

接触圧依存の摩擦係数が拡大孔・長孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に与える影響

大阪市立大学大学院 学生員 ○堀井 いずみ
日本橋梁株式会社 フェロー 小西 日出幸
西日本高速道路株式会社 正会員 豊田 雄介

大阪公立大学大学院 正会員 山口 隆司
オリエンタル白石株式会社 正会員 亀崎 誠志
西日本高速道路株式会社 正会員 浅野 貴弘

1. 研究背景および目的

拡大孔・長孔を有する高力ボルト摩擦接合継手の FEM 解析では、接触圧に依存しないクーロン摩擦を付与することが一般的であった。しかし、高力ボルト摩擦接合継手の接合面に無機ジンクを用いた場合、接触圧が大きくなるにつれて摩擦係数が低下するという関係が既往研究¹⁾により示されている。この関係を考慮すると高接触圧となる拡大孔・長孔ではすべり係数の低下率がさらに大きくなることが想定される。

本稿では、接合面に無機ジンクを塗布した場合を想定して接触圧依存の摩擦係数を用い、長孔のすべり係数の低下率を評価することを目的として、ボルト孔形状をパラメータとした FEM 解析を実施した。

2. 解析手法

Abaqus/Standard2022 を用いて、境界非線形性を考慮した静的弾塑性有限変位解析を実施した。解析対象は、1 行 2 列の高力ボルト摩擦接合継手で、モデル化範囲は図-1 に示すように、対称性を考慮した 1/4 モデルである。すべり/降伏耐力比 β は 0.85 のすべり先行型と 1.29 の降伏先行型とし、使用する鋼材を変えることで β を調整した。使用要素は、主に 8 節点低減積分 6 面体 1 次要素を用い、要素サイズは高力ボルトおよび座金は 2mm、母板・連結板のボルト孔付近は 1mm、それ以外は 2mm となるように分割した。接触やすべりが想定される部位全てに接触の相互作用を与え、母板連結板の接合面には図-2 に示した実験値から導出した累乗近似曲線(式(1))に示す接触圧 σ に依存して変化する摩擦係数 μ を与えた。その他の箇所に与えた摩擦係数は図-2 に示すとおりである。解析に用いた材料特性は表-1 の加工硬化係数が E/100 のバイリニア型構成則とした。

$$\begin{aligned} \mu &= 0.912 & 0 < \sigma \leq 45 \\ \mu &= 5.604 \times \sigma^{-0.477} & 45 < \sigma \leq 417 \\ \mu &= 0.315 & 417 < \sigma \end{aligned}$$

(1)

3. 解析ケース

解析ケースを表-2 に示す。パラメータは母板の孔形

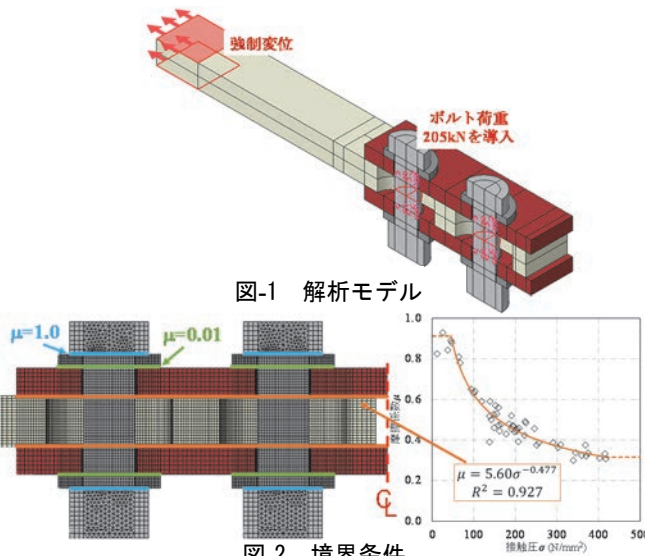


図-1 解析モデル

図-2 境界条件

表-1 材料特性

部材	鋼種	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	応力 (N/mm ²)	ひずみ (×10 ⁻⁶)
母板・ 連結板	SS400	200,000	0.3	235	1175
	SM490Y	200,000	0.3	332.65	50000
高力ボルト ナット・座金	F10T	200,000	0.3	355	1775
				451.45	50000
				900	4500
				991	50000

表-2 解析ケース

ケース名	ボルト 呼び径	鋼材	孔径 (mm)	板厚(mm)		板幅 (mm)
				母板	連結板	
S	NH	M22	SM490Y	22	12	80
	OH					84
	SHs					80
	SHI					80
	SHs90					88.5
	SHI90					110.5
Y	NH	M22	SS400	22	12	80
	OH					84
	SHs					80
	SHI					80
	SHs90					88.5
	SHI90					110.5

状とし、標準孔 φ24.5、拡大孔 φ28.5、荷重方向の短い長孔 24.5×33、長い長孔 24.5×55、荷重直角方向の短い長孔 33×24.5、長い長孔 55×24.5 とした。連結板の孔径は標準孔径の φ24.5 としている。ケース名の S はすべり先行型、Y は降伏先行型を意味している。

4. 解析結果

解析より得られたすべり耐力およびすべり係数、軸力低下率、降伏耐力を表-3 に示す。すべり係数低下率

は長孔のすべり係数を標準孔のそれで除して算出した。
本解析と同じ継手断面構成でクーロン摩擦を付与している文献 2)の解析結果と比較を行い、与えた摩擦係数の差がすべり係数低下率に与える影響を調べる。

表-3 より、標準孔のすべり係数は 0.507 であり、クーロン摩擦の 0.480²⁾と比較すると、接触圧依存の摩擦係数を導入した方がすべり係数は大きい。しかし、拡大孔・長孔ではボルト孔付近の高接触圧が影響し、クーロン摩擦の方がすべり係数が大きい。標準孔で生じる接触圧の範囲では、接触圧に依存して変化する摩擦係数の影響は小さいが、拡大孔・長孔のように、母板連結板間の接触面積が小さく、ボルト孔付近で高接触圧となる場合、接触圧依存の摩擦係数の影響ですべり係数が低下すると考えられる。すべり係数低下率は S-OH で 7.1%, S-SHs で 8.8%, S-SHI で 17.9%, S-SHs90 で 8.0%, S-SHI90 で 15.8%であった。文献 2)と比較すると、拡大孔・長孔すべての孔形状ですべり係数低下率は大きい。

降伏先行型のすべり係数低下率は、拡大孔で 2%, 長孔で 1%~11%であり、クーロン摩擦ではすべり先行型より降伏先行型の方がすべり係数低下率が大きいが、接触圧依存の摩擦ではその逆となっていることがわかる。すなわち、接触圧依存の摩擦では降伏先行型の方が標準孔と長孔のすべり係数の差が小さくなった。これは、降伏先行型ではすべりの前に純断面降伏が発生しており、板やせによる軸力低下が原因である。すべり時の平均軸力は Y-NH で 160.4kN、Y-SHI で 156.7kN であり、Y-SHIの方が軸力が小さい。Y-SHIでは接触面積が小さいため接触圧が大きくなるが、すべり時の軸力が小さいため、生じる接触圧は標準孔と同程度となり、摩擦係数も同程度となる (図-3)。

Y-NH, Y-OH では解析結果の降伏耐力 P_{ny} が設計値(式(2)により算出)の 1.1 倍以上であるが、Y-SHIでは解析結果が設計値の 1.0 倍となっている。図-4 に示す純断面降伏時の Mises 応力コンターより、Y-NH, Y-OH では純断面部から 45° 方向に塑性域が進展しているのに対して、Y-SHI では純断面部に垂直に塑性域が進展している。Y-SHI では、塑性域の進展の傾向が異なり、他の孔形状より塑性域の進展が早く、降伏耐力が低下した。また、Y-SHI90 では接触圧による塑性域と母板引張による塑性域がわかれ、接触圧による降伏が純断面降伏に影響しないため、降伏耐力が大きくなったと考えられる。

$$P_{ny} = \sigma_y(w - d_0)t_m \tag{2}$$

表-3 解析結果

ケース名		すべり 耐力 (kN)	すべり 係数	すべり 係数 低下率	すべり時軸力 (kN)			降伏 耐力 (kN)	クーロン 摩擦すべり係数
					内側	外側	平均		
S	NH	415.8	0.507	—	192.3	193.0	192.7	—	0.480
	OH	386.4	0.471	7.1%	193.6	192.5	193.0	—	0.477
	SHs	379.2	0.462	8.8%	191.0	189.7	190.4	—	0.473
	SHI	341.2	0.416	17.9%	185.2	183.1	184.1	—	0.456
	SHs90	382.4	0.466	8.0%	194.3	192.8	193.5	—	0.478
	SHI90	349.9	0.427	15.8%	192.8	191.5	192.1	—	0.476
Y	NH	381.8	0.466	—	175.8	145.1	160.4	332.5	—
	OH	373.9	0.456	2.1%	177.3	155.8	166.5	334.9	—
	SHs	363.9	0.444	4.7%	174.3	147.1	160.7	325.4	—
	SHI	338.9	0.413	11.2%	169.8	143.5	156.7	293.6	—
	SHs90	376.3	0.459	1.4%	178.2	164.2	171.2	343.5	—
	SHI90	361.7	0.441	5.2%	177.1	178.3	177.7	361.7	—

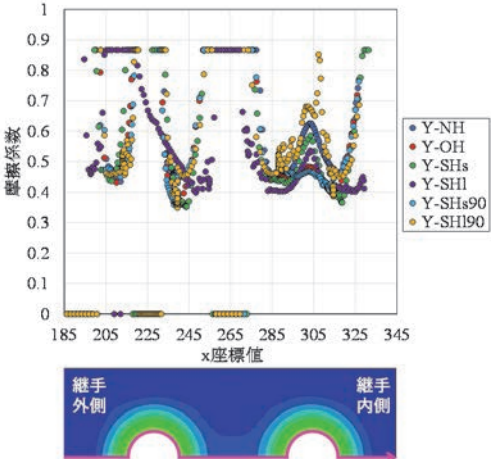


図-3 すべり時の摩擦係数分布 (降伏先行型)

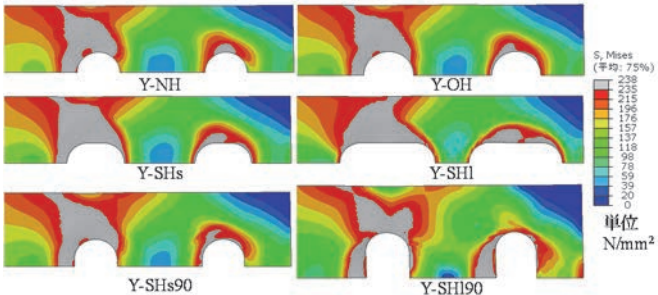


図-4 純断面降伏時の母板 Mises 応力コンター (降伏先行型, 単位 (N/mm²))

ここに、 σ_y : 母板の降伏点(N/mm²), w : 母板幅(mm), d_0 : ボルト孔径(mm), t_m : 母板厚(mm)

5. まとめ

接触圧依存の摩擦係数を導入して実施した FEM 解析による本検討により得られた成果を以下に示す。

- (1) すべり先行型のすべり係数低下率は拡大孔で 7%, 長孔では 8%~18%であった。

(2) 降伏先行型のすべり係数低下率は拡大孔で 2%, 長孔では 1%~11%ですべり先行型より小さくなった。

(3) 長孔では塑性域の進展が早く、降伏耐力は設計値の 1.1 倍を下回る 1.0 倍であった。

<参考文献>

1) 森猛, 網谷岳夫, 内田大介: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に対するボルト軸力の影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第 75 巻, 第 1 号, pp.58-66, 2019.

2) 堀井いずみ, 山口隆司, 小西日出幸, 亀崎誠志, 豊田雄介: 拡大孔・長孔を有する高力ボルト摩擦接合継手のすべりおよびすべり後挙動に関する解析的検討, 構造工学論文集 Vol.69A, 2023