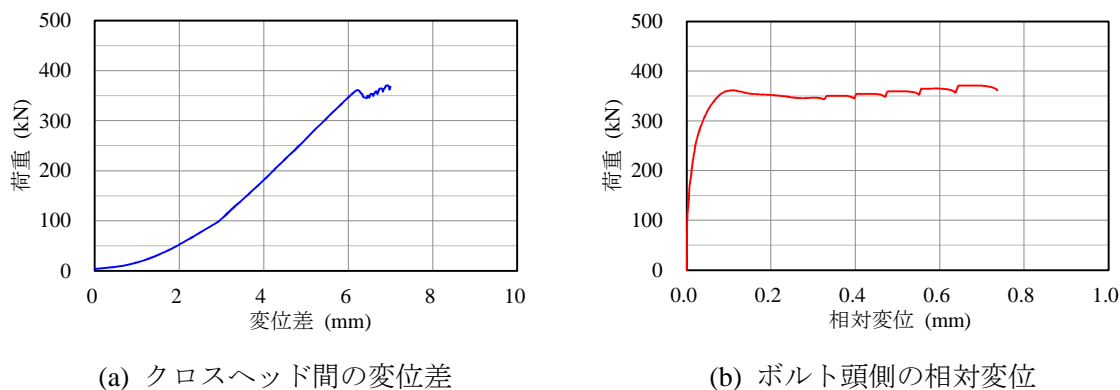


図 5.2 試験片 B-1 の試験結果

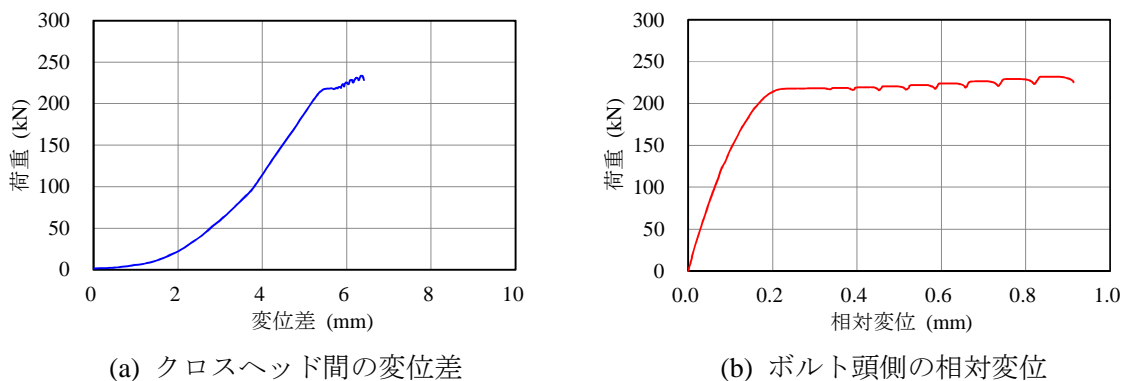


図 5.3 試験片 C-1 の試験結果

表 5.4 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)
A-1	328	328	0.11	0.14	328
A-2	356	359	0.10	—	—
A-3	311	312	0.11	0.11	308
A-4	311	320	0.11	0.15	318
A-5	314	315	0.05	0.15	315
B-1	360	361	0.10	0.17	350
B-2	385	384	0.09	0.13	384
B-3	400	400	0.05	0.11	400
B-4	379	379	0.07	0.14	379
B-5	359	361	0.07	0.14	360
C-1	219	217	0.22	0.25	—
C-2	162	162	0.17	0.16	—
C-3	180	179	0.16	0.22	—
C-4	186	187	0.24	0.20	—
C-5	191	191	0.25	0.20	—

注記 — : クリップ型変位計治具脱落のため計測できず。

表 5.4 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^{1),3)}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。

表 5.4 から分かるように、Eurocode 9³⁾で規定される、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等しいか、若干小さい値を示す。

5.4 摩擦係数

摩擦係数 μ は次式から算出される。

$$\mu = \frac{P}{mnN} \quad (13)$$

ここに、 P : すべり荷重
 m : 接合面の数 (=2)
 n : 片側ボルト本数 (=1 または 2)
 N : すべり試験時のボルト軸力 (表 5.3 参照)

すべり荷重 P に対して、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を用いる。式(13)から算出される、各試験片の摩擦係数 μ の値を表 5.5 に示す。同表には、摩擦係数 μ の平均値、標準偏差、変動係数も記載されている。

表 5.5 に示すように、試験片 B (片側 2 本ボルト試験片) と C (片側 1 本ボルト試験片) の摩擦係数 μ の平均値はほぼ等しい。しかし、試験片 C (片側 1 本ボルト試験片) の摩擦係数 μ の変動係数は、試験片 B (片側 2 本ボルト試験片) のその 2 倍以上あり、ばらつきが大きい。これは、片側 1 本ボルト試験片の場合、試験片の軸線が完全には真直ぐになっていなかったことが主な原因と考えられる。しかし、片側 1 本ボルト試験片の摩擦係数の平均値は片側 2 本ボルト試験片のそれに等しい。したがって、試験片の数を 5 本以上とし、それらのすべり試験から得られる摩擦係数の平均値を使用すれば、すべり試験に片側 1 本ボルト試験片を用いてもよいといえる。

他方、試験片 A (F8T 相当のボルト軸力導入) と B (F10T 相当のボルト軸力導入) において、試験片 A の摩擦係数 μ の平均値が試験片 B のそれより 8.4%大きい。ボルト導入軸力が小さくなると摩擦係数の値が大きくなるのが事実であるのか、単なる誤差であるかについては今後の検討課題である。

表 5.5 摩擦係数 μ

試験片	P (kN)	μ	平均值	標準偏差	変動係数(%)	
A	A-1	328	0.582	0.580	0.0339	5.85
	A-2	359	0.637			
	A-3	312	0.553			
	A-4	320	0.567			
	A-5	315	0.559			
B	B-1	361	0.513	0.535	0.0233	4.35
	B-2	384	0.545			
	B-3	400	0.568			
	B-4	379	0.538			
	B-5	361	0.513			
C	C-1	217	0.616	0.532	0.0568	10.67
	C-2	162	0.460			
	C-3	179	0.509			
	C-4	187	0.531			
	C-5	191	0.543			

第6章 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

前章までの成果に基づいて、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を提案する。

1. 適用範囲

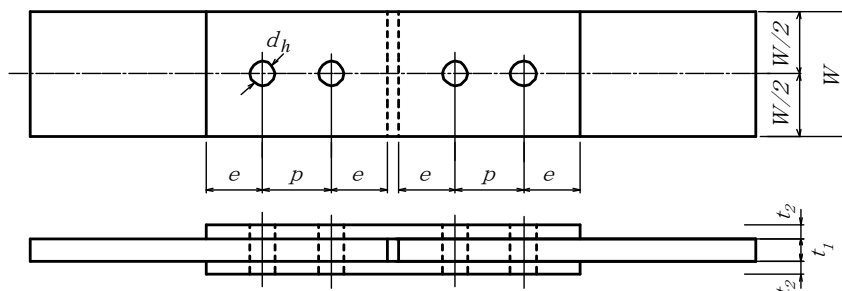
アルミニウム合金板摩擦接合継手の摩擦係数を求める試験法について規定する。

2. 試験片

- (1) 試験片の形状寸法の例を表-1に示す。F10Tの鋼製高力ボルトが締結に用いられている。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の板あるいは押出形材を用いる。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、所定のボルト軸力を導入する（初期導入軸力）。

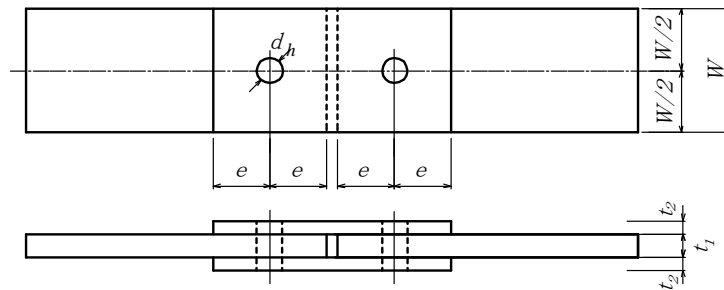
表-1 試験片の形状寸法の例

(a) 片側のボルト本数が2本の場合



呼び径 d (mm)	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



呼び径 d (mm)	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) ボルトの締付け後 30 時間以上経過したのちに試験を実施する。
- (2) ボルト締結からすべり試験を実施するまでの時間、およびボルトを締結したときの試験片の温度とすべり試験を実施したときの試験片の温度を計測する。
- (3) ボルト締結したときの試験片の温度とすべり試験を実施するときの温度があまり変わらないようにする。
- (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. 摩擦係数

- (1) 各試験片の摩擦係数を次式によって算出する。

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

ここに、

- μ : 摩擦係数
- P : すべり荷重
- n : 片側ボルト本数 (=1 または 2)
- N : すべり試験時のボルト軸力

すべり試験時のボルト軸力 N は次式によって算出する。

$$N = 10^{-0.01197t^{0.0649}} N_0 + 6.50 \times 10^{-4} A_s (T_2 - T_1) \quad (2)$$

ここに、

- N_0 : ボルトの初期導入軸力 (kN)
- t : ボルト締結後の経過日数 (日)
- A_s : 高力ボルトの有効断面積 (mm²)
- T_1 と T_2 : それぞれ、ボルト締結時とすべり試験時の試験片の温度 (°C)

- (2) 各試験片に対して算出された摩擦係数の平均値を摩擦係数とする。

解説

2. (1)

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 β が 0.45~0.6 になるように決められている。

$$\beta = \frac{2\mu n N}{(W-d)t\sigma_{0.2}} \quad (\text{解 1})$$

$$N = \alpha \sigma_{s0.2} A_e \quad (\text{解 2})$$

ここに、

- μ : 摩擦係数 (=0.45)
- n : 継手の片側のボルト本数 (=2 または 1)
- N : ボルト軸力
- α : 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_e : ねじ部の有効断面積
- d : ボルト孔径
- 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)

2. (4)

所定のボルト軸力（初期導入軸力）としては、式(解 2)で与えられるボルト軸力、あるいはボルト軸力の低下を見込んで、式(解 2)で与えられるボルト軸力を幾分増加させた値とする。

3. (3)

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. (4)

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^{1),3)}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。

第7章 結論

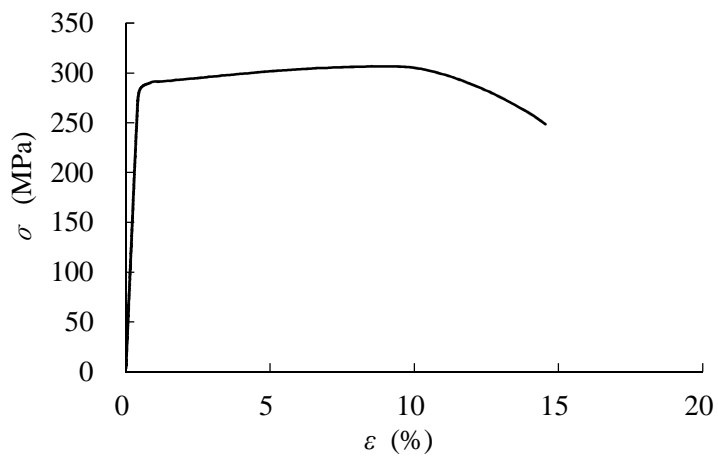
本研究では、片側1本ボルト試験片と片側2本ボルト試験片を製作し、両者のすべり試験を実施し、両者のすべり荷重を比較することより、鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり試験において、片側1本ボルト締結と片側2本ボルト締結が摩擦係数に与える影響を明らかにした。主な結論は次の通りである。

- (1) 片側2本ボルト試験片と片側1本ボルト試験片の摩擦係数の平均値はほぼ等しい。しかし、片側1本ボルト試験片の摩擦係数の変動係数は、片側2本ボルト試験片のそれの2倍以上あり、ばらつきが大きい。これは、片側1本ボルト試験片の場合、試験片の軸線が完全には真直ぐになっていなかったことが主な原因と考えられる。しかし、片側1本ボルト試験片の摩擦係数の平均値は片側2本ボルト試験片のそれに等しい。したがって、試験片の数を5本以上とし、それらのすべり試験から得られる摩擦係数の平均値を使用すれば、すべり試験に片側1本ボルト試験片を用いてもよいといえる。
- (2) 本研究の成果に基づいて、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を提案した。

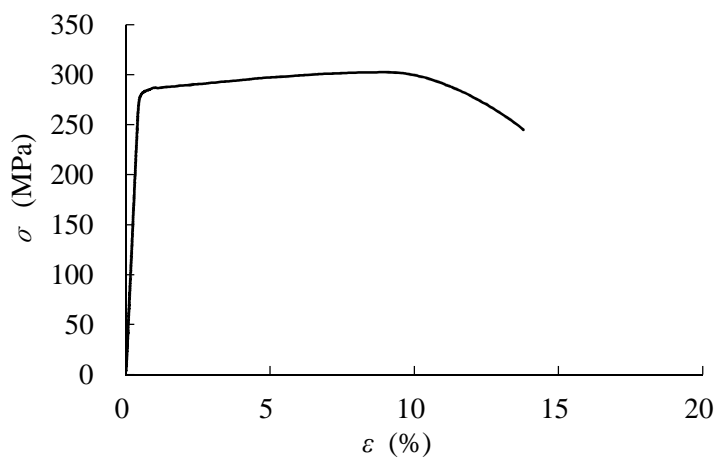
参考文献

- 1) 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.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，2012.
- 3) Eurocode 9 : Design of aluminium structures—Part 1-1:General rules—General rules and rules for buildings, 2007.
- 4) Aluminum Association : Aluminum Design Manual, PART I-A, Specifications for Aluminum Structures - Allowable Stress Design, 2005.
- 5) 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定および基準・同解説，2003.
- 6) 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.
- 7) JIS B 1082：ねじの有効断面積及び座面の負荷面積，2009.

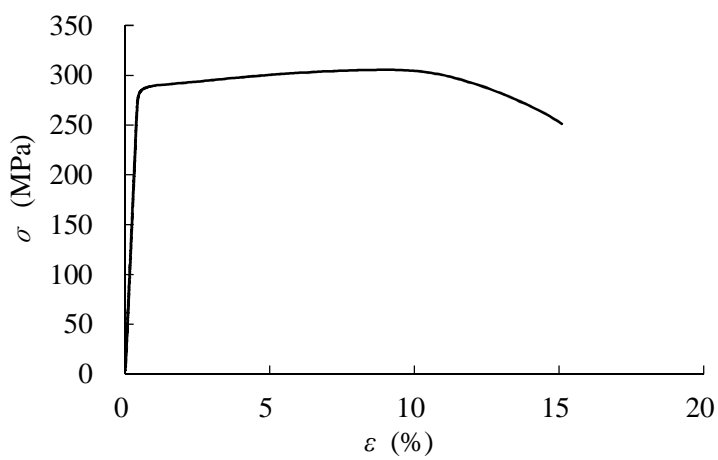
付録 A 母材と連結板の応力-ひずみ関係



(a) No.1

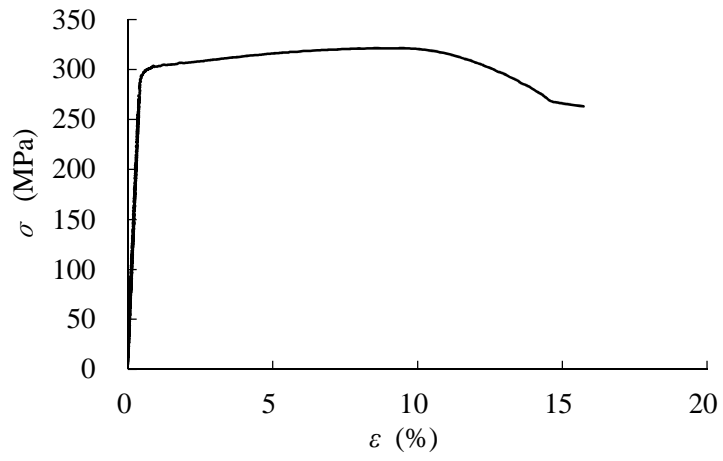


(b) No.2

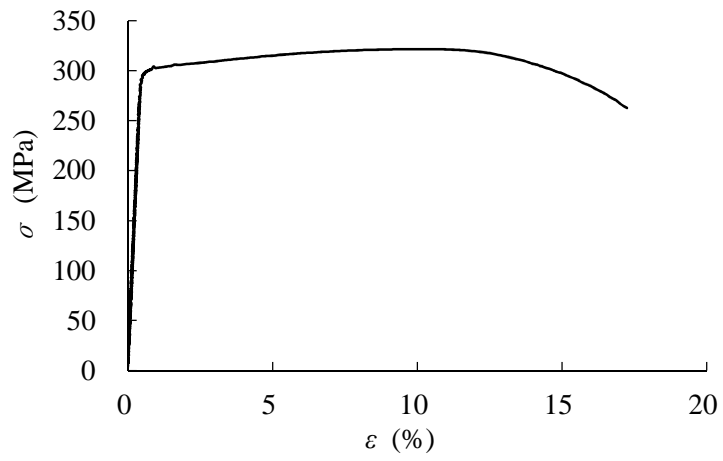


(c) No.3

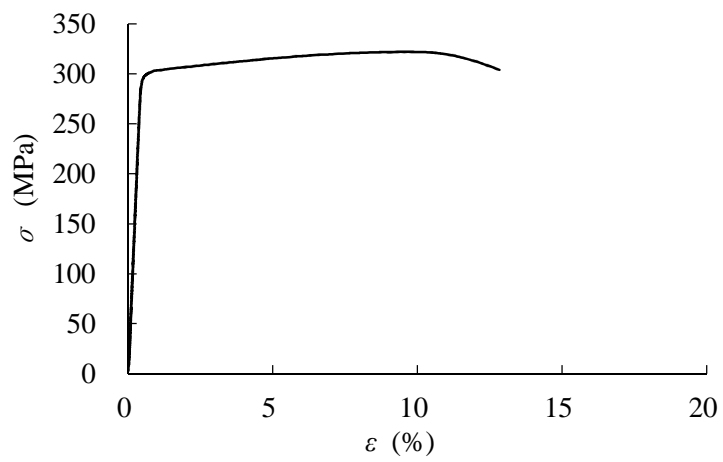
付図 A1 母材の応力-ひずみ関係



(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3

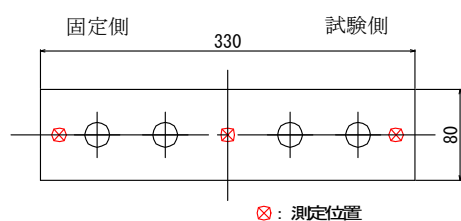
付図 A2 連結板の応力-ひずみ関係

付録 B ブラスト処理後の連結板の表面粗さの測定結果

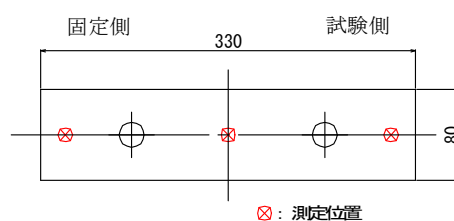
付表 B1 表面粗さの測定値

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	
A	1	34.5	25.1	28.0	32.8	34.0	—
	2	35.8	36.3	32.5	32.9	31.8	
	3	31.4	31.2	32.2	31.5	29.6	
	4	28.3	38.1	37.4	28.6	29.8	
	5	25.7	36.3	33.4	31.6	31.8	
	平均値	31.1	33.4	32.7	31.5	31.4	35.7
B	1	37.4	27.7	32.0	34.9	34.6	—
	2	28.4	32.2	29.2	30.5	32.2	
	3	29.7	31.2	27.1	29.9	25.1	
	4	27.7	30.1	28.7	34.2	38.5	
	5	28.8	28.0	28.9	25.6	27.4	
	平均値	30.4	29.8	29.2	31.0	31.6	28.8
C	1	27.4	33.2	32.6	30.0	31.3	—
	2	33.6	35.4	36.7	38.0	37.3	
	3	35.4	28.1	33.2	32.3	33.4	
	4	30.3	36.1	32.4	34.2	32.9	
	5	35.1	39.2	28.6	35.5	33.8	
	平均値	32.4	34.4	32.7	34.0	33.7	33.8



試験片 A と B



試験片 C

付録 C 試験片の温度

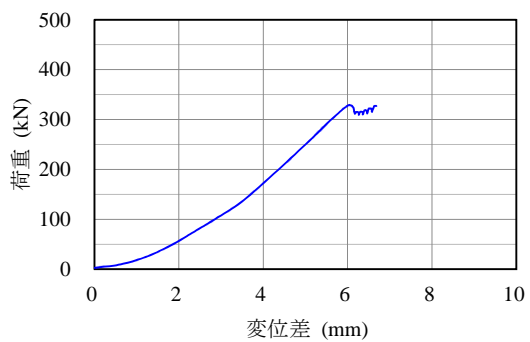
付表 C1 ボルト締結時の温度

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)	
A	A-1	27.9	26.3	26.2	26.3
	A-2	28.3	26.4	26.3	26.4
	A-3	28.7	26.2	26.2	26.2
	A-4	28.6	26.5	26.5	26.5
	A-5	28.5	27.1	26.8	27.0
B	B-1	28.2	26.6	26.8	26.7
	B-2	28.3	26.9	26.9	26.9
	B-3	28.8	26.6	26.9	26.8
	B-4	29.2	26.1	27.3	26.7
	B-5	29.4	27.0	27.4	27.2
C	C-1	29.5	26.9	26.6	26.8
	C-2	28.9	26.9	26.9	26.9
	C-3	28.8	26.9	26.5	26.7
	C-4	29.1	26.5	26.4	26.5
	C-5	28.9	26.8	26.6	26.7

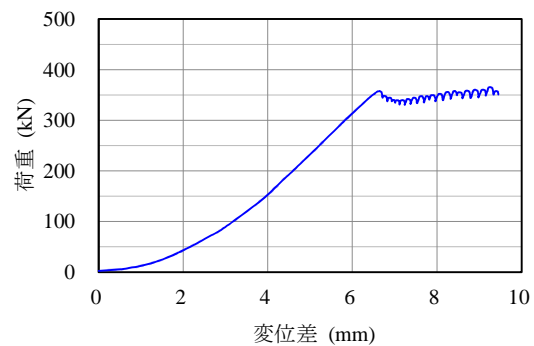
付表 C2 すべり試験時の温度

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)	
A	A-1	26.3	26.6	26.5	26.6
	A-2	27.0	26.8	26.7	26.8
	A-3	27.1	26.9	26.8	26.9
	A-4	27.5	26.9	26.8	26.9
	A-5	26.4	27.0	27.0	27.0
B	B-1	27.1	26.6	26.5	26.6
	B-2	27.4	26.7	26.6	26.7
	B-3	27.2	26.8	26.7	26.8
	B-4	27.5	27.0	26.8	26.9
	B-5	27.4	27.1	27.0	27.1
C	C-1	24.9	25.0	24.9	25.0
	C-2	24.3	25.0	25.0	25.0
	C-3	24.6	24.7	24.6	24.7
	C-4	24.9	24.8	24.7	24.8
	C-5	25.3	25.0	24.8	24.9

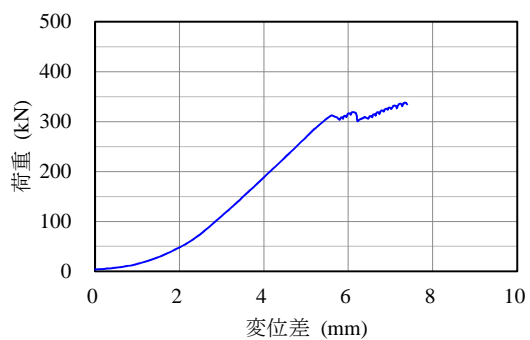
付録 D 荷重と引張試験機のカロスヘッド間の変位差の関係



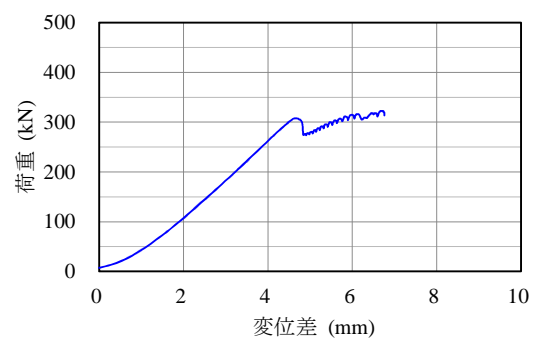
(a) A-1



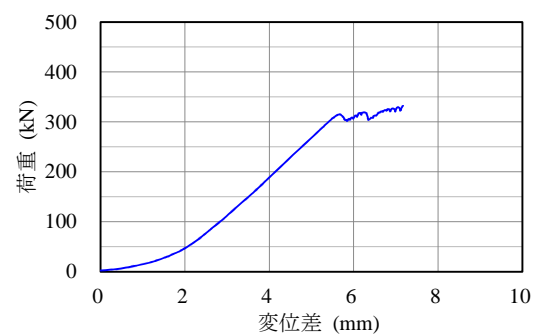
(b) A-2



(c) A-3

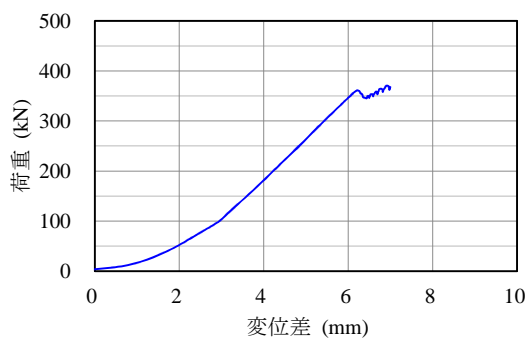


(d) A-4

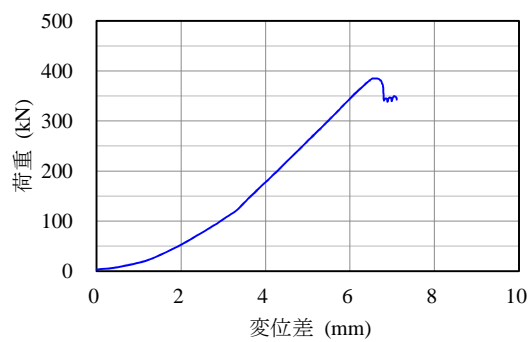


(e) A-5

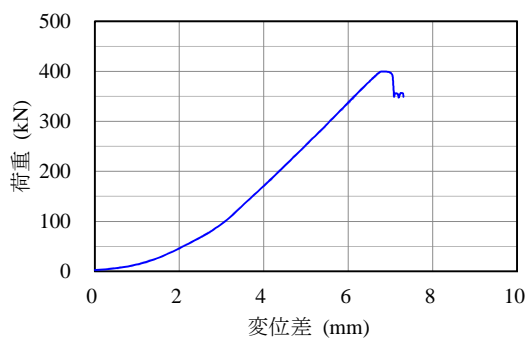
付図 D1 荷重と引張試験機のカロスヘッド間の変位差の関係 (試験片 A)



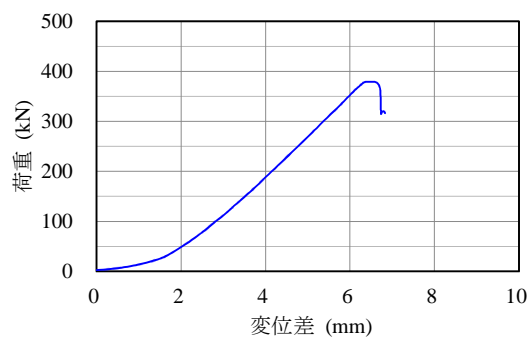
(a) B-1



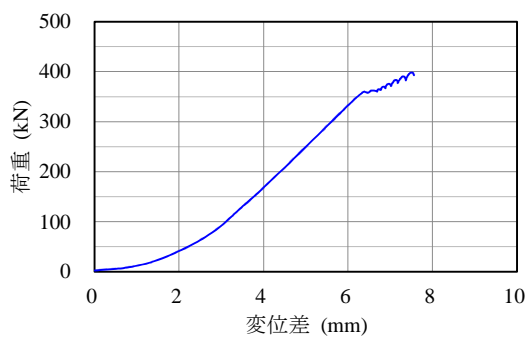
(b) B-2



(c) B-3

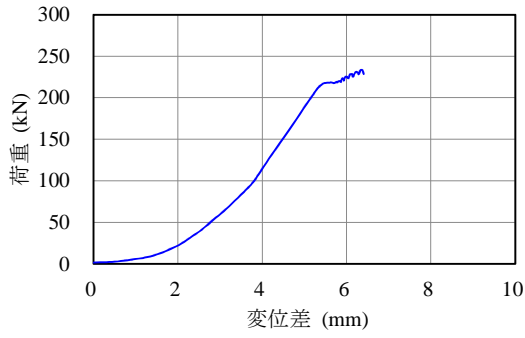


(d) B-4

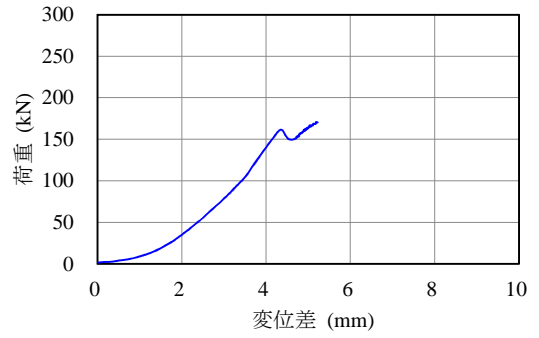


(e) B-5

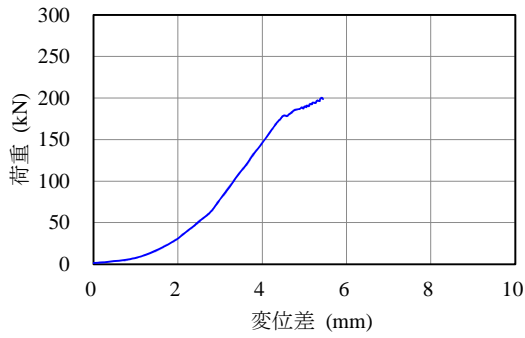
付図 D2 荷重と引張試験機のカロスヘッド間の変位差の関係 (試験片 B)



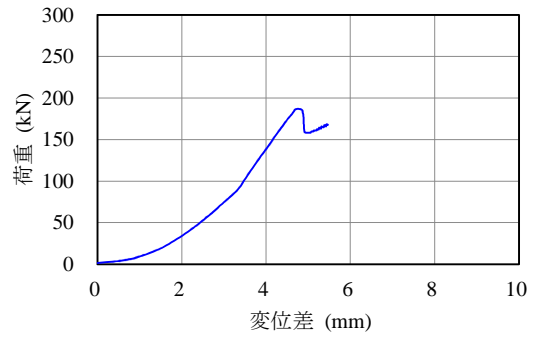
(a) C-1



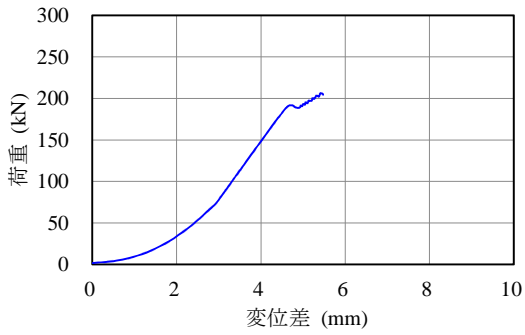
(b) C-2



(c) C-3



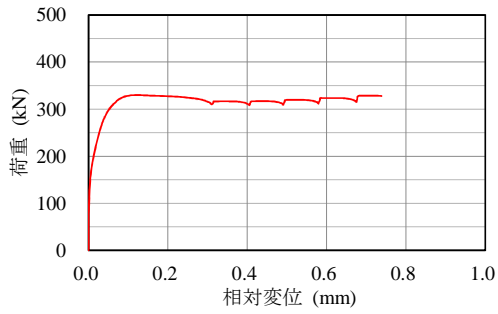
(d) C-4



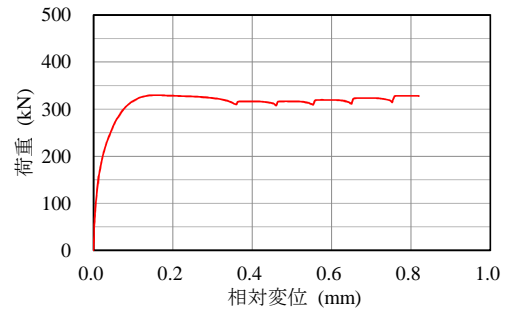
(e) C-5

付図 D3 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 C)

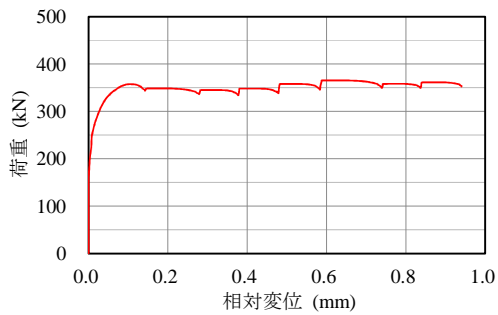
付録 E 荷重と母材・連結板間の相対変位の関係



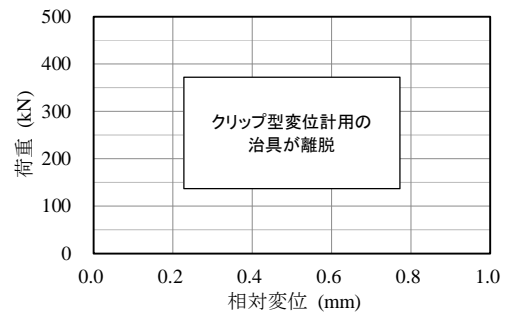
(a) A-1 頭側



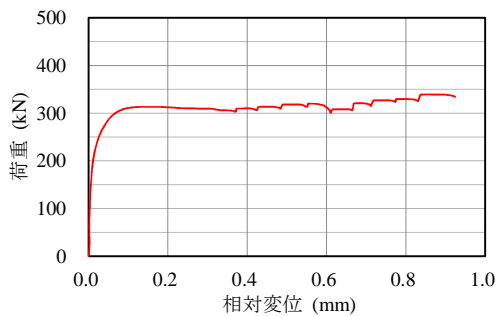
(b) A-1 ナット側



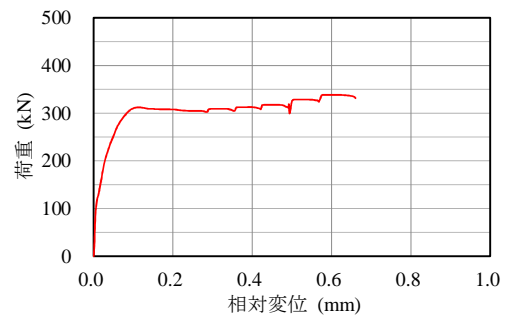
(c) A-2 頭側



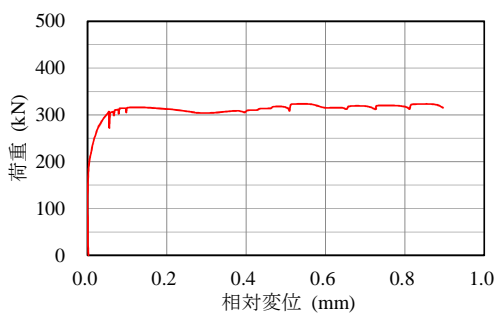
(d) A-2 ナット側



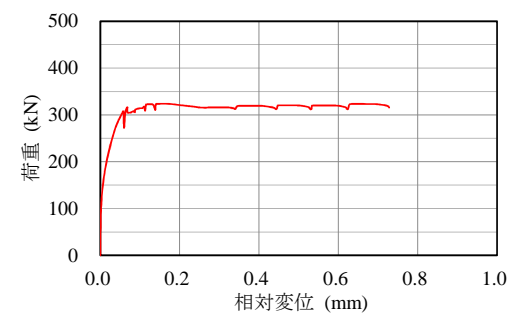
(e) A-3 頭側



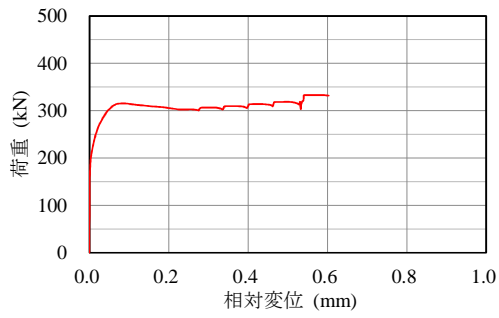
(f) A-3 ナット側



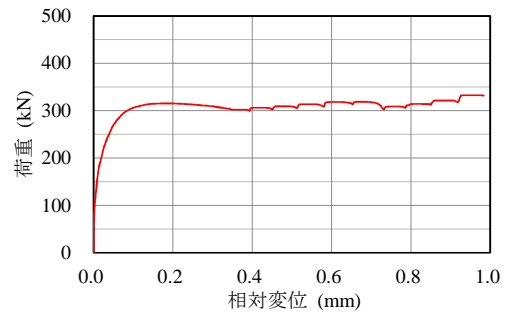
(g) A-4 頭側



(h) A-4 ナット側

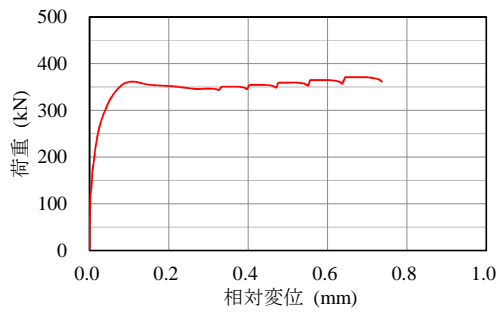


(i) A-5 頭側

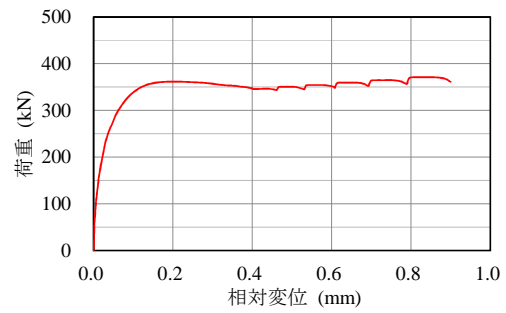


(j) A-5 ナット側

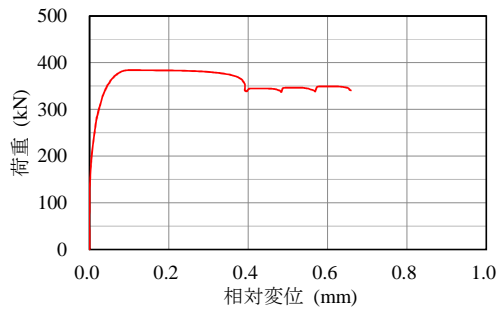
付図 E1 荷重と母材・連結板間の相対変位の関係 (試験片 A)



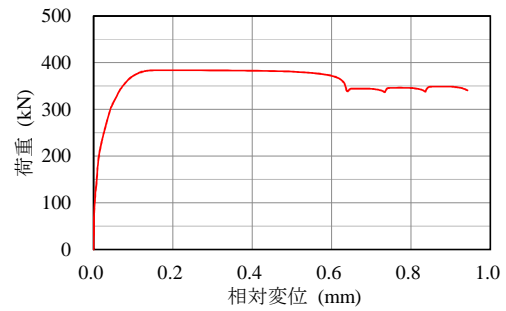
(a) B-1 頭側



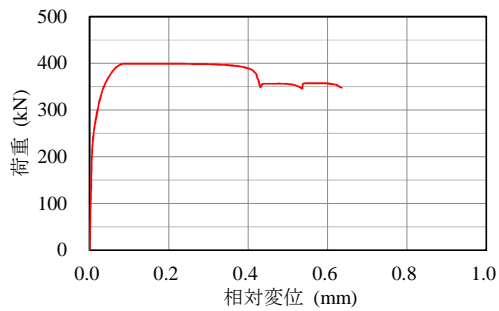
(b) B-1 ナット側



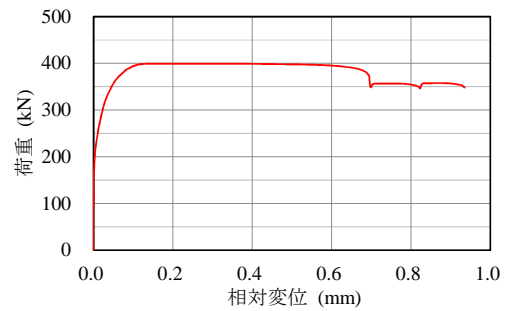
(c) B-2 頭側



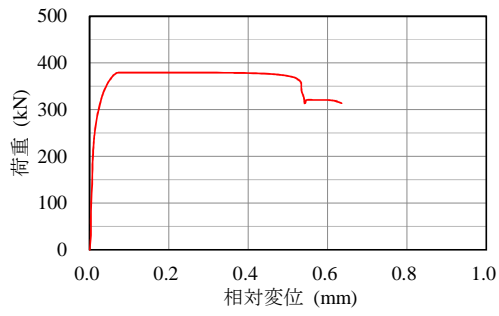
(d) B-2 ナット側



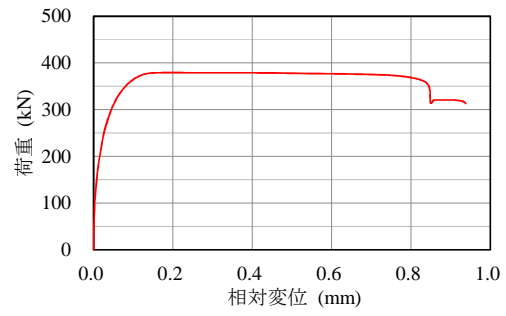
(e) B-3 頭側



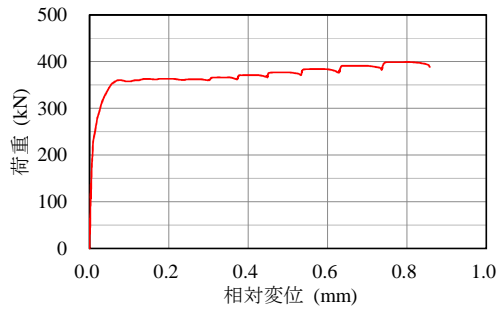
(f) B-3 ナット側



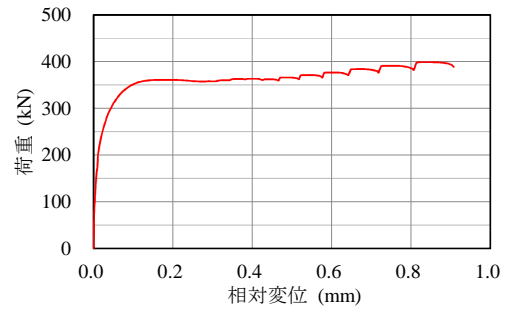
(g) B-4 頭側



(h) B-4 ナット側

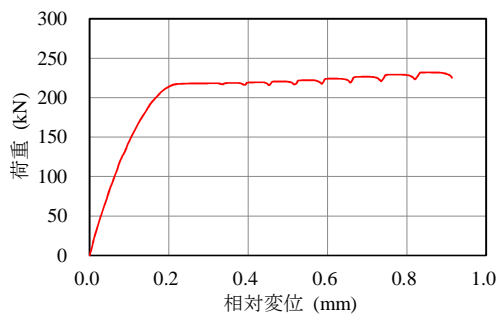


(i) B-5 頭側

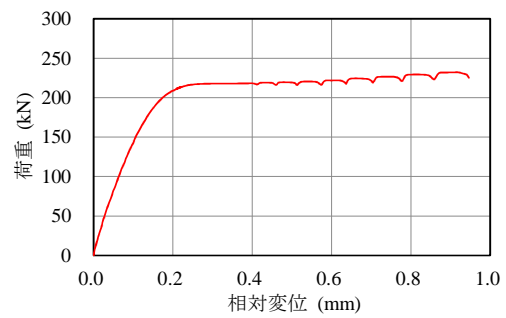


(j) B-5 ナット側

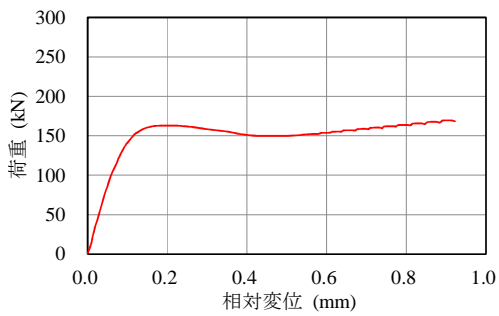
付図 E2 荷重と母材・連結板間の相対変位の関係 (試験片 B)



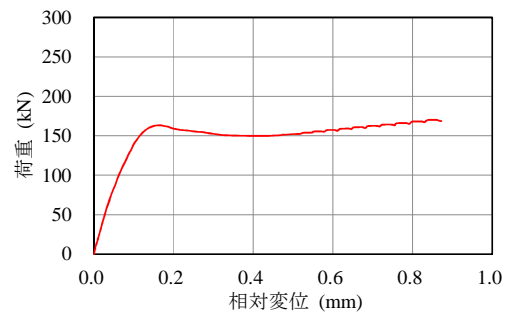
(a) C-1 頭側



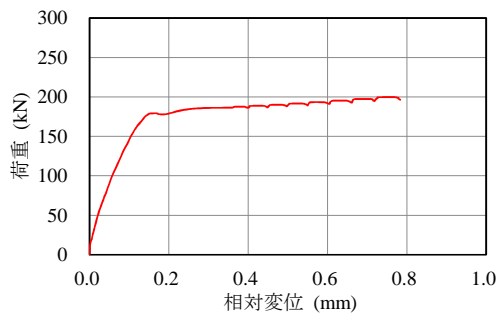
(b) C-1 ナット側



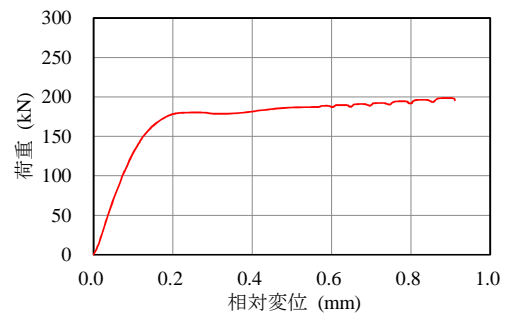
(c) C-2 頭側



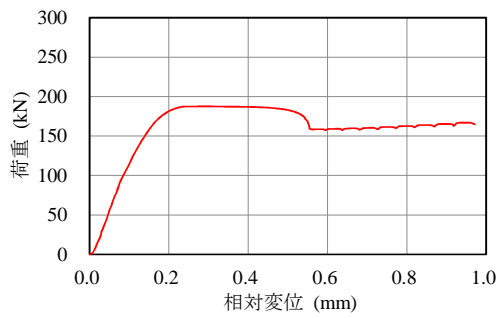
(d) C-2 ナット側



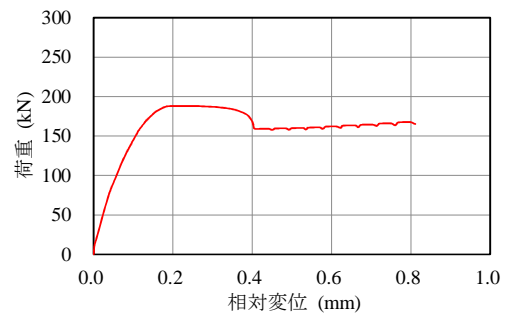
(e) C-3 頭側



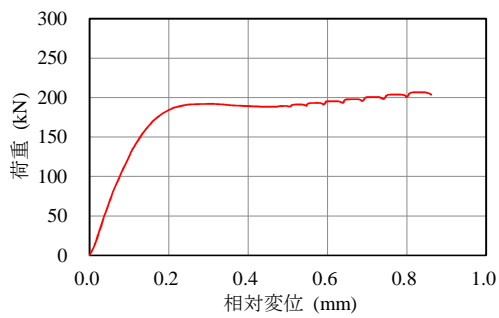
(f) C-3 ナット側



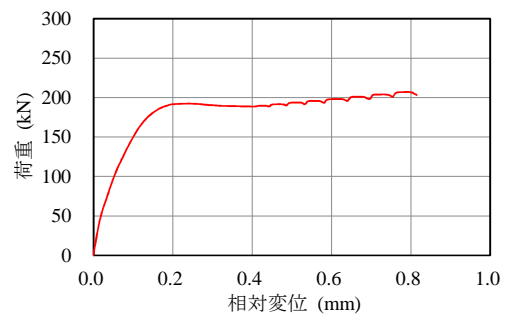
(g) C-4 頭側



(h) C-4 ナット側



(i) C-5 頭側



(j) C-5 ナット側

付図 E3 荷重と母材・連結板間の相対変位の関係 (試験片 C)