

大阪市立大学大学院 学生員○高井 俊和
大阪市立大学大学院 正会員 山口 隆司
大阪市立大学大学院 学生員 山階 清永

1. 研究目的

著者ら[1]は、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関連する各種不確定要因に着目し、それらの変動の分布を調査し、FEM による感度解析を実施した。その結果、母板厚が 75 mm、すべり／降伏耐力比が 0.66、ボルト列数が 3 列の場合、接合面の摩擦係数、およびボルト軸力の変動が、すべり耐力の変動へ与える影響が大きく、12 列の継手ではさらに鋼材のヤング係数の変動の影響が大きいなど、各変動の寄与の大小を示した。

本研究では、これらの影響の大きい変動に着目し、FEM 解析で得られたすべり係数から、各変動とすべり係数との応答曲面を求め、モンテカルロシミュレーションにより、すべり係数の変動の分布を試算する。

2. 解析条件

検討対象は、諸元を表 1 に、形状例を図 1 に示す母板厚が 75 mm の厚板で、ボルト配置が 1 行 3 列および多列の 1 行 12 列の継手である。摩擦係数は、無機ジンクリッチペイント塗布を想定し、0.72[1]としている。母材降伏の影響を排除してすべり耐力への影響を見るため、すべり／降伏耐力比が 0.66 のすべり先行型の継手を対象としている。

解析プログラムは Abaqus／Standard v6.13 を使用した。要素分割、荷重条件などのモデル化、すべり発生 の定義は、著者らの過去の研究[1]に準拠している。

変動の付与状況を表 2 に示す。変動の付与は実験計画法[2]を参考にし、その大きさは、平均値からの変動値までのベクトルの長さが同じになるよう、変動が 1 つの場合は(平均値) ± (2×標準偏差)、組合せの場合は(平均値) ± (1.15 ×標準偏差)としている。解析モデルに与えた変動値を表 3 に示す。

3. 解析結果および応答曲面

解析で得られたすべり係数を被説明変数、与えた変動を標準偏差で無次元化した大きさを説明変数とする重回帰分析で得られた標準偏回帰係数を図 2 に示す。重回帰分析は、各変動の 1 次項、交差項、および 2 次項を考慮している。

表 1 解析対象の継手諸元

高力ボルト	ボルト列数 (列)	3列タイプ	12列タイプ
		3	12
母板／連結板	等級	F10T M22	
	初期導入軸力 (kN/本)	205	
	降伏点 (MPa)	900	
	鋼種	SM490Y	
	板幅 (mm)	75	226
	母板厚 (mm)	75	
継手形状	連結板厚 (mm)	38	
	ボルト孔径 (mm)	24.5	
	降伏点 (MPa)	355	
	摩擦面数 (面)	2	
	摩擦係数	0.72	
設計すべり荷重 (kN)	ボルトピッチ (mm)	75	
	縁端距離 (mm)	40	
	設計母板降伏荷重 (kN)	886	3,542
	設計母板降伏荷重 (kN)	1,345	5,365
すべり／降伏耐力比		0.66	

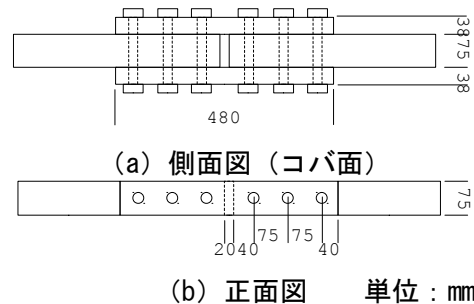


図 1 解析対象の継手形状 (3 列タイプ)

表 2 変動の付与状況

	モデル番号	ヤング率 E	摩擦係数 μ	ボルト軸力 N
平均値モデル	1	±0	±0	±0
変動付与モデル	2	-1.15σ	-1.15σ	-1.15σ
	3	-1.15σ	-1.15σ	+1.15σ
	4	-1.15σ	+1.15σ	-1.15σ
	5	-1.15σ	+1.15σ	+1.15σ
	6	+1.15σ	-1.15σ	-1.15σ
	7	+1.15σ	-1.15σ	+1.15σ
	8	+1.15σ	+1.15σ	-1.15σ
	9	+1.15σ	+1.15σ	+1.15σ
	10	-2σ	±0	±0
	11	+2σ	±0	±0
	12	±0	-2σ	±0
	13	±0	+2σ	±0
	14	±0	±0	-2σ
	15	±0	±0	+2σ

σ：標準偏差
±0：変動量を与えず (=平均値を使用)

切片は、ボルト列数が3列で0.698、12列で0.591である。
自由度調整済決定係数は、3列で0.998、12列で0.797とよい相関がみられた。

図2より、ボルト列数が3列の場合、すべり係数の寄与は、摩擦係数、ボルト軸力がほとんどであり、交差項、2次項の寄与がない。12列の場合、ヤング係数の1次項の寄与も大きい。多列の場合、相対変位によりすべり発生が支配されるため、相対変位および板ののびに関係するヤング係数の影響が高く、3列タイプと比べ12列のヤング係数の寄与が大きくなったと考えられる。さらに、2次項の寄与も若干みられる。

4. モンテカルロシミュレーション

図2のすべての回帰係数の線形和で得られる応答曲面を用い、モンテカルロシミュレーションによりすべり係数の分布を求めた。試行回数は15万回である。エクセルで発生させた正規乱数を用いた。得られた分布を図3に示す。

ボルト列数が12列のすべり係数の平均値が0.595と、3列の場合の0.697よりも低くなっている。これは、ボルトの多列によるすべり係数の低下の影響である。すべり係数のばらつきは、3列および12列の場合の標準偏差が0.034、0.022と、12列の方が分布の範囲が狭い。これは、すべり発生が相対変位に支配されるため、ヤング係数の影響は大きくなるが、すべり係数が低く、摩擦係数とボルト軸力の影響が小さくなり、結果的に変動全体の影響が小さくなったためと考えられる。

また、得られた分布で、接合面が無機ジンクリッチペイントの場合の設計すべり係数である0.45を下回る確率を求めると、3列の場合は $P(-\beta) = P(-7.2) = 3.0 \times 10^{-13}$ 、12列の場合は $P(-\beta) = P(-6.7) = 1.0 \times 10^{-11}$ となり、いずれの場合も β が大きく、その確率がほぼゼロとなった。この理由として、本検討で用いた摩擦係数の変動が、同一条件の一連のすべり試験に基づいており、その変動の標準偏差が小さく、平均値が高めであったことが関係していると考えられる。

5. 設計すべり係数の試算

得られたすべり係数の分布から、Eurocodeの目標信頼性指標 β を参考に β が3.8となるすべり係数を試算した結果を表4に示す。

β が3.8となるすべり係数が3列の場合0.568、12列の場合0.513となった。これに対し、道路橋示方書の多列の場合のボルト許容力に乘じる低減係数を考慮すると、いずれのボルト列数とも0.56程度となった。

参考文献

- [1] 高井 俊和, 彭 雪, 山口 隆司, 山階 清永: 各種のばらつきが厚板鋼板の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に与える影響に関する研究, 鋼構造論文集, 第21巻, 第82号, pp. 15-27, 2014.6
- [2] 山田 秀: 実験計画法 基盤的方法から応答曲面法, タグチメソッド, 最適計画まで, 日科技連出版社, 2004.9

表3 解析で与えた変動値

着目変動	変動量を考慮した解析入力値				
	$m-2\sigma$	$m-1.15\sigma$	m	$m+1.15\sigma$	$m+2\sigma$
ヤング係数 E (N/mm ²)	181,006	189,034	200,000	210,966	218,994
摩擦係数 μ	0.652	0.681	0.72	0.759	0.788
ボルト軸力 N (kN)	197	201	205	209	213
	-3.7%	-2.1%	0.0%	2.1%	3.7%

※下段(%)は、平均値(m)に対する変動の割合

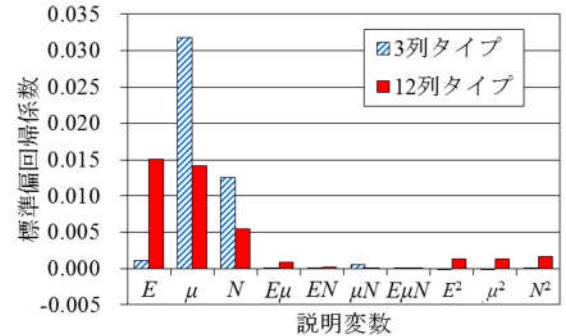


図2 標準編回帰係数

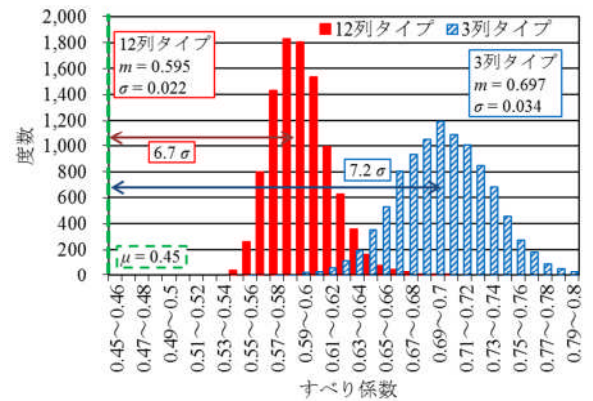


図3 標準編回帰係数

表4 設計すべり係数の試算

タイプ		3列タイプ	12列タイプ
パターン		Rg _{15/10} -Sf ₁₀	
シミュレーション結果 (すべり係数)	平均値 m	0.698	0.595
	標準偏差 σ	0.034	0.022
$\beta=3.8$ のときのすべり係数 試算	$m-3.8\sigma$	0.568	0.513
	道示低減係数	1.00	0.92
	設計すべり係数 (試算)	0.57	0.56