

高力ボルト摩擦接合部の応力解析

辻 岡 静 雄*

Stress Analysis of High-Strength Bolted Friction-Type Joints

Shizuo Tsujioka

This paper deals with the high-strength bolted friction-type joints before the major slip. As the gap-friction problems, the non-linear three-dimensional FEM analyses for one-fourth of joints were performed by using COSMOS/M. The distribution of the axial force in main plate and the friction force on the faying surfaces are discussed. The peak value of the principal stress and the von Mises stress can be obtained from the numerical results. It is obtained that the high concentration of stress occurs in both the edge and the front of the first bolt hole.

1. はじめに

応力の流れが円滑で継手の剛性が高い高力ボルト摩擦接合は添え板と被接合材との接触面における平面的な広がりを持った摩擦力によって応力を伝達する。その接触圧分布^{1,2)}は孔周辺から線形的に減少するので、材間の摩擦力は一様分布とならず、被接合材或いは添え板の応力分布に大きな影響を与える。継手の引張実験により、引張力を受ければ端部では微少なずれが生じるが継手中央部ではずれは小さくなること、孔縁の応力集中度は平均応力の2~2.5倍程度であること、長さ方向には端部に応力が集中し不均等分布となり荷重レベルによって応力分布特性が異なること等が得られている^{3,4)}。また、継手の断面を二次元平版に置換した解析も行われ、実験結果との対応が検討されている⁴⁾。最近では、3次元弾塑性接触問題としてすべり現象のFEM解析も行われている⁵⁾。

このような力学特性を有するにもかかわらず、主としてすべり荷重或いはすべり係数、最大荷重やボルト張力の変動などについて研究がなされて来た。また、激震時の接合部の力学挙動を検討するため主すべり後の力学特性⁶⁾や繰返し荷重下での履歴特性⁷⁾が調べられ、接合部のすべりを考慮したモーメント-回転角関係の履歴モデル⁸⁾も提案されている。

一方、すべり耐力、被接合材の引張耐力やボルトのせん断耐力を向上させることにより高力ボルト摩擦接合の高性能化が計られているが、摩擦力が大きくなることの応力分布性状への影響については検討されていない。また、繰返し荷重を受ける高力ボルト摩擦接合では第1ボルトの孔付近で疲労破断することが得られているが、その応力分布との相関を明らかにする必要がある。

本研究は高力ボルト摩擦接合部の主すべりが生じない場合の力学性状を把握することを目的とする。本報は、引張力を受ける高力ボルト摩擦接合部の弾性応力分布性状や材間圧縮力分布を3次元応力解析により検討したもので、添え板板厚や摩擦係数などの影響に関する基礎資料を呈示する。

* 建設工学科 建築学専攻

2. 高力ボルト摩擦接合部の3次元有限要素法解析

2. 1 解析プログラムと解析モデル

応力解析には汎用有限要素法解析プログラムCOSMOS/M(Ver.1.70A、MAC版拡張構造解析パッケージ)を用いた。このパッケージは線形解析、固有振動解析、振動解析、非線形構造解析の機能を備え、GEOSTARという完全対話型の幾何形状作成モデラ&ポストプロセッサのもとにパソコンによって大規模な解析(最大32,000節点)を行うことが可能である。

ここでは、高力ボルト摩擦接合部の基本的な3次元応力分布性状を検討するため、図1に示す引張力を受けるM20単一および2本ボルトからなる高力ボルト摩擦接合部を解析対象とした。対称性を考えて、図2に示す接合部の1/4部分からなる3次元力学モデルに置換した。添え板、母材には8節点ソリッド要素を、接触面(摩擦面)にはギャップ-摩擦要素を使用した。母材材軸上($y=0$)で鉛直方向の移動を、接合部中央($x=0$)で添え板の水平方向の移動を拘束した。

加力経路としてはM20高力ボルトの標準ボルト張力(18.2 t)に相当する締付け力(鉛直力) V を与えた後、母材端部に引張力 T を漸増载荷した。解析は、ほぼすべり係数0.45に対応する引張力(単一:4050kg、2本:8100kg)で終了した。本解析ではヤング係数は2100t/cm²とし、微小変形理論に基づく弾性非線形解析を荷重増分法で行った。なお、繰返し計算方法には修正Newton-Raphson法によった。ただし、解の安定性のため、添え板・母材の移動を拘束する柔らかいばねを、また、ギャップ要素位置でもばねを配置し添え板と母材を連結した。

解析モデルとしては、単一ボルト接合部では、母材板厚(t_m)12mm、添え板板厚(t_s)9mm、幅(B)75mm、摩擦係数(μ)0.5、鉛直力(V)9100kgを標準モデル(MODEL-A)とし、添え板板厚6mm、幅60mm、摩擦係数1.0とした各モデルも解析した。また、2本ボルト接合部では母材板厚19mmとし、添え板板厚を9mm、12mmとした。なお、解析モデルの一覧を表1に掲げておく。

2. 2 数値解析結果とその考察

鉛直力、引張力が作用した単一ボルトの場合の応力・変形状態および接触面の母材の応力分布を図3に、2本ボルトの場合を図4示す。ただし、変形量は20倍して図示している。また、ギャップ要素の応力から求めた材軸線上($z=0$)の材間圧縮力 C_i と接触面の摩擦力 q_i の分布を図5に、表2

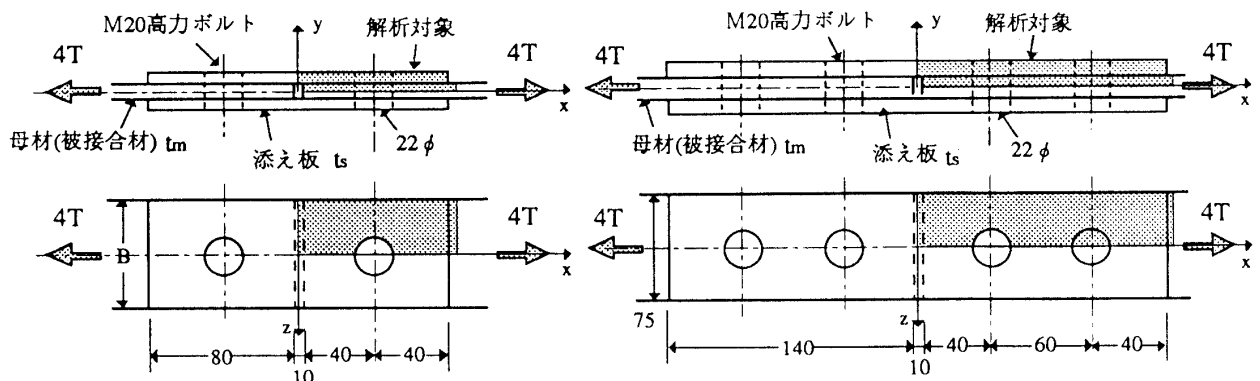


図1-a 単一高力ボルト摩擦接合部

図1-b 2本高力ボルト摩擦接合部

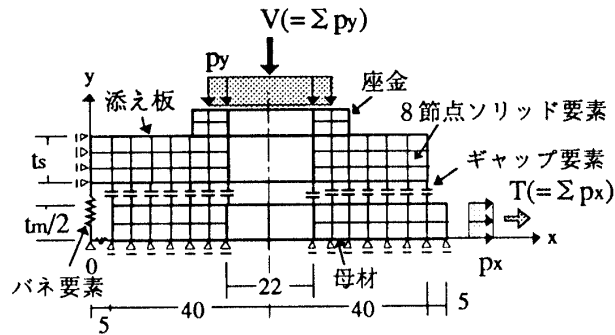


図2 解析モデル（単一ボルトの場合）

表1 解析モデル

記号	鉛直力 V (kg)	引張力 T (kg)	ボルト 本数 n	母材 板厚 tm (mm)	添え板 板厚 ts (mm)	板幅 B (mm)	摩擦 係数 μ
MODEL-A	9100	4050	1	12	9	75	0.5
MODEL-B			1	12	6	75	0.5
MODEL-C			1	12	9	60	0.5
MODEL-D			1	12	9	75	1.0
MODEL-E	9100	8100	2	19	12	75	0.5
MODEL-F			2	19	9	75	0.5

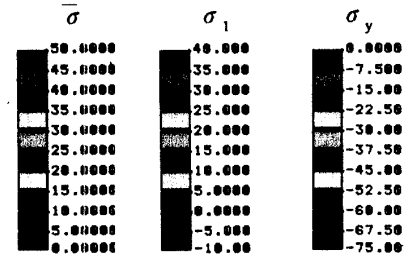
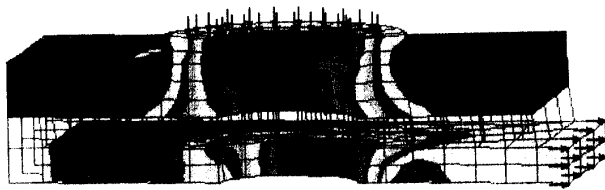
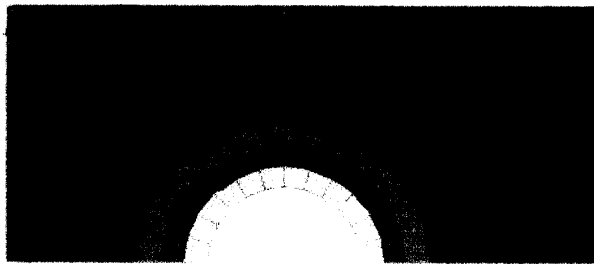
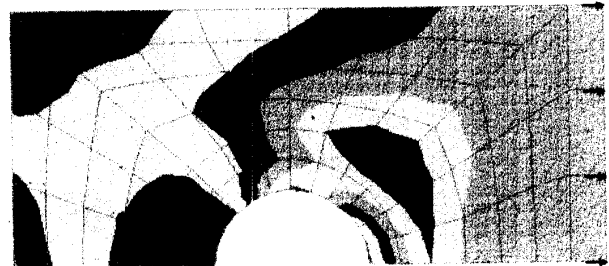


図3-a 応力 $\bar{\sigma}$ と変形状態（MODEL-A：ts=9mm, T= 4050 kg）



(a) σ_y , MODEL-A (ts=9mm, T= 0 kg)



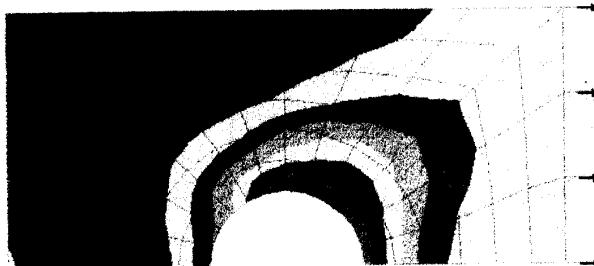
(d) σ_1 , MODEL-A (ts=9mm, T= 4050 kg)



(b) σ_y , MODEL-A (ts=9mm, T= 4050 kg)



(c) σ_1 , MODEL-B (ts=6mm, T= 4050 kg)



(e) $\bar{\sigma}$, MODEL-A (ts=9mm, T= 4050 kg)



(f) σ_1 , MODEL-D (μ=1.0, T= 4050 kg)

図3-b 接触面の応力分布（単一ボルト）

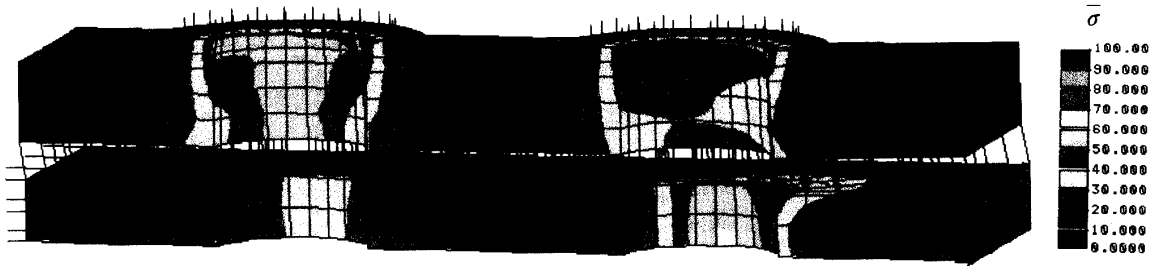


図 4-a 応力 $\bar{\sigma}$ と変形状態 (MODEL-E : $t_s=12\text{mm}$, $T=8100\text{ kg}$)



(a) σ_y , MODEL-E ($t_s=12\text{mm}$, $T=8100\text{ kg}$)



(b) σ_1 , MODEL-E ($t_s=12\text{mm}$, $T=8100\text{ kg}$)



(c) σ_1 , MODEL-F ($t_s=9\text{mm}$, $T=8100\text{ kg}$)

図 4-b 接触面の応力分布 (2本ボルト)

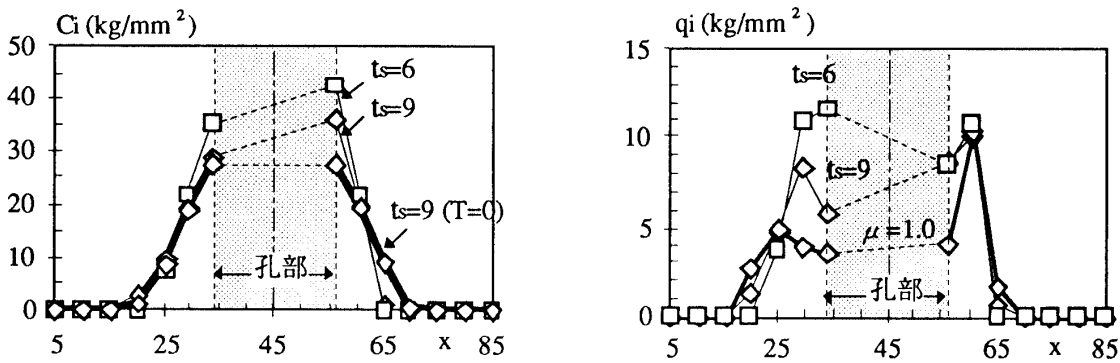


図 5-a 材間圧縮力 C_i と摩擦力 q_i (単一ボルト、 $z=0$ 、 $V=9100\text{ kg}$ 、 $T=4050\text{ kg}$)

に作用応力と最大応力を示す。

すべりは接触面(摩擦面)の端部で大きく、孔部近傍ではすべりが生じていない。また、von Mises の相当応力 $\bar{\sigma}$ は母材純断面部の孔縁に集中するのに対し、最大主応力 σ_1 は母材孔部板厚中央部とボルト孔前面の材間圧縮力分布域の外縁に沿った表面に集中している。単一ボルトの標準モデル (MODEL-A) では孔部とボルト前面の最大主応力は同程度であるが、幅が小さい場合と摩擦係数が大きい場合は孔部の最大主応力が大きく、添え板板厚が薄い場合にはボルト前面の最大主応力が大きくなる。しかし、いずれの場合もそれらの差異は大きくなく、作用応力に対する応力集中係数は1.48~1.81の範囲にある。一方、2本ボルトでも相当応力は第1ボルト孔縁に集中し、添え板板厚が薄い場合の各応力は大きくなる。また、第1ボルト孔前面や第2ボルト孔縁は第1ボルト孔縁に比べかなり小さくなる。最大主応力は第1ボルト孔縁で作用応力の約2倍程度となるが、その前面では1.5倍程度で相当応力と同程度である。

次に、材間圧縮力の分布形は文献1で示されている分布域にほぼ相当しているが、引張力作用時は初期締付け時に比べボルト孔前面の分布域が小さくなり分布形は非対称となる。また、材間圧縮力分布域の周辺部ですべりが生じ、摩擦力分布は材間圧縮力より得られる最大摩擦力分布と一致するが、孔部近傍では減少する分布を示す。特に、2本ボルトの場合、ボルト孔間の摩擦力は小さく、応力は第1ボルトの前面、第2ボルトの後面およびボルト孔間の外縁部で応力が伝達されると考えられる。

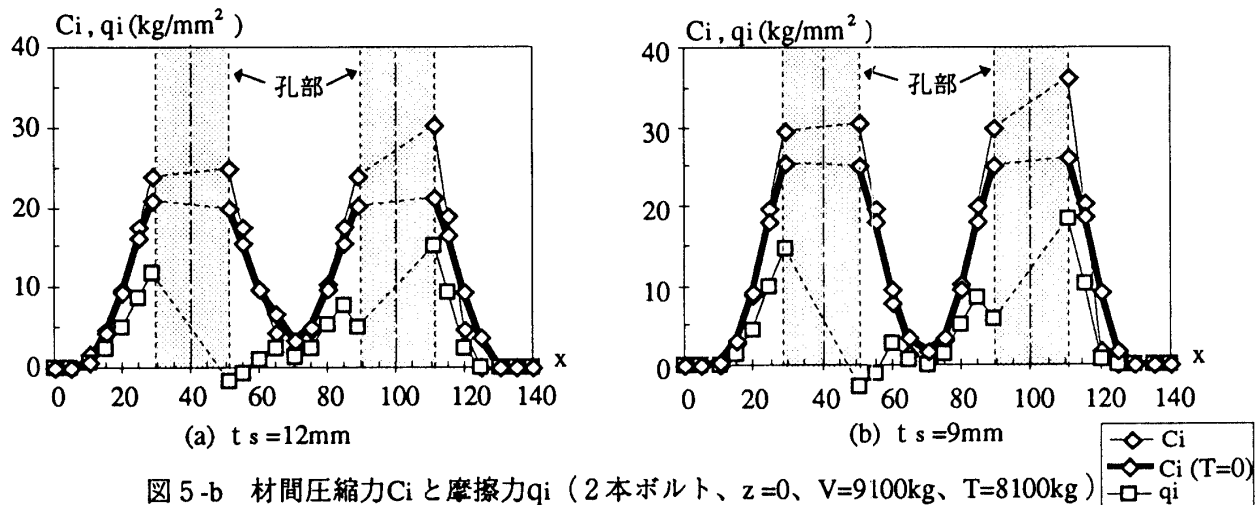


図 5-b 材間圧縮力 C_i と摩擦力 q_i (2本ボルト、 $z=0$ 、 $V=9100\text{kg}$ 、 $T=8100\text{kg}$)

表 2 作用応力と最大応力

記号	鉛直力作用時 応力(孔縁) σ_y	作用応力 σ_x	第1ボルト				第2ボルト	
			孔縁		ボルト前面		孔縁	
			相当応力 $\bar{\sigma}$	最大主応力 σ_1	相当応力 $\bar{\sigma}$	最大主応力 σ_1	相当応力 $\bar{\sigma}$	最大主応力 σ_1
MODEL-A	29.1	18	51.7	30.3	31.5	30.0	-	-
MODEL-B	38.3	18	58.8	26.6	32.2	32.7	-	-
MODEL-C	29.1	22.5	57.6	37.1	35.4	34.5	-	-
MODEL-D	29.1	18	51.5	30.6	29.4	27.8	-	-
MODEL-E	21.7	22.7	60.7	42.5	37.8	33.7	32.4	16.1
MODEL-F	27.2	22.7	63.8	50.1	38.3	36.5	38.0	14.1

単位: kg/mm^2

3. まとめ

本報では引張力を受ける高力ボルト摩擦接合部のすべり前の力学性状を数値解析的に検討した。汎用有限要素法解析プログラムCOSMOS/Mを用いて単一高力ボルト摩擦接合部の3次元解析を行い、締付け力、引張力が作用した場合の応力・変形状態、接触面の母材の弾性応力分布性状を検討した。また、2本高力ボルト摩擦接合部についても検討した。

それらを纏めれば以下ようになる。

- 1) すべりは接触面(摩擦面)の端部で大きく、孔部近傍ではすべりが生じない。
- 2) Von Mises の相当応力 $\bar{\sigma}$ は第1ボルト母材純断面部の孔縁に集中する。
- 3) 最大主応力 σ_1 は孔部板厚中央部とボルト孔前面の材間圧縮力分布域の外縁に沿った表面に集中するが、ボルト本数が多くなれば孔縁の方が大きくなる。
- 4) 変数の板幅、摩擦係数、添え板板厚によって各部の最大応力は変動するが、それらの差異は大きくない。
- 5) 引張力作用時は初期締付け時に比べボルト孔前面の材間圧縮力の分布域が小さくなり、材間圧縮力の分布形は非対称となる。
- 6) 材間圧縮力分布域の周辺部ではすべりが生じて摩擦力分布は最大摩擦力分布と一致するが、孔部近傍では減少する凹分布を示す。

ただし、今後、材料の塑性化についても検討したうえで総合的に評価する必要がある。

【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会編：鋼構造接合資料集成、技報堂、pp.323-327, 1977.3.
- 2) 小林正樹、脇山広三、井上一朗 他3名：高力ボルト摩擦接合部の引張耐力に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C構造II, pp.1423-1424, 1993.9.
- 3) J.W.Fisher and J.H.A.Struik : Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints, JOHN WILEY & SONS, pp.71-112, 1974.
- 4) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説、技報堂、pp.83-97, 1966.
- 5) 森山富雄、葛生貴博、植松 康、山田大彦：高力ボルト摩擦接合部に関する3次元弾塑性接触問題のFEM解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1構造III, pp.253-254, 1997.9.
- 6) 例えば、田中淳夫、高梨晃一：保有耐力接合された高力ボルトはり継手の挙動、日本建築学会論文報告集、第346号, pp.101-111, 1984.12.
- 7) 例えば、辻岡静雄：ショットブラスト摩擦面を有する高力ボルト接合のすべり荷重と履歴特性、日本建築学会構造系論文報告集、第471号, pp.173-179, 1995.5.
- 8) 谷口英武、高梨晃一、田中 尚、田中淳夫：電算機・試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析(その4)、日本建築学会論文報告集、第291号, pp.33-41, 1980.5.

(平成9年12月1日受理)