

高力ボルト摩擦接合のすべり耐力変動について

ON THE SCATTERING OF SLIP LOADS OF
FRICTION TYPE BOLTED JOINTS

西 村 昭*

By Akira Nishimura

ま え が き

高力ボルトを用いた摩擦接合が、橋梁主部材の接合に本格的に用いられるようになってすでに十数年を経過する。その間、高力ボルトの材質的欠陥、締付方法の不適当などに起因する事故を経て、現在、鋼部材現場接合法の代表的なものとして広く利用されている。現行の関連示方書は、当初先進諸国の例を基礎に出発し、わが国での独自の研究を背景に改正されたものであるが、高力ボルトの材質に対する高い信頼性に比して、施工面のそれが必ずしも十分保証されているとはいいがたい。ここに、完工後の摩擦接合の耐力が、設計通りの耐力を有するかどうかのなんらかの保証が必要となる。ほかの形式の現場接合同様に、構造部材の耐力を検定するための破壊試験ができないことから、統計学的手法を用いほかの同類の試験結果から間接的に推定することになる。この実験的研究は、一継手内のボルト間で締付力にばらつきがある場合の、継手耐力の変動を明らかにしようと試みるものである。

摩擦接合のすべり耐力を左右するおもな要因として、高力ボルトの締付力と、摩擦面の状態があげられるが、本研究は前者の影響を解明するものである。このため、摩擦面の状態が、ある締付条件に対して不変に保たれている必要がある。したがって、本研究ではこの点に関しても特別な考慮をほらい、予備的に摩擦面に関する実験を実施した。

1. 摩擦接合における高力ボルト締付力のばらつき

高力ボルトの締付方法として、現在一般にはつぎの 5 方法が用いられている。すなわち、

- ① トルクレンチを用いる方法（トルクレンチ法）
- ② 六角座金を用いる油圧レンチ法（油圧レンチ法）
- ③ トルク制御によるインパクトレンチ法（インパクトレンチ（T）法）
- ④ エアエネルギー制御によるインパクトレンチ法（インパクトレンチ（A）法）
- ⑤ ナットの回転角による方法（ナット回転角法）

これらの各方法はそれぞれ特徴を有するが、実橋において各方法によるボルトの締付力のばらつきの実状を求めたものとしては、著者らによる成果¹⁾が唯一のもので

表-1 現場締め高力ボルト締付力のばらつき¹⁾

桁	締付方法	継手位置*	ボルト数	締 付 力		
				平均値 (t)	標準偏差 (t)	変動係数 (%)
G1	トルク レンチ	FU	12	20.1	1.8	9.0
		MU	12	21.2	2.0	9.5
		S	28	19.5	1.2	6.2
		ML	12	20.3	1.8	8.9
		FL	28	18.9	1.9	10.0
G1'	油圧レンチ	FU	20	20.3	1.2	5.9
		MU	12	20.2	1.9	9.4
		S	40	19.1	1.6	8.4
		ML	12	19.7	1.5	7.6
		FL	56	20.3	1.1	5.4
G2	インパクト レンチ (T)	FU	16	18.1	1.7	9.4
		MU	12	17.1	1.6	9.4
		S	28	18.0	2.5	13.9
		ML	12	17.2	2.4	14.0
		FL	32	18.0	1.7	9.5
G3	インパクト レンチ (A)	FU	16	20.8	2.4	11.5
		MU	12	21.7	2.6	12.0
		S	28	20.8	2.2	10.3
		ML	12	21.7	1.3	6.0
		FL	32	19.6	1.2	6.1
G4	ナット 回転角法	FU	20	19.3	2.2	11.4
		MU	12	20.6	3.8	18.4
		S	18	19.9	2.8	14.1
		ML	12	19.8	2.5	12.6
		FL	36	19.9	2.6	13.1

* FU, MU, S, ML, FL はそれぞれ上フランジ, 上モーメントプレート, シャープレート, 下モーメントプレート, 下フランジを表す。

ある。すなわち、工場仮組時のプレートガーダー 5 主桁を利用して、それぞれの現場接合部の高力ボルトを上記 5 方法で締付け、そのボルト締付力の全数測定を実施した。測定結果をボルト締付力のばらつきについてまとめると表-1 のようになる。この実験での目標軸力は 21.0 t であった。このように、一継手内での締付力のばらつきは、変動係数にして最低値 5.4% から最高値 18.4% までのひろがりがあるが、中央値は 9.4% となっている。これらの数値は、実橋現場でのボルト締付作業状態にできるだけ近い状態で締付けて得られたものであるが、実験工事であることが意識されている点を考慮すると、実橋現場でのばらつきはこれらの数値をさらに上回ることが十分予想される。

2. 締付力のばらつきが継手すべり耐力におよぼす影響

(1) 概 説

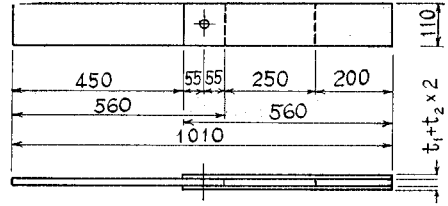
まえがきに述べた通り、本研究においてはボルト締付力のばらつきと継手すべり耐力とがいかなる関係にあるかを明らかにしようとするものであるから、締付力以外の要因の影響を極力除外する必要がある。そのため最大の要因と考えられる摩擦面の表面状態の影響をできるだけ少なくなるようにしなければならない。また、供試体が異なると、ボルト締付力、摩擦面の相違のほか、製作精度からくる誤差などが介入するから、この点からすれば、同一供試体の反復使用が好ましい。従来の研究²⁾によると、摩擦接合につき同一供試体を組み直してすべり試験を反復すると、最初の 1, 2 回ですべり耐力は急激に低下するが、以後次第に安定するとの結果が得られている。今回はこの事実を利用し、あらかじめすべりを反復した鋼板を、締付力に所定のばらつきを与えて組み立て、すべり試験を行なうことにした。

試験の種類は、実際構造物の規模のボルト継手に対応する一列型継手の試験と、ボルト数の多い継手に対応する群ボルト継手の試験とに大別される。この後者の場合には、試験機の容量の関係から、鋼板厚およびボルト軸径を小さくしている。

(2) 摩擦面の実験³⁾

a) 供 試 体

以後のすべり試験用供試体と同一の鋼板を用い、図-1 の形状とした。すなわち、1 列型 (W 7/8 ボルト相当鋼棒使用) 供試体に対応して A 型供試体、群ボルト供試体 (W 1/2 ボルト相当鋼棒使用) に対応して B 型供試体を準備した。



$\left\{ \begin{array}{l} \text{A型: } t_1 = 28, t_2 = 15, \text{孔径 } 23.5 \\ \text{B型: } t_1 = 16, t_2 = 8, \text{孔径 } 14.0 \end{array} \right.$

図-1 A 型・B 型供試体

鋼板材質はいずれも SM50、各型それぞれ 2 セットずつ作成し、いずれの供試体も摩擦面にはショットブラストをかけたままの状態とした。

b) 試験方法

A 型供試体においては高力ボルトによって締付ける代わりに、図-2 のようにボルトとほぼ同径の

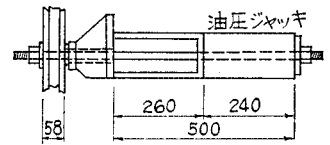


図-2 A 型供試体締付状況

P C 鋼棒をブルロッド油圧ジャッキで締付けた。締付力 21 t は、鋼棒に電気抵抗線ひずみゲージを貼付してロードセルとし、これによって正確に導入した。締付力 21 t を導入したままの状態で供試体を試験機にセットし、主すべりが生ずるまで引張り、主すべり発生後は締付力を解放して供試体を組み立て直し、同様のすべり試験を反復した。試験は 2 供試体につき繰返し、反復回数はいずれも 40 回とした。

B 型供試体においては、W 1/2 ボルトの代わりに、両端にねじを切った直径 12 mm の P C 鋼棒を用いて図-3 のよ

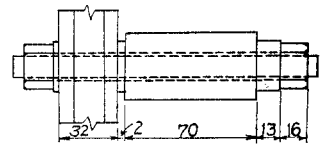


図-3 B 型供試体締付状況

うに締付けた。この際の締付力は、鋼棒に電気抵抗線ひずみゲージを貼付して測定した。供試体 2 本について締付力 2 t の場合と 3 t の場合につき、A 型供試体の場合同様、反復すべり試験を実施した。反復回数はそれぞれ 30 回、17 回とした。

c) 試験結果とその考察

反復すべり試験によるすべり荷重ならびにすべり係数

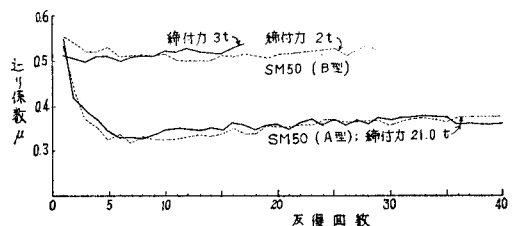


図-4 反復すべり試験結果

表-2 反復すべり試験結果

反復回数	B型供試体				A型供試体			
	締付力 2t		締付力 3t		締付力 21t			
	$P_S(t)$	μ	$P_S(t)$	μ	$P_S(t)$	μ	$P_S(t)$	μ
1	2.23	0.558	3.10	0.517	23.2	0.552	22.6	0.538
2	2.17	0.542	3.05	0.508	17.5	0.417	17.9	0.427
3	2.10	0.525	3.02	0.503	16.35	0.389	15.5	0.369
4	2.10	0.525	3.09	0.515	15.6	0.372	14.75	0.351
5	2.13	0.532	3.09	0.515	14.45	0.345	13.55	0.323
6	2.05	0.512	3.02	0.503	13.8	0.329	14.05	0.335
7	2.06	0.515	3.07	0.512	13.8	0.329	13.2	0.314
8	2.11	0.528	3.10	0.517	13.75	0.328	13.8	0.329
9	2.06	0.515	3.09	0.515	14.05	0.335	13.6	0.324
10	2.07	0.517	3.16	0.527	14.55	0.347	13.55	0.323
11	2.02	0.505	3.14	0.523	14.65	0.349	13.65	0.325
12	2.01	0.503	3.20	0.534	14.60	0.348	13.8	0.329
13	2.02	0.505	3.16	0.527	14.45	0.344	14.05	0.335
14	2.02	0.505	3.15	0.525	14.7	0.350	13.9	0.331
15	2.06	0.515	3.25	0.542	14.45	0.344	14.1	0.336
16	2.05	0.512	3.21	0.535	15.10	0.360	14.7	0.350
17	2.07	0.517	3.27	0.545	14.85	0.354	14.15	0.337
18	2.06	0.515			14.4	0.343	14.15	0.337
19	2.04	0.510			14.95	0.356	15.0	0.357
20	2.08	0.520			14.95	0.356	14.8	0.353
21	2.08	0.520			14.55	0.347	14.75	0.353
22	2.09	0.522			15.20	0.362	14.95	0.356
23	2.10	0.525			15.6	0.372	15.0	0.357
24	2.11	0.528			15.0	0.357	15.05	0.358
25	2.12	0.530			15.5	0.369	15.4	0.367
26	2.05	0.512			15.0	0.357	15.4	0.367
27	2.11	0.528			15.4	0.367	15.2	0.362
28	2.16	0.540			15.1	0.360	15.3	0.365
29	2.10	0.525			15.65	0.373	15.35	0.366
30	2.10	0.525			15.6	0.372	15.45	0.368
31					15.8	0.376	15.0	0.357
32					15.8	0.376	15.3	0.365
33					15.9	0.379	15.6	0.372
34					15.85	0.378	15.7	0.374
35					15.85	0.378	15.55	0.370
36					15.05	0.358	15.3	0.365
37					15.15	0.361	15.75	0.375
38					15.1	0.360	15.8	0.376
39					15.05	0.358	15.8	0.376
40					15.2	0.362	15.8	0.376

の変化の状況は表-2のとおりで、これを図示すると図-4のようになる。これよりつぎの諸点が明らかである。

① 締付力が 2t または 3t という低い値の B 型供試体の場合には、すべり試験の反復によって、すべり係数はほとんど不変で、両者はほぼ同じ値付近でばらついた。② これに対して締付力の高い A 型供試体では、最初の 5~6 回のすべり試験ですべり係数は初期値の 60% 程度に急激に減少し、③ その後の反復すべりによって、きわめて緩やかな傾斜で上昇した。その状況は 2 供試体ともほぼ同じで、反復 5~6 回目での $\mu \approx 0.33$ から 35 回目での $\mu \approx 0.37$ までほぼ直線的に変化した。

以上の結果に基づき、以後の継手すべり試験で、摩擦面のすべり係数の相違による誤差をできるだけ小さくするため、すべり係数安定後の摩擦面を利用する意味か

ら、供試体は試験に先立ち、締付力を与えた状態で数回すべらせ、その後同一供試体を用いてすべり試験を各種反復した。

(3) 1 列型供試体の実験³⁾

a) 供試体

形状・寸法は図-5に示すように、荷重方向に 3 本のボルトを有する 3L 型と、荷重と直角方向に 3 本のボルトを有する 3C 型の 2 種類ある。鋼板はいずれも SM 50、摩擦面にはショットブラストを施した。

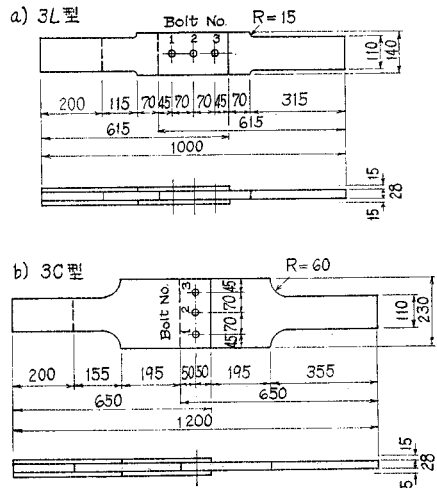


図-5 3 本型供試体

b) 試験方法

高力ボルトを用いる代わりに、2. (2), b) に述べた A 型供試体同様に、 $\phi 22$ mm の P C 鋼棒を用い、プルロード型油圧ジャッキで締付力を与えた。締付力は最大値 21 t (これは F 11 T, W 7/8 ボルトの設計ボルト軸力に相当する) として、3 ボルト中 3 者同一締付力の場合と、2 者のみ同一締付力の場合とにつき試験した。3 本のボルトの締付力の組み合わせは図-6 (3L-1~4)、および図-7 (3C-1~4) に併記した 8 種類よりなる。

試験は供試体を各締付力の組み合わせにセットした状態で引張荷重を加え、主すべりを生ぜしめ、主すべり発生後は除荷して供試体を組み立て直し、つぎの試験に移った。

c) 試験結果およびその考察

各場合の主すべり荷重 (以後単にすべり荷重とする) は表-3のとおりである。図-6, 7 は締付力とすべり荷重との関係を示したものである。ここで、すべり荷重は、すべり係数がすべりの反復により緩やかではあるが、直線的に増加したことを考慮し、試験当初の状態を基準に補正したものである。

図-6, 7 よりボルトの締付力とすべり荷重との間

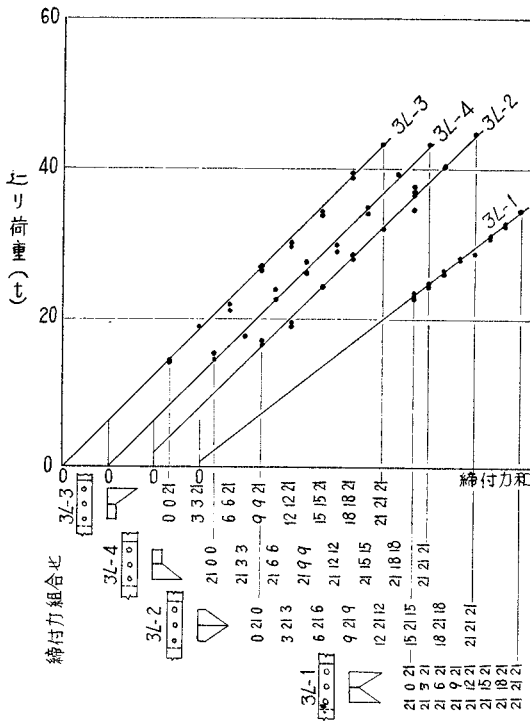


図-6 縮付力対すべり荷重図 (3L型)

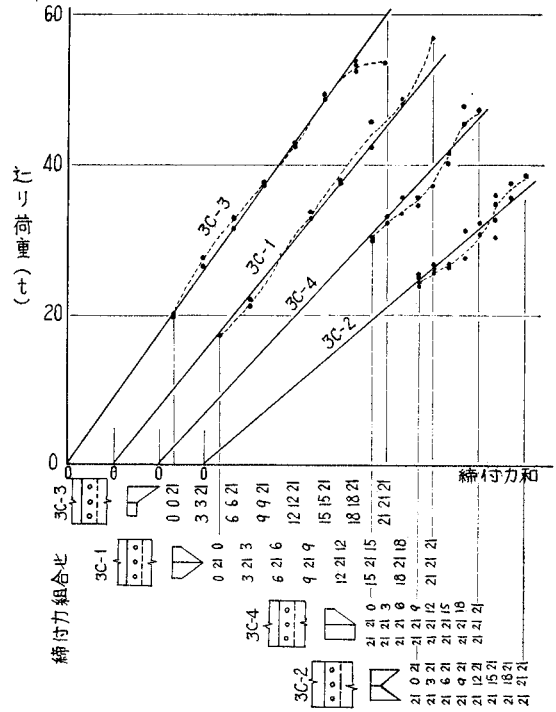


図-7 縮付力対すべり荷重図 (3C型)

表-3 1 本型供試体のすべり試験結果

縮付力和 (t)	%	3L-1		3L-2		3L-3		3L-4		3C-1		3C-2		3C-3		3C-4	
		$P_S(t)$	%	$P_S(t)$	%	$P_S(t)$	%	$P_S(t)$	%	$P_S(t)$	%	$P_S(t)$	%	$P_S(t)$	%	$P_S(t)$	%
63	100	34.6	100	44.6	100	43.2	100	43.2	100	56.8	100	38.6	100	53.4	100	47.4	100
60	95.2	32.6 32.4	94.2 93.7									35.7 37.5	92.4 97.2			48.0 45.6	101.3 96.2
57	90.5	30.9 31.3	89.3 90.5	40.5	90.8	39.4 38.4	91.2 88.9	39.3 39.2	91.0 90.8	48.9 48.0	86.0 84.5	30.5 32.8 34.9 36.0	79.0 85.0 90.4 93.3	53.1 52.5	99.4 98.4	41.6 40.4	87.8 85.2
54	85.7	28.6	82.6									30.9 32.3	80.0 83.6			37.4 37.3	78.9 78.7
51	80.9	28.1 28.2	81.2 81.5	34.4 37.0 36.8	77.2 82.9 82.5	34.2 33.8	79.2 78.3	34.9 33.9	80.8 78.6	45.7 42.4	80.5 74.5	27.5 27.5 31.1	71.2 71.2 80.6	49.3 48.6	92.3 91.0	35.8 34.9	75.5 73.7
48	76.2	26.5 26.2	76.6 75.8									26.9 26.3	69.7 68.1			35.8 33.7	75.5 71.1
45	71.4	24.7 24.3	71.4 70.2	32.0	71.7	30.1 29.8	69.7 69.0	29.8 28.9	69.0 66.9	38.0 37.7	66.8 66.3	26.0 26.8 25.7	67.3 69.4 66.5	42.4 42.6	79.4 79.8	32.5 33.2	68.6 70.0
42	66.7	23.1 23.4 22.8	66.8 67.6 65.9									25.1 23.8 23.9 25.0	65.0 61.7 61.9 64.7			30.1 30.2	63.5 63.7
39	61.9			27.9 28.6 28.1	62.5 64.1 63.0	26.7 26.3	61.8 60.9	26.0 27.6	60.2 63.9	32.9 33.5	57.9 58.9			37.5 37.1	70.3 69.5		
33	52.3			24.2	54.3	22.1 21.0	51.2 48.6	23.8 22.5	55.1 52.2	27.4 27.9	48.3 49.1			32.9 31.2	61.6 58.4		
27	42.8			19.5 19.3	43.7 43.3	18.8 18.8	43.6 43.6	17.6 17.7	40.8 41.0	21.0 21.0	36.9 36.9			26.4 27.5	49.4 51.5		
21	33.3			17.0 16.9	38.1 37.9	14.5 14.1	33.6 32.6	14.4 15.1	33.4 35.0	17.3 17.1	30.5 30.1			19.8 19.6	37.1 36.7		

には、ほぼ直線関係が存在し、また、3C型よりも3L型のほうがきれいに直線に乗っていることがわかる。8シリーズの試験で、3本のボルトがすべて21tの場合(21+21+21)、2本が21t(21+21+0)、1本のみ21t(21+0+0)など、相互に比較可能な締付力組合せのものを比較すると、同一締付力のものですべり荷重は必ずしも一致していない。各試験シリーズ間での条件の相違が原因と考えられる。そこで、これらの様子を明確にするために、表-3に併記したように、締付力

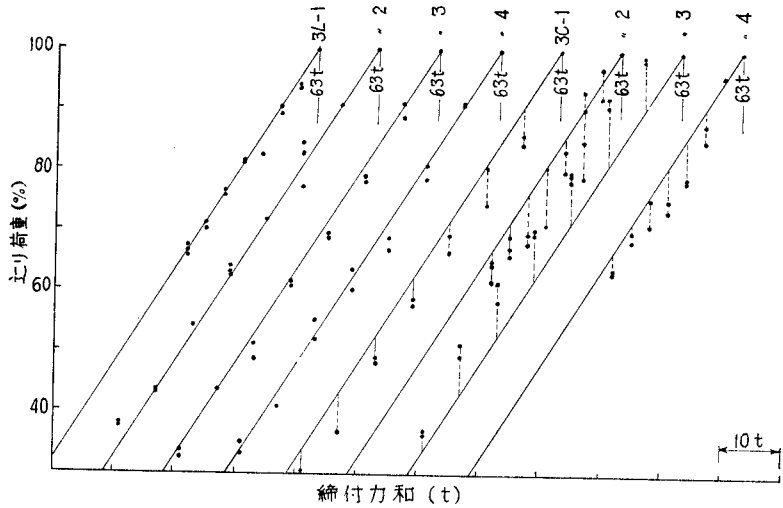


図-8 締付力と継手すべり荷重との関係

63tのときのすべり荷重を基準としたすべり荷重の割合(%)を締付力に対してプロットすると図-8のようになる。図中の直線は締付力とすべり荷重とが比例する場合を示したもので、3L型では、それらはよく合致する。3C型で、ことに3C-3の不一致が目立つようであるが、これは図-7から明らかなように締付力と63tでのすべり荷重の低さに原因があると考えてよい。図-6、7および8を総合して、摩擦接合のすべり荷重はボルト締付力の分布の非対称性にかかわらず、一応締付力に比例するものとして、実用上十分であると考えられる。

(4) 群ボルト型供試体の実験³⁾

a) 供試体

図-9のように3行×3列=9本のボルトよりなる

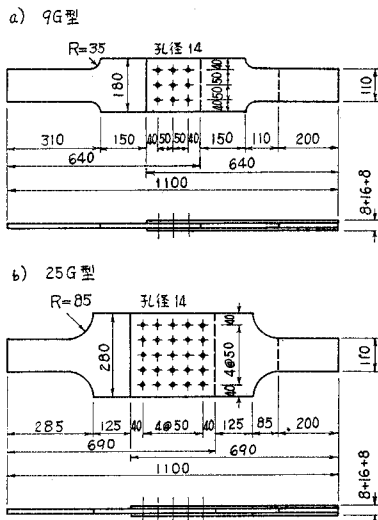


図-9 群ボルト型供試体

9G型の4シリーズと、5行×5列=25本のボルトよりなる25G型の4シリーズよりなる。鋼板はいずれもSM50、摩擦面にはショットブラストを施した。

b) 試験方法

高力ボルトを用いる代わりに(2), b)で述べたB型供試体と同様に、両端にねじを切ったφ12mmのPC鋼棒を用いた。締付力は軸部に貼付した電気抵抗線ひずみゲージを用いて所定の値になるように導入した。その値は基準値を2.0tとし、軸力導入ミス of ボルトを想定して、締付力0.1tのものを種々の状態に配置し、それが継手耐力におよぼす影響を明らかにした。なお、例外として、シリーズ9G-1のみは基準締付力3.0t、低締付力1.0tとした。

すべり試験は1列型供試体の場合と同様に、同一供試体を反復使用し、供試体の相違の影響が入らぬようにし、同時に、1シリーズの試験はその日のうちに完了し、試験目的とする要因以外のもの of 影響の介入を避けるように努めた。

c) 試験結果とその考察

前述のように供試体の違いの影響回避の努力にもかかわらず、試験シリーズ間では後述の表-4、および表-5のように、すべり係数に明瞭な差異を生じているものもある。その原因には、シリーズ間の試験条件などの相違、たとえば試験日、締付け順序、締付力などの相違が考えられる。したがってここでは、シリーズ間にまたがる比較は行わず、シリーズ内での比較を行なうことにする。

① 9G型供試体：試験結果をまとめると表-4のようになる。そのなかですべり荷重の計算値は、全ボルトの締付力が基準値である場合の継手のすべり荷重から求めたすべり係数μを用い、2. c)の結果を参考にして

表一4 群ボルト型供試体(9G型)の試験結果

シリーズ	基準状態*	締付力配置	送り荷重(τ)		シリーズ	基準状態	締付力配置	送り荷重(τ)		
			計算値	実験値 平均値				計算値	実験値 平均値	
9G-1	 $N = \begin{cases} + & 3t \\ \bullet & 1t \end{cases}$ $P_S = 25.1t$ $\mu = 0.463$	1	19.4	20.7 20.8	20.75	9G-3 続き		12.0	11.1 11.1	11.1
		2		21.4 21.4	21.4				11.1 11.4	11.25
		3		21.5 21.1	21.3				11.9 12.2	12.05
		4		19.6 19.4	19.5				13.9 13.4	13.65
		5		19.7 19.2	19.45				15.7 16.5 16.9	16.7
9G-2	 $N = \begin{cases} + & 2t \\ \bullet & 0.1t \end{cases}$ $P_S = 20.1t$ $\mu = 0.559$	6	18.0	17.7 17.9	17.8	9G-4	 $N = \begin{cases} + & 2t \\ \bullet & 0.1t \end{cases}$ $P_S = 16.4t$ $\mu = 0.455$	11.2	9.6 9.5	9.55
		7		17.9 17.7	17.8				10.3 10.1	10.2
		8		17.8 17.7	17.75				10.0 10.0	10.0
		9		17.6 17.7	17.65				10.2 10.3	10.25
		10		15.1 15.6	15.35				10.3 10.2	10.25
9G-3	 $N = \begin{cases} + & 2t \\ \bullet & 0.1t \end{cases}$ $P_S = 17.6t$ $\mu = 0.489$	11	12.0	12.9 12.8	12.85	9G-4	 $N = \begin{cases} + & 2t \\ \bullet & 0.1t \end{cases}$ $P_S = 16.4t$ $\mu = 0.455$	11.2	10.0 10.0	10.0
		12		12.3 12.1	12.2				10.2 10.3	10.25
		13		11.8 11.9	11.85				10.3 10.2	10.25
		14		12.3 12.1	12.2					

* N : ボルト締付力 P_S : 送り荷重 μ : 送り係数

次式により計算したものである。

$$P_G = 2\mu \Sigma N$$

ここに、 ΣN は各ボルト締付力の総和であって、ボルトの位置にかかわらず、機械的に加算したものである。表中の数値の比較からわかるように、計算値と実験値との一致はかなり満足しうようである。また、それらの大小関係は、ボルト締付力の分布状態(締付力配置と略称)と特に関係があるとも認められない。締付力配置とすべり荷重との関係に注目すると、

① 締付力配置 : 1, 2, 3; 6, 7, 8; 11, 12, 13; 23, 24, 25 の4グループは、荷重軸について対称で、それぞれ低締付力ボルトが荷重方向で占める位置の影響を知るためのものであるが、これらの実験値からはその影響の有無についての結論を見出しえない。

② 締付力配置 : 4, 5; 6, 9; 14, 15, 16; 26, 27 の4グループは、それぞれ低締付力ボルト位置の荷重軸に対する非対称性の影響を知るためのもので、このうち14, 15, 16のグループで低締付力ボルトが非対称に位置する場合には、対称に位置する場合に比してすべり荷重がいくぶん低下したが、ほかはほとんど不変であった。

以上をまとめると、一継手内でのボルト締付力の配置状態と継手すべり耐力との間には特に顕著な相関関係は認められず、継手すべり耐力は締付力の総和に比例する

として、前述の式により推定しうると結論することができよう。なお、締付力配置が荷重軸に対して非対称である場合には、対称な場合よりすべり耐力がわずかに低下する場合も認められたが、非対称の程度がこれよりはるかに少ないと推定される実在継手の場合には、その影響はほとんど無視しうる程度のもと考えてよい。

② 25G型供試体 : 試験は 25G-1, 25G-2, 25G-3, 25G-4 の4シリーズよりなり、その結果をまとめると表一5 のようになる。

表一5の実験結果から、低締付力ボルトの位置と継手耐力との関係を見るために、 $C_1 \sim C_6$ の列のうちの1列内全ボルトが低締付力の場合と、 $L_1 \sim L_6$ の行のうちの1行内全ボルトが低締付力の場合とを取り出して図示すると図一10(a), (b) のようになる。

まず、図一10(a)の1列の全ボルトが低締付力である場合のすべり耐力は、その列の位置と継手すべり耐力との間に特定の関係を見出しえず、一応無関係といえることができるようである。この点は9G型継手についてえられた結論と一致する。

つぎに、図一10(b)のように1行の全ボルトが低締付力である場合のすべり耐力は、その行の位置によって荷重軸に対してボルト締付力配置が非対称性になり、非対称性の大きいほどすべり耐力の低下が大きい傾向が見られる。これは9G型継手についても一部に見られたとこ

らである。

つぎに全ボルトの締付力を5段階に変化せしめたシリーズ 25G-3の結果を図示すると図-11のようになり、25本のボルトの締付力が同じ場合には、それらの総計とすべり耐力との間に直線関係の存在することがわかる。

シリーズ 25G-4は締付力ばらつきの型としてボルト締付力の配置が山型、あるいは谷型になる場合をとったものである。すなわち、

列間谷型：C₁, C₅列=3.5t, C₂, C₄列=1.5t, C₃列=0t,

列間山型：C₁, C₅列=0.25t, C₂, C₄列=3.0t, C₃列=3.5t,

行間谷型：L₁, L₅行=3.5t, L₂, L₄行=1.5t, L₃行=0t,

行間山型：L₁, L₅行=0.25t, L₂, L₄行=3.0t, L₃行=3.5t,

で、いずれの場合も締付力総計は50t, したがって計算上のすべり耐力はすべて等しくなるようにした。表-5のように、行間山型分布の場合すべり耐力が計算値の0.887倍と、ほかよりやや低い目の値となっているほか

は計算値とかなりよく一致する。また、全体的に、端部の行または列に高締付力ボルトが配される谷型の締付力分布のほうが山型分布よりもやや高いすべり耐力を持つように見えるが、ほかの試験シリーズでこれの裏付けとなるものがなく、これのみをもってただちに結論づけることは早計である。なおすべり耐力はこの場合も締付力総和を用いて計算することができよう。

(5) 実ボルトによる実験¹⁾

前述の9G型, 25G型の両実験においては、高力ボルトに代わってPC鋼棒が用いられた。これらは被締付板厚に適合する高力ボルトにくらべて長さが大で、その

表-5 群ボルト型供試体(25G型)の試験結果

シリーズ	基準状態	締付状態	すべり荷重 (t)			
			計算値	実験値	実験値/計算値	
25G-1	全ボルト N=2.0 t P _S =46.3 t μ=0.463	C ₁ 列 0.1 t	37.5 t	38.1 38.3	38.2	1.018
		C ₂ 列 0.1 t		39.5 39.3	39.4	1.050
		C ₃ 列 0.1 t		39.9 39.4	39.65	1.057
		C ₄ 列 0.1 t		37.7 37.9	37.8	1.008
		C ₅ 列 0.1 t		38.6 40.8 39.6	39.7	1.058
		L ₃ 行 0.1 t		38.4 38.9	38.65	1.030
		L ₄ 行 0.1 t		37.2 37.0	37.1	0.987
		L ₅ 行 0.1 t		35.0 35.7	35.35	0.944
		L ₁ 行 0.1 t			35.7	0.953
25G-2	全ボルト N=1.64 t P _S =53.6, 49.3, 52.2, 47.9 平均値 50.75 μ=0.619 シリーズ最終試験後 P _S =51.0 t	C ₃ 列 0.1 t	40.6 t	38.6 33.6	36.1	0.889
		C ₄ 列 0.1 t		35.7 39.2	37.45	0.923
		C ₂ 列 0.1 t		44.1 39.3	41.7	1.028
		C ₅ 列 0.1 t		45.8 38.2	42.0	1.035
		C ₁ 列 0.1 t		40.9 37.7	39.3	0.967
25G-3	全ボルト同一締付力	全 0.2 t	μ=0.410 μ=0.420 μ=0.473 μ=0.434 μ=0.429	3.9 4.3	4.1	
		全 0.5 t		10.5		
		全 1.0 t		23.8 23.5	23.65	
		全 1.5 t		32.5		
		全 2.0 t		41.8 43.9	42.85	
25G-4	全ボルト N=2.0 t P _S =48.0, 45.0 平均値 46.5 μ=0.465	列間谷型 3.5-1.5-0-1.5-3.5	46.5 t	46.9 46.7	46.8	1.007
		列間山型 0.25-3.0-3.5-3.0-0.25		46.4 43.6	45.0	0.968
		行間山型 0.25-3.0-3.5-3.0-0.25			41.2	0.887
		行間谷型 3.5-1.5-0-1.5-3.5			46.4	0.998

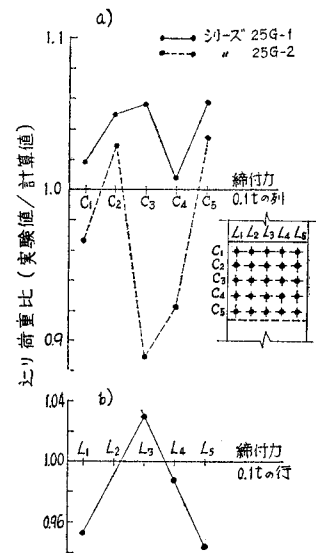


図-10 群ボルト型供試体(25G型)の試験結果

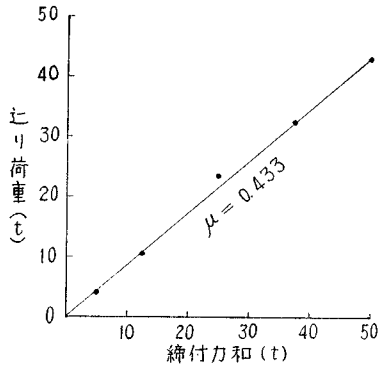


図-11 群ボルト型供試体の試験結果 (シリーズ 25 G-3a)

ため継手への作用荷重の増大による板純断面での板厚さの減少によって締付力はあまり影響を受けない。この点は実際の高力ボルト継手におけるのと相違する点である。そこでここに、普通の高力ボルトを用いて締付力を故意に変化せしめた継手の実験について述べ、先に述べた諸結論と比較を試みる。またこの場合は、普通行なわれているようにすべり試験ごとに供試体を変えているから、供試体の違いによる影響は避けられない。

a) 供試体

供試体の形状、寸法は 図-12 に示す通りである。鋼板は SM50、摩擦面はショットブラストをかけ、さびの発生していない状態で試験した。高力ボルトは F11T、W7/8 を用い、頭からボルト軸中心に直径 6 mm の穴をあけ、その内面に電気抵抗線ひずみゲージを貼付して、締付力を測定した(測定方法の詳細については文献 5) 参照)。

b) 試験方法

供試ボルト F11T、W7/8 の目標軸力として 21 t を

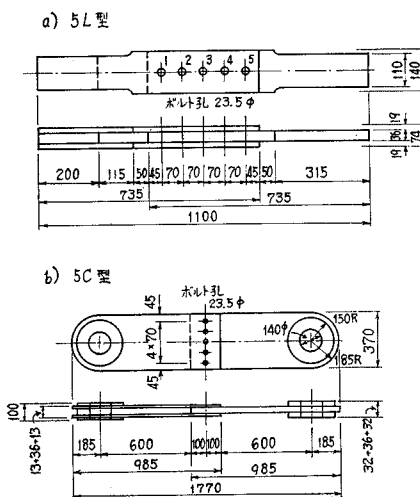


図-12 実ボルト継手試験用供試体

探り、一方、現場締めの場合の締付力の変動係数を 1. で述べたところにしたがって約 10%、すなわち 2 t とし、締付力が極度に低い場合として、 -3σ 程度の変動に対応して $21 \times 2 = 15 t$ とした。すなわち、ここでは表-6 に示すように締付力 21 t を有するものと、締付力 15 t の低締付力のもとを混合配置した。

ボルト締付けはトルクレンチを用いて行ない、ボルト軸中心の穴内面に貼った電気抵抗線ひずみゲージによって所定の締付力が生じるまで締付けた。

供試体の引張試験は、3L'型、5L'型、および 3C'型は 200 t 万能試験機により、5C'型のみは 600 t 横型試験機を用いて実施した。

引張試験時の測定の種類は、各荷重段階でのボルト軸中心のひずみゲージのひずみ変化の測定と、継手部を含んだ供試体軸方向の標点距離についての供試体両面のダイヤルゲージによる変形量の測定よりなる。

c) 試験結果とその考察

すべり試験の結果は表-6 に記した通りであるが、表中 5C'-1, 1' のすべり荷重がかなり低いのは、試験期日の関係で、表面状態がそのほかと異なっていたことに原因があると考えられる。これに対して、5C'-1' はショットブラストを掛け直したもので、一応常識的なすべり荷重を示している。

いま、慣用計算法によってすべり係数を求めるため、全ボルトが一様に標準軸力で締付けられた場合のすべり係数を求めてみると表-6 最右欄のようになり、その平均値を求めると $0.613 (\equiv \mu_0)$ となる。表-6 のすべり荷重計算値とは、その μ_0 の値を用い、既述の 9G 型、

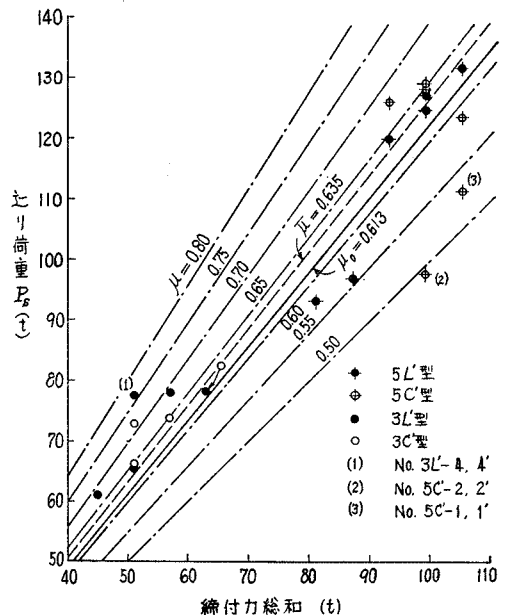


図-13 継手ボルト締付力総和とすべり荷重との関係

表-6 実ボルトによる1列型供試体試験の種類と試験結果

供試体 型	供試体 および ボルト 番号	供試 体 No.	ボルト締付力 N ○ 21.0 t, ● 15.0 t					すべり荷重 $P_S(t)$		すべり 係 数		
			ボルト No.					試験値	計算値 ($\mu_0=0.613$)			
			1	2	3	4	5				平均値	
3L'		3L'-1 1'	○	○	○			76.8 79.6	78.2	79.8	0.620	
		2 2'	○	●	○			80.0 75.9	78.0	72.2		
		3 3'	●	●	●			59.0 63.0	61.0	57.0		
		4 4'	●	○	●			75.7 79.2	77.5	64.7		
		5	○	●	●			65.3	65.5			
		5' 5'	●	●	○			65.7	65.5			
5L'		5L'-1 1'	○	○	○	○	○	145.4 117.7	131.6	133.0	0.623	
		2 2'	○	○	○	●	○	○	107.0 142.0	124.5		125.4
		3 3'	○	○	○	○	○	●	144.2 110.0	127.1		
		4 4'	●	○	○	○	○	●	114.0 125.7	119.9		117.8
		5 5'	○	○	●	●	○	○	94.8 99.0	96.9		110.2
		6 6'	●	●	●	●	○	○	94.0 92.0	93.0		102.6
3C'		3C'-1 1'	○	○	○			74.8 81.5	78.2	79.8	0.620	
		2 2'	○	○	○	●		69.4 77.7	73.6	72.2		
		3 3'	●	●	○			67.3 65.0	66.2	64.7		
		4 4'	●	○	●			72.8 72.7	72.8			
5C'		5C'-1 1'	○	○	○	○	○	108.0 115.0	(111.5)	133.0	0.587	
		1''						123.2	123.2			
		2 2'	●	○	○	○	○	97.0 98.0	97.5	125.4		
		3 3'	○	●	○	○	○	123.0 133.0	128.1			
		4 4'	○	○	○	●	○	127.5 132.7	129.1	117.8		
		5 5'	●	●	○	○	○	124.5 127.5	126.0			

および 25 G 型供試体についてすべり荷重と締付力総和との間の $P_S = \mu \Sigma N$ なる関係を用いて得られたすべり荷重である。図-13 は、締付力総和 ΣN とすべり荷重 P_S との関係プロットしたもので、図中の傾斜実線が上記 μ_0 を用いた関係であり、さらに $\mu=0.50\sim 0.80$ に対する直線も鎖線で示した。 μ_0 を用いた計算値に対して、実験値は 3L' 型あるいは 3C' 型ではすべて大きい目に、5L' あるいは 5C' 型では下回るものが5点出ている。このうち、点(2)、(3)は前述のように摩擦面に問題があったと見られる。したがって、これだけの資料をもっては3本型に比して5本型のほうが低締付

力ボルトの介在の有無を含めて一般にすべり耐力が低くなるとの結論を導くことはできない。

また L' 型と C' 型との間でも明確な傾向の差をつかみえない。これらより、低締付力ボルトの介在が継手すべり耐力に特定の影響を与えることは考えられないといえよう。

また、荷重方向にならぶ1ボルト列内では、端部のボルトほど内部のボルトより大きい荷重伝達を行なうから、常識的には端部ボルトが低締付力の場合のほうが、内部ボルトが低締付力である場合より継手すべり耐力の低下は大きいと考えられるが、低締付力ボルトの介在位置とすべり耐力との間にも明確な相関性は認めがたい。

以下の考察から明らかなように、この実ボルト実験シリーズでのすべり荷重実験値のばらつきは、ボルト締付力の導入誤差と摩擦面の状態、したがってすべり係数の変動の両要因が合成されたものであり、低締付力ボルトの介在位置の影響を考慮外としうる。この第1の締付力の導入誤差は、この実験では電気抵抗線ひずみ計により測定しつつ締付力導入が行なわれることから、第2の摩擦面に関する要因に比較して十分無視しうるものとできよう。したがって、このすべり荷重実験値から、すべり係数のばらつきの実態を推定することができる。すなわち、

供試体の形式に関係なくとるとすべり荷重実験値は合計41個となる。これらからすべり係数を求め、Thomas法により正規確率紙にプロットすると図-14のようになる。またヒストグラムは図-15の通りである。図-14の点列は直線状にならび、 μ のばらつきは正規分布にしたがうと考えられる。図-14に基づいてつぎの標本値がえられる。

すなわち、
 平均値 $\bar{\mu}=0.635$
 標準偏差 $S=0.073$

この結果は、鋼板表面処理条件がほぼ同じと考えられ

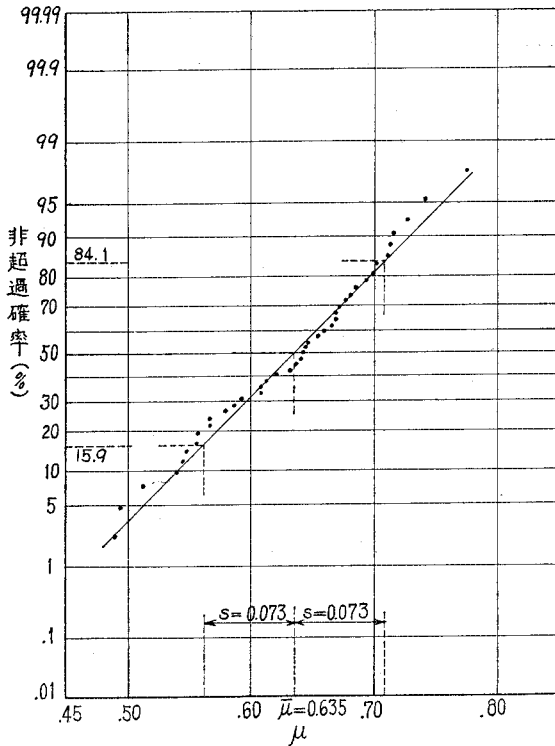


図-14 すべり係数実験値の正規確率紙へのプロット

る場合のものであるから、ファブリケーターの相違などがあれば、平均値、標準偏差はさらに異なる値を示すことになる。これについては研究を実施中であり、別の機会に発表の予定である。

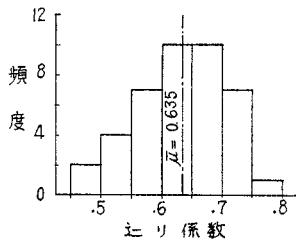


図-15 すべり係数実験値ヒストグラム

3. 実験結果の総括と結論

本研究を総括するとつぎのようになる。

摩擦接合高力ボルトの締付力は、締付け方法によって程度の差はあるが、相当なばらつきを示す。一方鋼板の表面状態も変化するため、摩擦接合のすべり耐力はこのような各要因の影響の組み合わせで相当な変動が予想される。本研究は摩擦接合のリライアビリティ解明の基礎資料をうるために、高力ボルト締付力のばらつきと継手すべり耐力の相関性、およびすべり係数のばらつきの実態を明らかにしたもので、継手すべり耐力に対する影響因子を単独に作用せしめるために、実験を分割した。

(1) 摩擦面の実験

ボルト締付力と継手すべり耐力の相関性を解明するた

めには、供試体間のすべり係数差を除く必要がある。このため同一材の反復すべり試験では5~6回反復後のすべり係数が安定するとの従来の資料に基づき、今回すべり試験に用いる鋼板について最大40回におよぶ反復すべり試験を行ない、結論として、

① ショットブラストを掛けたSM50板両面添接材($t=15+28+15$ mm)をF11T, W7/8ボルトの設計軸力である21tに締付けすべり試験を実施すると、反復5回程度まで急激にすべり係数が減少し(0.54→0.33)、以後反復35回まで徐々に回復する($\mu \approx 0.33 \rightarrow 0.37$)。

② 9G型(3行3列)、25G型(5行5列)供試体用のショットブラストを掛けたSM50板両面添接材($t=8+16+8$ mm)を2t, または3tの低締付力で締付けすべり試験を反復しても、すべり係数は初期値(0.52程度)を持続する。

(2) 1列型供試体の実験

上記①の板よりなる3本打ち供試体(3行または3列)につき、ボルトの代わりにPC鋼棒を油圧ジャッキで締付け、すべり試験を行なった。供試体はあらかじめ5~6回反復すべらせてから同一のものをを用い、締付力に各種の組み合わせを与えた。結論として、

③ 3行、3列いずれの場合もすべり荷重は継手構成全ボルトの締付力に比例し、低締付力ボルト位置、継手内でのボルト締付力分布の対称性、あるいは非対称性にはほとんど無関係のようであった。

(3) 群ボルト供試体の実験

上記②の板よりなる9G型および25G型供試体を、両端にねじを切ったPC鋼棒(ひずみゲージ貼付)をボルト代わりにして締付け、締付力の配置を種々に変えてすべり試験を行なった。この場合の結論も③と同様であった。すなわち、

④ 継手のすべり耐力は全ボルトの締付力に比例すると考える。

(4) 実ボルト供試体の実験

(2)、(3)の実験で用いたボルトに代わる鋼棒は通常のボルトよりもグリップがはるかに大であり、実際と異なる。この実験シリーズでは実ボルトを用い、その軸にひずみゲージを貼付し、締付力を測定しながら3列1行、5列1行、3行1列、5行1列の各供試体を締付け、すべり試験を実施した。試験は各場合2供試体を原則とし総計41であった。締付力は21tを標準とし、15tの低締付力(従来のボルト締付力ばらつき測定資料から $\bar{x}-3\sigma$ に相当)のものを適宜介在せしめた。鋼板はSM50で、板厚は3本継手は $t=15+28+15$ mm、5本

継手は $t=19+36+19$ mm, 表面にショットブラストをかけた。結論として,

⑤ どの継手形式においても, 低締付力ボルトの介在位置とすべり耐力との間に明確な相関性は認めがたく, ③と同様すべり耐力はボルト締付力之和に比例するとしうる。

つぎにすべり耐力のばらつきは, 摩擦面状態に比して締付力の誤差はひずみ計の測定誤差程度でほとんど無視しうるから, 各すべり耐力によって継手ごとのすべり係数を求めそのばらつきを求めた。その結果として,

⑥ SM 50, ショットブラスト材のすべり係数の分布は, 平均値 0.635, 標準偏差 0.073, 変動係数 11.5% の正規分布によく適合した。

謝辞 本研究は兵庫県土木部 梶谷義昭氏, 阪神高速道路公団 田井戸米好氏, (株)片山鉄工所 瀬良茂氏, 同穂積重臣氏, (株)神戸製鋼所 三谷哲夫氏との共同研究として参考文献 1), 4) に一部発表したものを, 著者が摩擦接合のリアイアビリティ解明の観点から考察, まとめ直したものである。また, 本研究の一部に昭和 44

年度文部省科学研究費(総合研究 A)を使用した。なお, 実験実施に際して神戸大学工学部土木工学科の学生諸君の労を煩わした。ここに関係各位に深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 西村・田井戸・瀬良・穂積・三谷:現場締高力ボルト軸力のばらつきについて, 土木学会論文報告集, 第 180 号, pp. 1~9, 昭和 45 年 8 月。
- 2) 西村・広田:摩擦接合のすべり耐力変動に関する実験的研究, 建設工学研究所報告, No. 10, pp. 1~9, 昭和 42 年 5 月。
- 3) 西村・梶谷:摩擦接合の耐力におよぼすボルト軸力ばらつきの影響, 土木学会第 23 回年次学術講演会講演概要集, I, pp. 599~602, 昭和 43 年 10 月。
- 4) 西村・田井戸・瀬良・穂積・三谷:摩擦接合の耐力変動について, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, I-39-1~4, 昭和 43 年 5 月。
- 5) 西村・田井戸・穂積・三谷:高力ボルト締付力の測定方法について, 土木学会第 22 回年次学術講演会講演概要集, I, pp. 183-1~2, 昭和 42 年 5 月。

(1970. 7. 27・受付)