

高力ボルト継手の FEM 解析における計算収束性向上のためのモデル化方法の検討

九州工業大学 学生会員〇古市 大陽

九州工業大学 正会員 高井 俊和

1. はじめに

高力ボルト継手の FEM 解析では、部材間の接触、摩擦を扱うため計算収束性が低く、解が得られない場合がある。その例として、ボルト軸力導入時初期のボルトの剛体移動の発生や、すべり後、ボルト軸部と孔壁間の高い支圧応力下での摩擦の計算、ボルトの曲げ変形が進み、ボルト頭部と連結板間に角度が生じ座金の姿勢が計算上不安定となった状態が挙げられる。

文献[1]によれば接触部の摩擦係数が低い方が計算収束性が高くなるとされている。この情報や計算収束性低下の要因をもとに、本検討では、高力ボルト継手の FEM 解析の計算収束性を向上させるモデル化を検討し、その効果と各種荷重の評価結果への影響を確認した。

2. 解析ケース

解析対象とした継手の諸元を表 1 に、解析ケースを表 2 に示す。

ケース a と b の比較では、ボルト軸力導入時のボルトの剛体移動の抑制のため、ボルトの拘束の追加をした。引張荷重作用時にはこの拘束は解除した。

b, c, d の比較では、ボルト軸部とボルト孔の接触の計算収束性向上のため、ボルトと各部の摩擦係数を小さくしたケースを設定した。

e, f の比較では、終局時の計算収束性改善のため、座金とボルトを結合した。

3. 解析方法

解析プログラムは Abaqus Standard v6.13 を用いた。解析モデルの概要を図 1 に示す。対称性を考慮し 1/8 モデルとした。材料特性は、ヤング率を 200,000 N/mm²、ポアソン比を 0.3、降伏点、引張強さは JIS の下限値とした。文献[2]を参考にトリリニア型真応力-真ひずみ関係を用いた。また、幾何学的非線形性を考慮した。母材と連結板間の摩擦係数は 0.5、母板と座金間の摩擦係数は 0.005 とした。

解析の計算ステップは、まず、ボルト軸力導入し、その後強制変位を与えて引張荷重を作用させた。

すべり荷重の定義は、母板と連結板のずれ（相対変位）に着目し、「解析における最大荷重時、もしくは内

表 1 継手の諸元

ボルト	ボルト配置	1行3列	1行1列
	等級	F10T	
呼び	M22		
耐力 (N/mm ²)	900		
引張強さ (N/mm ²)	1,000		
接合面数	2		
ボルト本数	3	1	
設計ボルト軸力 (kN)	205		
母板・連結板	鋼種	SM490Y	
	降伏点 (N/mm ²)	355	
	引張強さ (N/mm ²)	490	
	母板厚 (mm)	28	
	連結板厚 (mm)	16	
	縁端距離 (mm)	40	
	ピッチ (mm)	75	—
	板幅 (mm)	120	80
	ボルト孔径 (mm)	24.5	
	純幅 (mm)	95.5	55.5
母板長さ (mm)	500	110	
連結板長さ (mm)	480	220	
すべり/降伏耐力比 β			0.65

表 2 解析ケース

ケース名	ボルト配置	ボルトの拘束	ボルトとの摩擦係数		ボルト・座金の結合
			母板	連結板	
a	1行3列	なし	0.5	0.5	なし
b	1行3列	あり	0.5	0.5	なし
c	1行3列	あり	0.005	0.5	なし
d	1行3列	あり	0.005	0.005	なし
e	1行1列	あり	0.005	0.005	なし
f	1行1列	あり	0.005	—	結合

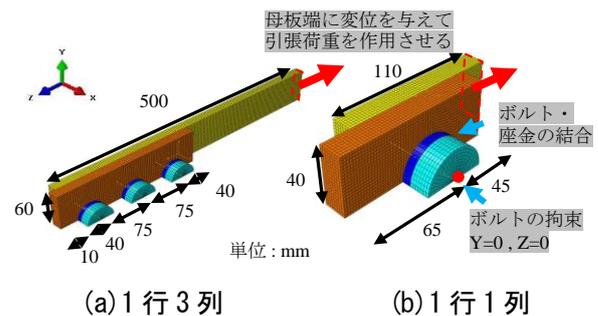


図 1 解析モデルの概要

側相対変位が 0.2mm に達した時点のうち、内側相対変位が小さい方の時点の荷重」[3]とした。相対変位は継手のコバ面で継手中央部の母板端部から 15mm の位置を参照した。

降伏は 1 行 3 列のケースでは母板純断面で生じ、降伏荷重は、降伏領域がコバ面に達した時点の荷重[4]とし、1 行 1 列のケースはボルト軸部で生じたため、降伏荷重は、ボルト軸部の断面全体がせん断降伏した時点の荷重[5]とした。また、最大荷重は解析結果におけ

る荷重のピーク時の値とした。

4. 解析結果および考察

図2に示すように、1行3列は母板の純断面で、1行1列はボルト軸部のせん断で降伏、終局となった。荷重-変位関係と荷重-相対変位関係を図3に、各種荷重を図4にまとめる。

図3より、ケースaでは、ボルト軸力導入開始時にボルトの剛体移動が発生し、計算が収束せず結果が得られなかった。一方で、bはボルトに追加した拘束により剛体移動が抑制され、結果が得られた。

また、ケースb, c, dより、各部位の摩擦係数を小さくしても荷重-変位、荷重-相対変位の挙動に差はなく、図4に示した各荷重への影響は最大でも2%程度と小さかった。よって純断面降伏が生じるケースにおいて、計算の収束性向上のために摩擦係数を低くしても各種荷重の評価には影響しないと考えられる。

図3よりケースeでは最大荷重に達する前に解析が打ち切られた。eでは支圧によるボルト軸部の曲げによって、座金と連結板、ボルトに角度が生じ、図5に示すように座金が局所的にしか接触せず、姿勢が不安定となり、解が得られなかったと考えられる。fでボルトと座金を結合することで最大荷重まで解が得られた。また、図3でeの解析が打ち切られるまで荷重-変位、荷重-相対変位の挙動とfの挙動は一致し、すべり荷重、降伏荷重の差が1%未満であり、ボルトと座金を結合しても各種荷重の評価への影響はないと考えられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 21K14233 の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

[1]ダッソー・システムズ株式会社 SIMULIA 事業部：Abaqus トラブルシューティングの手引き - よくある解析のエラーとその対策 - Abaqus 6.14), 2015

[2]大塚 貴広, 高井 俊和: 破断を考慮した真応力-ひずみ関係の簡易なモデル化方法の1提案, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, I-420, 2021.9

[3]彭雪, 山口 隆司, 高井 俊和, 村越 潤, 澤田 守: 厚板多列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, Vol.69, No.3, pp.452-466, 2013.9

[4]高井 俊和, 森山 仁志, 山口 隆司, 山本 佑大: 高力ボルト摩擦接合継手の引張載荷実験における試

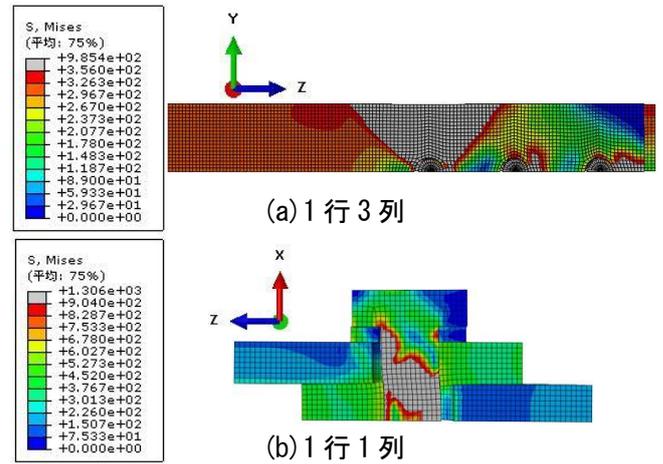


図2 応力分布図 (降伏時, 灰色: 降伏領域)

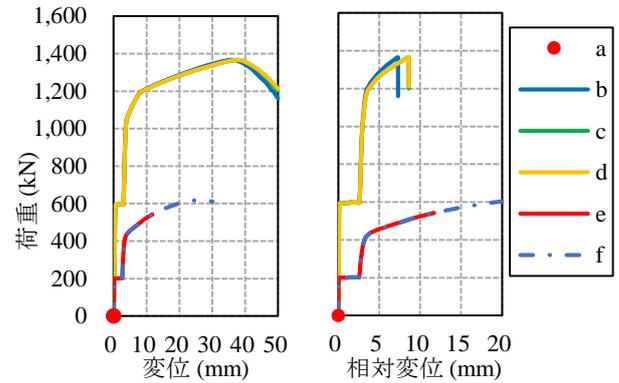


図3 荷重-母板端変位および荷重-相対変位

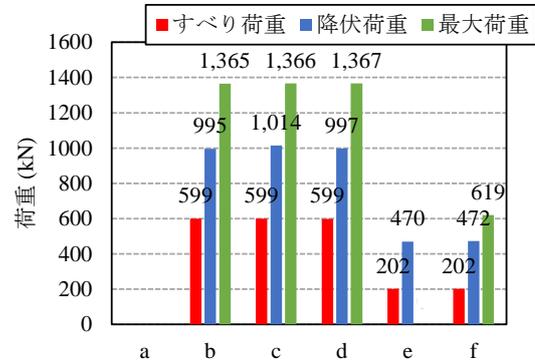


図4 各種荷重の比較

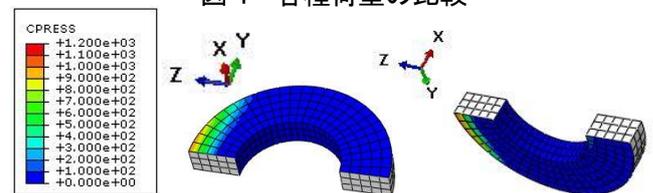


図5 座金の接触応力(ケースe, 解析打ち切り時)

験体ボルト行数のすべりおよび母板降伏挙動への影響に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.365-376, 2019.3

[5]高井 俊和: アンボトニング現象に着目した高力ボルト摩擦接合継手のすべり後のボルト軸部のせん断挙動, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.282-295, 2021.3