

## 砲台配置された高力ボルト摩擦接合継手の合理的設計法に関する研究

### STUDY ON RATIONAL DESIGN FOR HIGH STRENGTH BOLTED FRICTIONAL JOINTS CONSIDERING GRID AND STAGGERED BOLT ARRANGEMENT

橋梁工学分野 山階 清永

鋼桁の下フランジ連結部によく用いられるボルト配置を砲台配置とした高力ボルト摩擦接合継手のボルト列数は増加する傾向にある。そのようなボルト配置の継手を対象として、すべり耐力に与える多列化の影響を検討した研究はほとんど実施されていない。本研究では、砲台配置された摩擦接合継手を対象に、すべり試験および FEM 解析を実施した。その結果、そのすべり係数の低下を換算継手長さ、すべり/降伏耐力比  $\beta$  および 相対変位比  $\alpha$  の関数として表せることを示した。

It is known that the slip coefficient of high strength bolted frictional type joints is reduce, then the number of bolt in a line is increased. But the study have not been carried out about such long joint considering grid and staggered bolt arrangement. In this study, in order to study rational design of high strength bolted frictional type joints considering grid and staggered bolt arrangement, the slip test and parametric analysis. In this analysis, the number of bolt in a line , bolt arrangement, slip/yield strength ratio , the number of bolt in a row etc. As a result, it was confirmed that the reduction of slip coefficient was indicated by the function of conversion joint length, slip/yield strength ratio and relative displacement ratio.

#### 1. 研究背景と目的

鋼橋の架設現場における部材の接合法に高力ボルト摩擦接合継手が多く採用されている。道路橋では、1990年頃からコスト縮減が強く要求されるようになり、部材接合部についても合理化検討が行われるようになった<sup>1)</sup>。平成8年改定の道路橋示方書<sup>2)</sup>では、鋼道路橋に用いることのできる鋼板の最大板厚が50mmから100mmに緩和されたこともあり、近年では、コスト縮減・施工の簡易化を狙った、構造が簡易化された少数主桁橋の事例が増加している。少数主桁橋では桁の大型化に伴い、その継手部はボルト列数が増加する傾向にある。

多列化する継手において、すべり耐力が低下することが知られている<sup>3), 4)</sup>。平成24年改定の道路橋示方書<sup>5)</sup>では、ボルト列数が8列を超える継手において、高力ボルトの許容力に乗じる低減係数が導入されるとともに、ボルト1線上に並ぶボルト本数を12列までとすることが規定されている。

鋼I型断面桁の下フランジ連結部では、母材の最外ボルト列において、断面欠損を抑える目的で矩形配置と千鳥配置を組み合わせたボルト配置（以下、砲台配置と呼ぶ）が採用されることが多い。砲台配置の事例を写真-1に示す。文献<sup>6)</sup>では、摩擦接合継手の実績調査が実施されており、矩形配置では、9列を超える継

手はなく、砲台配置では、9列を超える継手が調査継手の27%を占めていたことが報告されている。しかし、ボルト列数が8列を超えるような多列化した砲台配置を対象とした研究はなく、道路橋示方書に示される低減係数を適用するには不明確な点も多い。

そこで、本研究では、砲台配置された高力ボルト摩擦接合継手を対象に、すべり試験を実施し、すべり挙動を調査する。また、継手の構造諸元に着目したパラメトリック解析をもとに、得られた結果からすべり係数の低下に関連する支配構造因子を抽出し、すべり係数の評価式を提案する。

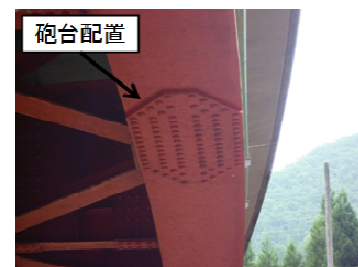


写真-1 砲台配置の事例

#### 2. すべり試験

##### 2.1 試験体

本試験で用いた試験体の形状および寸法を図-1に示す。試験体は鋼I型断面桁の引張力を受ける下フラ

ンジ連結部における砲台配置を模擬した2面摩擦接合継手とした。基本的なすべり挙動を確認することを目的としていることから、母材降伏の影響を受けないよう、すべり/降伏耐力比  $\beta$  を 0.86 程度とし、すべり先行型とすること、および試験機の载荷能力等を考慮して、試験体の形状およびボルト本数を決定している。すべり/降伏耐力比  $\beta$  は式(1)を用いて算出した。なお、鋼材には溶接構造用圧延鋼材 SM490Y を使用している。試験体は3体製作した。

$$\beta = \frac{\mu \cdot n \cdot m \cdot N_d}{(W - n_w \cdot d) \cdot \sigma_y \cdot t_c} \quad (1)$$

ここに、

$\mu$ : すべり係数 (=0.4),  $n$ : ボルト本数,  
 $m$ : 接合面数 (=2),  $N_d$ : 設計ボルト軸力 (kN),  
 $W$ : 板幅 (mm),  $n_w$ : ボルト行数,  
 $d$ : ボルト孔径 (mm),  $\sigma_y$ : 降伏応力 (N/mm<sup>2</sup>),  
 $t_c$ : 母板厚 (mm)

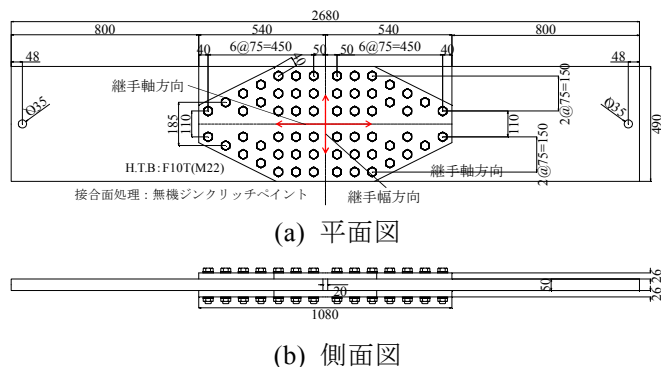


図-1 試験体の形状および寸法 (単位: mm)

## 2.2 試験方法

すべり試験には、土木研究所所有の 30MN 万能試験機を用いた。なお、すべり試験におけるすべりの定義は最大荷重発生時をすべり発生と定義した。すべり側のボルト軸力は設計ボルト軸力の 1 割増しである 225kN、固定側のボルト軸力は設計ボルト軸力の 2 割増しである 246kN を目標に導入した。なお、ボルトの軸力管理は、事前に実施したキャリブレーションから得られた、締付トルクと軸力の関係を用いた。

## 2.3 試験結果

### (1) 荷重 - 相対変位関係

図-2 に各箇所での相対変位に着目した荷重 - 相対変位関係の一例を示す。同図より、継手軸方向の内側 ( $\delta_2$ ) に比べて、外側 ( $\delta_5, \delta_6$ ) の相対変位が大きくなっていることがわかる。これは、継手軸方向の外側に配置されているボルト本数が少なく、その位置における剛性が低いことが原因と考えられる。また、継手軸方向の中央 ( $\delta_3$ ) の相対変位は他の箇所のそれよりも小さくなっている。

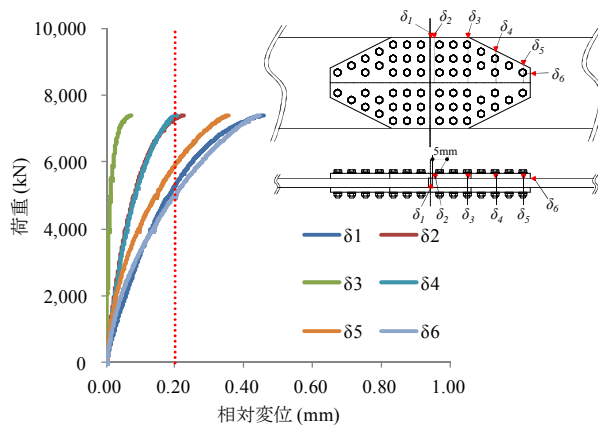


図-2 荷重 - 相対変位関係

### (2) ボルト軸力

図-3 に、荷重と残存軸力の関係の一例を示す。図の横軸は作用荷重をすべり荷重で除した値を示している。図より継手軸内側に配置されたボルト (bolt1) の軸力残存率が最も小さくなっており、その他のボルトは同程度の軸力低下率になっている。これは、継手軸方向の内側では連結板に作用する断面力が最も大きくなることで、それに伴うポアソン効果による板厚減少が生じ、その箇所に配置されたボルトの軸力低下が大きくなったと考えられる。

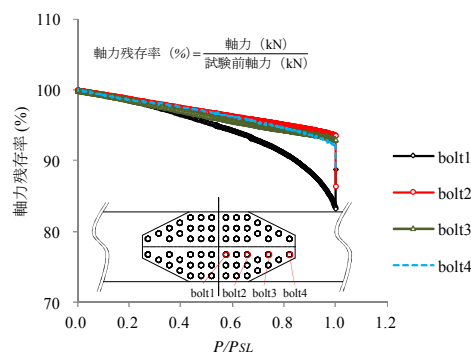


図-3 ボルト軸力残存率

### (3) ひずみ

図-4 にすべり発生時における母板コバ面のひずみ分布を示す。図の縦軸にはひずみを、横軸にはひずみの計測位置をそれぞれ示す。図より、継手軸方向の外側でひずみが最も大きく、内側に向かってひずみが低下している。これは母板に作用する荷重が連結板へと伝達されるためである。ひずみの低下量は継手軸方向の外側 (sM8~sM5) において、次第に大きくなっている。これは、ボルト配置を砲台配置としたことで、千鳥部分において、各ボルト列に存在するボルト本数が継手軸方向の外側から次第に多くなることで連結板に伝達される応力もボルト本数が多い列ほど大きくなるためと考えられる。

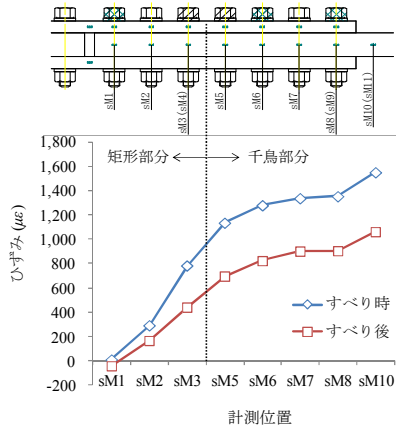


図-4 母板コバ面のひずみ分布

### 3. FEM 解析

#### 3.1 解析ケース

解析は汎用構造解析コード Abaqus/Standard を用いた。表-1 に解析ケースの諸元を、図-5 および図-6 に形状およびメッシュ分割の例をそれぞれ示す。解析ケース名の先頭のアルファベットはボルト配置を示し、St は砲台配置を、G は矩形配置をそれぞれ示す。次に続く数字は順にボルト列数、すべり降伏耐力比  $\beta$  を示している。最後に付く 6row は矩形部分のボルト行数が 6 行であることを、4top は先端ボルト行数が 4 行であることを示している。なお、特に表記がないケースは、矩形部分のボルト行数が 8 行、先端ボルト行数が 2 行である。表中に示す比較項目に対して、同じ記号が付いたケースを比較することでそれぞれの項目につ

いて検討を行う。また、' (ダッシュ) が付くものはすべり係数の低下傾向を確認するためのケースである。なお、本解析では、摩擦面に設定する摩擦係数を 0.5 としたため、結果として得られるすべり係数は 0.5 よりも小さくなる。

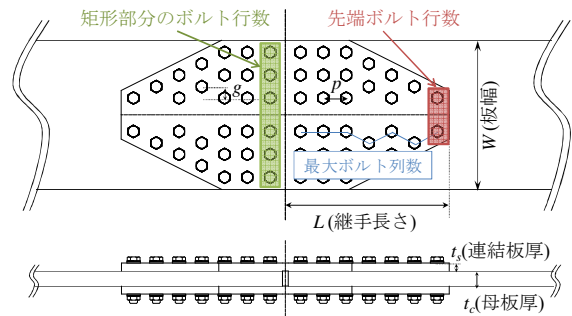


図-5 解析ケースの形状

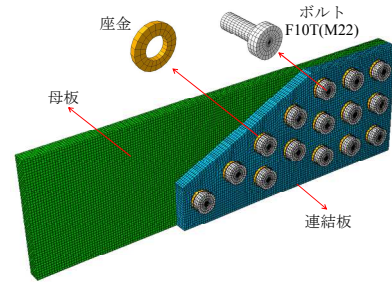


図-6 メッシュ分割の例

#### 3.2 解析結果と考察

図-7 にボルト列数とすべり係数の関係を示す。なお、すべり係数は式(2)を用いて算出している。

$$\mu = \frac{P_{SL}}{m \cdot n \cdot N} \quad (2)$$

表-1 解析ケース

解析ケース	最大ボルト列数	ボルト行数		母板厚 (mm)	連結板厚 (mm)	板幅 (mm)	継手長さ (mm)	ボルト間隔 (mm)		すべり/降伏耐力比 $\beta$	連結板/母板降伏耐力比 $\gamma$	比較項目				
		矩形部分	先端					$p$	$g$			ボルト列数	ボルト配置	$\beta$	先端ボルト行	矩形部分ボルト行
St-7-0.87	7	8	2	50	26	610	530	75	37.5	0.87	1.08	A		C'	D1	E1
St-8-0.87	8					712	605		46			C1	D2	E2		
St-9-0.87	9					820	680		55			A	C2	D'	E'	
St-10-0.87	10					928	755		64			A	C3	D3	E3	
St-12-0.87	12					1132	905		81			A	C4	D4	E4	
St-7-1.20	7					496	530		28				C'			
St-8-1.20	8					568	605		34				C1			
St-9-1.20	9					646	680		40.5				C2			
St-10-1.20	10					724	755		47				C3			
St-11-1.20	11					796	830		53				C'			
St-12-1.20	12					874	905		59.5				C4			
St-8-1.60	8					478	605		26.5				C1			
St-10-1.60	10	592	755	36		C2										
St-12-1.60	12	700	905	45		C4										
St-5-0.87_4top	5	562	380	33.5				D'								
St-7-0.87_4top	7	766	530	50.5				D1								
St-8-0.87_4top	8	868	605	59				D2								
St-10-0.87_4top	10	1078	755	76.5				D3								
St-12-0.87_4top	12	1288	905	94				D4								
St-6-0.87_6row	6	460	455	37.5						E'						
St-7-0.87_6row	7	536	530	47						E1						
St-8-0.87_6row	8	616	605	57						E2						
St-10-0.87_6row	10	768	755	76						E3						
St-12-0.87_6row	12	928	905	96						E4						
G-8-0.87*	8	8	8	100		610	605	75	0.87			B1				
G-8-1.74	8	8	8	50		610	605	75	1.74			B2				
St-11-0.87*	11			100		610	605	75	0.87			B1				
St-11-1.74	11					830	605	75	1.74							
St-8-1.09	8					610	605		1.09							
St-9-1.31	9						680		1.31							
St-10-1.53	10						755		1.53							
St-8-1.30_6row	8						605		1.30							
St-9-1.51_6row	9					460	680		1.51							
St-10-1.73_6row	10						755		1.73							

継手実績を反映

ここに、

$P_{SL}$  : すべり荷重(kN),  $m$  : 摩擦面数(=2),  
 $n$  : ボルト本数(本),  $N$  : 導入軸力(kN)

同図より、St-n-0.87, St-n-0.87\_4top, St-n-0.87\_6row のケースでは、ボルト列数が 10 列以上になるとすべり係数が低下しているが、その低下傾向はケース間で異なっている。また、St-n-0.87 では、ボルト列数が少ない範囲でも、St-n-0.87\_4top および St-n-0.87\_6row よりもすべり係数が低下する結果となった。さらに、St-n-0.87, St-n-1.20 および St-n-1.60 より、すべり/降伏耐力比  $\beta$  が大きくなるとすべり係数が低下し、その低下度は、ボルト列数が増加するほど大きくなっている。

配置の違いについて比較すると、ボルト本数およびすべり/降伏耐力比  $\beta$  が同等の砲台配置 (St-11) と矩形配置 (G-8) のすべり係数は同程度であった。これは、すべり先行型 ( $\beta=0.87$ ) および降伏先行型 ( $\beta=1.74$ ) いずれの場合においても同様の結果であった。

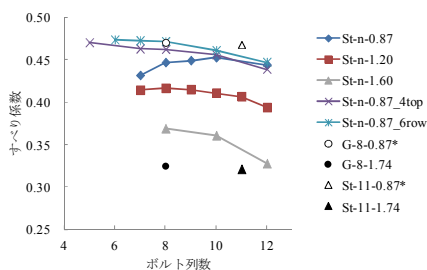
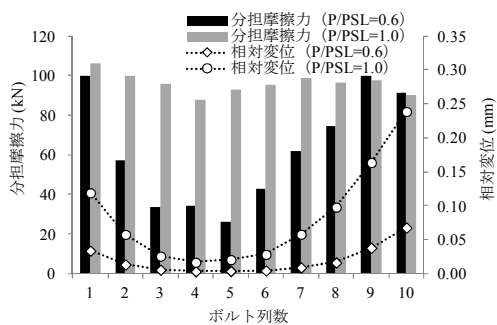


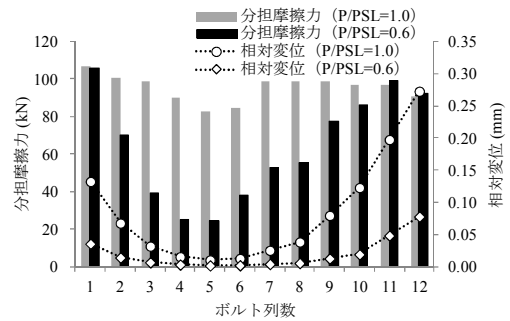
図-7 ボルト列数とすべり係数の関係

(1) ボルト列数の影響

図-8 に St-10-0.87 および St-12-0.87 の各列の分担摩擦力と継手幅方向の内側における継手軸方向の相対変位分布を示す。図より、すべり発生時における分担摩擦力は 4, 5, および 6 列で St-12-0.87 の方が低下している。また、分担摩擦力が低下している箇所と相対変位が最も小さくなっている箇所が一致していることがわかる。つまり、ボルト列数が増加することで、継手軸方向の中央かつ継手幅方向の内側のボルトに力が伝達されにくくなり、その箇所における分担摩擦力が十分に上昇せず、すべり係数が低下すると考えられる。その結果として、継手方向の中央の相対変位も小さくなっている。



(a) St-10-0.87



(b) St-12-0.87

図-8 各列の分担摩擦力

(2) すべり/降伏耐力比  $\beta$  の影響

図-9 にボルト列数 12 列の砲台配置継手を例にすべり発生時における継手軸方向の相対変位分布を、図-10 に各ボルト列の分担摩擦力をそれぞれ示す。図-9 より、継手軸方向の相対変位の分布傾向は一致しているが、その最小値はすべり/降伏耐力比  $\beta$  が大きくなるほど小さくなっている。さらに、図-10 より、相対変位が小さくなっている箇所において、分担摩擦力が低下していることがわかる。これらのことから、すべり/降伏耐力比  $\beta$  が大きくなることで、母板および連結板の変形が大きくなり、継手軸中央の相対変位が小さくなることで、すべり係数が低下すると考えられる。

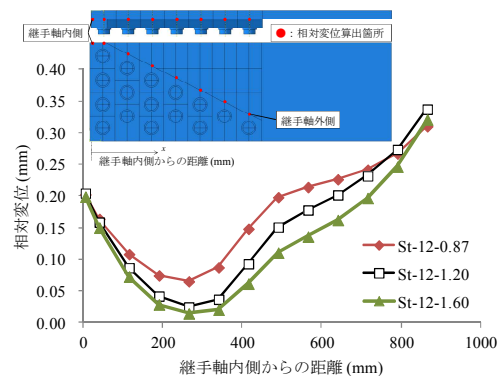


図-9 すべり発生時における継手軸方向の相対変位分布

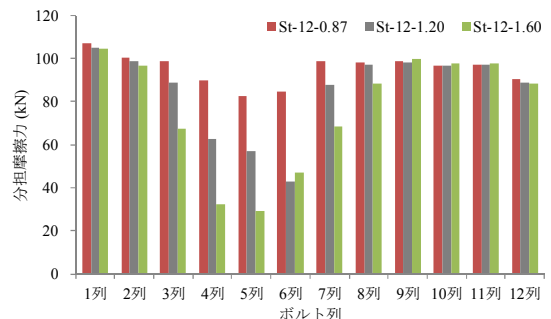


図-10 すべり発生時における各列の分担摩擦力

(3) 先端ボルト行数および矩形部分ボルト行数の影響

図-11 にすべり発生時における継手軸内側の継手幅方向の相対変位分布を示す。図の縦軸には継手幅外側からの距離を、横軸には相対変位を示している。相対

変位算出位置を図-12 に示す。図より、すべり係数が低い結果となった St-7-0.87 および St-8-0.87 において、継手幅方向の内側の相対変位が外側に比べて小さくなっており、その傾向は St-n-0.87\_4top および St-n-0.87\_6row よりも顕著である。つまり、継手軸方向の内側において、継手幅方向の内側のボルトに比べて、外側ボルトで、力の伝達が先行し、すべり係数が低下したと考えられる。結果として、継手軸方向の内側では、継手幅方向の相対変位分布において、内側の相対変位が小さくなっている。

すべり係数が同程度であった、St-7-0.87\_4top と St-7-0.87\_6row, St-8-0.87\_4top と St-8-0.87\_6row の幅方向の相対変位は同程度であった。また、St-n-0.87 および St-n-0.87\_4top は板幅が大きくなると継手幅方向の内側の相対変位も大きくなっている。St-n-0.87\_6row は板幅が小さくても、St-n-0.87 に比べて継手幅方向の内側の相対変位が外側の相対変位と同程度となっているが、これは矩形部分のボルト列数が St-n-0.87\_6row の方が多いためであると考えられる。

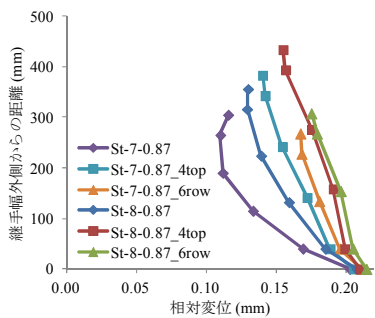


図-11 継手幅方向の相対変位分布

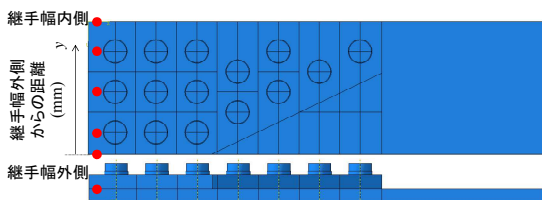


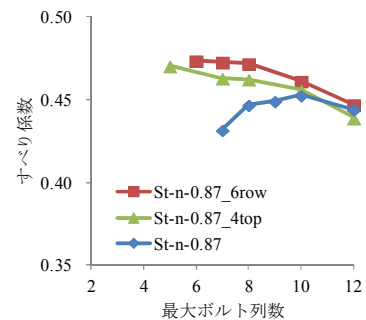
図-12 相対変位算出箇所

#### 4. すべり係数の評価

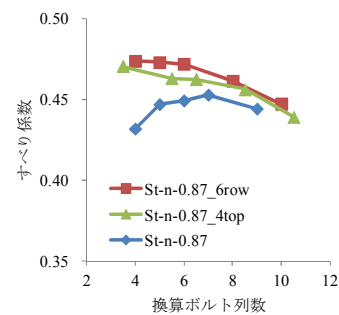
##### 4.1 ボルト列数とすべり係数

図-13 にボルト列数とすべり係数の関係を示す。図-13(a) より、St-n-0.87\_4top および St-n-0.87\_6row において、ボルト列数が 8 列以上の場合、すべり係数およびその低下傾向が一致していることがわかる。しかし、St-n-0.87 では、すべり係数は同程度であるがその 10 列、12 列の低下の傾きが一致していないことがわかる。ここで、St-n-0.87, St-n-0.87\_6row および St-n-0.87\_4top において、同じ最大ボルト列数であっても、矩形部分および千鳥部分のボルト列数はそれぞれ異なっている。それらを統一的に評価するため、それぞれのケースの換算ボルト列数により、すべり係数の評価を行う方法

を考える。それぞれの換算ボルト列数は図-14 に示すように、砲台配置継手を各ボルト行に短冊状に分割し、各行のボルト列数の平均をその継手の換算ボルト列数とする。分割した領域内に存在するボルトは 1 本として数え、分割線上に存在するボルトは 0.5 本として数える。図-13(b)に示す換算ボルト列数とすべり係数の関係では、8 列以上の継手において、多列の影響により、そのすべり係数が低下する傾きおよび低下し始める点がほぼ同等になっている。つまり、ボルトの多列化がすべり係数に及ぼす影響を換算ボルト列数を用いることで、千鳥部分の列数が異なる砲台配置に対しても統一的に評価できると考えられる。



(a) 最大ボルト列数とすべり係数の関係



(b) 換算ボルト列数とすべり係数の関係

図-13 ボルト列数とすべり係数

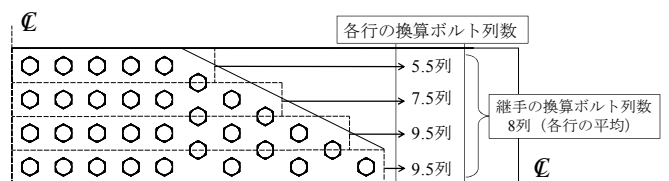


図-14 ボルト列数の換算例

##### 4.2 相対変位比 $\alpha$

3.2(3)で、継手軸方向の内側における幅方向の相対変位が均等に発生しないことが原因ですべり係数が低下することを示した。ここで、継手幅方向の外側の相対変位を内側の相対変位で除した相対変位比  $\alpha$  が板幅  $W$  と矩形部分の長さ  $Lg$  に関係性があると考えられる。 $Lg/W$  と相対変位比  $\alpha$  との関係を図-15 に示す。図中には回帰分析により得られた近似曲線も示している。同図より、 $Lg/W$  と相対変位比  $\alpha$  に関係性がみられる。また、近似曲線の相関係数は 0.86 と高くなっている。

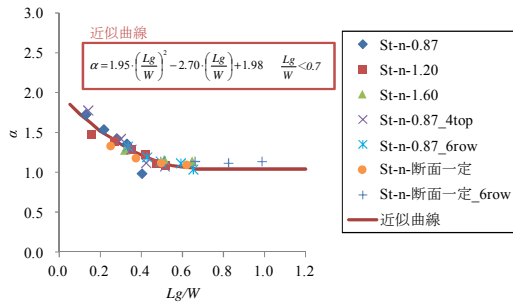


図-15  $Lg/W$ とすべり係数の関係

### 4.3 すべり係数の低減曲線

すべり係数の低下に関連する構造因子は、換算ボルト列数に対応した換算継手長さ  $L'$  (ただし、ボルト間隔および縁短距離は同じ)、すべり/降伏耐力比  $\beta$ 、および相対変位比  $\alpha$  が考えられる。ここで、図-7 のようにすべり係数の低減傾向が異なるため、統一的に評価できるようこれらの因子を考慮し、重回帰分析を用いて、すべり係数の低減係数  $\lambda$  を求める。低減係数と  $\alpha\beta L'$  値の関係は式(3)で定義している ( $\kappa$  は定数)。この式の常用対数を取った式を式(4)で示す。この式に対して、重回帰分析を行い、式中の係数  $j$ 、 $m$  および  $n$  を決定する。回帰分析の結果、得られた低減曲線が式(5)である。

図-16 に得られた低減曲線および解析結果により得られたそれぞれのすべり係数を得られたすべり係数の最大値 (0.47) で除した値と  $\alpha\beta L'$  との関係を示す。図中には石川ら<sup>7)</sup>による解析結果も示している。図より、低減曲線と解析結果はよく一致しているといえる。また、その低減曲線の相関係数は 0.92 であり高い相関性があるとえいる。

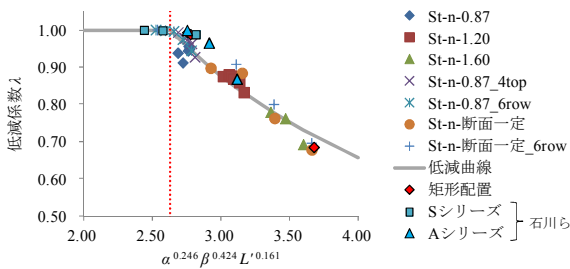


図-16 低減曲線と  $\alpha\beta L'$  の関係

$$\lambda = \frac{\kappa}{\alpha^j \cdot \beta^m \cdot L'^n} \quad (3)$$

$$\log \lambda = \log \kappa - j \log \alpha - m \log \beta - n \log L' \quad (4)$$

$$\text{○低減曲線} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \lambda = 1.0 & \alpha^{0.246} \cdot \beta^{0.424} \cdot L'^{0.161} \leq 2.63 \\ \lambda = \frac{10^{0.420}}{\alpha^{0.246} \cdot \beta^{0.424} \cdot L'^{0.161}} & \alpha^{0.246} \cdot \beta^{0.424} \cdot L'^{0.161} > 2.63 \\ \alpha = \frac{0.2}{\delta_m} = 1.95 \cdot \left(\frac{Lg}{W}\right)^2 - 2.70 \cdot \left(\frac{Lg}{W}\right) + 1.98 & \frac{Lg}{W} < 0.7 \\ \alpha = 1.05 & \frac{Lg}{W} \geq 0.7 \end{cases}$$

## 5. まとめ

本研究では、砲台配置された高力ボルト摩擦接合継手を対象に、すべり挙動を解明することを目的とし、すべり試験および継手の構造諸元に着目したパラメトリック解析を実施した。得られた結果を以下に示す。

- (1) すべり発生時におけるボルトの軸力残存率は継手軸方向の内側ほど連結板の板厚減少により小さくなり、相対変位は継手軸方向の内側に比べて外側の方が大きくなることをすべり試験により確認した。
- (2) ボルトが多列化すると、継手軸方向の中央かつ継手幅方向の内側のボルトに力が伝達されにくくなり、その箇所における分担摩擦力が十分に上昇せず、すべり係数が低下すると考えられる。その結果として、継手方向の中央の相対変位も小さくなる。
- (3) すべり/降伏耐力比  $\beta$  が大きくなることで、連結板および母板の変形が大きくなり、継手軸内側および外側の相対変位が大きくなる。このように、作用する平均応力が大きくなり相対変位が増加することですべり係数が低下すると考えられる。
- (4) 砲台配置継手において、板幅が小さくなる、あるいは矩形部分の長さが短くなることで、継手軸内側の幅方向の相対変位分布が均等に発生せず、すべり係数が低下する。
- (5) 砲台配置継手のすべり係数の低下は相対変位比  $\alpha$ 、すべり/降伏耐力比  $\beta$  および換算継手長さ  $L'$  に関連する。また、低減係数を目的変数、 $\alpha$ 、 $\beta$  および  $L'$  を目的変数とした重回帰分析を行った結果、そのすべり係数の低減曲線をそれらすべり係数の低下に関連する因子のべき乗ですべり係数の評価式を提案した。

### 〈参考文献〉

- 1) 西村宜男, 秋山寿行, 亀井義典: 高力ボルト摩擦接合継手に関する最近の研究動向, 土木学会論文集 No.675/I-55, pp.1-14, 2001年。
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 1996年12月
- 3) 彭雪, 山口隆司, 高井俊和, 村越潤, 澤田守: 厚板多列高力ボルト摩擦接合継手の構造諸元がすべり挙動に与える影響に関する解析的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・耐震工学), Vol.69, No.3, pp.452-466, 2013年。
- 4) 独立行政法人土木研究所, 公立大学法人大阪市立大学: 高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究報告書, 共同研究報告書 No.428, 2012年。
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 2013年3月
- 6) 土木学会鋼構造委員会鋼構造物の部材連結に関する検討小委員会: 部材連結に関する現状と課題, 2012年。
- 7) 石川誠, 亀井義典, 西村宜男, 秋山寿行: 千鳥配置された高力ボルト摩擦接合継手の強度と荷重伝達機構, 土木学会構造工学論文集, Vol.48A, 2003年。

## 討議

### 討議 [ 鬼頭 宏明 教授 ]

実験に用いたすべり試験体のレイアウト（形状および寸法）を決めている理由は何か？

#### 回答

本試験では、鋼 I 型断面桁の引張力を受ける下フランジ連結部に用いられる砲台配置継手を想定している。さらに、基本的なすべり挙動を調査することを目的としていることから、母材降伏の影響を受けないよう、すべり/降伏耐力比  $\beta$  を 0.86 程度とすることを前提とした。また、ボルト中心間隔は道路橋示方書に示される M22 のボルトに対する最小ボルト中心間隔を参考に決定している。

### 討議 [ 山田 卓 講師 ]

ボルト位置によって相対変位が異なっているが、部材が伸びている影響もあるのではないか？

#### 回答

部材伸びの影響によって各ボルト位置の相対変位が異なることが考えられる。摩擦接合継手は母材および連結板の降伏あるいは接合面のすべりに対して、安全側になるように設計されている。よって、継手の両端の相対変位が大きくなることは部分的なすべりが生じていることを意味し、すべり耐力が低下すると考えられる。また、これらの現象は多列化した継手のすべり試験においても確認されている。

### 討議 [ 谷口 徹郎 准教授 ]

ボルト列数が増えることですべり耐力が低下するのは仕方ないのか？配置を工夫することで改善はできるのか？

#### 回答

ボルト列数が増加することで、すべり耐力が低下することは避けられないと考えられる。また、それに対する改善策としては、本研究の結果から判断すると、砲台配置において、ボルト本数が多くなる場合に矩形部分の長さ  $L_g$  と板幅  $W$  との比である、 $\alpha$  の値が小さくならないよう考慮しながらボルト行数（橋軸直角方向のボルト本数）を増加させることが考えられる。

### 討議 [ 松村 政秀 准教授 ]

検討結果から砲台配置の最適な形状は何か考えられるのか？

#### 回答

ボルト配置に関するパラメータとして、ボルト列数、先端ボルト行数および矩形部分のボルト行数に着目した解析を実施している。それらの結果から、先端ボルト行数の違いによるすべり係数の低下は確認されず、ボルト列数が少ない範囲において、矩形部分のボルト列数が少ない継手のすべり係数が低下した。これらの結果から判断して、砲台配置においては、矩形部分のボルト列数を 3 列以上確保し、先端ボルト行数を 2 行とする配置が最適であると考えられる。

### 討議 [ 鬼頭 宏明 教授 ]

すべり以降は支圧と摩擦が混在した状態となっているのか？

#### 回答

本研究では、解析におけるすべりの定義を「最大荷重発生時あるいは継手内側相対変位が 0.2mm に達したときのうち、相対変位が小さい方の時点」としている。また、ボルト孔径は 24.5mm としており、孔中央に配置したボルト（M22）軸部との間隙は 1.25mm となっている。よって、すべり発生時における継手軸方向の各箇所の相対変位量は 1.25mm よりも小さく、すべり発生時のいて支圧状態となっているボルトは存在していないと考えられる。また、すべてのボルトがすべり耐力に達した後は継手両端のボルトから支圧状態となることが想定される。

### 討議 [ 谷口 徹郎 教授 ]

繰返し荷重が作用する場合はどういった影響が考えられるのか？

#### 回答

力学的挙動から想定すると、静止摩擦の範囲内であれば繰返し荷重による影響はほとんどないと考えられる。つまり、実現象を想定しても、供用中に発生するような応力範囲であれば、すべり耐力に対する繰返し荷重の影響はほとんどないと考えられる。

また、継手に圧縮力が作用する場合は、ポアソン効果によって母板の板厚が増加することで、ボルト軸力が増加するため、引張力を受ける場合に比べて、すべり係数は上がる傾向にある。

### 討議 [ 山田 卓 講師 ]

解析結果によるすべり係数の最小の低減係数が 0.6 となっているが、道路橋示方書に示されている値と同じものなのか？

#### 回答

道路橋示方書に示されるものとは異なる。道路橋示方書によって規定されている低減係数はボルト列数のみを考慮したものであり、本研究で提案する低減係数はすべり/降伏耐力比 $\beta$ を考慮したものである。つまり、ボルトが多列化し、すべり/降伏耐力比が大きい継手になると低減係数が0.6まで低下していることを示している。