

5. FEM解析

5.1 目的と概要

前章まで行った各種実験によって、従来の高力ボルトである F10T、S10T と同様な使用条件における鋼道路橋への超高力ボルトの実用化について、すべり耐力に着目して検討した。各種実験は、すべり耐力に影響を与える因子をパラメータとして検討を行ったが、同じ条件の試験体は最大でも 5 体を基本としており、各因子のばらつきを統計的に評価できるには十分とはいえない。そこで本章では、FEM 解析を行い、実験結果を力学メカニズムに着目して考察することで、各種実験結果について検討する。

本章の構成は以下のとおりである。まず、5.2 節で解析モデルの検討を行う。3 章の多列すべり試験から、ボルト列数の多列化などによってボルト軸力の変動が生じやすくなることが考察されているため、ここでは特にボルト軸力の導入方法に着目して 4 つのモデル化を比較検討する。次に、5.3 節で多列すべり試験結果について、5.4 節で桁曲げ試験結果について、それぞれ FEM 解析により検討する。

5.2 解析モデルの検討

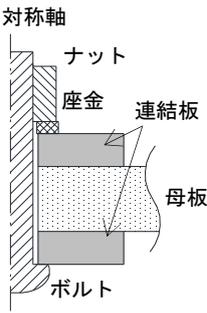
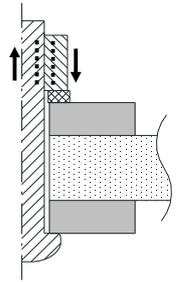
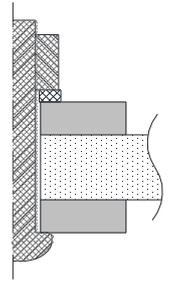
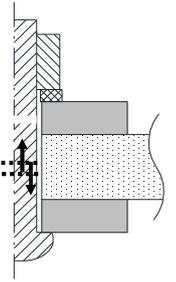
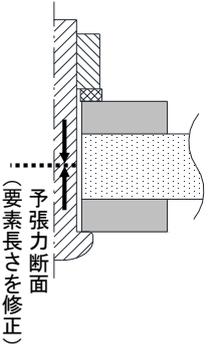
5.2.1 解析の概要

3章の多列すべり試験から、ボルト列数の多列化などによってボルト軸力の変動が生じやすくなることが考察されているため、ここでは特にボルト軸力の導入方法に着目して4つのモデル化を比較検討する。

(1) 解析におけるボルト軸力の導入方法

ボルト軸力の導入方法に関する4つのモデル化の概要を表-5.2.1に示す。

表-5.2.1 ボルト軸力の導入方法に関するモデル化の特徴

モデル化の手法	a) 荷重モデル	b) 温度作用モデル	c) 強制変位モデル	d) 締結力モデル
ボルト軸力の導入方法 				
これまでの知見	知見なし	知見なし	1/8に对称モデルに採用された研究が多数ある ^{5.3, 5.4, 5.7, 5.9)}	文献 5.10) にてすべり発生時の連結板の接合面に生じる接触応力分布は、c) 強制変位モデル (1/8 対称) とほぼ同等とされている

a) 荷重モデル

ボルト軸力がボルトとナットの接合面から伝達されることに着目して、ボルトとナットの接合面に表面力として作用させる。具体的には、単位面積当りの表面力 P を式(5.1)から算出して入力する。

$$P = \frac{F}{\pi dh} \quad (5.1)$$

ここに、 F は表面力の合力で、ボルト軸力とする。 d はボルトの直径、 h はナット高さとする。

b) 温度作用モデル

ボルト軸力によってボルト軸部に生じる軸ひずみに着目して、一体化したボルトとナットに低い温度を与えて収縮させることによって仮想的にボルトを締めた状態とし、ボルトに軸力を導入する。ボルト締結により生じるボルト軸部の軸ひずみ ε は、式(5.2)のとおり、温度作用によりボルトに発生する軸ひずみ ε_T と、ボルト締結対象である連結板および母板から受ける反力による軸ひずみ ε_F の和になる。

$$\varepsilon = \varepsilon_T + \varepsilon_F = \alpha \cdot \Delta T + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (5.2)$$

ここに、 α はボルトの線膨張係数、 ΔT は温度作用、 F はボルト締結対象である連結板および母板から受ける反力、 d はボルトの直径である。ボルト締結対象である連結板および母板が、ボルト締結によって変形しないと仮定すると、 $\varepsilon = 0$ となり、入力する温度作用 ΔT は式(5.3)となる。

$$\Delta T = -\frac{4F}{\pi \alpha d^2} \quad (5.3)$$

実際は、母板および連結板はボルト締結によって圧縮変形するため、 $\varepsilon < 0$ となる。よって、入力する温度作用 ΔT は、ボルトに導入される軸力が所定の設計軸力となるように試算を行って決定する。なお、ボルトの収縮は、3次元の全方向に生じる。

c) 強制変位モデル

ボルト軸力によって生じるボルト軸部の収縮に着目して、ボルト軸部をボルト長さの中央の断面で分割し、分割面に強制変位を作用させてボルトに軸力を導入する。強制変位量は、ボルトに導入される軸力が所定の設計軸力となるように試算を行って決定する。強制変位モデルでは分割された部材がそれぞれ独立の挙動を示すため、2つの部材が離れたり、逆に一部重複したりする挙動が起きる可能性がある。そのため、ボルト部の挙動を再現することに着目すると解析モデルとして不適切であるものの、前述したように 1/8 対称モデルで多くの実績がある強制変位モデルを 1/4 対称モデルにも採用することで、すべり耐力またはボルト以外の母板や連結板の挙動がどの程度再現が可能か検討するために、本研究において比較対象とした。

d) 締結力モデル

ボルト長さの中央におけるボルト軸部断面を予張力断面と定義し、予張力断面全体に、ボルト軸力に相当する締結力を作用させる。締結力によって予張力断面の片側にある要素長さが修正されることにより予張力断面でのボルト長さが調整され、設定したボルト軸力が導入される。強制変位モデルでは分離したボルトが締結力モデルの場合、予張力断面においてボルトは一体化されているため、ひとつの部材として挙動する。本検討で使用する有限要素解析コード Abaqus/Standard ではボルト荷重オプションを用いることにより、締結力モデルで解析することができる^{5.1)}。

(2) 解析モデル

解析の対象とした標準すべり試験は、3章の標準すべり試験における供試体 No. 45 であり、試験体概要を図-5.2.1 に示す。試験の詳細は3章に記述している。

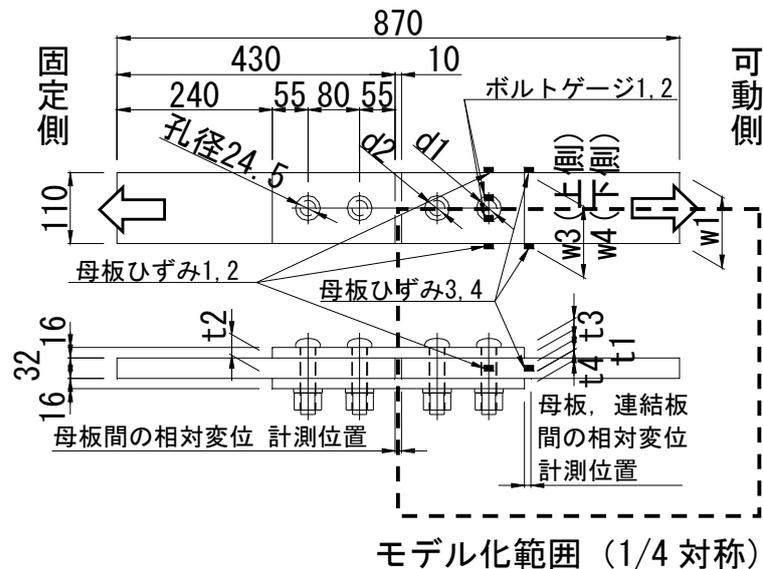


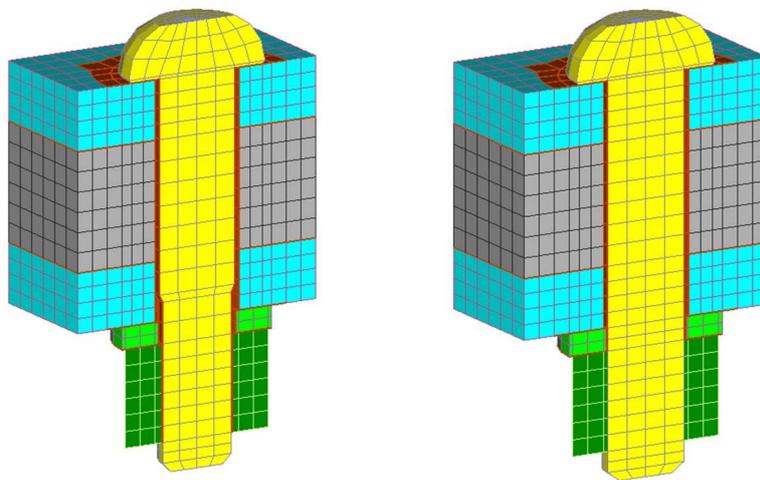
図-5.2.1 標準すべり試験 試験体概要

図-5.2.1 の計測箇所に対応した供試体の計測値を表-5.2.2 に示す。母板、連結板の幅、板厚ともに設計値より大きく 5.2.2 項以降に示す解析より剛性は大きい。

表-5.2.2 標準すべり試験 部材寸法

幅 (mm)				板厚 (mm)			
母板		連結板		母板		連結板	
可動側	固定側	上側	下側	可動側	固定側	上側	下側
w1	w2	w3	w4	t1	t2	t3	t4
110.2	110.3	110.1	110.1	32.2	32.3	16.3	16.3
孔径 (mm)							
母板		連結板					
		上側		下側			
d1	d2	d1	d2	d1	d2		
24.6	24.6	24.5	24.4	24.5	24.5		

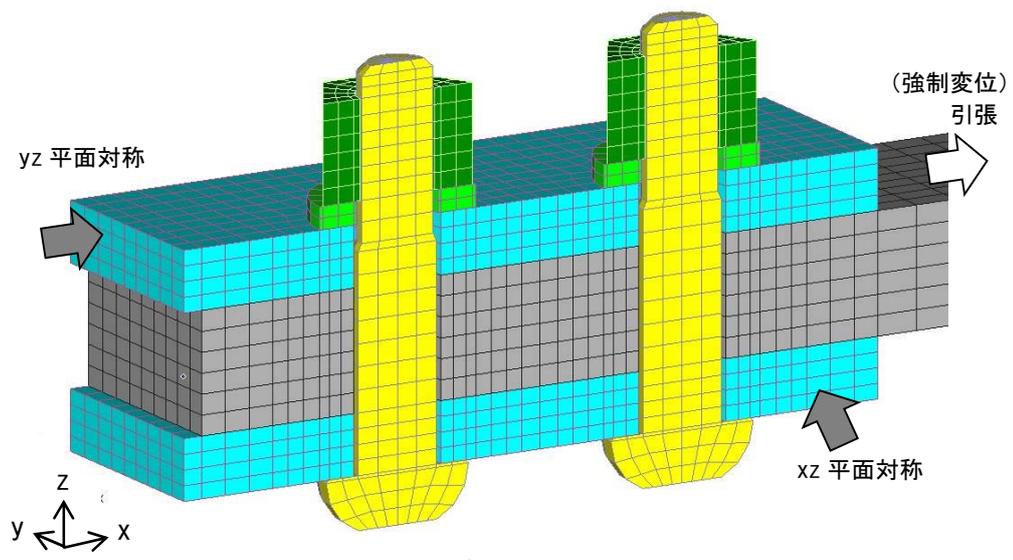
解析モデルは、桁曲げ試験を解析することを考慮してボルト全体をモデル化するために、1/4 対称モデルとした。ボルトは 6 節点ソリッド完全積分要素（三角柱要素）および 8 節点ソリッド完全積分要素（六面体要素）とし、座金、母板、連結板をそれぞれ 8 節点ソリッド完全積分要素（六面体要素）とした。要素サイズはボルト周りを約 5.5mm、ボルト中心は 1 周 24 分割とした。有限要素解析コードは Abaqus/Standard ver.6.11-1^{5.1})を用いた。図-5.2.3 に示した対称面には対称条件を満足するように境界条件を与えた。各部材の要素分割の詳細を図-5.2.4 に示す。a) 荷重モデルのみボルトのネジ山部分をネジ有効径の円筒形によりモデル化し、他のモデルではボルト径の円筒形でモデル化しているため、a) 荷重モデルのみボルト先端がくびれている（図-5.2.2 参照）。



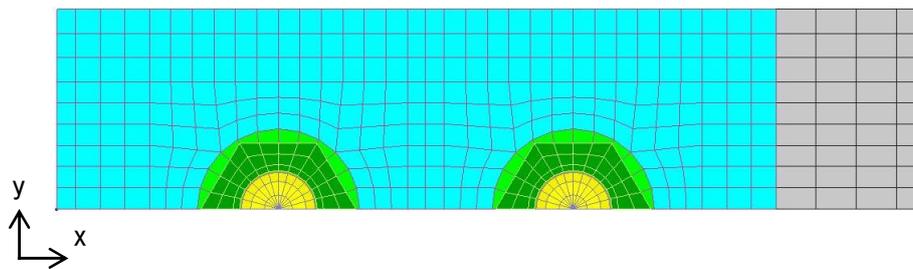
(a) ボルト荷重モデル

(b) その他のモデル

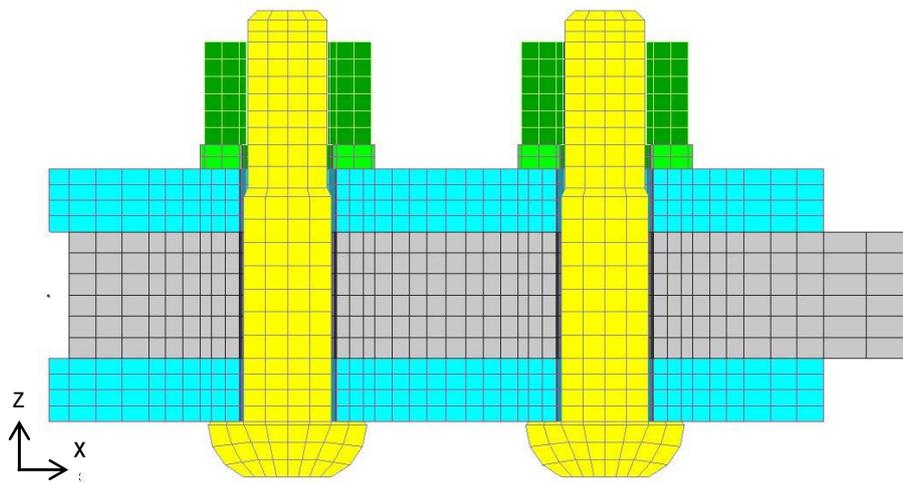
図-5.2.2 ボルト周りの要素分割（1/2断面図）



(a) 鳥瞰図



(b) 鉛直上から (+z方向より)



(c) 側面から (-y方向より)

図-5.2.3 解析モデル全体図 (a) 荷重モデルの例

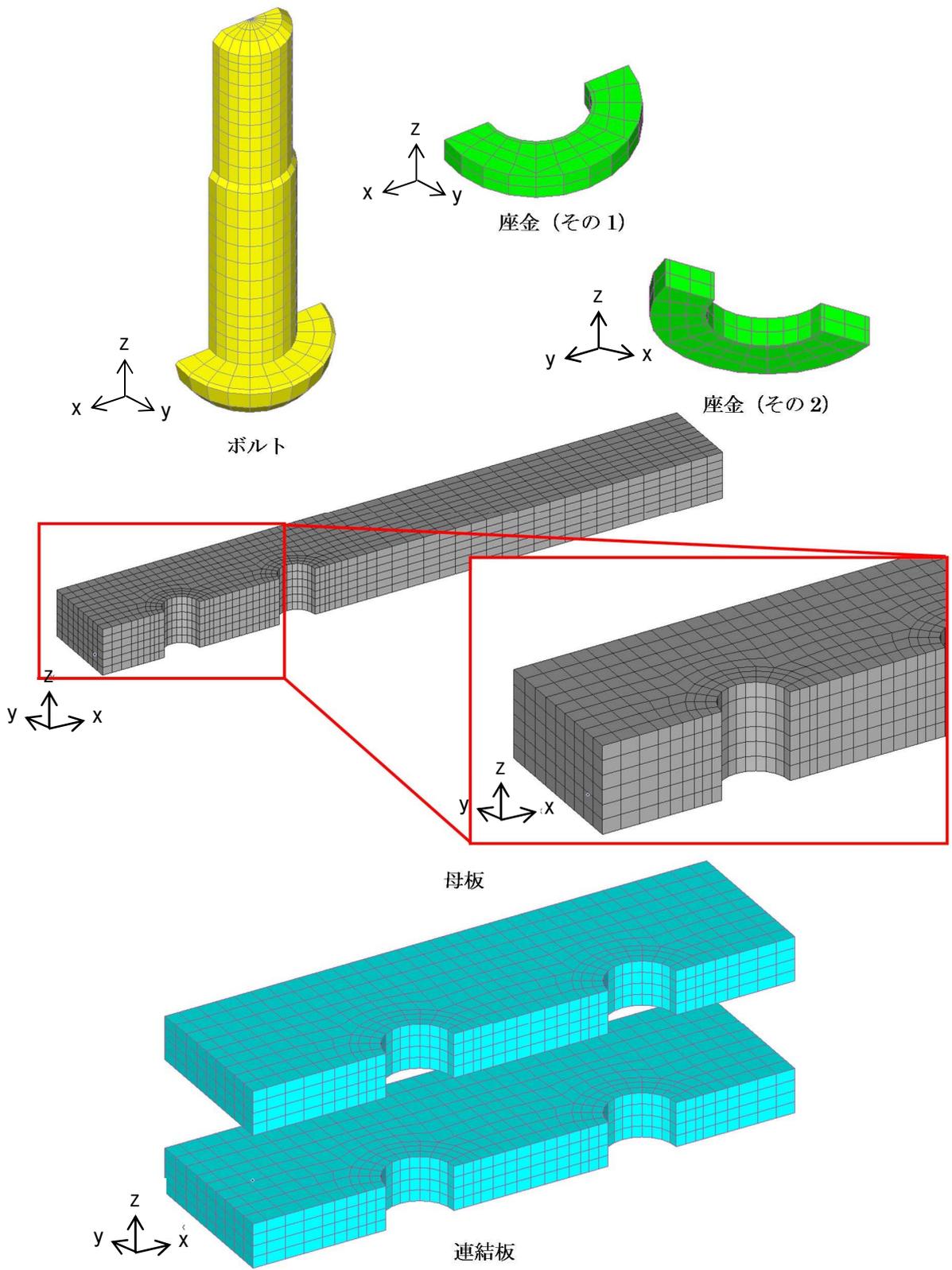


図-5.2.4 各部材の解析モデル図 (a) 荷重モデルの例)

(3) 接触設定

座金と連結板、母板と連結板、および孔壁とボルト軸部には、マスタースレーブ法による接触設定を行う。つまり、接触面をマスター面とスレーブ面で構成し、スレーブ面で接触判定を行う。従来の節点による接触判定^{5.1)}と異なり、面と面で判定を行えることから、接触する部材それぞれの形状を接触判定に反映することができる。接触摩擦にはクーロンモデルを使用し、ペナルティ法により摩擦力の算定を行う。クーロンモデルの荷重と変位の関係を図-5.2.5に、接触表面定義を図-5.2.6～図-5.2.8に、接触対定義を表-5.2.3～表-5.2.5にそれぞれ示す。ボルト軸部の接触は摩擦ゼロとし、母板と連結板の接触は3章で行った実験結果から静摩擦係数を0.55とし、ほかの接触摩擦も同様に0.55を採用する。ここで、静摩擦係数 μ は5.2.2項で定義するすべり耐力 N_e 、すべり試験直前に計測したボルト軸力 F_e を用いて式(5.4)より算出した。

$$\mu = \frac{N_e}{mnF_e} \quad (5.4)$$

ここに、 m は接合面の数 (=2)、 n はボルト本数とする。

本解析では使用限界状態であるすべり耐力までのメカニズムに着目しているため、動摩擦係数は静摩擦係数と同じとする。Abaqusでは動摩擦係数の設定は可能である^{5.1)}が、図-5.2.10で見られるすべり耐力後の引張荷重の低下を再現するためには、動摩擦係数の具体的な値の決定方法が課題となる。これは、母板の孔壁部とボルト軸部の支圧状態や、ボルトなどが破断する終局限界状態と合わせて、すべり耐力までを精度良く解析できた後の課題とし、本研究の対象外とした。

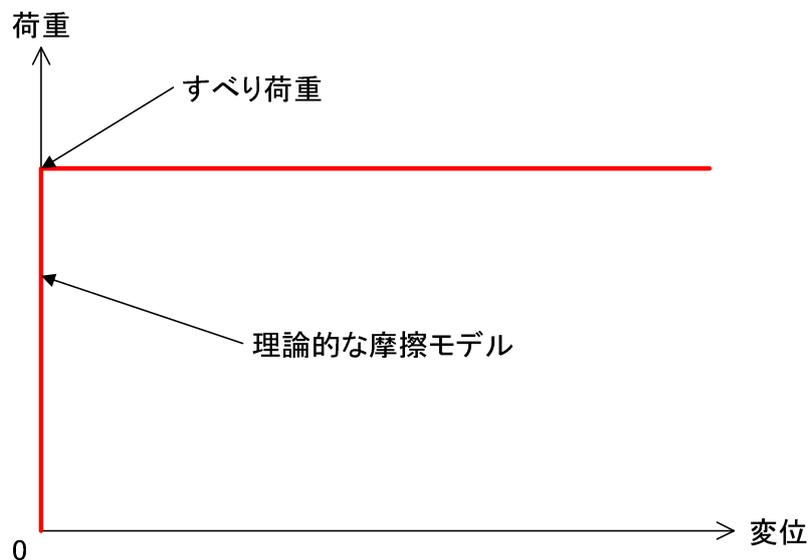


図-5.2.5 摩擦のモデル化

表-5.2.3 接触設定 (a) ボルト荷重モデル)

(a) 摩擦のある接触対

SLAVE	MASTER
NUT_UPPER	WASHER_LOWER
BOLT_PLATE	PLATEU_UPPER
WASHER_UPPER	PLATEL_LOWER

(b) 摩擦のない接触対

SLAVE	MASTER
NUT_INNER	BOLT_SIDE
WASHER_INNER	BOLT_SIDE
BASE_INNER	BOLT_SIDE
PLATEU_INNER	BOLT_SIDE
PLATEL_INNER	BOLT_SIDE

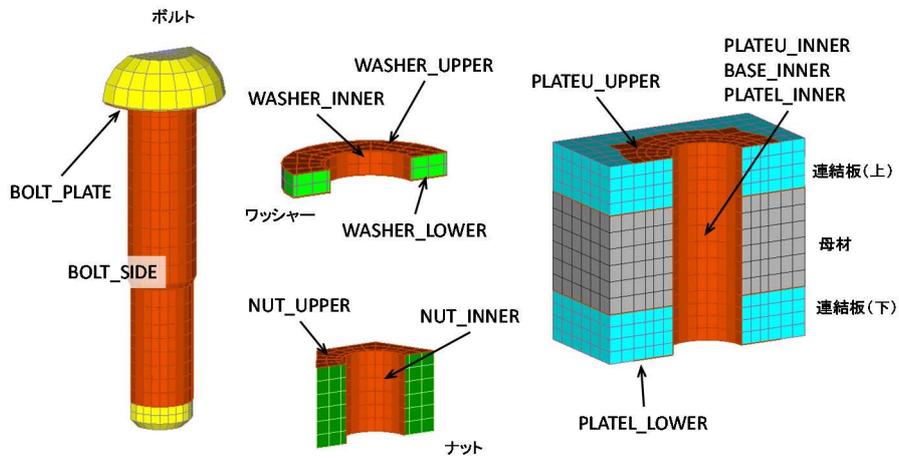


図-5.2.6 ボルト接触箇所一覧 (a) ボルト荷重モデル、母板/連結板の接触は除く)

表-5.2.4 接触設定 (b)ボルト冷却モデル、d)ボルト締結力モデル)

(a) 摩擦のある接触対		(b) 摩擦のない接触対	
SLAVE	MASTER	SLAVE	MASTER
NUT_UPPER	WASHER_LOWER	WASHER_INNER	BOLT_SIDE
BOLT_PLATE	PLATEU_UPPER	BASE_INNER	BOLT_SIDE
WASHER_UPPER	PLATEL_LOWER	PLATEU_INNER	BOLT_SIDE
		PLATEL_INNER	BOLT_SIDE

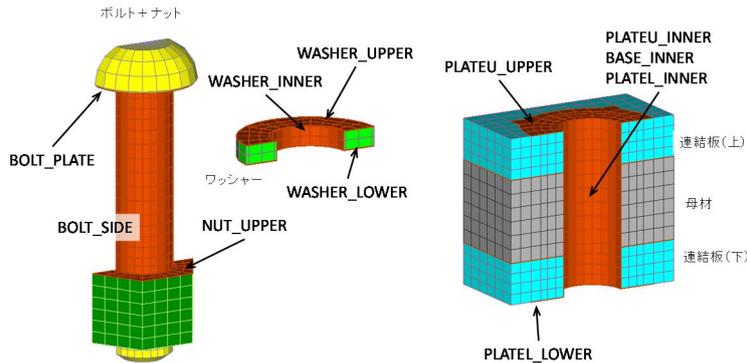


図-5.2.7 ボルト接触箇所一覧

(b) ボルト冷却モデル、d) 締結力モデル、母板/連結板の接触は除く)

表-5.2.5 接触設定 (c)ボルト強制変位モデル)

(a) 摩擦のある接触対		(b) 摩擦のない接触対	
SLAVE	MASTER	SLAVE	MASTER
NUT_UPPER	WASHER_LOWER	WASHER_INNER	BOLT_SIDE_UPPER
BOLT_PLATE	PLATEU_UPPER	BASE_INNER	BOLT_SIDE_UPPER
WASHER_UPPER	PLATEL_LOWER	BASE_INNER	BOLT_SIDE_LOWER
		PLATEU_INNER	BOLT_SIDE_UPPER
		PLATEL_INNER	BOLT_SIDE_LOWER

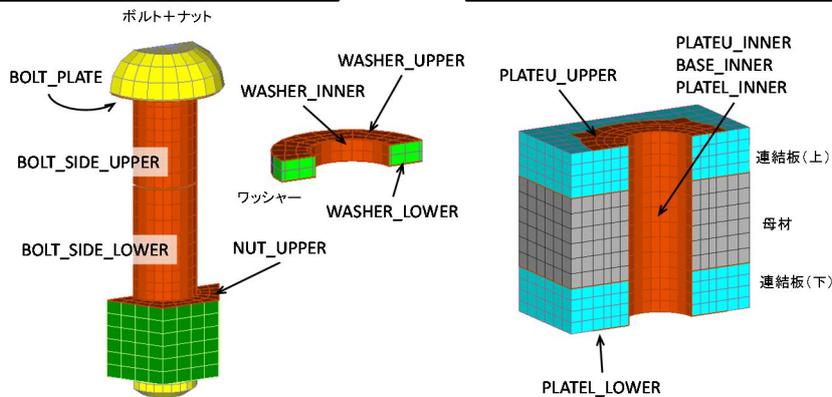


図-5.2.8 ボルト接触箇所一覧 (c) 強制変位モデル、母板/連結板の接触は除く)

(4) 材料特性

解析で用いた鋼材の材料特性、および応力ひずみ関係を表-5.2.6 に示す。母板と連結板の材料特性は各板厚で実施した引張試験結果の平均値とし、高力ボルトは標準すべり試験で用いた高力ボルトと同じ製造ロットの材料から加工した JIS Z 2201 の 4 号試験片の引張試験結果から設定した。

表-5.2.6 標準すべり試験の解析モデルにおける材料特性

部位	鋼種	ヤング率	ポアソン比	降伏強度	降伏ひずみ
		N/mm ²		N/mm ²	
母板	SM490Y	212,000	0.28	430	0.00203
連結板					
S14T (M22)		213,000	0.29	1,362	0.00639

	応力 N/mm ²	ひずみ
母板	0	0
連結板	430	0.00203
SM490Y	430	0.02500
	569	0.08000
S14T	0	0
	1362	0.00639
	1482	0.05090

(5) 解析方法

解析手法は、まず、ボルト軸力を本節(1)に示すそれぞれのモデル化に準じて、ボルトに与える。その後、母板の水平引張方向に強制変位を与える（図-5.2.9 参照）。

ここで、使用した M22 の S14T ボルトに導入するボルト軸力は設計軸力 299kN ではなく、リラクセーションを考慮して試験直前の計測値 278kN とする。

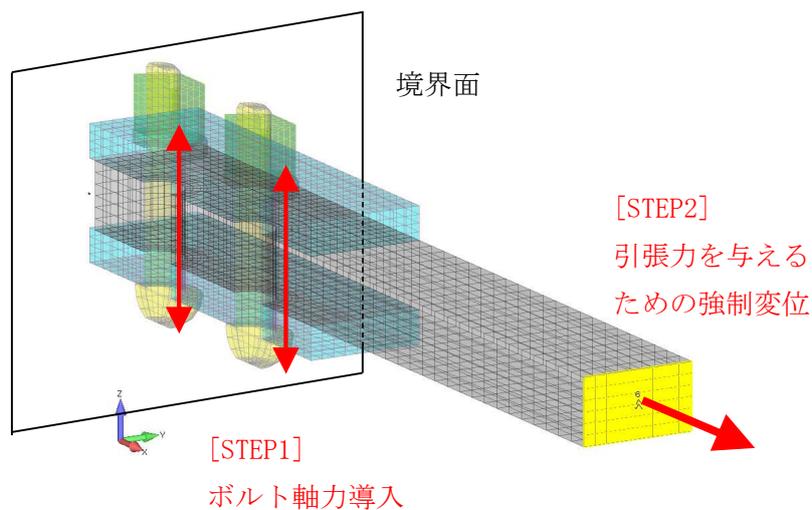


図-5.2.9 解析ステップ

5.2.2 解析結果

5.2.1(1)で示した4つのモデル手法を用いて、標準すべり試験の再現解析を行った。解析ではすべり挙動を把握するために、図-5.2.1に示した位置での母板と連結板間の相対変位、母板間の相対変位、および母板ひずみと引張荷重の関係、または座金と連結板間の接触面における相当応力について、各モデルによる解析結果を比較した。さらに、ボルト軸力の変動、およびボルト、母板、連結板断面の相当応力に関する解析結果より、ボルト軸力の導入からすべり挙動後までの状態について検討した。相当応力以外は実験結果も示し、解析の妥当性について検証した。

(1) 母板と連結板間の相対変位

図-5.2.1に示す連結板端部における母板、連結板間の相対変位と引張荷重の関係について、解析および実験の結果を図-5.2.10に示す。解析では主にすべり耐力までのメカニズムに着目していることから、動摩擦係数を静摩擦係数と同じとしている。そのため、すべり後の引張荷重がすべり耐力より低下する実験時の挙動と異なり、解析ではすべり耐力がピークとして明確に現れない。そこで、本解析では「母板と連結板間の相対変位が増加しても引張荷重が横ばいとなって増加しなくなる時の引張荷重」をすべり耐力と定義し、設定した例を図-5.2.11に示す。

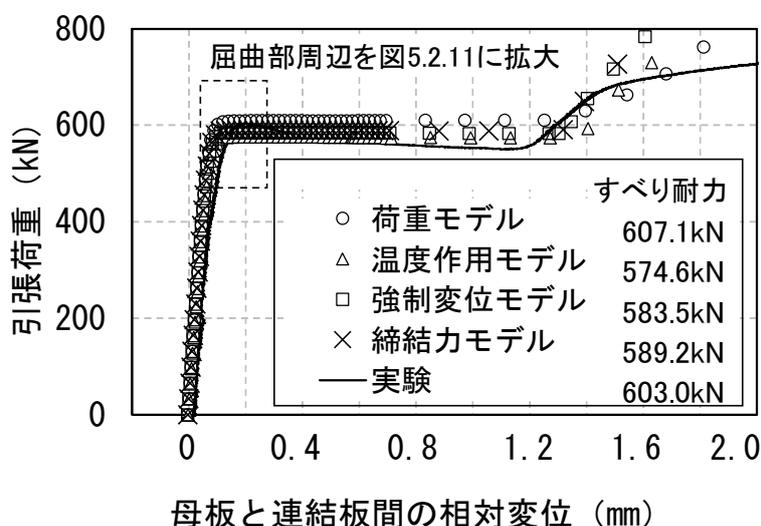


図-5.2.10 母板と連結板間の相対変位と引張荷重の関係

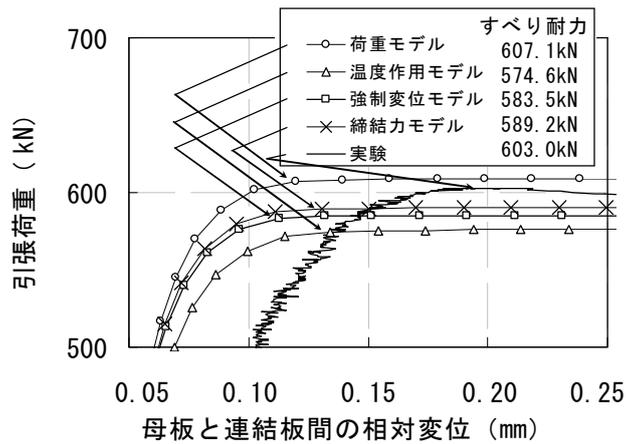


図-5.2.11 母板と連結板間の相対変位と引張荷重の関係 (拡大)

すべり耐力までの挙動について

- 図-5.2.11 より、上記のように定義したすべり耐力までの引張荷重と、母板と連結板間の相対変位との関係は、全ての解析結果について実験結果と良い一致を示した。
- すべり耐力は、実験結果 603.0kN に対して、a)荷重モデル 607.1kN (実験結果に対する比率 1.007)、b)温度作用モデル 574.6kN (0.953)、c)強制変位モデル 583.5kN (0.968)、d)締結力モデル 589.2kN (0.977) である。これらの誤差は最大 5%程度に収まり、a)荷重モデル以外は、実験結果より小さく安全側の評価となっている。
- すべり耐力までの母板と連結板間の相対変位、およびすべり耐力については、いずれの解析モデルによっても実験の挙動を再現できる可能性が示された。

すべり耐力以降の挙動について

- 解析における動摩擦係数と静摩擦係数を同じとしたことにより、すべり耐力後の引張荷重の低減を解析では再現できていない。
- 全ての解析において、母板と連結板間の相対変位がボルト孔とボルト径の隙間 $(24.5 - 22) / 2 = 1.25\text{mm}$ に達した以降に引張荷重が再度増加している。引張荷重の再増加は、連結板に対して母板がすべった後、母板の孔壁部にボルト軸部が接触して支圧状態になったことを示している。
- 実験結果では、相対変位が解析結果より小さい 1.2mm に達した段階から引張荷重が再度増加している。実験では連結板が固定側に固定されているため、可動側では母板が最初にすべると考えられる。表-5.2.2 に示した母板の孔径は設計値より大きいことから、ボルト径中心が母板のボルト孔中心と一致していなかった可能性が推定される。また、ボルト径に製作誤差が生じること、および座金と連結板間の摩擦係数が母板と連結板間の摩擦係数と異なる可能性があることなども考慮すると、全てのボルトが同時には支圧状態にならない可能性が高い。

- ・ 本研究で比較した実験結果では、解析よりも小さい相対変位で一部のボルトが支圧状態になったと推定される。
- ・ すべり耐力以降から母板の孔壁とボルト軸部の支圧状態までの挙動は、強制変位モデルと締結力モデルの荷重増加が荷重モデルや温度作用モデルより大きい。これは、後述するように図-5.2.21 に示すすべり耐力直後の母板の相当応力が各モデルによって異なっていることから、母板の孔壁からの支圧によるボルト軸部の曲げ挙動が解析モデルの違いによる影響を受けたためと考えられる。

以上より、すべり耐力までは、いずれの解析モデルによっても母板と連結板間の相対変位に関する実験の挙動を解析で再現が可能であることを確認した。

すべり耐力以降は、動摩擦係数の設定のほかに、すべり挙動から支圧状態へ移行する挙動の変化をボルトごとに考慮する必要があることがわかった。

(2) 母板間の相対変位

解析、および実験の結果から、図-5.2.1 に示した連結中心における母板間の相対変位と引張荷重の関係を図-5.2.12 に示す。

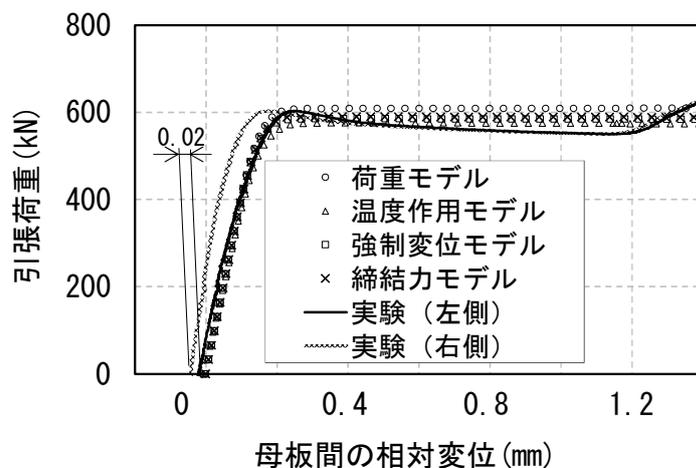


図-5.2.12 母板間の相対変位と引張荷重の関係

すべり耐力までの挙動について

- ・ 引張荷重載荷開始からすべり耐力までを見ると、実験では引張荷重載荷直後の初期段階で母板間の相対変位を計測するゲージ貼付位置に反対方向のすべりが生じて、相対変位が0からすぐに-0.02mm程度に変化した。本研究では解析による実験の再現性のほかに、実験で生じる誤差も測定値のばらつきとして把握することとし、ゲージのすべりについて補正を行っていない。

- ・ 一方、解析ではこのようなすべりが発生しないことから、載荷開始直後に両者には約 0.02mm の差が生じた。ただし、相対変位と引張荷重の曲線に関する傾きを見ると、すべり耐力までは全ての解析結果が実験結果とほぼ同じであることから、静摩擦状態における相対変位が再現されていることがわかる。
- ・ 各解析モデルを比較すると、母板と連結板間の相対変位と同様に、すべり耐力までの挙動に関する各モデルの解析結果の違いはわずかであり、全ての解析結果は良い一致を示した。

すべり耐力以降の挙動について

- ・ 母板と連結板間の相対変位と同様に、動摩擦係数の設定、またはすべり挙動から支圧状態へ移行するボルトごとの挙動の変化を考慮できていないことから、実験結果との乖離が見られる。
- ・ 各解析モデルを比較すると、相対変位の増加に対する引張荷重の増加の傾きにモデル間の違いが見られた。
- ・ 母板の孔壁とボルト軸部の支圧状態による引張荷重の再増加については、いずれの解析結果も実験結果との乖離が生じた。

以上より、すべり耐力までは、いずれの解析モデルを用いても、載荷初期段階のゲージのすべりを除いて、母板間の相対変位に関する実験の挙動を解析で再現が可能であることを確認した。

すべり耐力以降は、母板と連結板間の相対変位と同様に、動摩擦係数の設定、すべり挙動から支圧状態へ移行する挙動の変化をボルトごとに考慮するなどが課題である。

(3) 母板ひずみ

解析、および実験の結果から、図-5.2.1 に示す連結中心から 2 列目のボルト位置の母板ひずみ 1、2、および連結板端部位置における母板ひずみ 3、4 と引張荷重の関係をそれぞれ図-5.2.13、図-5.2.14 に示す。

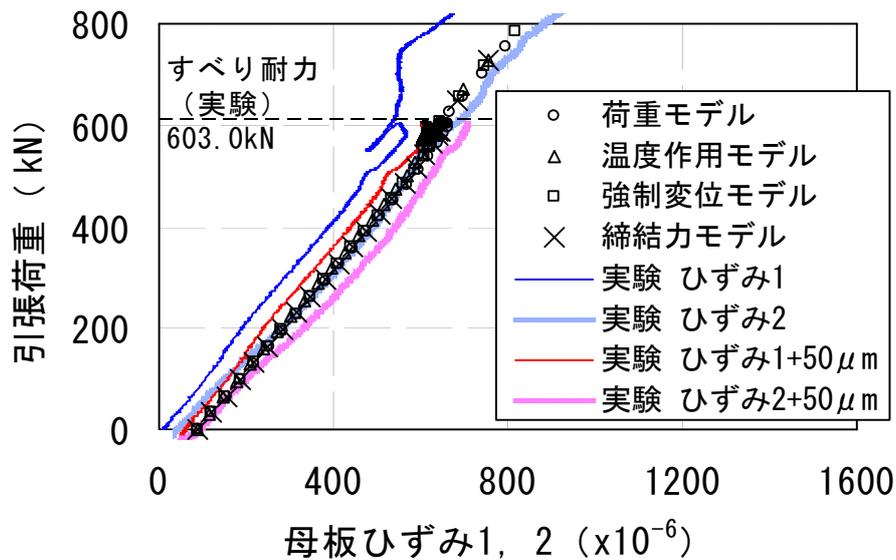


図-5.2.13 母板ひずみ 1, 2 と引張荷重の関係

母板ひずみ 1, 2 について

- 母板ひずみ 1, 2 は、母板ひずみ 3, 4 より小さい。これは、母板ひずみ 1, 2 では引張荷重の一部が高力ボルト摩擦接合によって連結板に分担されていることが原因である。
- 実験では、供試体の中心に対する引張荷重の偏心から左右のひずみに差が生じている。この偏心の影響を排除するために、左右の平均値と解析結果を比較すると、母板ひずみ 1, 2 と引張荷重の関係において、引張荷重の載荷開始直後に 50μ 程度の差がある。これは、ボルトに導入した軸力が連結板から母板側面端部にまで分布した結果、ポアソン効果によって引張荷重方向にも生じたひずみが解析では考慮されたことが原因と考えられる。
- 後述する図-5.2.16～図-5.2.19 に示す座金側の連結板の相当応力を見ると、ボルト軸力の影響は座金近傍の範囲に限定されている。しかし、図-5.2.15 に示す母板の板厚中心には、連結板の厚さの影響でボルト位置における断面全体に支圧応力が伝達され、側面端部で最大 19.4N/mm^2 の作用応力度が発生していることがわかる。なお、実験ではボルト軸力導入後にひずみ計測を開始したため、ポアソン効果によるひずみは計測値に含まれていない。
- 図-5.2.13 に示したすべり耐力までの母板ひずみ 1, 2 を 50μ 平行移動したデータを見ると、その後の母板ひずみと引張荷重の関係における曲線の傾きは、各解析結果と実験結果で良い一致を示した。
- 実験における母板ひずみ 1 がすべり耐力付近で乱れているが、これは、ボルト近傍における計測であることから、すべり時の衝撃等の影響も考えられるが、原因は特定できていない。

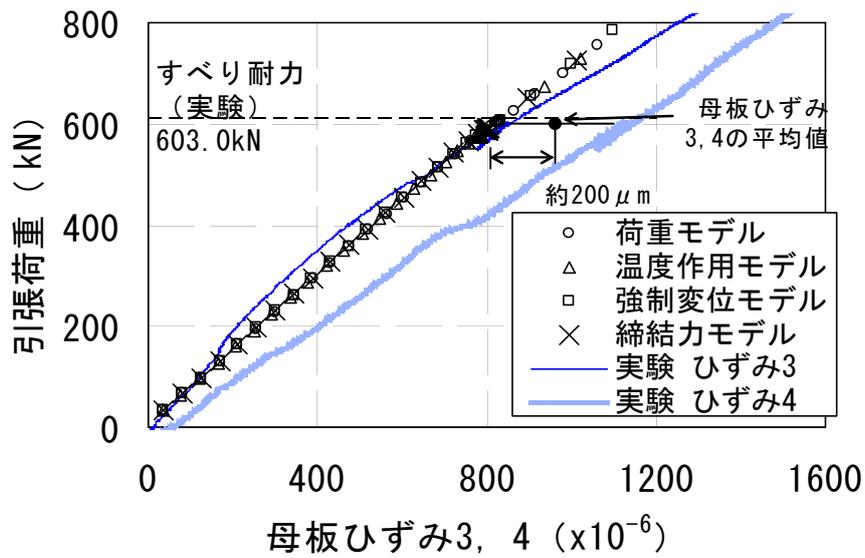


図-5.2.14 母板ひずみ 3, 4 と引張荷重の関係

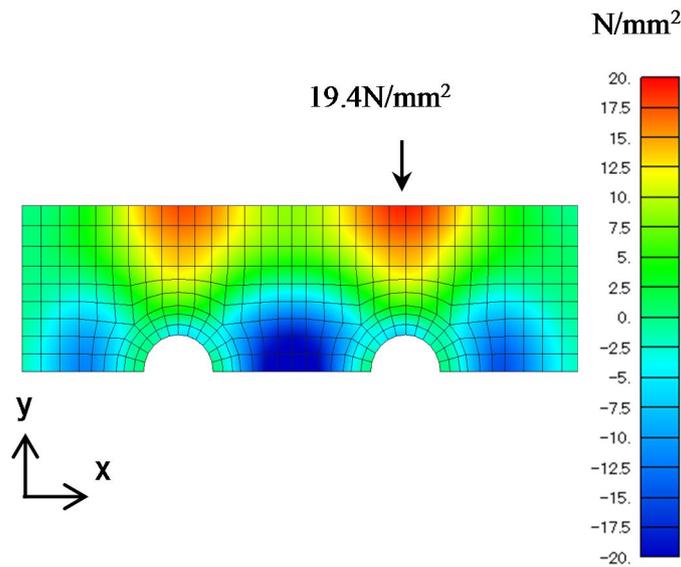


図-5.2.15 母板の板厚中心の x 方向直応力分布 (d) 締結力モデル

母板ひずみ 3, 4 について

- 母板ひずみ 3, 4 については、計測位置に連結板がないため、母板のひずみ 3, 4 の平均値約 810×10^{-6} を母板の平均ひずみ ϵ_f と仮定し、ほか母板の断面積 A_f 、および表-5.2.6 から得られるヤング率 E_f からすべり耐力時における引張荷重 N を式(5.5)より算出すると 604.5kN が得られる。

$$N = E_f \varepsilon_f A_f \quad (5.5)$$

これは、実験によるすべり耐力 603.0kN とほぼ同じ値であることから、解析の母板ひずみ 3、4 は精度良く再現されていると考えられる。

- 一方、実験では母板ひずみ 3、4 が実際の値より大きく計測されて、曲線の傾きが小さくなったと考えられるが、その原因は明らかでない。

実験結果を解析で再現することについて、ボルト軸力導入による引張荷重方向への母板のポアソン効果による誤差が生じる可能性があることがわかった。

(4) 母板ひずみ座金と連結板間の接触面における相当応力

解析結果から、a) 荷重モデル～d) 締結力モデルについて、ボルト軸力導入直後、すべり耐力直前、およびすべり耐力直後における、座金と連結板間の接触面に関する連結板の相当応力分布を図-5.2.16～ 図-5.2.19 にそれぞれ示す。

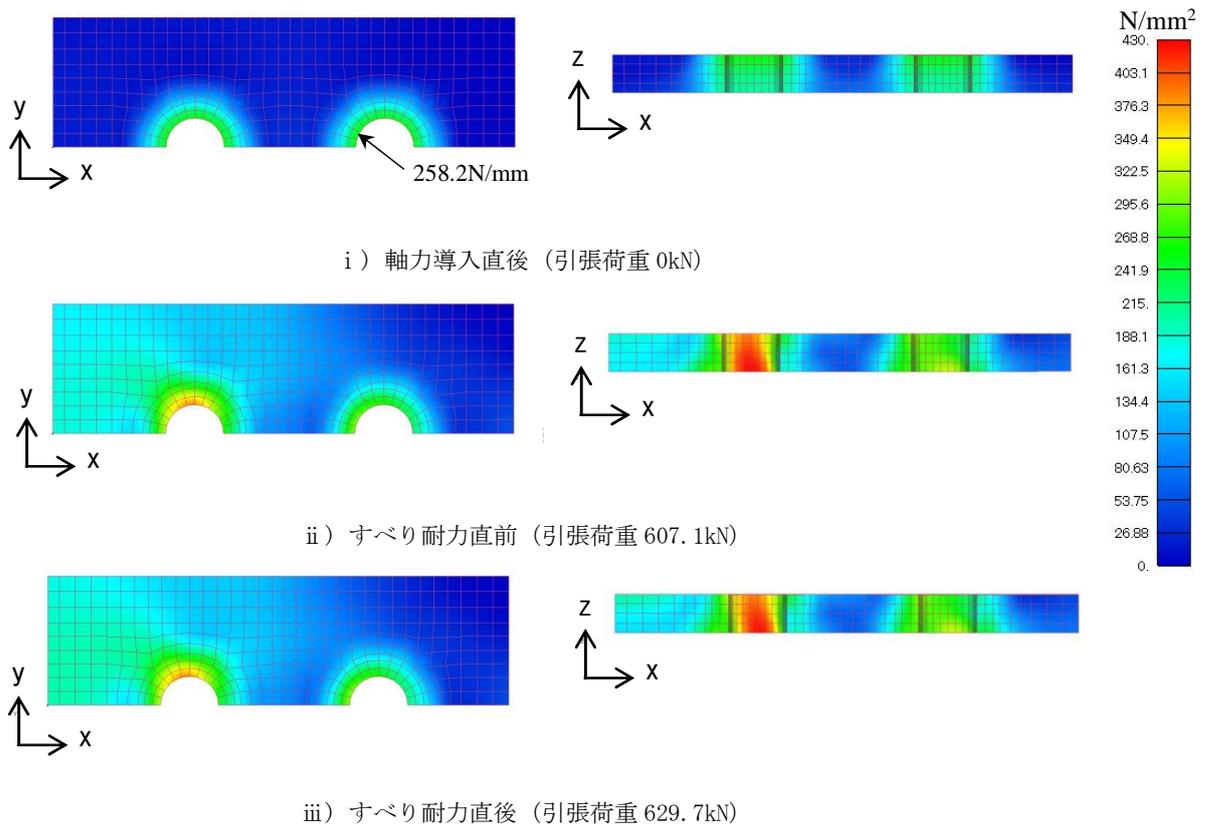


図-5.2.16 座金と連結板間の接触面における連結板の相当応力分布 (a) 荷重モデル)

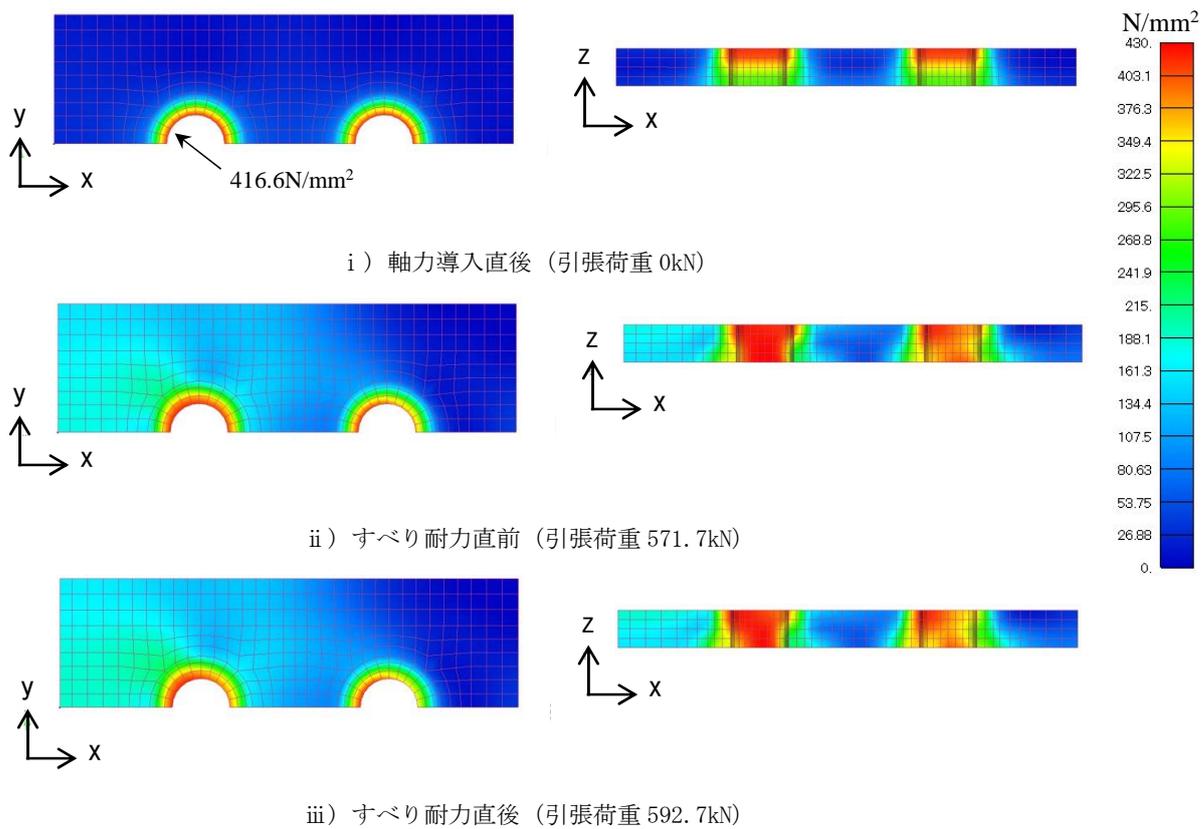


図-5.2.17 座金と連結板間の接触面における連結板の相当応力分布 (b)温度作用モデル)

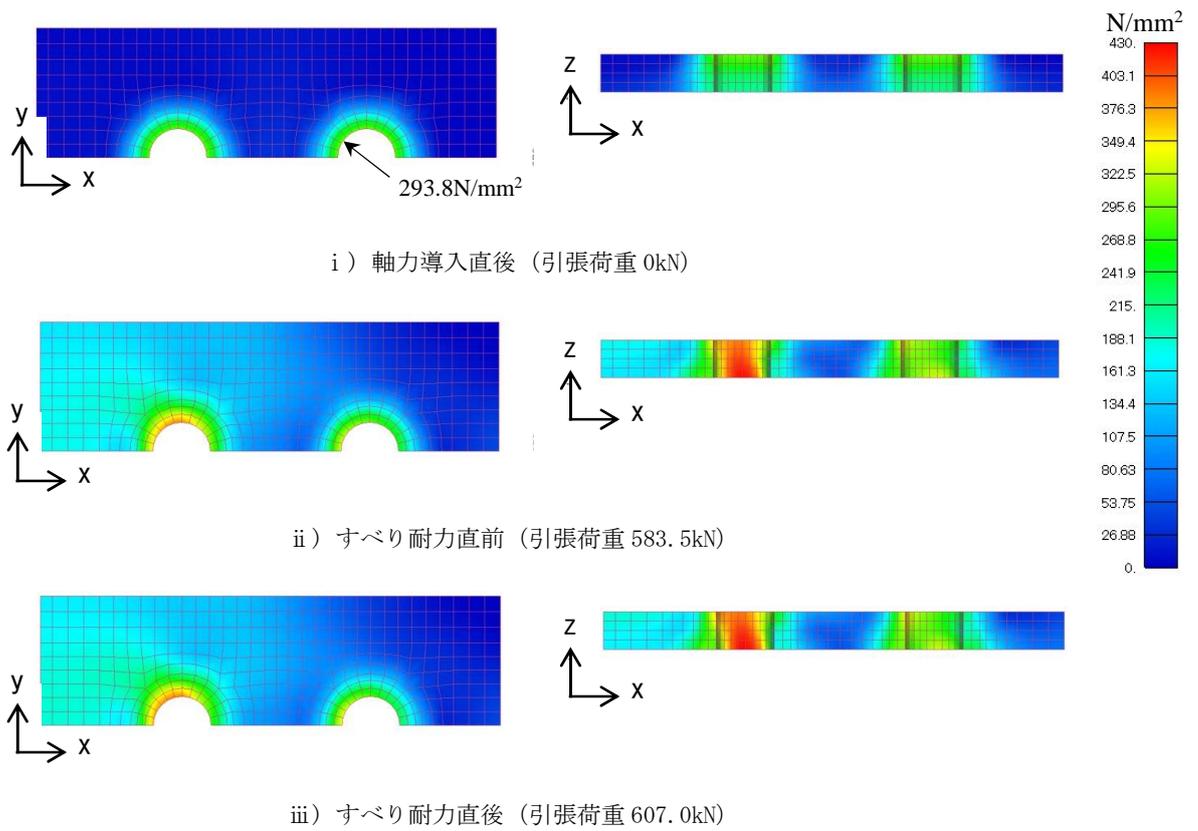


図-5.2.18 座金と連結板間の接触面における連結板の相当応力分布 (c)強制変位モデル)

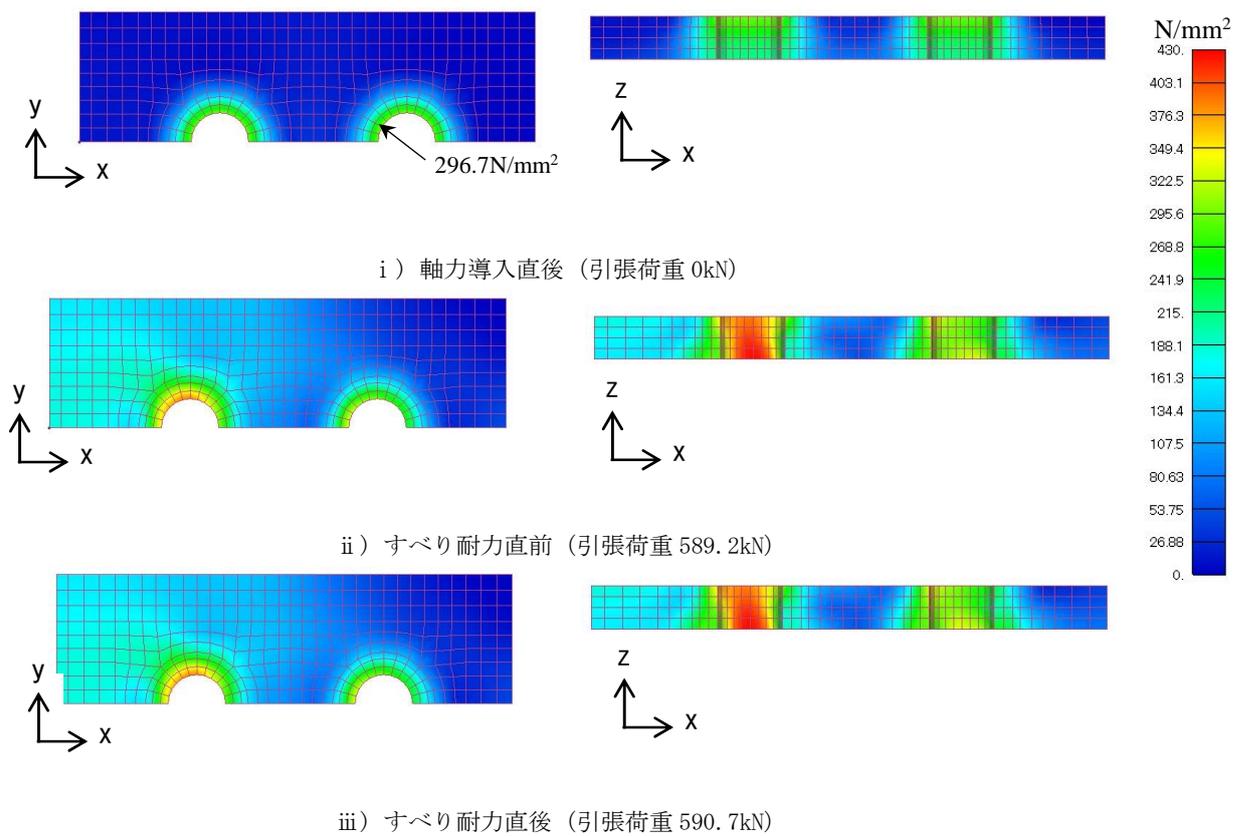


図-5. 2. 19 座金と連結板間の接触面における連結板の相当応力分布 (d) 締結力モデル)

i) 軸力導入直後について

- b) 温度作用モデルでは、接触面に最大 416.6N/mm^2 と、降伏強度 430N/mm^2 に近い作用応力が発生している。
- 他の3つの解析モデルでは、a) 荷重モデルで 258.2N/mm^2 、c) 強制変位モデルで 293.8N/mm^2 、d) 締結力モデルで 296.7N/mm^2 と、接触面の最大作用応力度は相対的に小さい。
- これは、ボルト軸力を導入するために、低い温度をボルトとナットに作用させたことから、ボルト軸方向だけでなくボルト軸直角方向にもボルトとナットが収縮し、引張荷重を作用させる前から接触面に摩擦力が生じたことが原因と考えられる。
- 実際には、ボルト軸力導入時にボルトやナットのすべり方向への収縮はない。そのため、温度作用モデルにおいて、座金と連結板の接触面における局所的な作用応力に着目する場合には、実際との乖離が生じることが明らかとなった。

ii) すべり耐力直前について

- i) と同様に、b) 温度作用モデルは、他の3つの解析モデルよりボルト孔壁部近傍の作用応力が大きい。これは、i) の状態からの作用応力が作用し続けているためと考えられる。

iii) すべり耐力直後について

- いずれの解析モデルにおいても、相当応力分布はii) すべり耐力直前からほぼ変化がない。つまり、すべり耐力前後で接触面の応力分布に大きな変化がないことがわかった。これは、静摩擦係数と動摩擦係数を同じにしていることが理由と考えられる。

i) ~ iii) の b) 温度荷重モデルに見られた、他の3つの解析モデルより作用応力が大きいことについて、原因であるボルト軸力導入時に生じるボルトやナットのすべり方向への収縮は、実際にはない。そのため、b) 温度作用モデルにおいて、座金と連結板の接触面における局所的な作用応力に着目する場合には、実際との乖離が生じることが明らかとなった。

(5) ボルト軸力の変動

ボルト軸力の変動と引張荷重の関係について、解析および実験の結果を図-5.2.20に示す。実験結果のボルトゲージ1、2は、図-5.2.1に示すとおり、可動側における連結中心から2列目のボルトについて、引張荷重の向きと直角方向の左右の位置で計測したものである。

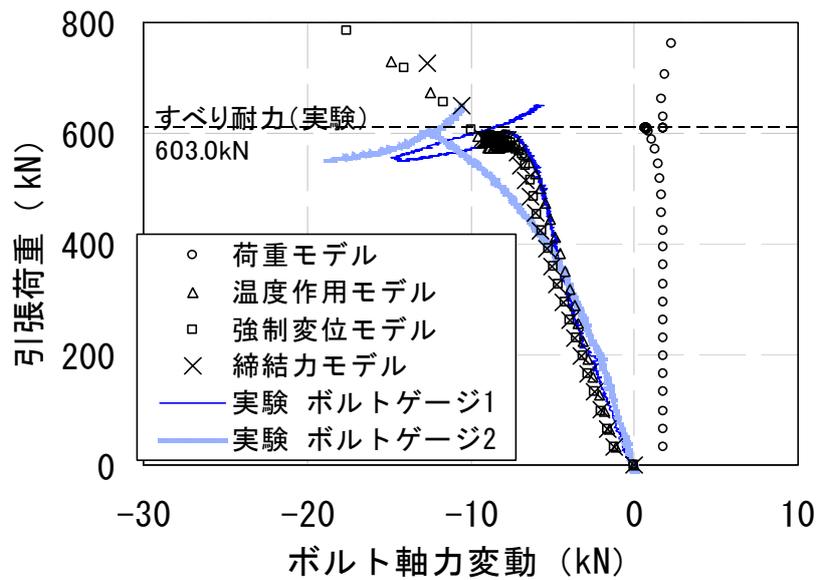


図-5.2.20 ボルト軸力変動

- ボルトゲージ 1、2 の平均値を見ると、ボルト軸力は、引張荷重がすべり耐力に達するまでに約 10kN の低下が生じている。これは、引張荷重が作用した母板および連結板の板厚がポアソン効果によって減少したことが原因と考えられる。
- すべり耐力以降の実験結果が乱れているが、これはすべり時の衝撃等の影響と考えられる。
- 解析結果に着目すると、a) 荷重モデルでは、ボルト軸力の減少挙動を再現できずに、すべり耐力までボルト軸力は一定値となっている。他の 3 つの解析モデルでは、すべり耐力付近まで実験結果と一致し、ボルト軸力の変動を解析で再現できていることを確認した。

(6) ボルト、母板、連結板断面の相当応力

解析結果から、ボルト軸力導入直後、およびすべり耐力直後におけるボルト、母板、連結板の相当応力分布を図-5.2.21 に示す。

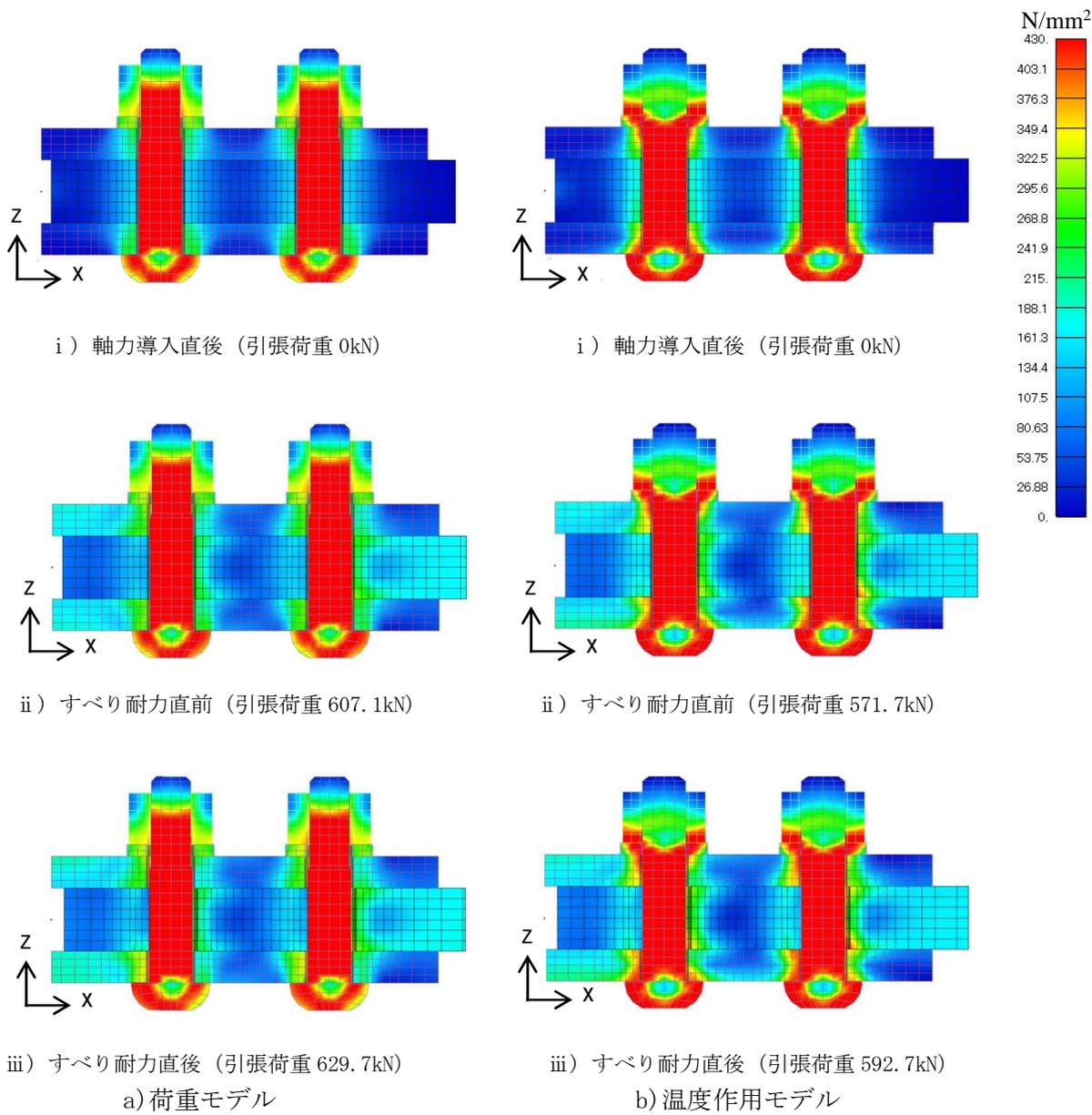
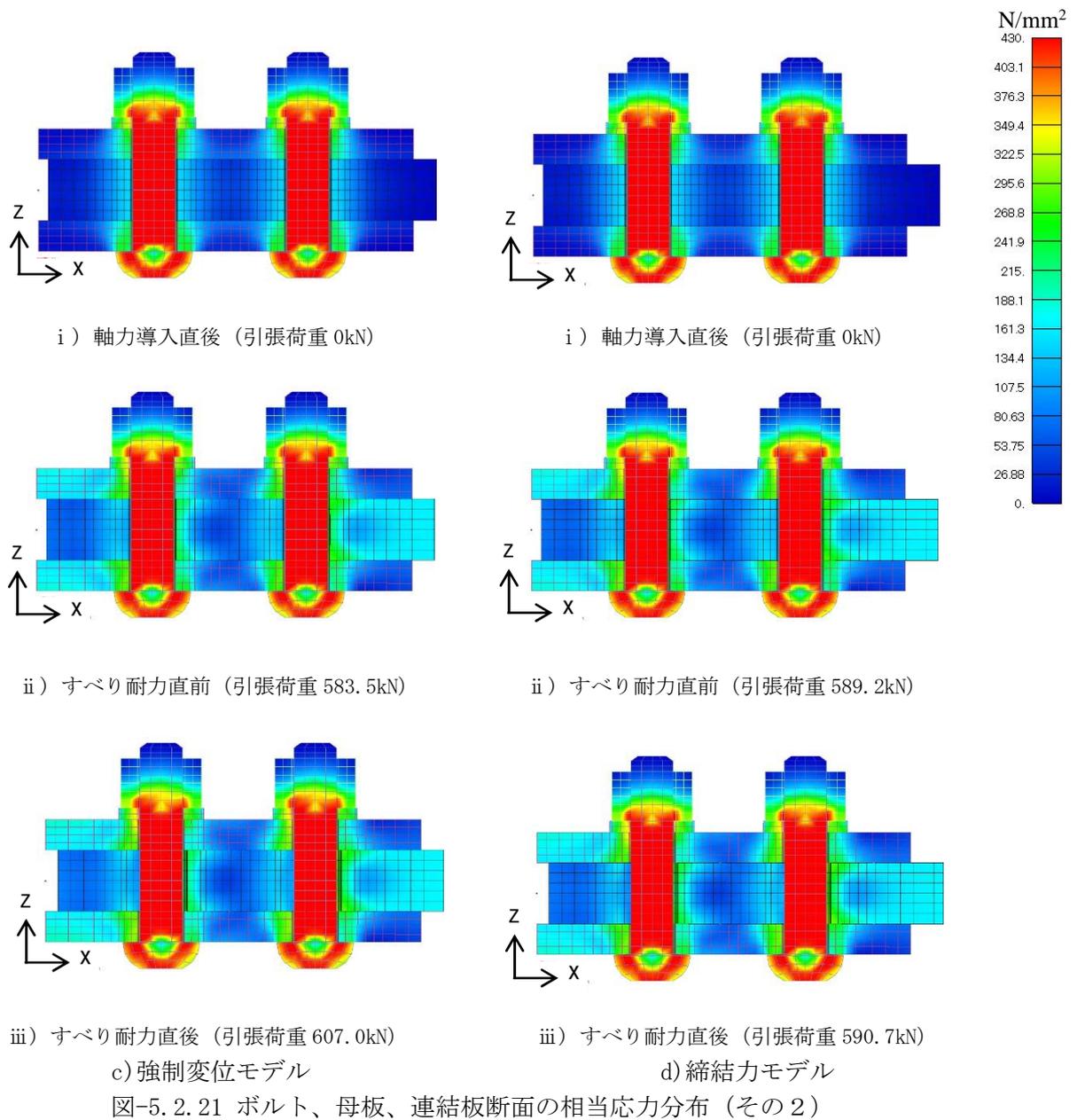


図-5.2.21 ボルト、母板、連結板断面の相当応力分布 (その1)



i) ボルト軸力導入直後について

- c) 強制変位モデルと d) 締結力モデルの応力分布はほぼ一致している。
- a) 荷重モデルでは、ボルトとナットのネジ部において他の3つの解析モデルの結果と応力分布が異なっており、これはボルトとナットの境界部にボルト軸力に相当する表面力を作用させたためと考えられる。母板や連結板、ボルト軸部は、c) 強制変位モデルおよび d) 締結力モデルの応力分布とほぼ一致している。
- b) 温度作用モデルでは、本項(4)に既述したとおり、ボルト軸力導入時に座金と連結板間

の接触面に摩擦力が生じることから、接触面近傍の連結板、座金、ナット、ボルトの応力分布が他の解析モデルの結果と異なっている。

ii) すべり耐力直前について

- ・ d) 締結力モデルに対して c) 強制変位モデルではボルト軸中心に対する非対称性が大きい。これは、c) 強制変位モデルにおいて、ボルト長さ中央でボルトを 2 分割にしていることから、ボルトが分割位置で角折れした変形挙動をしていることが原因と考えられる。
- ・ 実際のボルトの挙動は角折れにならないため、引張荷重の増加に伴い、強制変位モデルのボルトの変形は実挙動から乖離していくと考えられる。
- ・ a) 荷重モデルでは、ボルト軸力導入直後と同様に、ボルトとナットのネジ部において他の解析モデルの結果と応力分布が異なっている。さらに、本項(5)に既述したとおり、ボルト軸力の低下を再現できていないことから、他の解析モデルの結果と比較して、連結板の作用応力が大きくなっている。これは、図-5.2.10、図-5.2.11 に示したとおり、a) 荷重モデルのすべり耐力が他の解析モデルより大きいことと整合している。
- ・ b) 温度作用モデルでは、ボルト軸力導入直後と同様に、接触面近傍の連結板、座金、ナット、ボルトの応力分布が他の解析モデルの結果と異なり、その程度が大きくなっている。

iii) すべり耐力直後について

- ・ いずれの解析モデルにおいても、相当応力分布は ii) すべり耐力直前からほぼ変化がない。つまり、すべり耐力前後で接触面の応力分布に大きな変化がないことがわかった。これは、静摩擦係数と動摩擦係数を同じにしていることが理由と考えられる。

以上より、母板、連結板、ボルト軸部のほか、ボルトとナットのネジ部まで応力分布を精度良く再現するには、c) 強制変位モデル、または d) 締結力モデルが良いことがわかった。さらに、すべり耐力付近の挙動まで再現するには、d) 締結力モデルを用いた解析が最も精度良いことが明らかとなった。

(7) まとめ

標準すべり試験について、実験による挙動を再現することを目的として FEM 解析を行った。再現解析では桁曲げ試験等への拡張を考慮して、ボルト軸力の導入方法について表-5.2.1 に示す4つの解析モデルを比較した。以下、得られた知見を示す。

- すべり耐力までの挙動については、いずれの解析モデルを採用しても、母板と連結板間の相対変位、または母板間の相対変位と引張荷重の関係は実験結果とよく一致した。
- 本項(1)の定義から求めるすべり耐力も実験結果とほぼ同じとなり、誤差は最大 5%程度であった。a) 荷重モデル以外は、実験結果より値が小さく安全側の評価となる結果を得られた。
- 母板ひずみについて、4つの解析モデル間に明確な差はなく、実験結果を解析結果で再現することが可能と考えられる。
- 連結中心から2列目のボルト位置における母板ひずみ 1、2 について、ボルト軸力導入による引張荷重方向への母板のポアソン効果の考慮の有無によって、実験結果と解析結果には約 50μ の差が生じた。
- 座金と連結板間の接触面における応力分布は、b) 温度作用モデルを用いた場合に、軸力導入時にボルト軸と直角方向にもボルトが収縮することから、実挙動とは異なることが推定された。
- ボルト軸力の変動について、a) 荷重モデルではボルト軸力の低減が再現されないことが明らかとなった。
- ボルト、およびボルト近傍の母板と連結板の応力分布は、d) 締結力モデルを用いた解析が最も精度良く実験結果を再現できることがわかった。

標準すべり試験の再現解析において、ボルト軸力の導入方法に着目した4つの解析モデルを比較した結果を表-5.2.7 に示す。これより、すべり耐力までの挙動について、締結力モデルが最も精度良く実挙動を再現できることがわかった。

表-5.2.7 すべり耐力までの挙動に関するボルト軸力導入モデルの比較

a) 荷重モデル	b) 温度作用モデル	c) 強制変位モデル	d) 締結力モデル
軸力を荷重として入力するため、母板や連結板の板厚が小さくなってボルト軸方向のひずみが増加しても軸力変動を再現できない問題点がある。	ボルト軸方向のほかにボルト軸直角方向にも収縮を作用させているため、座金と連結板間のせん断力が過大に生じる問題点がある。	ボルト全長をモデル化した場合には、ボルトを2分割しているため、すべり後のボルト軸直角方向の変形を正確に再現できない。特に、母板の孔壁部にボルト軸部が接触する支圧状態以降にその影響が顕著になると推定される。 ボルト長さの半分をモデル化する場合には、すべり耐力までの挙動を再現できる。 参考文献 5.3, 5.4, 5.7, 5.9)	他の3つの解析モデルのような問題点がなく、ボルト全長をモデル化する場合に、少なくともすべり耐力までの挙動については実挙動を精度良く再現できる。 参考文献 5.10)

5.3 多列すべり試験のFEM解析

本節では、ボルト軸力導入の精度の影響を受けやすい多列すべり試験を対象として、締結力モデルを用いたFEM解析を行う。

5.3.1 解析の概要

3章の多列すべり試験の中から、ボルト列数が12列と最も多い供試体 No. 58 を対象に解析を行う。

(1) 解析モデル

解析の対象とした供試体 No.58 の多列すべり試験について、試験体の概要を図-5.3.1 に示す。試験の詳細は3章に記述したとおりである。

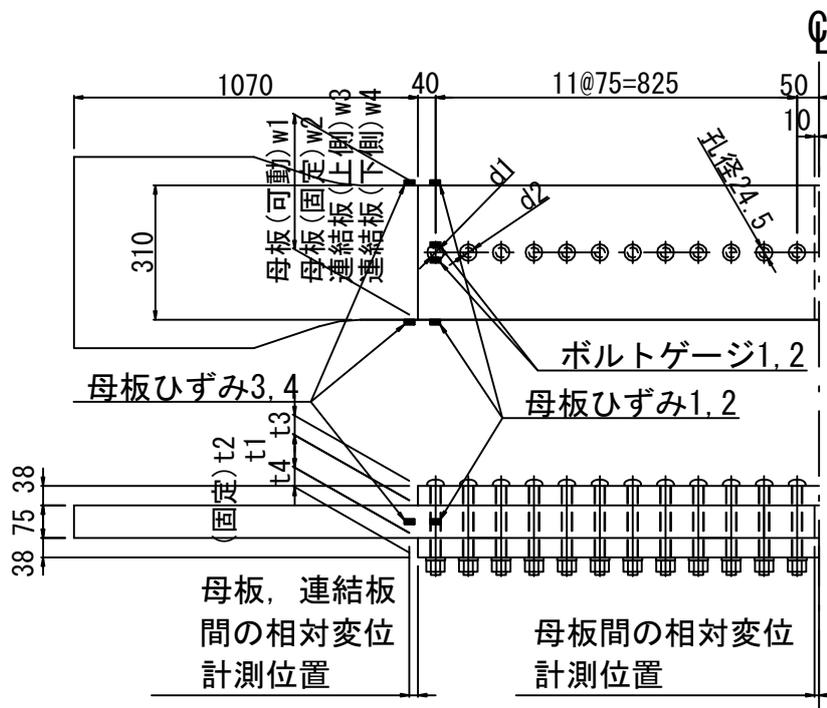


図-5.3.1 多列すべり試験の供試体 (12列、供試体 No. 58)

供試体の接合面処理は、道路橋示方書に規定された無機ジンクリッチペイントとし、ボルト孔周辺の合計塗膜厚が道路橋示方書の規定値である $100\sim 200\mu\text{m}$ に収まっていることを確認している。試験は標準すべり試験と同様に、ボルト締付後、12時間以上経過させてからすべり試験を行った。図-5.3.1の計測箇所に対応した供試体の計測値を表-5.3.1に示す。母板、連結板の幅は設計値どおりであり、板厚は設計値より大きく、5.3.2項以降に示す解析より剛性は大きい。

表-5.3.1 多列すべり試験の部材寸法 (12列、供試体 No. 58)

幅 (mm)				板厚 (mm)			
母板		連結板		母板		連結板	
可動側	固定側	上側	下側	可動側	固定側	上側	下側
w1	w2	w3	w4	t1	t2	t3	t4
310.0	310.0	310.0	310.0	75.2	75.1	75.0	75.0
孔径 (mm)							
母板		連結板					
		上側		下側			
d1	d2	d1	d2	d1	d2		
24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5		

解析モデルは、ボルト全体をモデル化するために 1/4 対称モデルとし、要素の種類、要素サイズ、有限要素解析コード、接触設定、境界条件も 5.2 節と同じとした。母板と連結板の接触は 5.2 節と同様に、標準すべり試験結果から求めたすべり係数 0.64 を静摩擦係数とした。動摩擦係数と静摩擦係数を同じとしたことも 5.2 節と同じである。ボルト軸力の導入方法には、締結力モデルを採用した。

(2) 材料特性

解析で用いた鋼材の材料特性、および応力ひずみ関係を表-5.3.2 に示す。板厚 75mm の母板は SM520C-H を使用した。ただし、一部の試験結果がないことから、鋼板のヤング率とポアソン比は道示を参考に公称値とし^{5.5)}、ボルトの材料特性も公称値とした^{5.11)}。ここで、ボルトメーカーの自主検査によるボルト軸部のヤング率に関する試験結果を資料-3 に示す。超高力ボルトの 2 種類のボルト径のヤング率 (平均値) は、 2.018×10^5 (N/mm²) であり、他の高力ボルトのヤング率の平均値 S10T : 2.013×10^5 (N/mm²)、F8T : 1.983×10^5 (N/mm²) とほぼ同等、あるいは若干高い値を示した。鋼板のヤング率に対する比率が 1.009 と 1%程度であることから、文献 12) の検討実績も参考に、解析では鋼板と同じ公称値を採用した。

表-5.3.2 多列すべり試験の材料試験 (12列、供試体 No. 58)

部位	鋼種	ヤング率 N/mm ²	ポアソン 比	降伏強度 N/mm ²	降伏 ひずみ
母板	SM520C-H	200,000	0.30	375	0.00188
連結板	SM490Y				
S14T (M22)		200,000	0.30	1,260	0.00630
	応力 N/mm ²	ひずみ			
母板	0	0			
SM520C-H	375	0.00188			
連結板	375	0.02500			
SM490Y	579	0.08000			
S14T	0	0			
	1260	0.00630			
	1400	0.14630			

(3) 解析方法

解析手法は、5.2 節と同様に、以下の手順とする。

<STEP1>設計ボルト軸力を 5.2.1 に示す締結力ボルトのモデル化に準じて、ボルトに与える。

<STEP2>図-5.2.9 と同様な載荷荷重位置に強制変位を与える。

使用した M22 の S14T ボルトに導入するボルト軸力は、試験直前に計測した可動側の 12 本中 8 本の平均値を用いて 288kN とした。

5.3.2 解析結果

(1) 母板と連結板間の相対変位

解析、および実験の結果から、連結板端部における母板、連結板間の相対変位と引張荷重の関係について図-5.3.2 に示す。

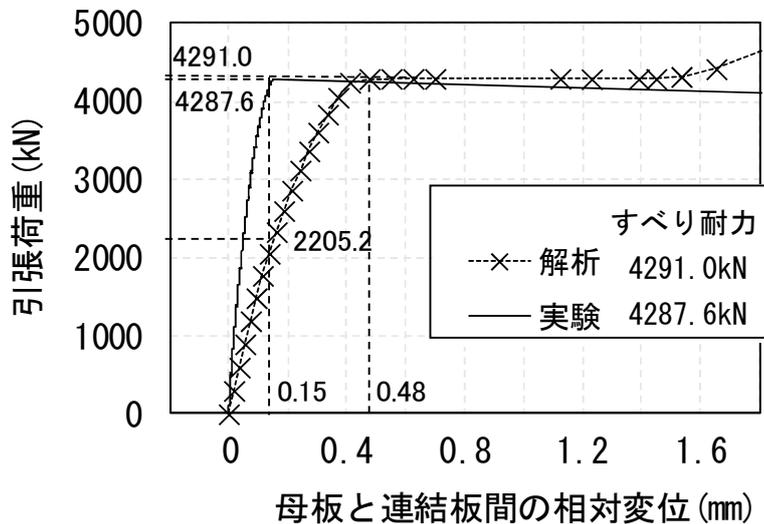


図-5.3.2 母板と連結板間の相対変位と引張荷重

解析結果から得られた知見は以下のとおりである。

- ・すべり耐力は、実験結果 4287.6kN に対して解析結果 4291.0kN (実験結果との比率 1.00) と、ほぼ同じ値を示した。しかし、すべり耐力までの母板と連結板間の相対変位と引張荷重の曲線に関する傾きには相違が生じ、実験によるすべり耐力時の相対変位 0.15mm における解析の引張荷重は 2205.2kN (実験結果との比率 0.51) であった。これは、鋼板のヤング率を公称値に設定したことが原因と考えられ、標準すべり試験の実験供試体と同様に、多列すべり試験の実験供試体もヤング率は公称値より大きかった可能性が推定される。
- ・多列すべり試験の場合、ボルト 1 本当たりの分担摩擦力が不均一になることから、全てのボルトが同時にすべり挙動を示さず^{5.2~5.4)}、解析では実験よりも引張荷重が小さい段階で

すべり始めたボルト本数が多く、特に連結中心から1列目のボルトのすべり始めの引張荷重が小さかった可能性も考えられる。

- ・ 図-5.3.5 よりすべり耐力までの連結中心から1列目のボルト軸力の変動は、実験結果18.7kNより解析結果7.0kNの方が小さいものの、試験直前のボルト軸力は実験317kNより前述した解析288kNの方が小さかった。その結果、すべり耐力時のボルト軸力は、実験結果298kNに対して解析結果281kNの方が小さく、静摩擦係数が同じ場合、解析では実験よりも引張荷重が小さい段階ですべり始めた可能性があると考えられる。
- ・ すべり耐力以降の挙動については、標準すべり試験と同様に、解析における動摩擦係数と静摩擦係数を同じとしたことにより、すべり耐力後の引張荷重の低減を解析では再現できていないことが確認できる。
- ・ なお、山口らの研究^{5.3.5.4)}ではすべり発生の定義を「解析における最大荷重発生時、もしくは母板と連結板の接触面の内側相対変位が0.2mmに達した時のうち、内側相対変位が小さい方の時点」としている。ここで、内側相対変位とは、連結中心から1列目のボルト位置における母板と連結板間の相対変位を示す。図-5.3.2の相対変位の計測位置は連結板端部であり、計測位置が山口らの研究と異なることから両者を直接的に対比できないものの、5.2節で定義した本研究におけるすべり耐力時の相対変位は約0.48mmであり、0.2mmを大きく超過している。多列すべり試験については、すべり時における荷重最大値とすべり発生時における荷重値が異なるため、解析時に着目する状態を明確にする必要がある。

(2) 母板間の相対変位

図-5.3.3に、解析および実験の結果から得られた、連結中心における母板間の相対変位と引張荷重の関係を示す。

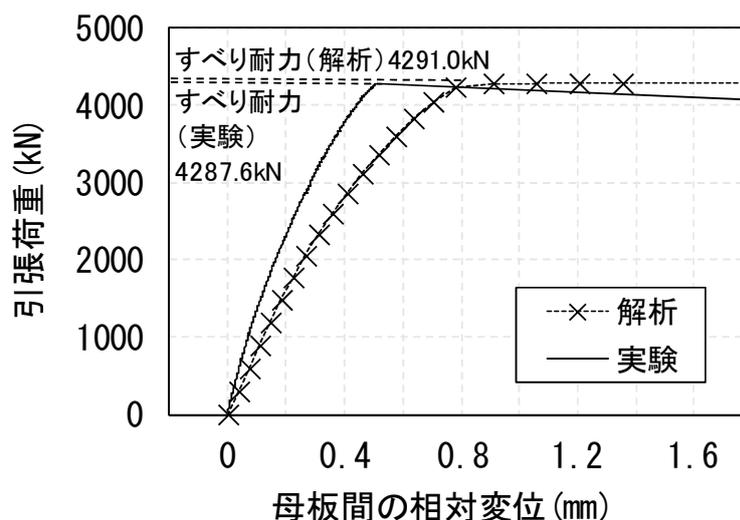


図-5.3.3 母板間の相対変位と引張荷重

解析結果から得られた知見は以下のとおりである。

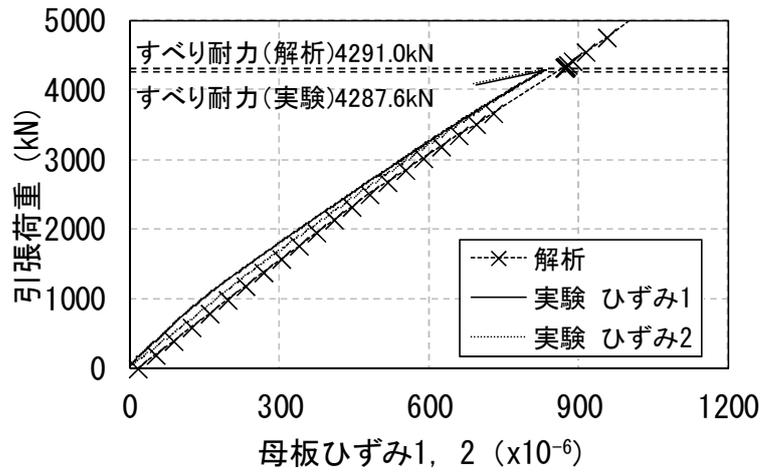
- (1)で示した母板と連結板間の相対変位と同様に、すべり時における引張荷重は、実験結果と解析結果で良い一致を示した。
- しかし、すべり耐力までの相対変位に対する引張荷重が増加する傾きは、解析結果の方が小さくなった。これは(1)と同様に、鋼板のヤング率の実験供試体と公称値の差、および連結中心から12列目のボルトのすべり始めの引張荷重が小さかった可能性が考えられる。
- 連結中心から12列目の試験直前のボルト軸力は前述した解析288kNに対して実験282kNであり、図-5.3.5よりすべり耐力までのボルト軸力の変動がそれぞれ解析結果11.0kN、実験結果6.7kNであったことから、すべり耐力時のボルト軸力は、それぞれ解析結果277kN、実験結果277kNと同じ値であった。
- 接合面処理のばらつきにより、12列目の静摩擦係数は、解析より実験の方が大きく、解析では実験よりも引張荷重が小さい段階ですべり始めた可能性がある。
- 解析では動摩擦係数を静摩擦係数と同じとしたことを原因として、すべり耐力後の引張荷重の低減を再現できていない。

(3) 母板ひずみ

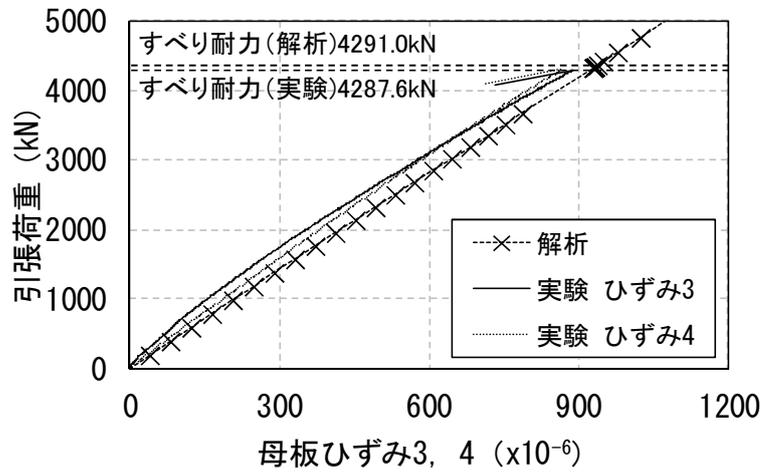
解析、および実験の結果から、図-5.3.1に示す連結中心から12列目のボルト位置の母板ひずみ1、2、および連結板端部位置における母板ひずみ3、4と引張荷重の関係を図-5.3.4に示す。

解析結果から得られた知見は以下のとおりである。

- 5.2節と同様に、母板ひずみ1、2は母板ひずみ3、4より小さい。
- ボルト列数が12列のため、母板ひずみ1、2の位置における連結板の分担する引張荷重の割合が、ボルト列数2列の標準すべり試験より小さくなっている。
- 供試体の長幅比が大きくなっていることから、引張荷重の偏心は相対的に小さくなり、母板ひずみ1と2、または3と4の差も低減している。
- 実験における母板ひずみは全てすべり耐力近傍で乱れているが、標準すべり試験と同様に、計測位置がボルト近傍であることから、すべり時の衝撃等の影響を受けたものと推定される。
- 母板ひずみ1と2、および3と4それぞれについて、解析結果は実験結果より曲線の傾きが小さい。これは(1)と同様に、鋼板のヤング率の実験供試体と公称値の差が原因と考えられる。



(a) 母板ひずみ 1、2



(b) 母板ひずみ 3、4

図-5.3.4 母板ひずみと引張荷重

(4) ボルト軸力の変動

ボルト軸力の変動と引張荷重の関係について、解析および実験の結果を図-5.3.5に示す。12列の中から、端部および中間部の挙動を把握するために、連結中心から1、3、8、12列目に着目した。

(5) まとめ

多列すべり試験について、実験による挙動を再現することを目的として FEM 解析を行った。再現解析では 5.2 節の検討結果から締結力モデルを用いた。以下、得られた知見を示す。

- すべり耐力までの挙動に着目すると、すべり耐力や母板ひずみは精度良く実験結果の再現ができた。
- 母板と連結板間の相対変位、母板間の相対変位、ボルト軸力の変動では実験結果との乖離が見られ、ボルトごとの導入軸力、母板や連結板の初期変形、または鋼材の機械的性質の設定により精度が向上すると考えられる。
- すべり耐力以降の挙動については、標準すべり試験と同様に、動摩擦係数の設定が課題として挙げられる。

5.4 桁曲げ試験のFEM解析

本節では、鋼 I 桁の縮小供試体を用いた桁曲げ試験の再現解析を行った。

5.4.1 解析の概要

4章の桁曲げ試験の中から、供試体No. G2を代表させて解析を行う。

(1) 解析モデル

解析の対象とした桁曲げ試験の試験体概要を図-5.4.1に示す。試験の詳細は4章に記述している。

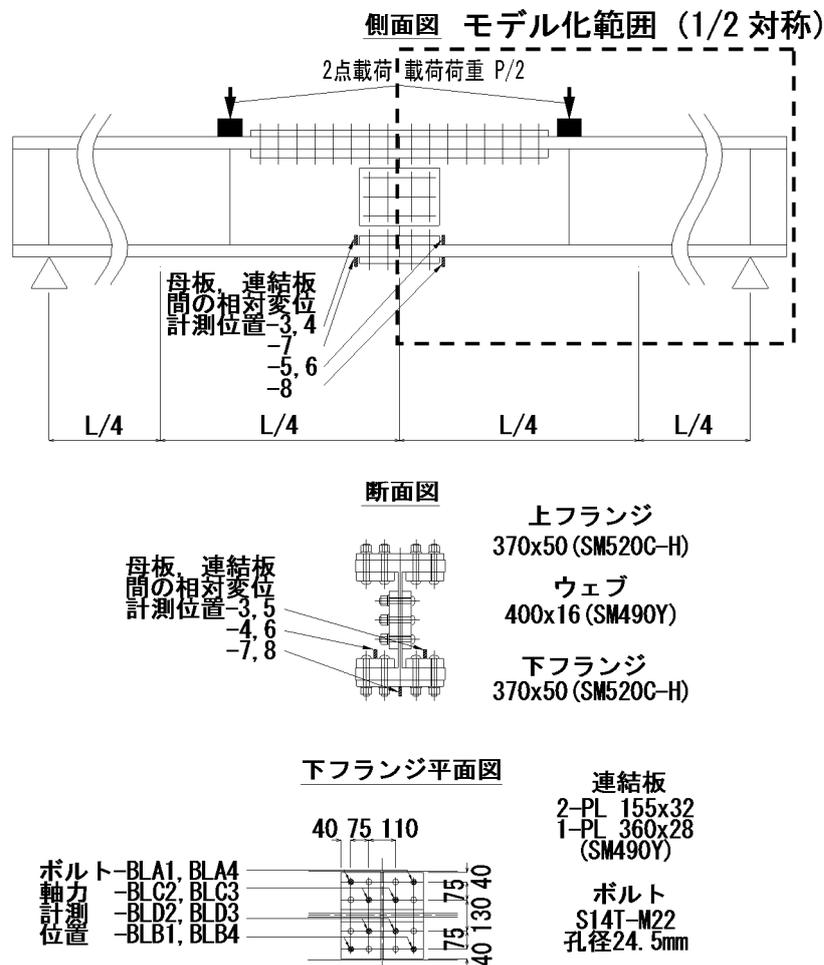


図-5.4.1 桁曲げ試験 試験体概要 (供試体No. G2)

4章で示したとおり、桁曲げ試験は1800kNの荷重試験機を使用して2点荷重とし、供試体と荷重状況を図-5.4.1に示す。試験では下フランジ連結部のすべり耐力に着目し、確実に下フランジですべりが生じるように、上フランジのボルト本数は下フランジより多く設

置した。桁断面の終局強度は降伏強度以上となるように各板要素の幅厚比を決定した。解析で着目した計測内容は、図-5.4.1 に示す位置における母板と連結板間の相対変位、ボルト軸力、および試験機の引張力と変位とした。

解析モデルは、桁曲げ試験の再現解析のためにボルト全体をモデル化し、左右対称の1/2対称モデルとし、図-5.4.2 に示す要素分割とした。ボルト、座金、母板、連結板に使用した要素の種類や分割、および接触設定を標準すべり試験や多列すべり試験と同様とした。有限要素解析コードはAbaqus/Standard ver. 6.11-1^{5.1)}を用いた。

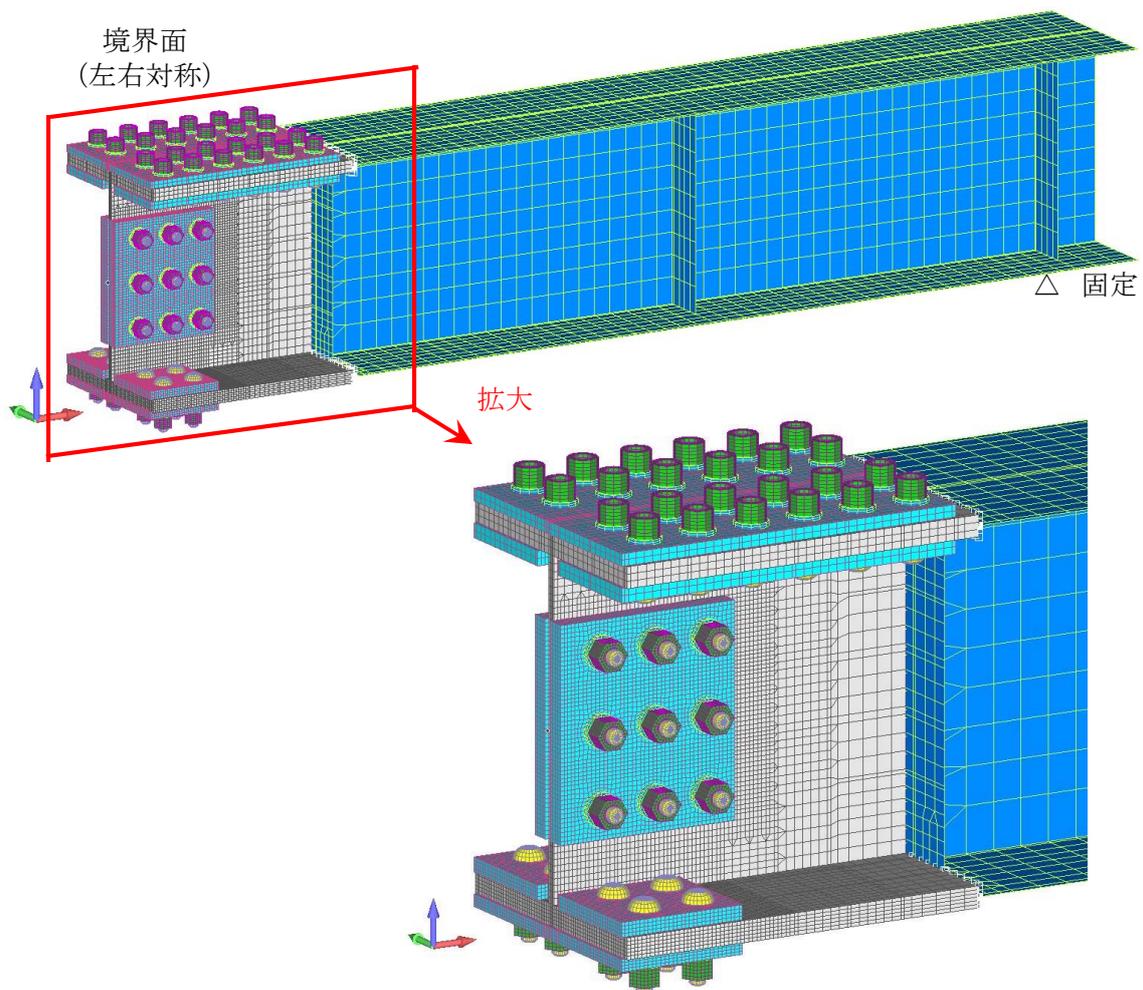
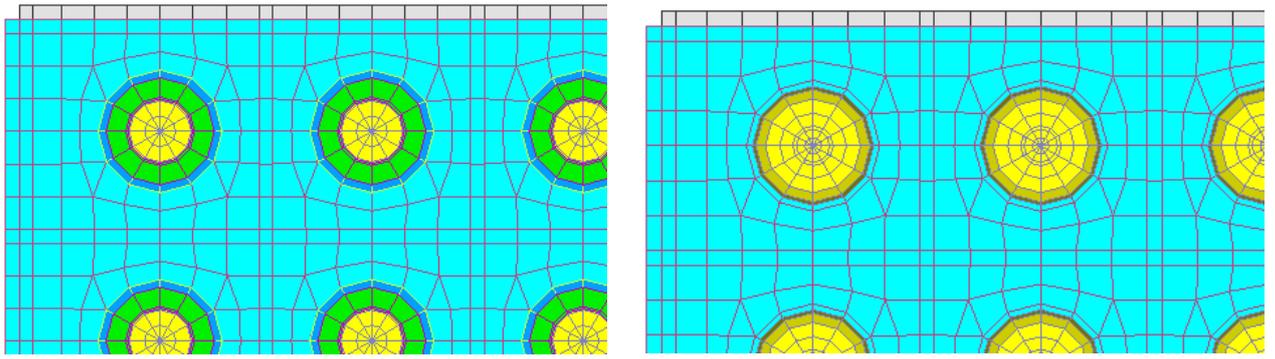
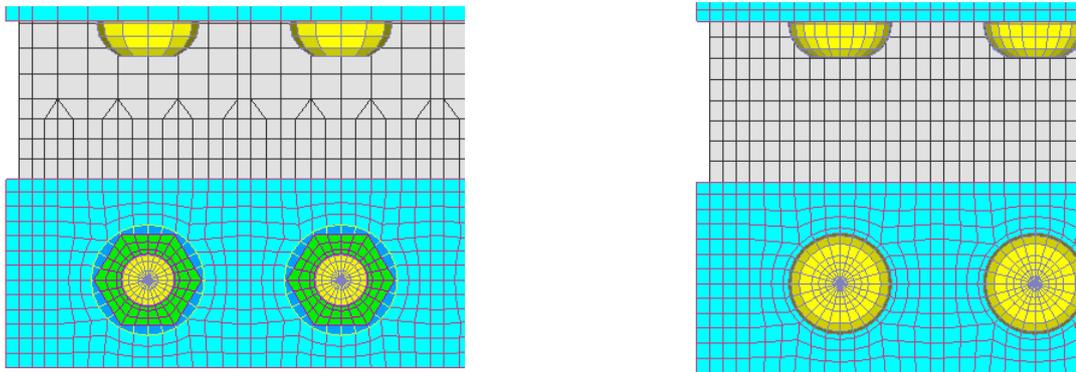


図-5.4.2 桁曲げ試験の解析モデル



(a) 上フランジのボルトとナット



(b) ウェブのボルトとナット (下フランジも同様)

図-5.4.3 ボルト付近の要素分割

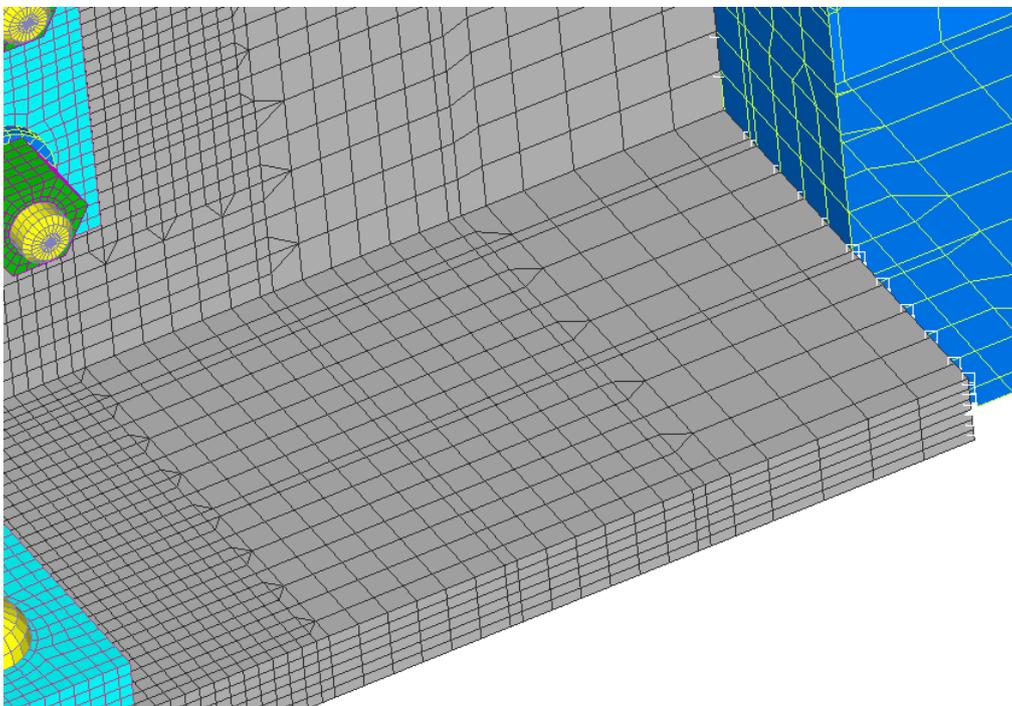


図-5.4.4 ウェブや下フランジの連結板から遠い箇所の比較的粗い要素分割

ボルト周りの要素分割を図-5.4.5 に示す。下フランジとウェブは詳細に評価する必要があるので図-5.4.5(a) に示す詳細ボルトモデルを使用し、上フランジは評価対象箇所ではないため図-5.4.5(b) に示す簡易ボルトモデルを使用する。

(a)詳細ボルトモデルは、標準すべり試験や多列すべり試験と同様な要素サイズとし、ボルト周りを約 5.5mm、ボルト中心は1周 24 分割とした。

(b)簡易ボルトモデルは、ボルトの軸部をほぼ省略している。また、図-5.4.5(b) に示すとおり、連結板にボルトおよびナットを一体化させている。このモデルではボルト、ナット、および座金による連結板への支圧現象を解析することができず、さらにボルトおよびナットの作用応力を解析することができない。ただし、ボルトおよびナットに軸力を与えることにより、母板と連結板間の面圧分布は(a)詳細ボルトモデルと同様に解析することができる。(b)簡易ボルトモデルの要素サイズは(a)詳細ボルトモデルの約 2 倍の大きさとし、ボルト中心は1周 12 分割とした。また、ナットの外形は座金に合わせて六角形ではなく円筒形とした。

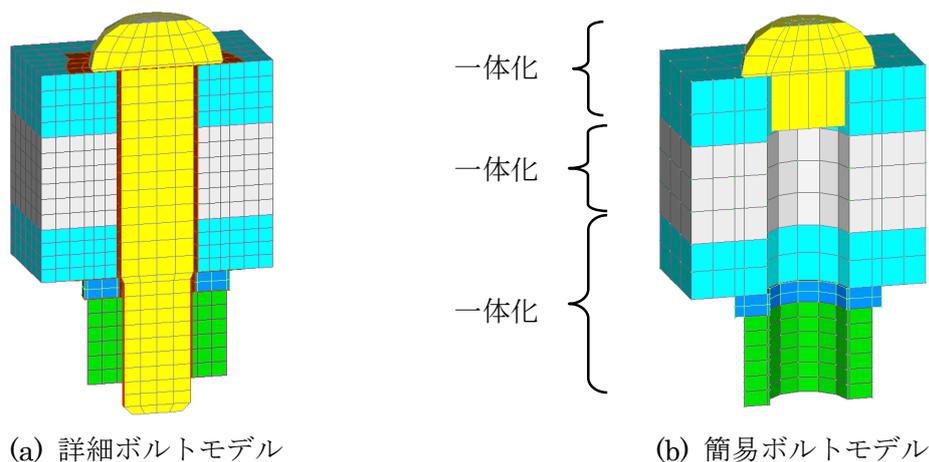


図-5.4.5 ボルト周りの要素分割通

摩擦係数は、5.2、5.3 節と同様な方法で求めて 0.56 とした。ただし、ボルト軸の接触部だけは摩擦力が生じないように設定した。動摩擦係数は静摩擦係数と同じとした。簡易ボルトモデルは、ボルト軸部の省略、またはボルトおよびナットを連結板に一体化させることによりモデル化を省略しているため、接触箇所はない。

(2) 材料特性

本解析で使用されている材料は、母板と連結板が SM490Y (板厚が 50mm の場合は SM520C-H)、ボルト (ナットと座金も含む) が S14T である。これらの材料特性について、表-5.4.1 に示す。一部の試験結果がないことから、5.3.1(2)と同様に、鋼板のヤング率とポアソン比は道示を参考に公称値とし^{5.5)}、ボルトの材料特性も公称値とした^{5.11)}。こ

ここで、ボルトメーカーの自主検査によるボルト軸部のヤング率に関する試験結果を資料-3に示す。超高力ボルトの2種類のボルト径のヤング率(平均値)は、 2.018×10^5 (N/mm²)であり、他の高力ボルトのヤング率の平均値 S10T : 2.013×10^5 (N/mm²)、F8T : 1.983×10^5 (N/mm²) とほぼ同等、あるいは若干高い値を示した。鋼板のヤング率に対する比率が1.009と1%程度であることから、文献12)の検討実績も参考に、解析では鋼板と同じ公称値を採用した。鋼板の降伏強度は実験結果を用いた。

表-5.4.1 材料特性

部位	鋼種	ヤング率	ポアソン比	降伏強度	降伏ひずみ
		N/mm ²		N/mm ²	
母板	SM520C-H (t=50) または	200,000	0.30	391	0.00196
連結板	SM490Y (t=16, 28, 32)				
S14T (M22)		200,000	0.30	1,260	0.00630
	応力	ひずみ			
	N/mm ²				
母板	0	0			
連結板	391	0.00196			
SM520C-H	391	0.02500			
SM490Y	579	0.08000			
S14T	0	0			
	1260	0.00630			
	1400	0.14630			

(3) 解析方法

解析手法は、同様に以下の手順とする。

<STEP1>設計ボルト軸力を5.2節に示す締結力ボルトのモデル化に準じて、ボルトに与える。

<STEP2>図-5.4.1の載荷荷重位置に強制変位を与える。

使用したM22のS14Tボルトに導入するボルト軸力は、試験直前の計測値から247kNとした。この値は、設計軸力299kNと比較して約20%も小さく、ボルト軸力は締付直後から設計軸力を下回っていた。これは、ボルトにひずみゲージを貼り付ける前にボルトに付着したオイルを一部取り除き、貼り付け後にオイルを再塗布した一連の作業が原因と考えられる。しかし、実験の再現に着目した場合、ボルトに導入した軸力が設計軸力を下回ったことは影響ないと判断し、本実験を解析の対象とした。

5.4.2 解析結果

(1) 母板と連結板間の相対変位

図-5.4.1 に示す計測位置-3~8 の母板、連結板間の相対変位と下フランジ引張荷重との関係を図-5.4.6 に示す。下フランジ上面の計測位置-3 と 4、および計測位置-5 と 6 は、それぞれ桁断面内における左右対称位置であり、計測位置-3 と 5、計測位置-4 と 6 は連結中心から桁軸方向に対称の位置関係である。下フランジ下面の計測位置-7 と 8 も、連結中心から桁軸方向に対称の位置関係である。解析モデルは連結中心から対称とした 1/2 モデルであるため、計測位置-3 と 5、4 と 6、7 と 8 はそれぞれ同じ値とみなす。

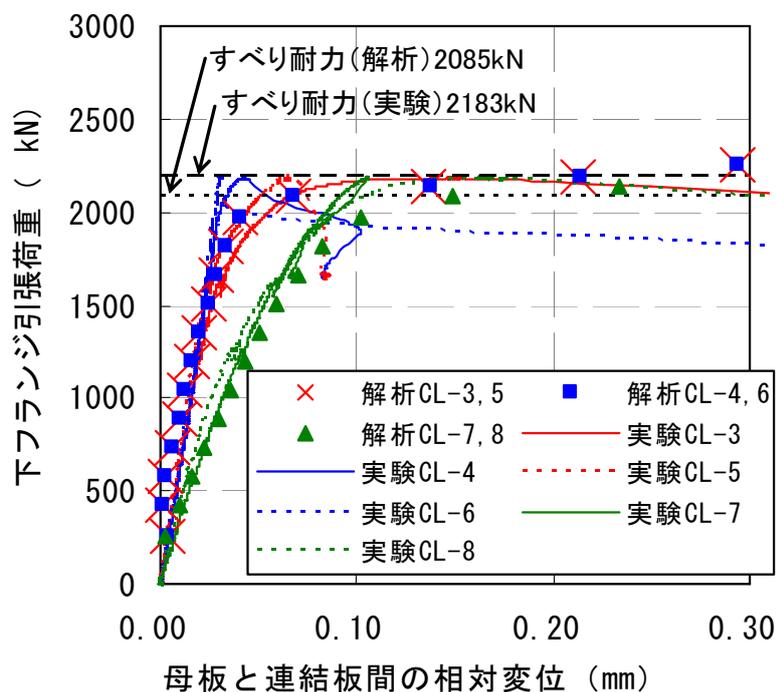


図-5.4.6 母板と連結板間の相対変位と引張荷重

解析結果から得られた知見は以下のとおりである。

- ・ 桁に面外曲げやねじりモーメントが作用しないことから、計測位置-3 と 4、5 と 6 も解析結果は同じとなった。
- ・ 一方、実験結果に着目すると、計測位置-4 と 6 は計測位置-3 と 5 に対して、荷重載荷当初は同じ挙動であるものの、すべり耐力時の相対変位が小さいことや、すべり耐力後に相対変位が大きく増加せずに荷重が低下していることから、遅れてすべりが生じたことがわかる。
- ・ これは、実験供試体における接合面処理である無機ジンクリッチペイント塗布の施工誤差による摩擦係数のばらつき、および導入されたボルト軸力のボルトごとのばらつきが原因と考えられる。

- 5.2.2(1)で定義したすべり耐力について、下フランジ引張荷重の最大値 2183kN である実験結果に対して、解析結果 2085kN（実験結果に対する比率 0.955）は 5%程度の誤差の精度となった。
- 以上より、すべり耐力までの挙動について、解析結果は実験結果の計測位置-3 と 5 を再現できていると考えられる。
- 下フランジ下面の計測位置-7 と 8 についても、計測位置-3～6 より若干精度は劣るものの、解析結果は実験結果を再現できていると考えられる。
- さらに、下フランジ下面の計測位置-7 と 8 の相対変位は、桁の曲げ変形により下フランジ上面の計測位置-3～6 の相対変位より大きくなるのが解析で再現できていることを確認した。

(2) ボルト軸力変動

図-5.4.1 に示す各ボルトの軸力変動について、図-5.4.7 に示す。

ボルト BLA1、4 と BLB1、4、および BLC2、3 と BLD2、3 はそれぞれ桁断面内における左右対称位置であり、左右でほぼ同じ結果であったことから、BLB1、4 と BLD2、3 の結果を代表させた。

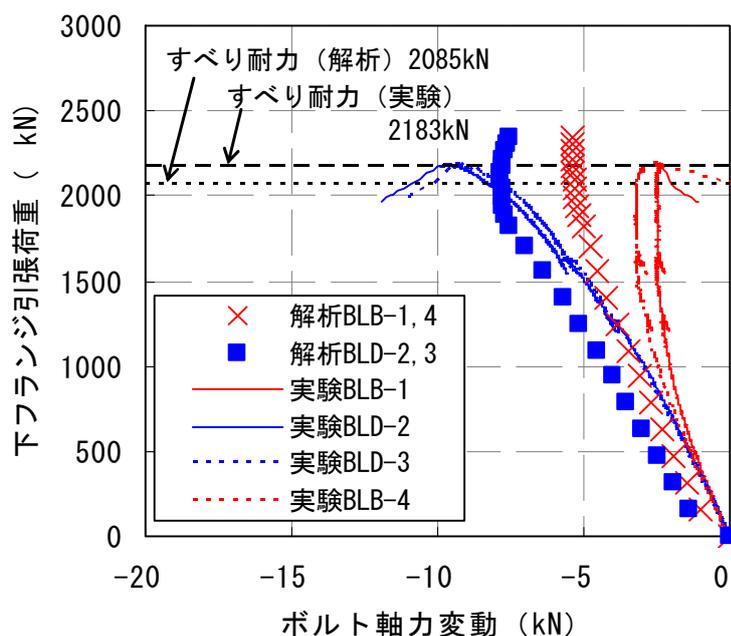


図-5.4.7 ボルト軸力変動

解析結果から得られた知見は以下のとおりである。

- 連結中心から 1 列目のボルト BLD2、3 は、同 2 列目のボルト BLB1、4 よりも軸力低下が大きい。連結部は等曲げ状態であることから、各ボルト位置における曲げモーメント、および曲率は同じである。それでも、連結中心からの距離が異なるボルトの軸力変動に

差が生じたのは、曲げ変形によりボルト位置ごとのフランジや連結板の板厚減少量に差が生じたことが原因の可能性として考えられる。

- ただし、連結中心から 2 列目のボルト BLB1、4 より、1 列目のボルト BLD2、3 の方が実験結果に対する解析結果の再現精度が低下している。これは、鋼板のヤング率やポアソン比といった機械的性質を公称値としたこと、ボルトの導入軸力は計測値の平均値を用いたが実際は各ボルト間でばらつきがあったこと、実験では等曲げにならずボルト位置によって異なる曲率が軸力変動に影響を与えたことが原因と考えられる。
- 実験結果において、どのボルト軸力の値もすべり耐力以降に値が乱れているが、これはすべり時の衝撃等の影響と考えられる。
- すべり直前までの実験結果における軸力変動の傾向を見ると、連結中心から 1 列目の BLD2、3 は、5.2 節の標準すべり試験、および 5.3 節の多列すべり試験と同様に、すべり耐力付近で軸力低下が大きくなっている。
- 一方、連結中心から 2 列目の BLB1、4 は、軸力低下が収まり、ある値に収束する傾向を見ることができる。
- これは、実験では桁曲げ試験のみで見られた傾向であることから、下フランジに引張力が軸方向に作用するだけでなく、桁曲げ試験によって再現される曲げ変形の影響が要因となった可能性があるかと推定される。
- FEM 解析では、BLB1、4 に関するこの傾向が再現できている。しかし、BLD2、3 では、軸力のみが作用するすべり試験と同様な傾向となったことの原因とともに、FEM 解析と傾向が一致していない原因が明らかでない。

(3) まとめ

桁曲げ試験の FEM による再現解析について、得られた知見は以下のとおりである。

- 桁曲げ試験に関する締結力モデルを用いた再現解析について、すべり耐力までの挙動に着目すると、すべり耐力は精度良く実験結果の再現ができた。実験結果も妥当と考えられる。
- 母板と連結板間の相対変位は、局所的なばらつきが実験では生じるものの、解析による再現は可能と考えられる。
- ボルト軸力の変動については、桁の曲げ変形に起因するボルトごとの違いを再現できた。

5.5 FEM解析結果のまとめ

本章では、FEM解析を行い、実験結果を力学メカニズムに着目して考察することで、各種実験の妥当性を検討した。

得られた知見は以下のとおりである。

- 4つのボルト軸力の導入方法をそれぞれ用いた標準すべり試験の再現解析を行った結果、全ての解析モデルにおいて最大5%程度の誤差ですべり耐力を再現することができた。ただし、座金と連結板間の接触面における応力分布、またはボルト軸力の変動も含めた継手挙動については、締結力モデルを用いることで標準すべり試験を再現することが可能であることがわかった。
- 締結力モデルを用いた再現解析を行った結果、多列すべり試験および桁曲げ試験においてもすべり耐力を精度良く再現できた。桁曲げ試験においては、桁の曲げ変形に起因すると考えられるボルトごとの軸力変動の違いも再現できた。
- ただし、多列すべり試験における母板と連結板間の相対変位、母板間の相対変位、ボルト軸力の変動は、解析結果と実験結果に乖離が見られた。ボルトごとの導入軸力、母板や連結板の初期変形、または鋼材の機械的性質の設定の精度を上げることで、継手挙動の再現精度が向上すると考えられる。
- 今後の課題として、多列化におけるボルトごとの局所的な軸力変動に関する精度の向上が挙げられる。これは、実橋でもボルトごとの局所的なばらつきが想定されることから、鋼材の機械的性質を公称値に、静摩擦係数を想定される下限値にするなどの設定により安全側に評価できる解析を行うことが対応として考えられる。
- すべり耐力以降の挙動の評価については、動摩擦係数の設定や、ボルトごとのすべり挙動から支圧状態へ移行する挙動の変化の再現等が課題として考えられる。

これらより、

- 解析によってすべり耐力は精度良く再現できること
- その解析には締結力モデルを用いるなどの条件があること
- 多列すべり試験におけるボルトごとの軸力変動など、実験結果と乖離がある項目もあり、全てを実験で再現するには引き続き検討しなければならない課題があることが、明らかとなった。

5 章参考文献

- 5.1) Dassault Systemes : Abaqus 6.11ja オンラインドキュメンテーション, 2011.
- 5.2) 山口隆司, 彭雪, 鈴木康夫, 宮尾修平: 極厚鋼板を対象とした多列高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 17 巻第 66 号, pp. 23-33, 2010. 6.
- 5.3) (独) 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, 共同研究報告書第 428 号, 2012. 1.
- 5.4) 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・地震工学), Vol. 69 No. 3, pp. 452-466, 2013. 9.
- 5.5) (公社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編, 2012. 3.
- 5.6) 亀井義典, 石川誠, 西村宣男, 桐生真司, 竹内修治: 超高強度ボルトの鋼桁橋への適用性に関する検討, 鋼構造論文集, 第 10 巻第 38 号, pp. 39-49, 2003. 6.
- 5.7) 山口隆司, 北田俊行, 池田敬之, 吉岡夏樹: 圧縮力を受ける F18T 級超高力ボルト摩擦接合継手の力学的挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1005-1013, 2009. 3.
- 5.8) (公社) 土木学会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 2006. 12.
- 5.9) 山口隆司, 森猛, 橋本国太郎: 高力ボルト摩擦接合継手のすべり強度/降伏強度比とすべり係数に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 1737-1748, 2005. 3.
- 5.10) 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.
- 5.11) (一社) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2012. 3
- 5.12) 山口隆司, 長崎英二, 潘超, 木村勇次: 1800N/mm² 級超高力ボルトに使用するねじ形状の開発および性能確認試験, 土木学会論文集 A1, Vol. 70 No. 3, pp. 409-417, 2014. 9.