

卒業論文

偏心荷重を受けるスタッドボルト締結体の

ゆるみの有限要素法解析

p.1～p.64 完

平成 24 年 2 月 3 日提出

指導教員 泉聡志 准教授

100243 白井宏尚

目次

第1章	序論	6
1.1	研究の背景	6
1.2	研究の目的	6
1.3	本論文の構成	6
第2章	偏心荷重を受けるボルト締結体について	7
2.1	緒言	7
2.2	用語説明	8
2.3	引き上げ落下試験	9
2.4	実験	10
2.4.1	実験条件	10
2.4.2	実験結果	11
2.5	解析	14
2.5.1	解析手法	14
2.5.2	解析結果（先行研究）	15
2.5.3	解析結果	16
2.5.3.1	振動範囲の違いにおけるゆるみについて	16
2.5.3.2	レボ板の平行移動について	18
2.5.3.3	両振り荷重におけるゆるみの原因	22
2.5.3.4	レボ板の移動による軸力減少の違い	27
2.5.3.5	解析と実験の違いについて	29
2.5.3.6	初期軸力の違いについて	31
2.6	結言	32
第3章	レボ板の平行移動によるボルト締結体の挙動について	33
3.1	緒言	33
3.2	境界条件	34
3.3	解析結果と考察	35
3.4	結言	41
第4章	モーメントと軸直角方向の外力を受けるボルト締結体の挙動について	42
4.1	緒言	42

4.2	全体解析.....	43
4.2.1	解析条件.....	43
4.2.2	解析結果.....	44
4.3	解析手法.....	45
4.4	解析結果.....	46
4.5	結言.....	48
第5章	結論と考察.....	49
	参考文献.....	61
	謝辞.....	62

目次

図 2.1	油圧ショベル各部名称 (株小松製作所提供)	8
図 2.2	引き上げ落下試験	9
図 2.3	実験装置	10
図 2.4	片振り荷重における軸力変化 (初期軸力 666MPa)	11
図 2.5	片振り荷重における軸力変化 (初期軸力 291MPa)	12
図 2.6	両振り荷重における軸力変化 (初期軸力 652MPa) (1000 回まで)	12
図 2.7	両振り荷重における軸力変化 (初期軸力 652MPa) (10000 回まで)	13
図 2.8	解析モデル	14
図 2.9	片振り・両振り軸力変化の比較	15
図 2.10	片振り・両振りボルトねじ先の回転角の比較	16
図 2.11	振動範囲の違いにおける軸力変化 (片振り荷重)	17
図 2.12	ボルト変形図 (振動範囲を大きくした片振り荷重)	18
図 2.13	片振り荷重と両振り荷重におけるレボ板の平行移動量	19
図 2.14	レボ板にかかる荷重とその方向 (下死点)	20
図 2.15	レボ板にかかる荷重とその方向 (上死点)	20
図 2.16	1 周期におけるレボ板の平行移動量	21
図 2.17	1 サイクルにおけるゆるみ回転角の比較	22
図 2.18	1 サイクルにおける回転ゆるみによるゆるみメカニズムについて	23
図 2.19	ボルト変形図	25
図 2.20	ボルト頭接触状態	25
図 2.21	両振り荷重における 1 サイクルのゆるみ回転角	26
図 2.22	1 サイクルにおける片振り荷重と両振り荷重のねじ先の回転角の比較	26
図 2.23	レボ板が平行移動しない条件における軸力変化	28
図 2.24	レボ板が平行移動する条件における軸力変化	28
図 2.25	ピン拘束モデル	29
図 2.26	拘束条件	30
図 2.27	ピン拘束をした場合の軸力変化	30
図 2.28	初期軸力の違いによる軸力変化の比較	31
図 3.1	偏心荷重を与える解析における荷重条件	34
図 3.2	変更後の荷重条件	35
図 3.3	レボ板を平行移動させた場合の軸力変化	35
図 3.4	レボ板を平行移動させた場合のねじ面の回転角	36

図 3.5	レボ板が 0.4mm 平行移動時のねじ面の接触状態.....	37
図 3.6	レボ板が 1.0mm 平行移動時のねじ面の接触状態.....	37
図 3.7	x の正方向側のボルトとナットのねじ山の詳細図.....	38
図 3.8	x の負方向側のボルトとナットのねじ山の詳細図.....	38
図 3.9	2.0mm 平行移動時のボルトの変形図.....	40
図 4.1	全体解析モデル.....	43
図 4.2	スイングサークル締結部モデル.....	44
図 4.3	全体解析ボルト変形図.....	45
図 4.4	荷重条件.....	46
図 4.5	ボルト変形図.....	46
図 4.6	モーメントをかけた場合の軸力変化.....	47
図 4.7	モーメントをかけた場合のねじ先の回転角.....	47
図 5.1	レボ板が 2mm 移動した時のボルトにかかる応力の分布図.....	50
図 5.2	初期軸力 650MPa における軸力変化とその近似曲線.....	51
図 5.3	初期軸力 650MPa における軸力変化.....	52
図 5.4	初期軸力 650MPa における軸力変化の予想 (1000 回まで)	52
図 5.5	初期軸力 650MPa における軸力変化の予想 (10000 回まで)	53
図 5.6	初期軸力 350MPa における軸力変化.....	53
図 5.7	初期軸力 350MPa における軸力変化の予想 (1000 回まで)	54
図 5.8	初期軸力 350MPa における軸力変化の予想 (10000 回まで)	54
図 5.9	初期軸力 180MPa における軸力変化.....	55
図 5.10	初期軸力 180MPa における軸力変化の予想 (1000 回まで)	55
図 5.11	初期軸力 180MPa における軸力変化の予想 (10000 回まで)	56
図 5.12	初期軸力 650MPa におけるステップ毎の軸力減少量.....	57
図 5.13	軸力減少についての実験値と解析の予想値の比較 (150 サイクルまで)	58
図 5.14	軸力減少についての実験値と解析の予想値の比較 (1000 サイクルまで) ..	58
図 5.15	両振り荷重におけるレボ板の平行移動量の外挿.....	59
図 5.16	レボ板を平行移動させた場合の軸力変化 (再掲)	60
表 2.1	用語説明.....	8
表 2.2	試験条件.....	11
表 2.3	実験結果.....	13
表 2.4	記号説明.....	21

第1章 序論

1.1 研究の背景

様々な機械には多くの結合部分が存在し、その結合方法には接着剤による接着や釘を打ち込むことによる結合など様々である。その中でも着脱が容易にでき、安価であるボルトによる締結方法は広く利用されている。

しかし着脱が可能であるという点から機械製品を利用しているうちにゆるみが生じてしまい、使用に悪影響を与える可能性がある。そこで機械製品の信頼性を確保するためにもボルト締結体のゆるみのメカニズムの解明は重要な課題である。

以上の背景から、以前からボルト締結体のゆるみに関する研究が数多く行われてきた。Junker [1] によってボルト締結体に軸直角方向の外力がかかる場合、ボルトとナットの間ですべりが生じ、最もゆるみが発生しやすいことが示され、実験装置に関しても Junker 式ねじゆるみ試験機や山本や賀勢ら [2] のゆるみ試験機などがあり、軸直角方向の外力によるゆるみに関する研究は頻繁に行われている。

第1章 しかし産業界において、一見軸直角方向の外力がかからないと考えられる場合においてもゆるみが生じるといった事例が報告されている。そこで軸直角方向以外の外力によるボルト締結体のゆるみのメカニズムの解明が求められている。

1.2 研究の目的

油圧ショベルにおけるボルト締結体についてゆるみが見られた。

そこで本研究の目的は、三次元有限要素法解析により油圧ショベルにおける1本のボルト締結体を模擬したボルト締結体に軸直角方向以外の外力をかけ、油圧ショベルの対象のボルト締結体のゆるみのメカニズムを解明することである。

1.3 本論文の構成

第1章では、研究の背景と目的を述べた。

第2章では、偏心荷重を受けるボルト締結体についての実験と解析の方法、結果を示し、それに対する考察を行った。

第3章では、レボ板の平行移動によるボルト締結体の挙動について述べた。

第4章では、モーメントと軸直角方向の外力を受けるボルト締結体の挙動について述べた。

第5章では、本研究のまとめを述べた。

第2章 偏心荷重を受けるボルト締結体について

2.1 緒言

(株)小松製作所によって行われた油圧ショベルの実稼働試験の結果，油圧ショベルの旋回部に締結されているボルトにゆるみが見られた．そして油圧ショベルの引き上げ落下試験によってボルトにかかる外力を測定した．

本章では，(株)小松製作所によって行われた油圧ショベルの引き上げ落下試験，そして油圧ショベルの旋回部の1本のボルト締結体を模擬したボルト締結体に偏心荷重をかける実験とそれを三次元有限要素法 CAE ANSYS によって準静的に行った解析について述べる．

以下に本章の構成を記す．

- ・ 緒言
- ・ 用語説明
- ・ 引き上げ落下試験
- ・ 実験
- ・ 解析
- ・ 結言

2.2 用語説明

油圧ショベルについての用語説明を以下に記す。

油圧ショベルは旋回部に取り付けられているスイングサークルによって旋回することができる。スイングサークルにはアウターサークルとインナーサークルがあり、アウターサークルと車体下面にあるレボフレームの下板（以下、レボ板と呼ぶ）がアウターボルトによって締結されている。

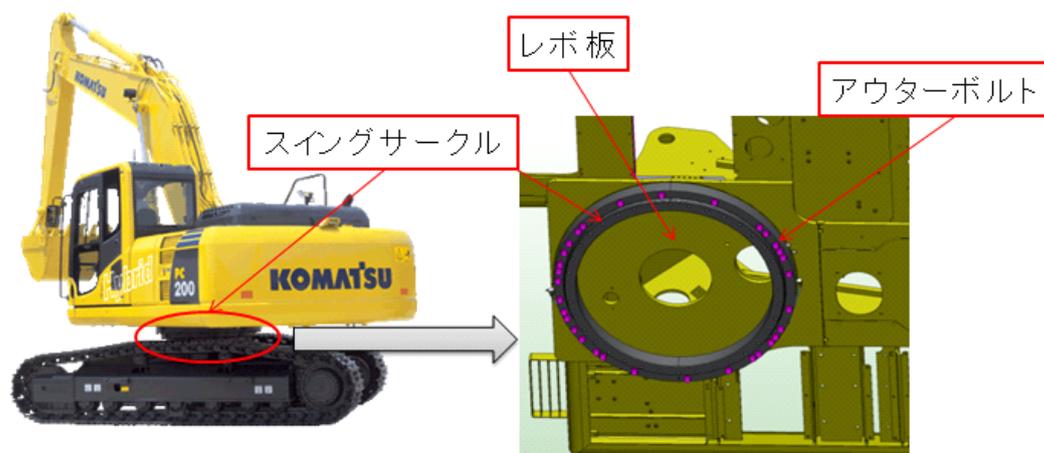


図 2.1 油圧ショベル各部名称（株小松製作所提供）

その他、本論文で使用する用語について以下に示す。

表 2.1 用語説明

軸力	ボルトの軸方向総荷重 [kN]。ボルトの締結力を表す。つまりゆるみの指標として使用される。本論文では軸方向応力を表す軸応力のことを特別に軸力と呼ぶこととする。単位として[MPa]を使用している。
アウターボルト	アウターサークルとレボ板を締結しているボルト。32本締結されている。アウターサークルに均等に締結されているわけではなく、外力がかかりやすい場所に多く締結されている。

2.3 引き上げ落下試験

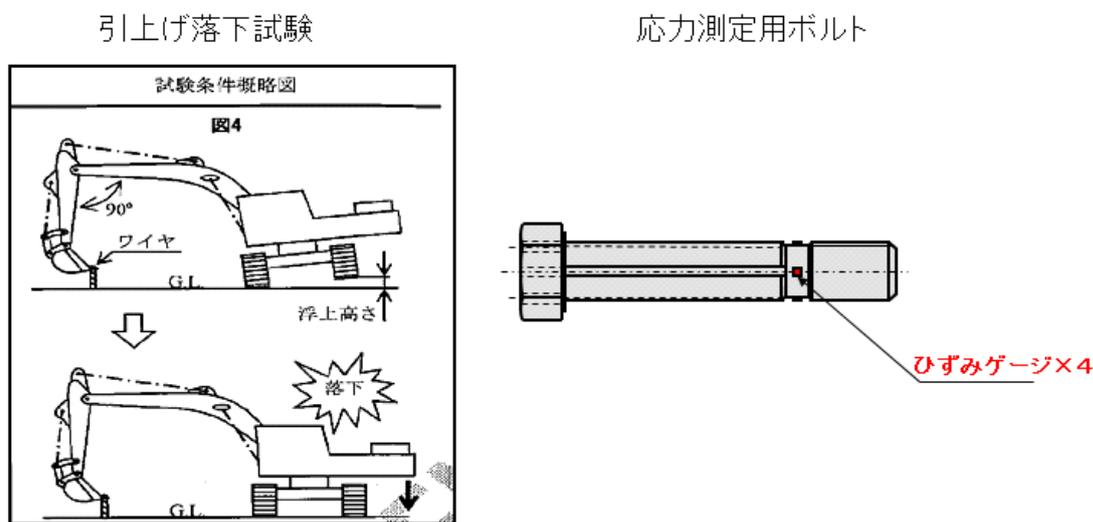


図 2.2 引き上げ落下試験
(株小松製作所提供)

株小松製作所によって行われた実機の引き上げ落下試験について説明する。

油圧ショベルを一定時間走行させた後、ボルトのゆるみを測定する実稼動試験においてゆるみが見られた。

実際に油圧ショベルを使用していてアウターボルトにかかる荷重として大きなもの一つが、油圧ショベルの履帯が落下する際の衝撃力が挙げられる。

そこで車体を履帯に対し直角にした上で、ワイヤで引き上げて落下させることで、アウターボルトに対して、荷重をかける。アウターボルトには、図 2.2 の右にあるようなボルトに 4 枚のひずみゲージを張った測定用ボルトを取り付け、アウターボルトにかかる荷重を測定した。

その結果、32 本あるうちの一部のボルトの軸力が低下し、ボルトには偏心外力がかかることが分かった。

2.4 実験

2.4.1 実験条件

引き上げ落下試験の結果から、アウターボルトには主に偏心外力がかかることが示された。

そこでアウターボルト、スイングサークル、レボ板による締結体を模擬したボルト締結体に偏心外力を加え、ボルト締結体の挙動を調べる実験を、(株)小松製作所に行なっていた。

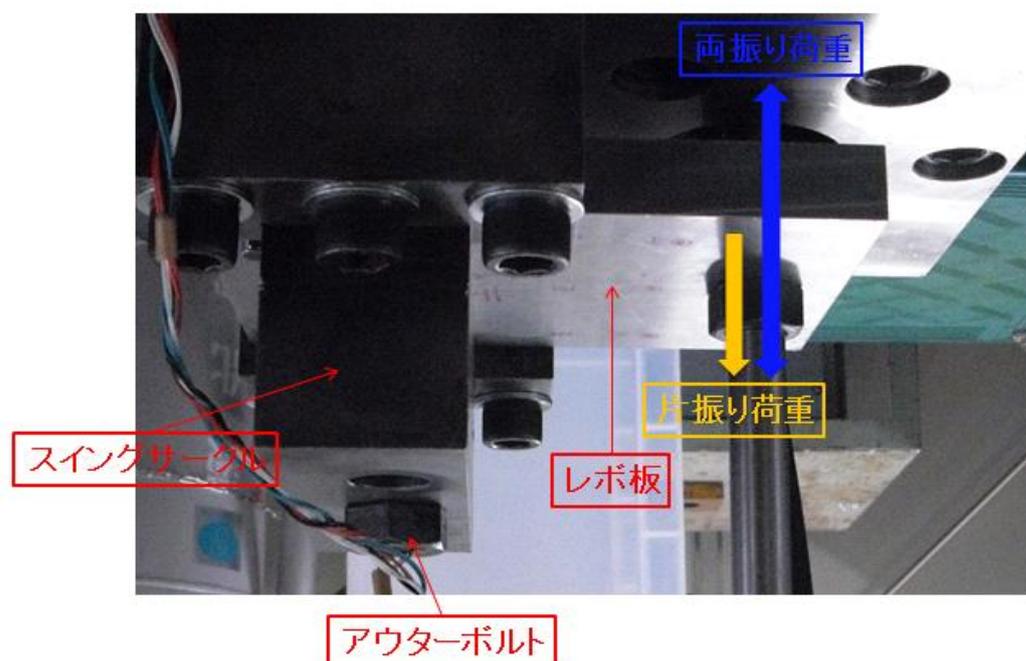


図 2.3 実験装置

スイングサークルには 32 本のアウターボルトが締結されているが、そのうちの一部分である 1 本のアウターボルトでスイングサークルとレボ板を締結した状態を模擬した。

アウターボルトに偏心外力がかかるようにレボ板に対して垂直方向に荷重をかけた。

荷重のかけ方としては、下方方向に 40kN の力をかけ、その後力を抜くことを繰り返す片振り荷重、そして下方方向に 40kN の力をかけた後、力を抜き、その後上方方向に 40kN の力をかけ、力を抜くといった上下に交互に力をつける両振り荷重の二通りのかけ方で実験を行った。

以下に実験条件を示す.

表 2.2 試験条件

※(株)小松製作所提供データより

試験条件	荷重条件		片振り	片振り	両振り	
	初期軸力		666MPa	291MPa	650MPa	
	負荷条件	負荷応力 (軸力+曲げ応力)	221MPa (47MPa+174MPa)	144MPa (51MPa+93MPa)	引上げ	208MPa (24MPa+184MPa)
					押込み	198MPa (37MPa+161MPa)
	周波数		1Hz	1Hz	1Hz	
	表面状態	ねじ面	KP-9塗布	KP-9塗布	KP-9塗布	
		締結面	KP-9塗布	KP-9塗布	KP-9塗布	

2.4.2 実験結果

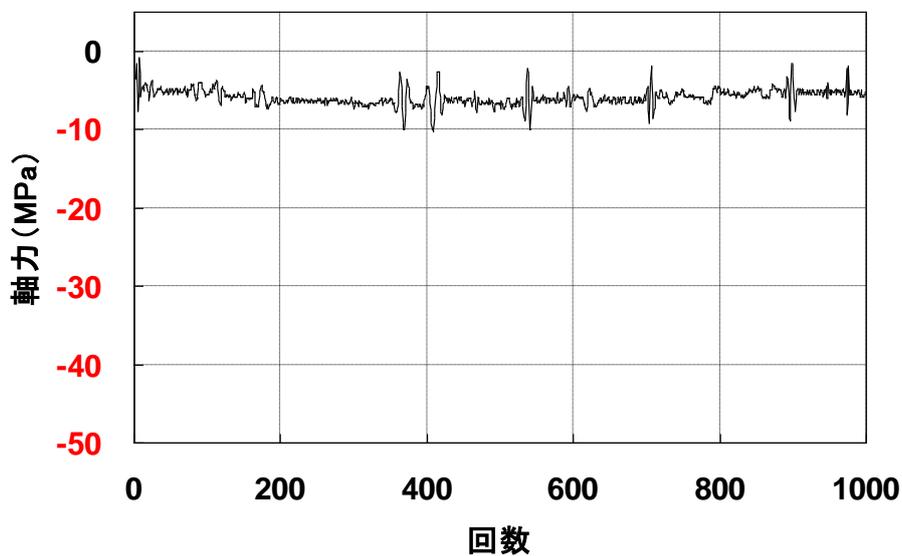


図 2.4 片振り荷重における軸力変化 (初期軸力 666MPa)

※(株)小松製作所提供データより

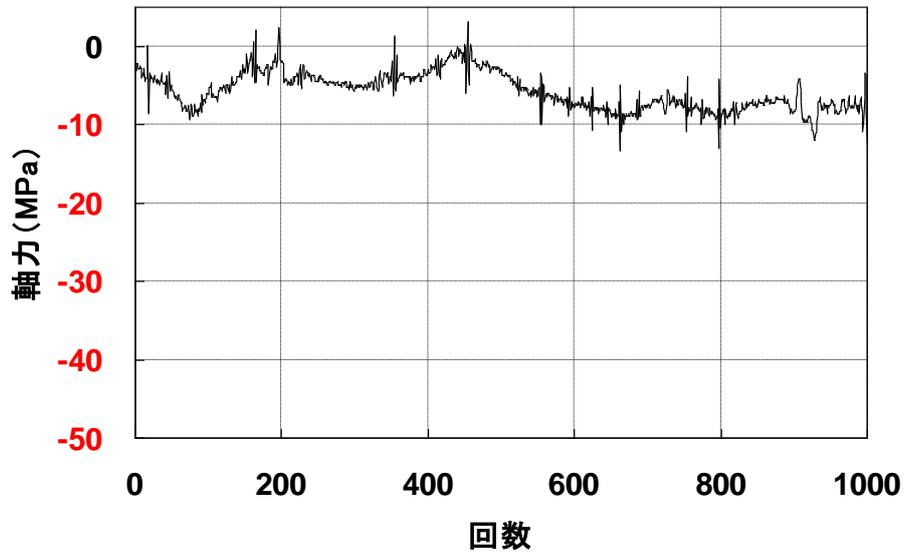


図 2.5 片振り荷重における軸力変化 (初期軸力 291MPa)
 ※(株)小松製作所提供データより

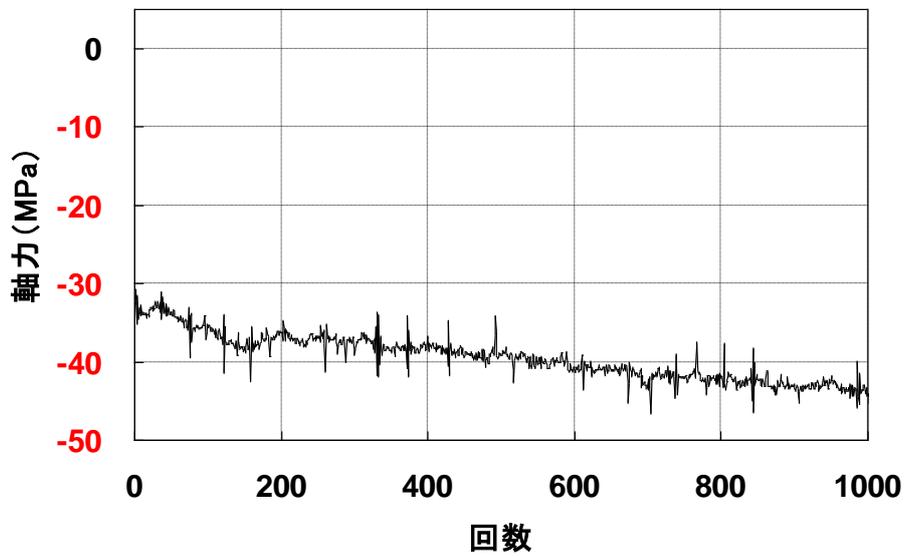


図 2.6 両振り荷重における軸力変化 (初期軸力 652MPa) (1000 回まで)
 ※(株)小松製作所提供データより

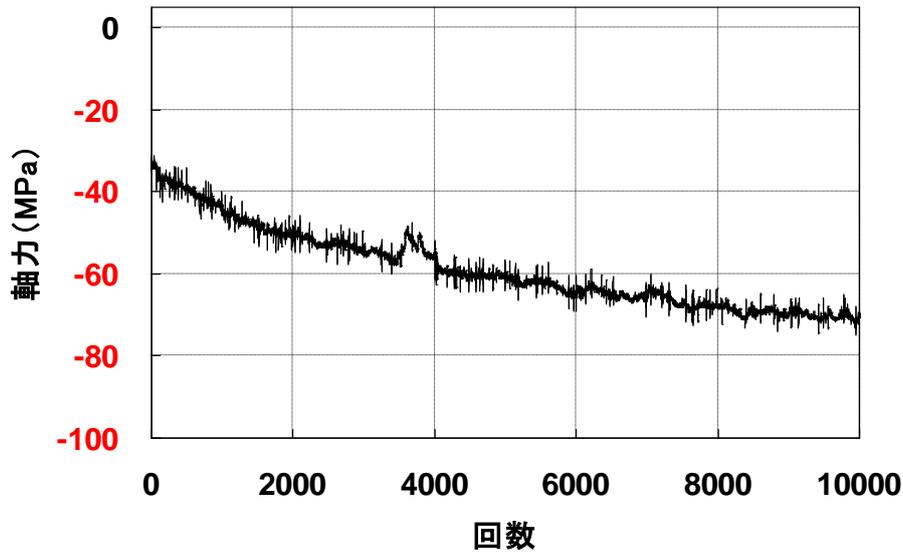


図 2.7 両振り荷重における軸力変化（初期軸力 652MPa）（10000 回まで）

※(株)小松製作所提供データより

試験条件	荷重条件	片振り荷重	両振り荷重
	初期軸力 (MPa)		666
軸力低下(MPa)	繰返し1000回	-6	-45

表 2.3 実験結果

片振り荷重を加えた場合では、初期ゆるみで軸力が少々減少するものの、その後一定となり目立った軸力減少は見られない。初期軸力を半分以下にまで減らした場合でも、同様に初期ゆるみで軸力が減少した後、一定になり、ゆるみの進行は見られない。

しかし荷重条件を両振り荷重に変更すると、軸力減少が見られた。初期ゆるみで一定になることはなく、10000 回荷重を繰返し与えた時点でもゆるみは進行している。

2.5 解析

2.5.1 解析手法

解析には，三次元有限要素法ソフト ANSYS 11.0 を使用した．

ボルト締結体に偏心荷重を加える実験を，ANSYS により準静的解析を行った．

以下にボルト締結体に偏心荷重を加える実験を模擬した有限要素法モデルを示す．

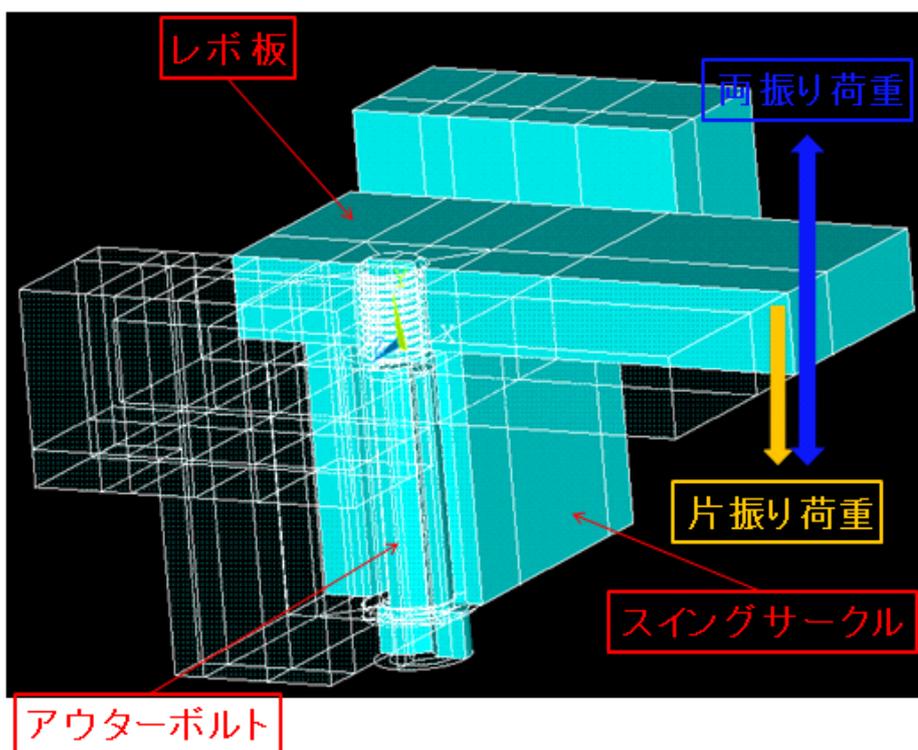


図 2.8 解析モデル

対象となるボルトサイズは，M22 のボルト・ナットで，グリッップ長さは 76.5mm で用いた．おねじとめねじのねじ山数は，それぞれ 10 ピッチ，8 ピッチである．

要素タイプは三次元ソリッド要素を用いた．

接触についてはペナルティー法を用い，以下の 4 箇所 contacts を定義をした．

- i. ボルトねじ面－ナットねじ面
- ii. ワッシャー上面－スイングサークル下面
- iii. ワッシャー下面－ボルト頭上面
- iv. スイングサークル上面－レボ板下面

そして制度を向上するため対称接触を用いた。

初期軸力については、以下の2ヶ所を初期干渉させることで発生させた。

- i. ワッシャー上面－スイングサークル下面
- ii. ワッシャー下面－ボルト頭上面

材料特性としてはすべてにおいてヤング率 205GPa, ポアソン比 0.3, 摩擦係数は 0.15 とした。

以下では、レボ板の長手方向（ボルト締結位置から荷重点方向）を x 方向，ボルト軸方向（ボルト頭からボルトねじ面方向）を y 方向，レボ板の妻手方向（ボルト締結位置から図手前方向）を z 方向と定義する。

拘束条件としては、スイングサークルを全自由度拘束，そして実験装置ではレボ板の回転を止めるためピンで止められており，ピンの結合位置において z 方向拘束を定義した。

2.5.2 解析結果（先行研究）

神谷によって行われた解析結果を以下に示す

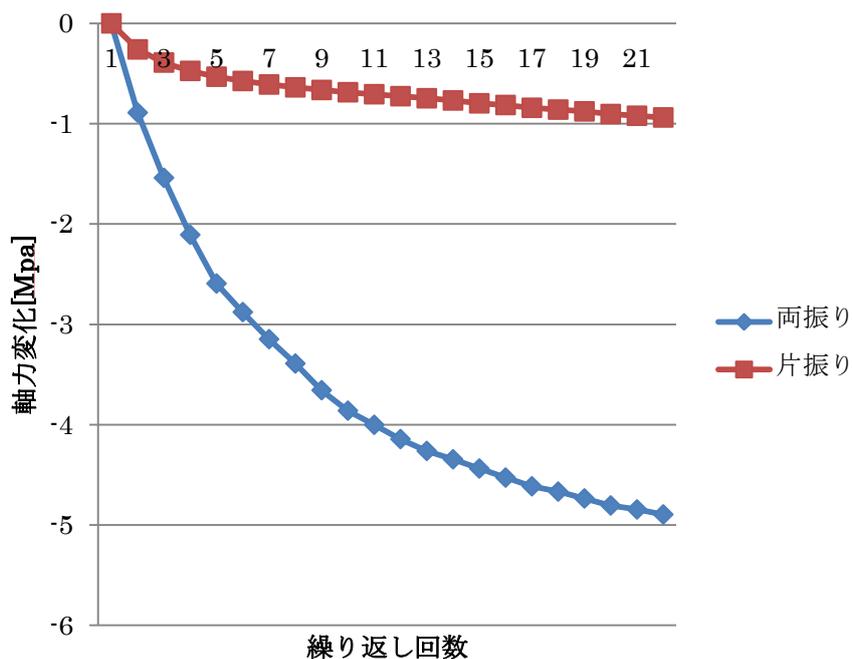


図 2.9 片振り・両振り軸力変化の比較

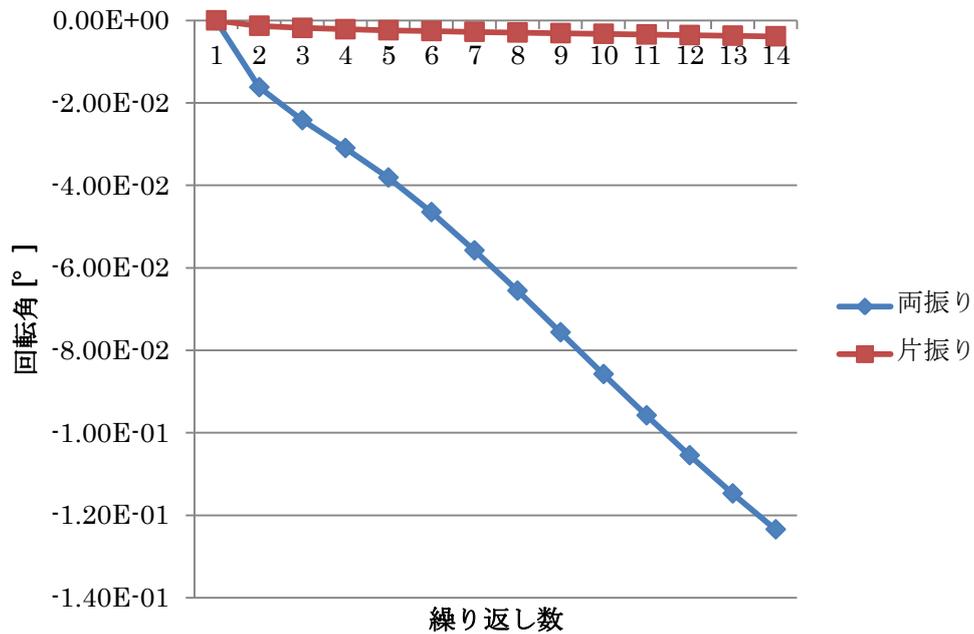


図 2.10 片振り・両振りボルトねじ先の回転角の比較

片振り荷重，両振り荷重ともに，初期軸力は 650MPa に設定した。

片振り荷重と両振り荷重における軸力減少，そしてゆるみ回転角を比較すると，片振り荷重の場合に比べて，両振り荷重において軸力の減少，そしてゆるみ回転角の進行が見られる。

2.5.3 解析結果

2.5.3.1 振動範囲の違いにおけるゆるみについて

神谷による先行研究の解析結果から片振り荷重に比べて，両振り荷重の方がボルト締結体のゆるみが進行しやすいことが分かった。

片振り荷重と両振り荷重において振動範囲の違いがゆるみの進行の様子の違いに起因している可能性があるため，両振り荷重における振動範囲で片振り荷重をかけた解析を行った。

以下に解析結果を示す.

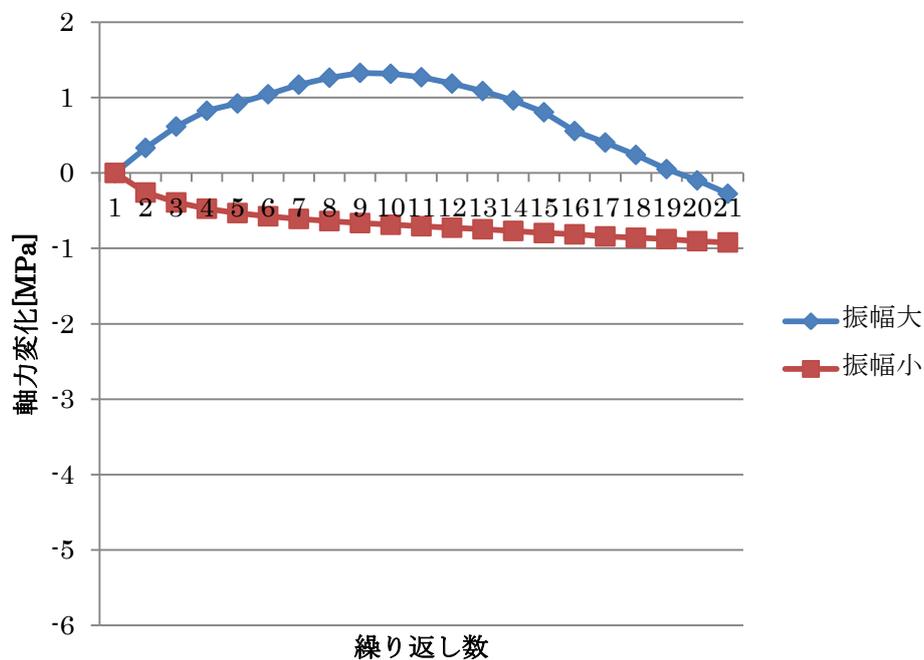


図 2.11 振動範囲の違いにおける軸力変化 (片振り荷重)

片振り荷重において振動範囲を両振り荷重と同じにした場合でも目立った軸力の低下は見られなかった.

軸力が下がるのではなく、むしろ軸力が上がっている。これは振動範囲を大きくした結果、図 2.12 のような曲げ変形を受け、ボルトが伸び、軸力が上昇したと考えられる。

つまり、片振り荷重に比べ両振り荷重においてゆるみの進行が見られたのは、片振り荷重と両振り荷重の振動範囲の違いが原因ではないと考えられる。

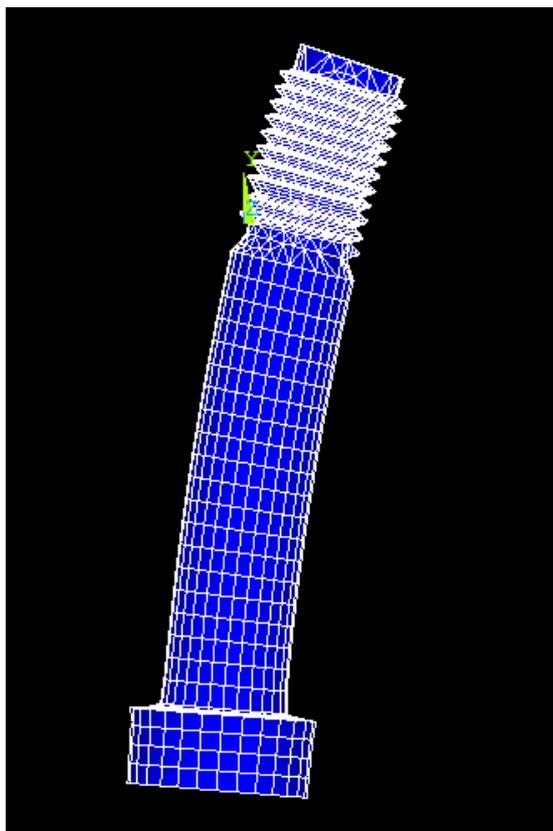


図 2.12 ボルト変形図（振動範囲を大きくした片振り荷重）
※倍率 20 倍

2.5.3.2 レボ板の平行移動について

片振り荷重と両振り荷重についての主な違いの一つとして、レボ板の平行移動量が挙げられる。

以下に片振り荷重と両振り荷重におけるレボ板の平行移動量の比較を示す。

ちなみにレボ板の平行移動量とは、レボ板のボルトのねじ面付近とスイングサークルとの相対変位をとった。

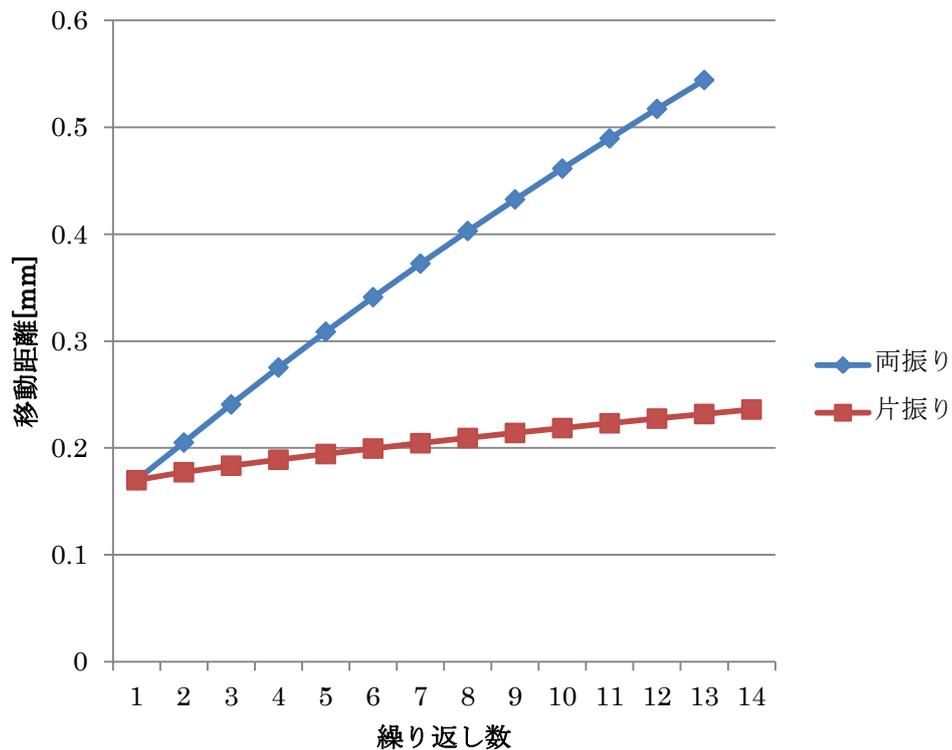


図 2.13 片振り荷重と両振り荷重におけるレボ板の平行移動量

レボ板の平行移動量は片振り荷重に比べ、両振り荷重の方が大きくなった。

以下に示すのは、片振り荷重と両振り荷重における接触を定義した部分の接触状態である。赤色で示されている部分は、完全に固着しており、すべりが生じていない部分。橙色で示された部分は、接触はしているが、すべりが生じている部分。黄色で示された部分は、接触していない部分をそれぞれ示している。

片振り荷重の場合、レボ板とスイングサークル間の接触において、ボルトの右側が常に接触しているので、レボ板は平行移動を起こしにくい。

それに対して両振り荷重の場合、同様にレボ板とスイングサークル間の接触において、レボ板が上下に移動するのに合わせて、固着域がボルトの左右に移動する。一周期のうちにレボ板とスイングサークル間の接触において常に固着している部分がないので、徐々にレボ板が平行移動をしていき、レボ板とスイングサークルの相対変位が生じると考えられる。

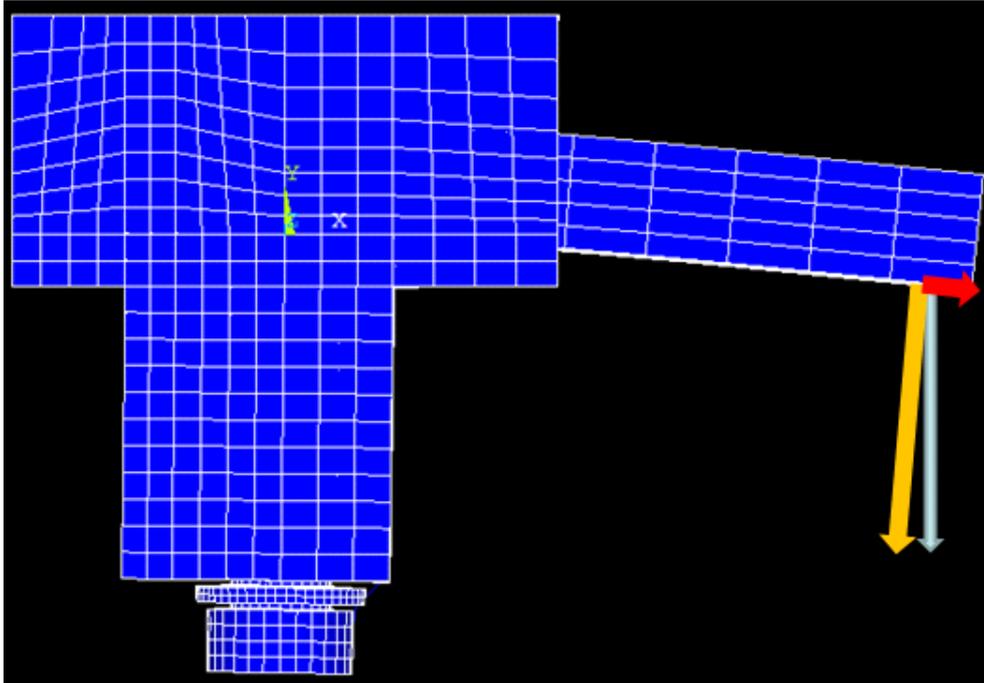


図 2.14 レボ板にかかる荷重とその方向（下死点）

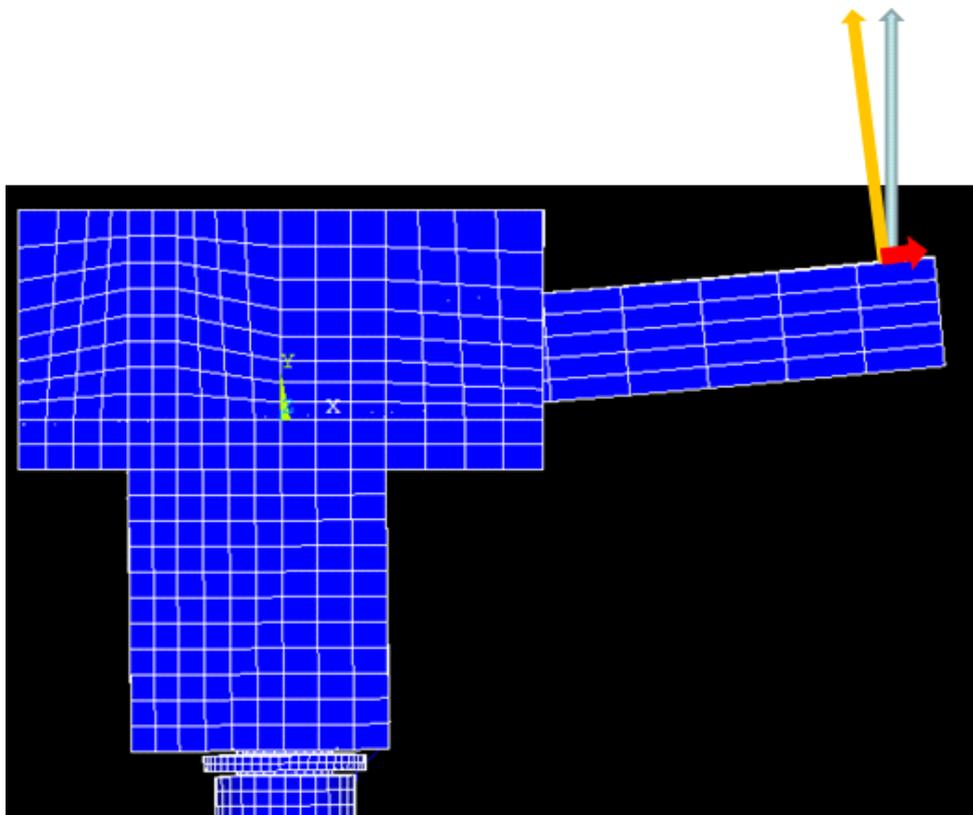


図 2.15 レボ板にかかる荷重とその方向（上死点）

表 2.4 記号説明

	荷重
	レボ板を回転させる力
	レボ板を平行移動させる力

解析においてはレボ板の垂直上下方向に荷重をかけている。レボ板が水平状態ならば、荷重は全てレボ板を回転させる力になるのだが、レボ板が傾いている状態で垂直上下方向に荷重をかけた場合、レボ板の水平方向の分力が生じ、常にレボ板を右方向に移動させようとする。この力がレボ板を平行移動させると考えられる。

以下に両振り荷重1周期におけるボルト付近のレボ板の平行移動量を示す。

レボ板は上下に荷重をかけられ、傾くことでx方向成分の値は上下するが、1周期荷重をかけ終わり、レボ板が水平に戻った時点でも荷重をかける前に比べ、若干平行移動していることが分かる。荷重が繰り返しかかることで徐々にレボ板が平行移動していくと考えられる。

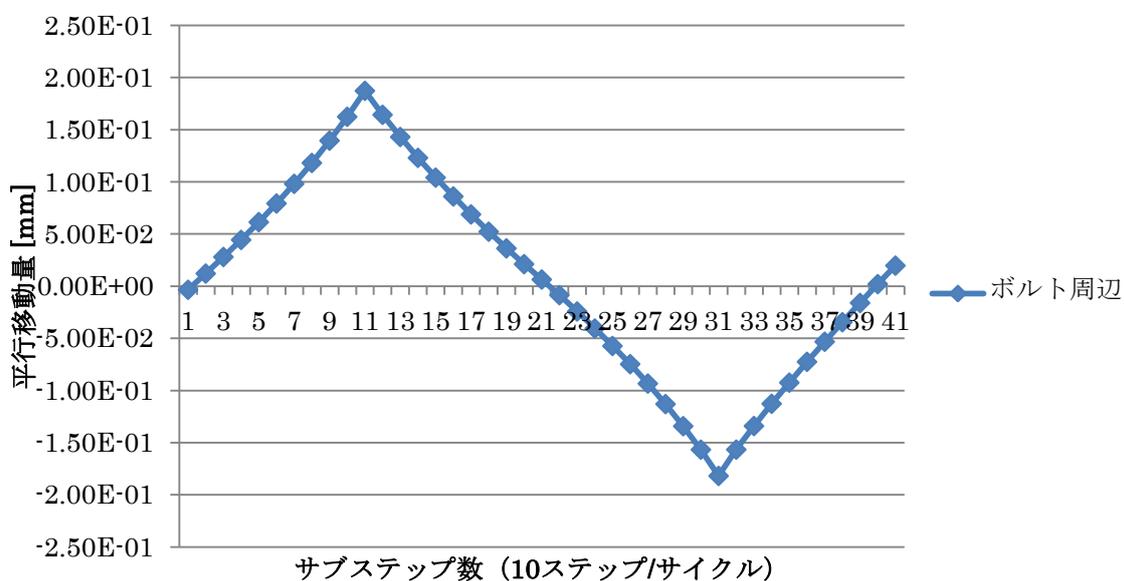


図 2.16 1周期におけるレボ板の平行移動量

2.5.3.3 両振り荷重におけるゆるみの原因

最初に回転ゆるみによるボルト締結体のゆるみの進行のメカニズムを説明する。

以下に初期軸力を低下させたボルト締結体に片振り荷重をかけた際の、ゆるみメカニズムについて示す。

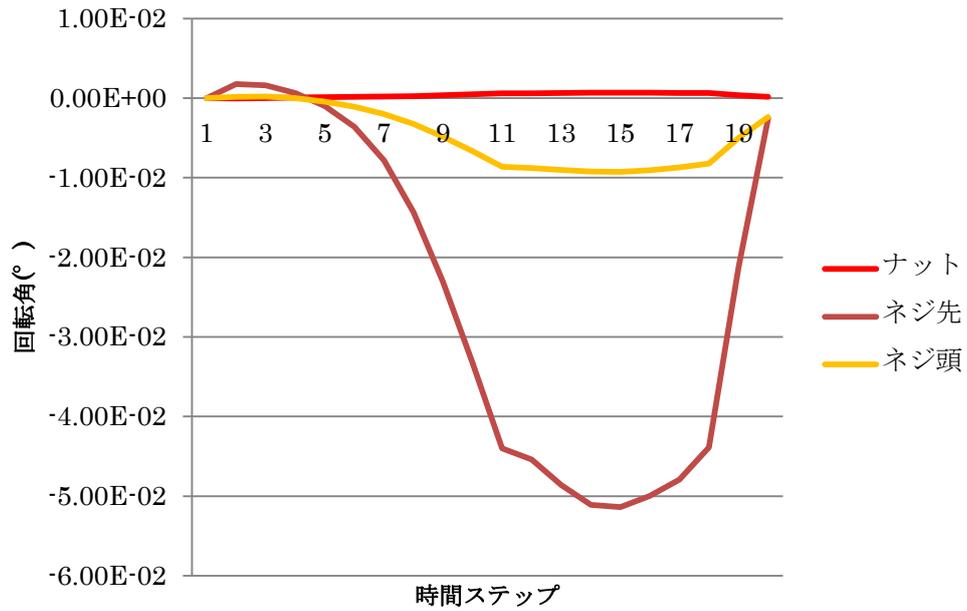


図 2.17 1 サイクルにおけるゆるみ回転角の比較

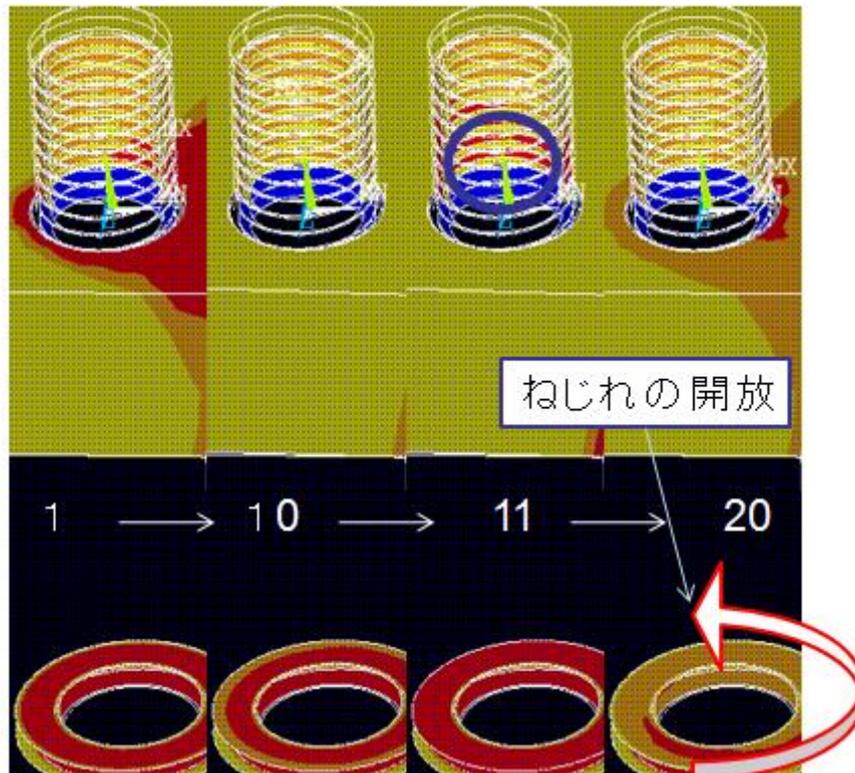


図 2.18 1 サイクルにおける回転ゆるみによるゆるみメカニズムについて

神谷による先行研究より，片振り荷重においてはゆるみが生じなかったが，片振り荷重においても初期軸力を大きく下げることによりゆるみが進行することが示された。

図 2.17 はその時の 1 サイクルにおけるボルトのねじ先，ボルト頭，ナットの回転角を比較したグラフである。

図 2.18 はそれぞれのステップにおけるねじ面とボルト頭の接触状態を表している．赤色の部分は，固着していてすべりを生じていない部分．橙色の部分は，接触はしているが，すべりを生じている部分．黄色の部分は接触していない部分．青色の部分は他の接触面との距離が遠い部分をそれぞれ表している．

各ステップの説明を以下に示す．

- i. ステップ 1：下方向への荷重のかけ始め
- ii. ステップ 10：下方向への荷重のかけ終わり
- iii. ステップ 11：荷重の抜き始め
- iv. ステップ 20：荷重の抜き終わり

図 2.17 より，ナットは回転をしていないのに対し，ねじ先とボルト頭は回転を生じている．ねじ面から荷重を受けることで，まずはねじ先が回転していき，その後ねじ先の回転につられるようにボルト頭が回転していくことが分かる．そして 1 サイクル終了後にねじ

先，ボルト頭の回転角はナットの回転角と差が生じる．この回転角の差の分だけ，1 サイクルにおいてボルト締結体はゆるみが進行する．

図 2.18 より，荷重のかけ始めからかけ終わりにかけてねじ面ですべりを生じているのが分かる．しかしボルト頭の接触面では常に固着してしまっている．したがってねじ面はゆるみ回転を起こすが，ボルト頭は回転しないので，ボルトには軸方向のねじりが蓄えられていき，トルクが大きく働いている．そして荷重を抜いていくとねじ面からはゆるみ回転が戻るような力を受け，ねじ先は戻っていくが，その途中でボルト頭の接触面がすべりを生じ，蓄えられていたねじりが解放され，ボルト全体がゆるむ方向に回転してしまう．この回転が 1 サイクルにおけるゆるみ回転で，これが繰り返し行われることで，ゆるみが進行していくと考えられる．

締め付け軸力が小さい場合には，接触面がすべりを生じやすいため，簡単にはこのような回転ゆるみは生じない．実際先ほどの例は初期軸力を 75MPa まで下げた場合で，片振り荷重の場合初期軸力が 650MPa の場合，このようなゆるみ回転はほとんど見られない．しかし両振り荷重の場合，初期軸力が 650MPa の場合でもゆるみが進行していく．その原因を以下に示す．

両振り荷重においてレボ板が平行移動することが分かった．レボ板が平行移動することにボルトのねじ面がすべり，ねじ先においてゆるみ回転を生じる．しかしボルト頭の接触面は固着しているため，すべりは生じないのでゆるみ回転は起こらない．したがってボルトにはねじれが蓄積されていく．ボルト頭の接触面ですべりが生じなければボルト頭は回転しないため，ボルト全体がゆるみ回転を起こすことはない．

しかし，レボ板が平行移動することにより，ボルトは図 2.19 のように変形する．ボルトが図 2.19 のように変形することによりボルト頭が傾き，図 2.20 のように固着域が減少，局所化してしまい，微小座面すべりを起こし，徐々にゆるみ回転が進行していくと考えられる．

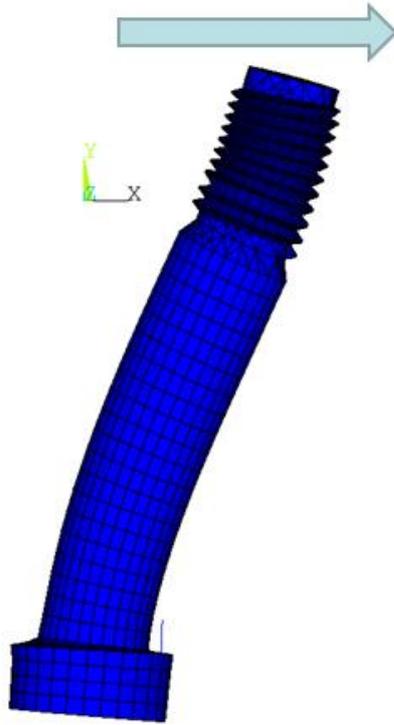


図 2.19 ボルト変形図
※倍率 30 倍

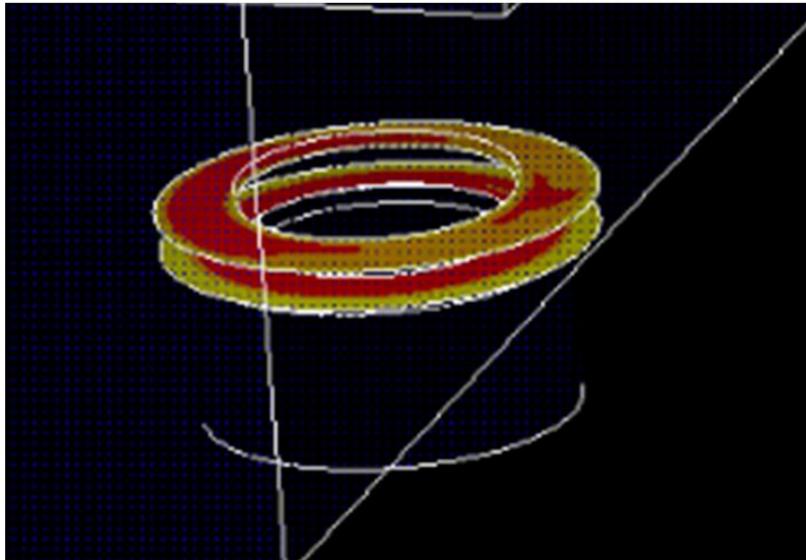


図 2.20 ボルト頭接触状態

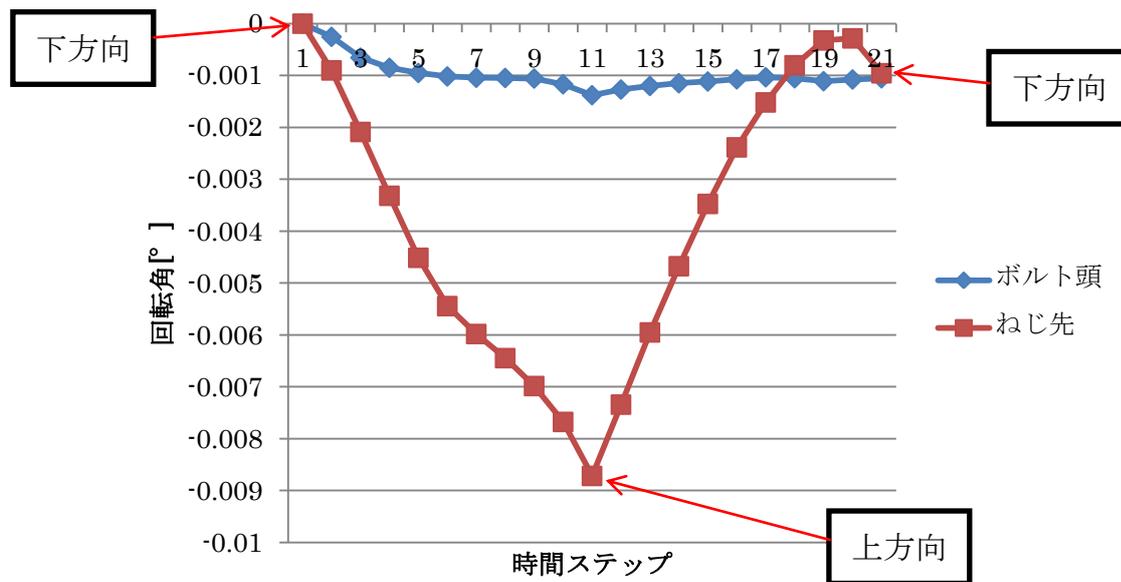


図 2.21 両振り荷重における 1 サイクルのゆるみ回転角

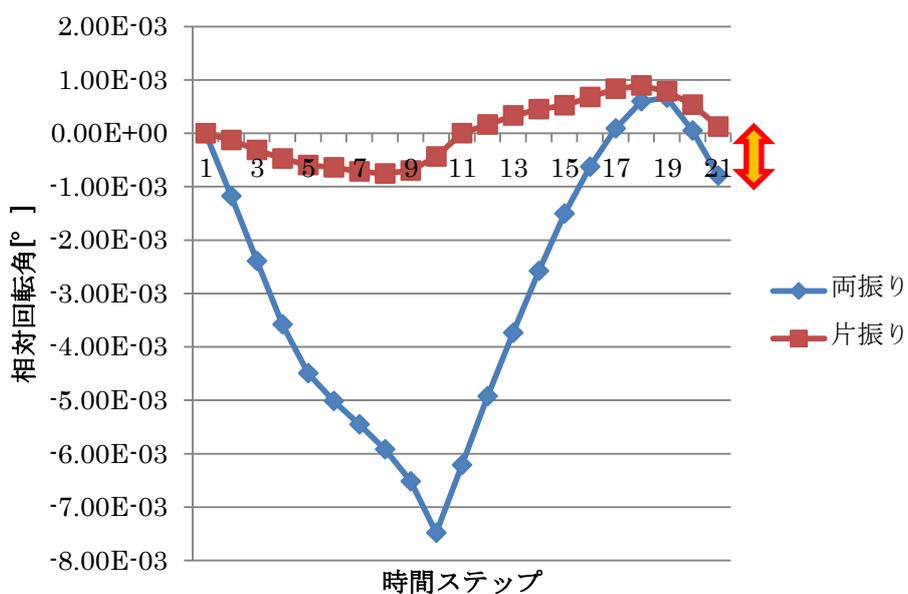


図 2.22 1 サイクルにおける片振り荷重と両振り荷重のねじ先の回転角の比較

図 2.21 は両振り荷重における 1 サイクルのゆるみ回転角を表しており，図 2.22 は 1 サイクルにおける片振り荷重と両振り荷重の比較を表している。

両振り荷重における各ステップの説明を以下に示す。

- i. ステップ 1：下方向荷重抜き始め
- ii. ステップ 5：下方向荷重抜き終わり
- iii. ステップ 6：上方向かけ始め
- iv. ステップ 10：上方向荷重かけ終わり
- v. ステップ 11：上方向荷重抜き始め
- vi. ステップ 15：上方向荷重抜き終わり
- vii. ステップ 16：下方向荷重かけ始め
- viii. ステップ 20：下方向荷重かけ終わり

図 2.22 より，片振り荷重においては同じステップ（ステップ 1 とステップ 21）を比べると，回転角の進行は見られないのに対し，両振り荷重において同様に同じステップを比較すると，図に示す矢印（）の分だけ，1 サイクルにおいてゆるみ回転が進行していることが分かる。

2.5.3.4 レボ板の移動による軸力減少の違い

レボ板の平行移動がゆるみの進行に影響を与える可能性がある。そこでレボ板を拘束し，平行移動を止めた状態で解析を行い，ボルト締結体の挙動を調べた。

拘束条件として，ピンによる固定位置においてこれまではレボ板の回転を止めるために z 方向固定をかけていたが，この解析においては x 方向固定も併せて施した。

以下にレボ板の平行移動しない条件，そして平行移動する条件における片振り荷重と両振り荷重のおいての軸力変化をそれぞれ示す。

レボ板が平行移動しない条件においては，片振り荷重だけでなく，両振り荷重においても目立った軸力減少は見られなかった。

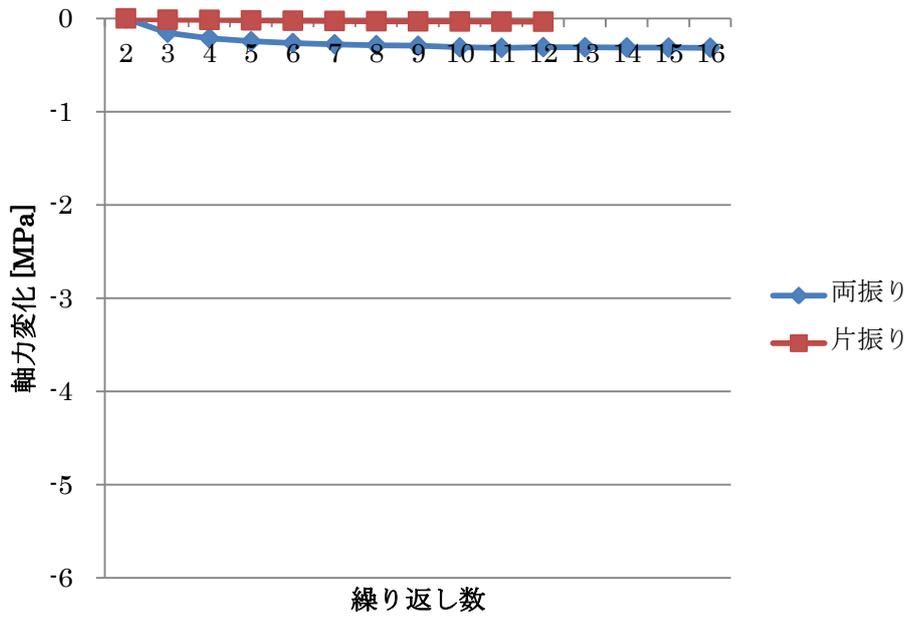


図 2.23 レボ板が平行移動しない条件における軸力変化

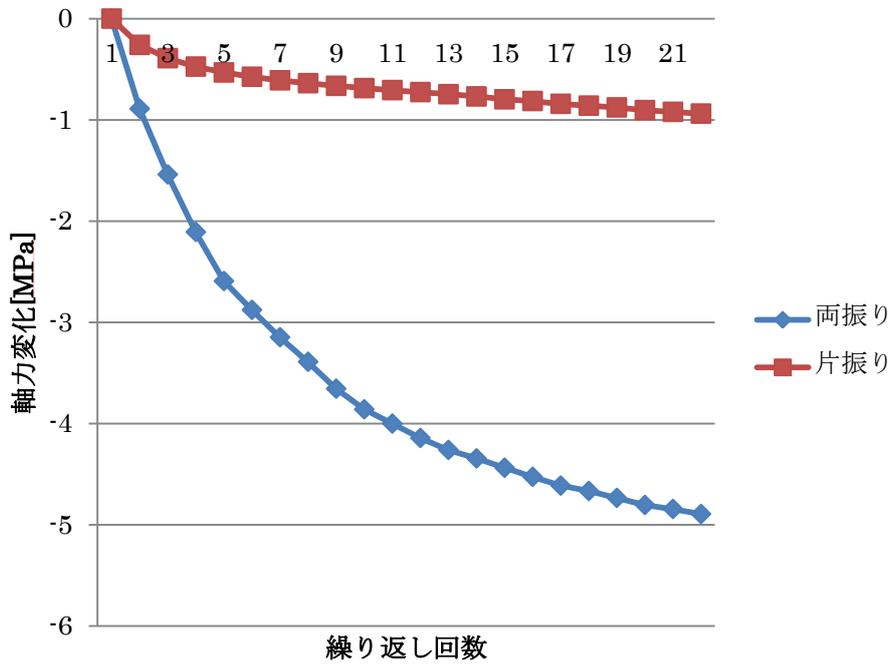


図 2.24 レボ板が平行移動する条件における軸力変化

2.5.3.5 解析と実験の違いについて

解析ではレボ板の回転方向である z 方向には拘束をかけているが、 x 方向には拘束をかけていないため平行移動は拘束していない。

しかし実験ではレボ板の回転を止める目的で、ピンによってレボ板を拘束しているため、レボ板の回転だけではなく、同時にレボ板の平行移動についても拘束している。レボ板の平行移動を止めるような拘束をかけていない解析との違いを以下で記す。

ピンによってレボ板を拘束することでボルト締結体の緩み挙動を調べるために三次元有限要素法を用いて、ピンによる拘束を含めて実験装置をモデリングし、レボ板に両振り荷重を加えた時のボルト締結体の挙動を調べた。

以下に示す接触の定義以外の境界条件は今までの解析条件と変更はない。

- i. ピン側面－ピン穴側面間
- ii. ピン側面－レボ板側面間

以下にピンによる拘束も含めた実験装置のモデルを示す。

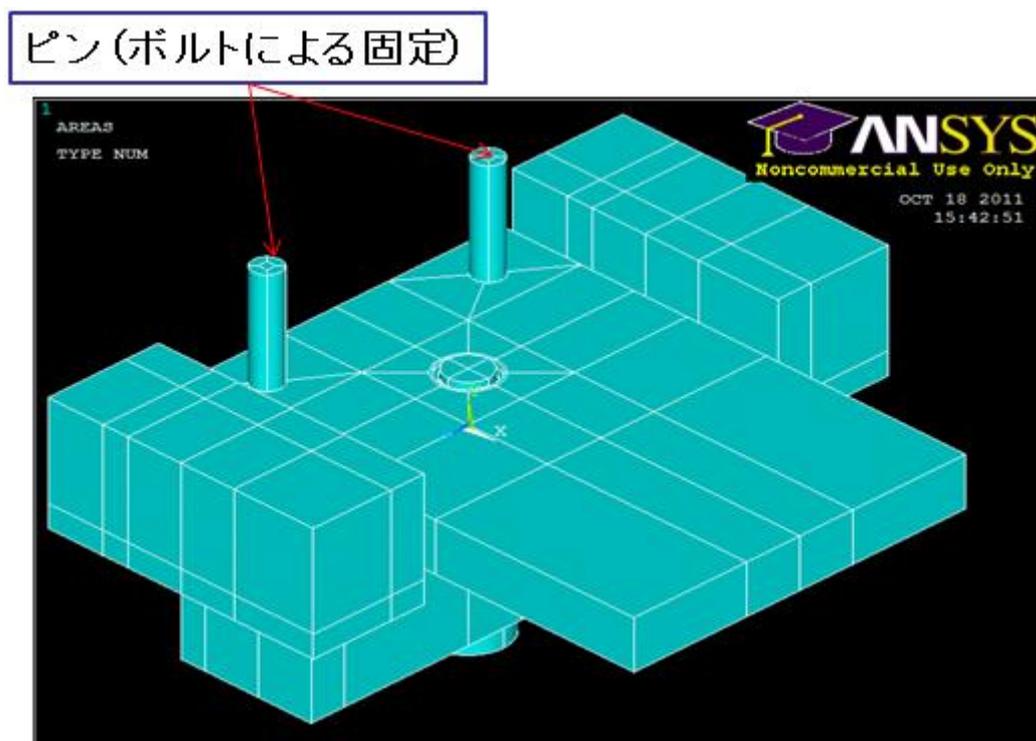


図 2.25 ピン拘束モデル

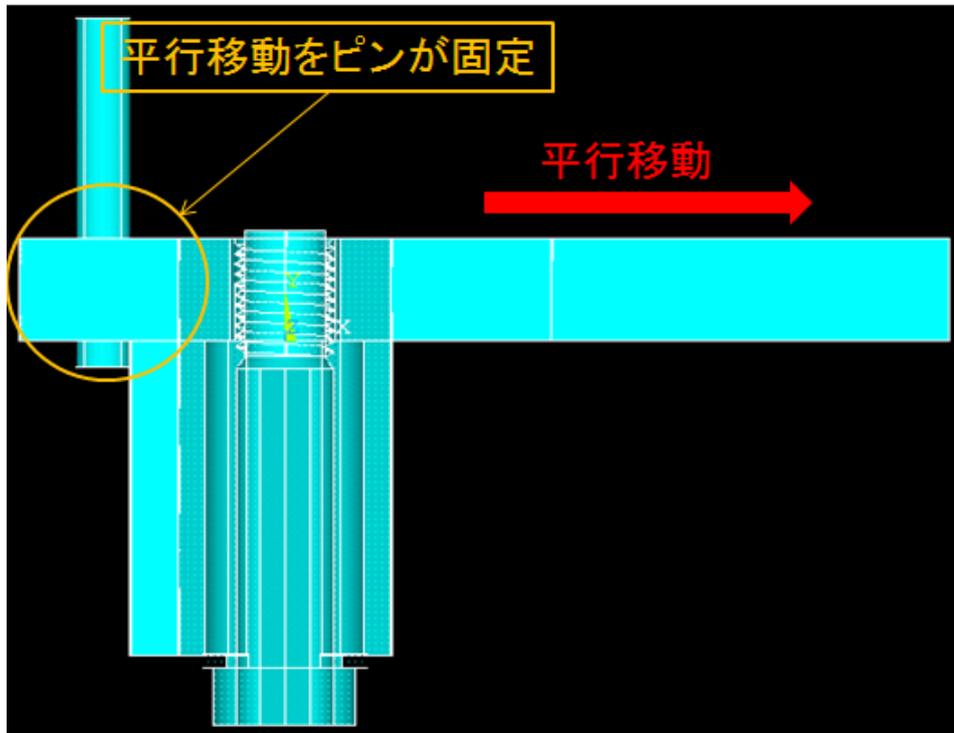


図 2.26 拘束条件

以下に解析結果を示す。

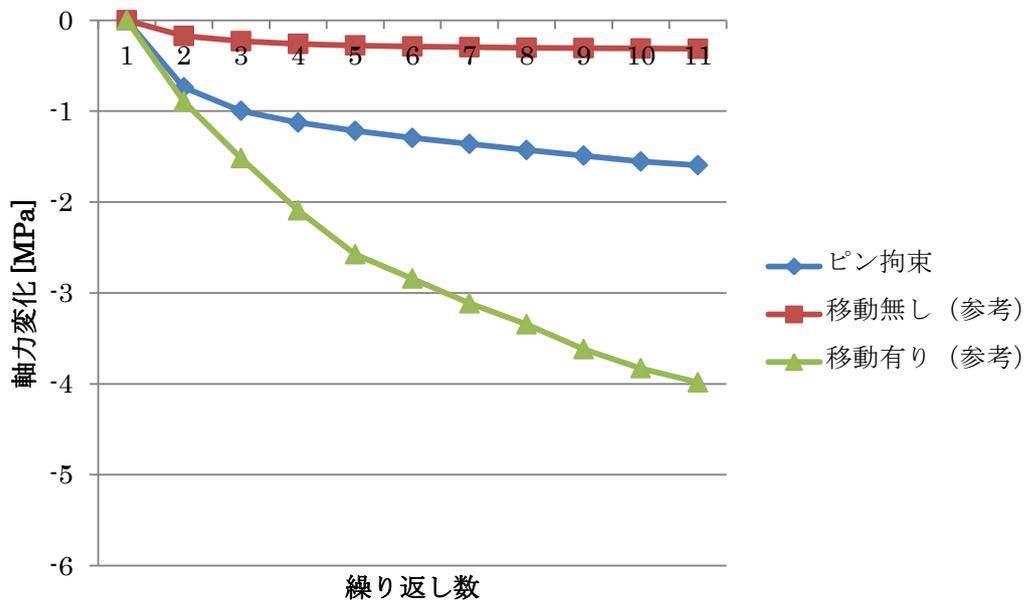


図 2.27 ピン拘束をした場合の軸力変化

図 2.27 より、実験装置と同じようにピンでレボ板を拘束した場合の軸力の減少量は、レボ板の平行移動を止めた場合とレボ板を拘束していない場合の減少量の間にとる。

これは、ピン径が直径 12mm であるのに対し、ピン穴の直径が 12.2mm であるので、中心に固定した場合、レボ板は最低で 0.1mm 移動可能であると考えられるので、実験における軸力の減少量は、レボ板の平行移動を止めた場合の軸力の減少量よりも大きく、そしてレボ板の平行移動を拘束しない場合の解析において、レボ板の移動量は 0.1mm よりも大きいので、実験における軸力の減少量は、レボ板の平行移動を拘束しない場合の軸力の減少量よりも小さくなったと考えられる。

2.5.3.6 初期軸力の違いについて

これまでの解析においてはボルトの初期軸力は 650MPa で統一していた。

ここでは初期軸力の違いにより、ゆるみ挙動にどのような差が生じるのかを調べた。

初期軸力を約半分である 350MPa、そして約 4 分の 1 である 180MPa に設定し、解析を行った。初期軸力以外の解析条件について変更はない。

以下に解析結果を示す。

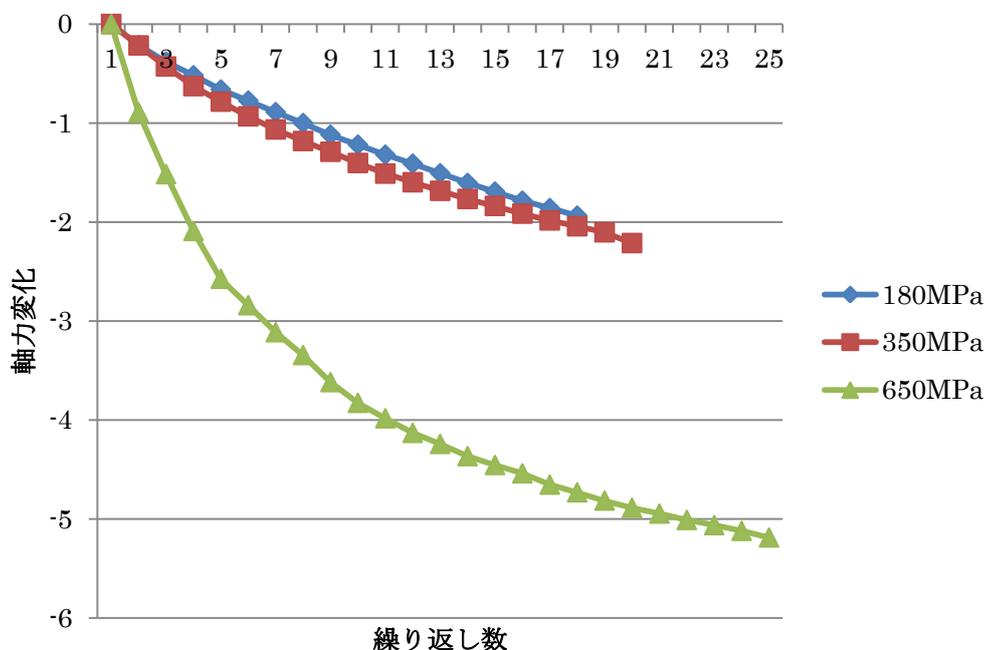


図 2.28 初期軸力の違いによる軸力変化の比較

図 2.28 より、軸力の減少量は初期軸力が 650MPa のときが最も大きく、初期軸力が 180MPa,350MPa のときがほぼ等しかった。初期軸力が 650 MPa のときが他の場合に比べ、軸力の減少量が大きいということは、初期軸力の値が大きいことで軸力の減少量の絶対値も大きくなってしまふからだと考えられる。そして初期軸力が 350MPa と 180MPa の場合において軸力の減少量がほぼ等しかったことについては、締結力が小さい方がねじ面や座面のボルトの接触面での摩擦力が下がり、すべりが起きやすくなることで、ゆるみ回転が生じ、軸力が低下しやすくなるといった影響と、前述の初期軸力の値が大きいことによる軸力の減少量が大きくなってしまふ影響が重なったことが原因ではないかと考えられる。

2.6 結言

本章では、(株)小松製作所によって行われた油圧ショベル全体における引き上げ落下試験、偏心荷重を受けるボルト締結体の実験の紹介、そしてその実験を、三次元有限要素法を用いてシミュレーションによって模擬し、実験との比較、ゆるみの原因の考察を行った。

以下に本章の結論を示す。

- ・ (株)小松製作所によって行われた偏心荷重を受けるボルト締結体の実験においては、レボ板に片振り荷重をかける場合は、目立った軸力の減少は見られなかったが、両振り荷重の場合、軸力の減少、そしてゆるみ回転角の進行が見られた。
- ・ シミュレーションにおいても、片振り荷重に比べ、両振り荷重においてゆるみの進行が見られ、実験と解析で定性的な一致を得た。
- ・ 片振り荷重に比べ、両振り荷重においてゆるみが見られるのは、振動範囲が原因ではなく、レボ板の平行移動の違いが原因である可能性が高い。
- ・ 片振り荷重に比べ、両振り荷重の方がレボ板の平行移動量は大きい。
- ・ レボ板の平行移動がボルト締結体のゆるみに大きな影響を与えたと考えられる。
- ・ 実験における軸力の減少量は、解析におけるレボ板の平行移動を止めた場合の軸力の減少量よりも大きく、レボ板を拘束していない場合の軸力の減少量よりも小さい。

第3章 レボ板の平行移動によるボルト締結体の挙動について

3.1 緒言

三次元有限要素法による偏心荷重を受けるボルト締結体の解析によって，レボ板の平行移動がゆるみに影響を与えることが分かった．

そこで同じボルト締結体に対し，レボ板に上下の荷重をかけるのではなく，レボ板を平行移動させることでスイングサークルとの相対変位を生じさせ，ボルト締結体の挙動を調べた．

レボ板の平行移動とボルト締結体のゆるみの相関を調べることが本章の目的である．以下に本章の構成を示す．

- 緒言
- 境界条件
- 解析結果と考察
- 結言

3.2 境界条件

レボ板に，上下に荷重するのではなく，変位制御によってレボ板を，偏心荷重を与えていた荷重点とスイングサークルの相対変位が 0mm から 8mm になるまで平行移動させるように荷重を与えた．（図 3.1 から図 3.2 に示すように変更した）

材料特性や拘束条件に関しては，偏心荷重を与える解析と同じである．

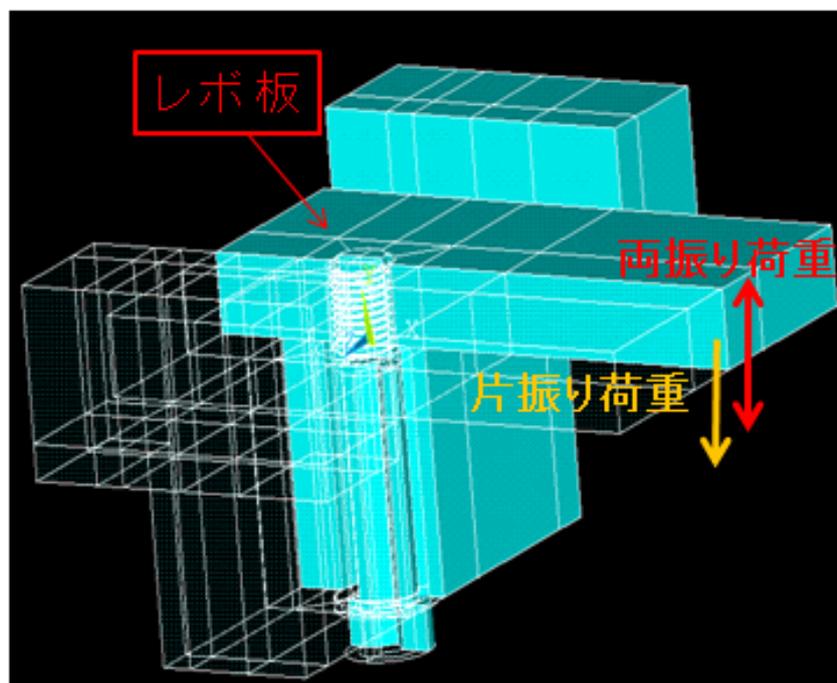


図 3.1 偏心荷重を与える解析における荷重条件

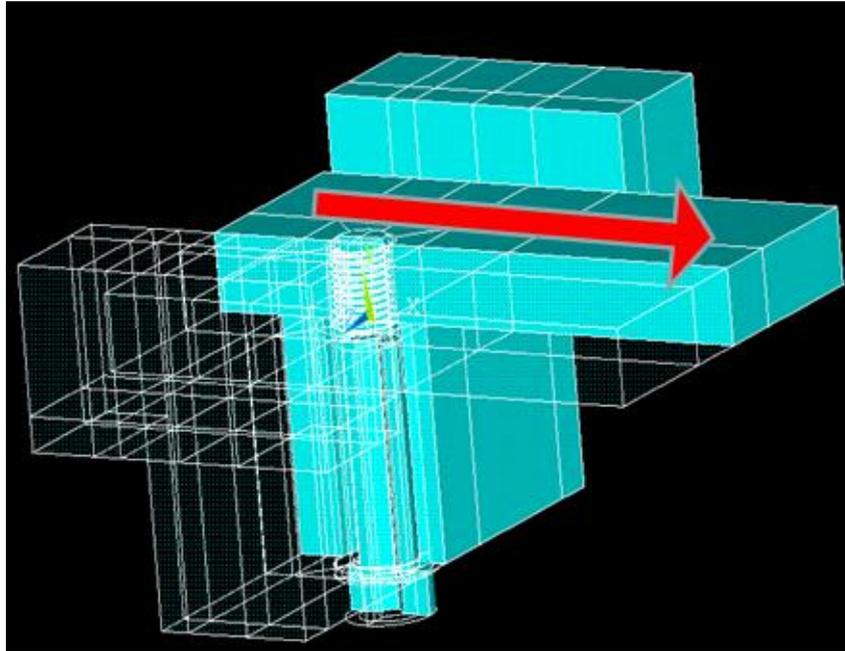


図 3.2 変更後の荷重条件

3.3 解析結果と考察

以下に解析結果を示す。

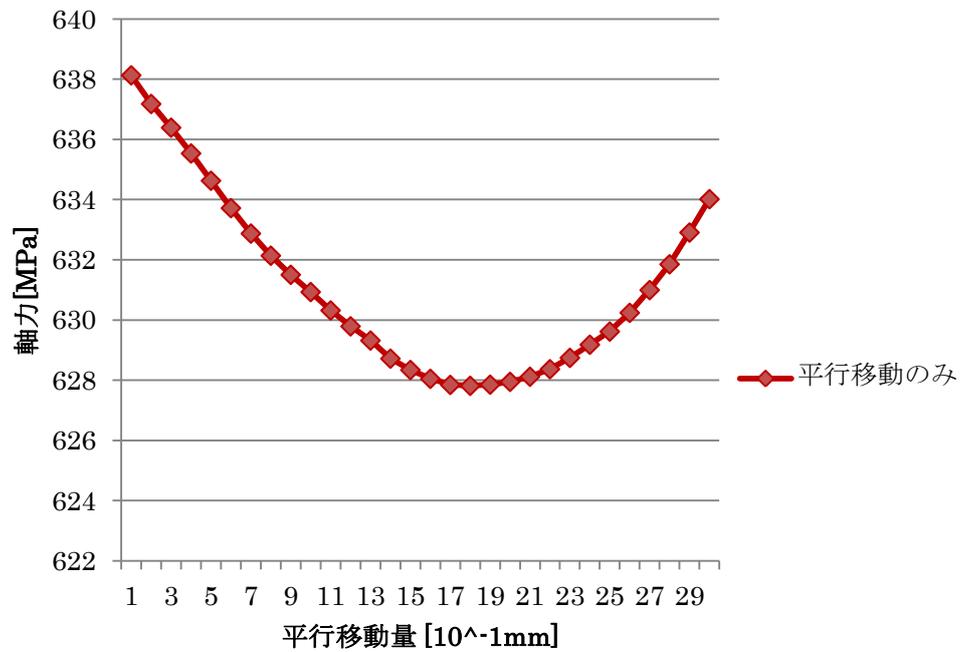


図 3.3 レボ板を平行移動させた場合の軸力変化

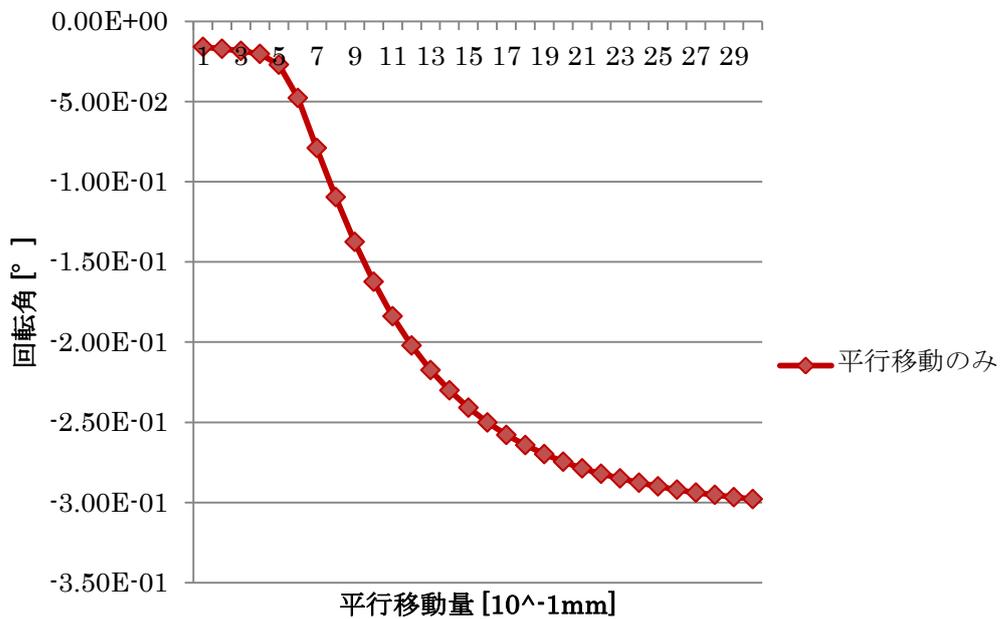


図 3.4 レボ板を平行移動させた場合のねじ面の回転角

図 3.3 レボ板を平行移動させることにより軸力は線形的に減少していく。しかしそれ以上レボ板を移動させていくと減少量は緩やかになっていき、徐々に軸力は上昇していく。

次にねじ面におけるボルトの回転角についてだが、図 3.4 よりレボ板の平行移動量が小さいときには、ボルトのねじ面はほとんど回転していないことが分かる。しかし、より回転させていくとある移動量から急激にねじ面が回転していき、その後ねじ面の回転が収束していく。

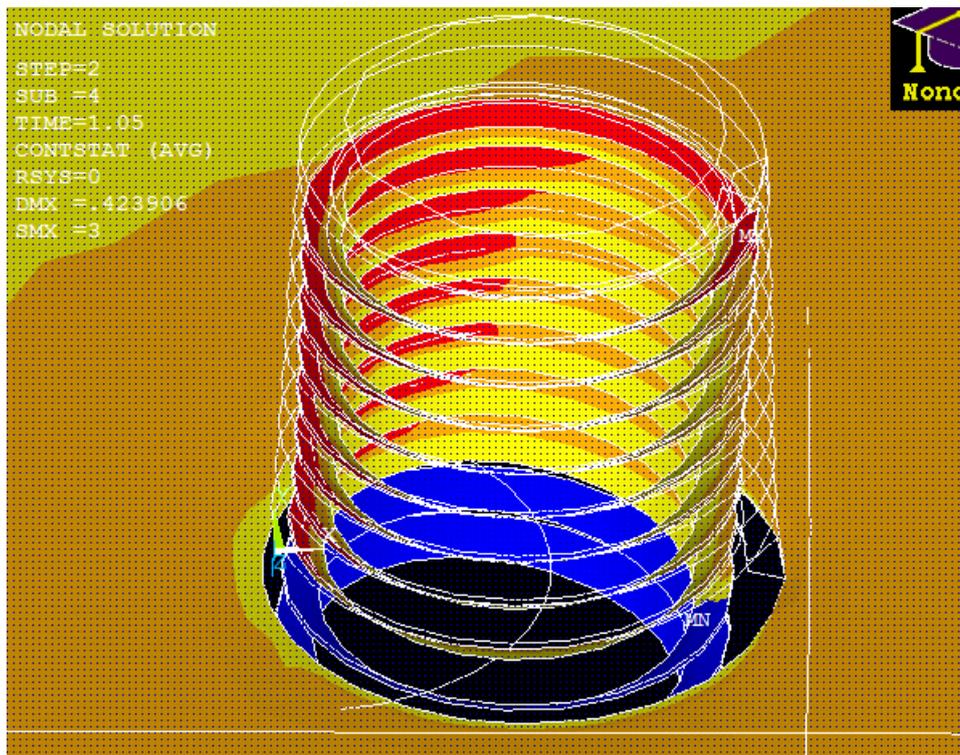


図 3.5 レボ板が 0.4mm 平行移動時のねじ面の接触状態

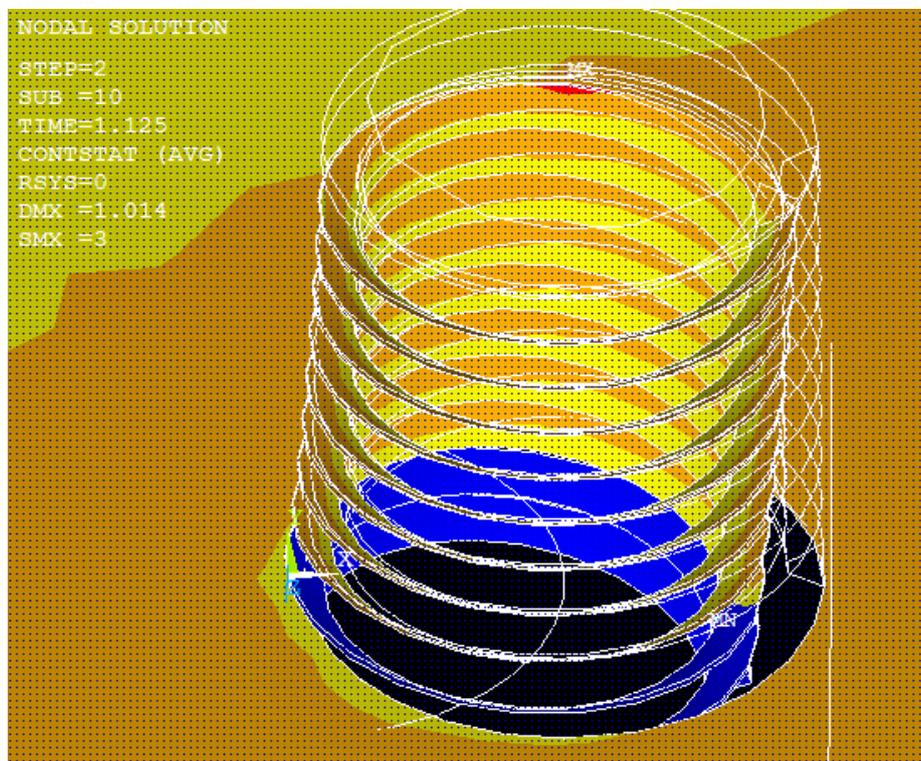


図 3.6 レボ板が 1.0mm 平行移動時のねじ面の接触状態

図 3.5 と図 3.6 はそれぞれレボ板が 0.4mm 平行移動した時と 1.0mm 平行移動した時におけるねじ面の接触状態を表している。赤色の部分がボルトのねじ面とナットのねじ面が接触，固着していて，お互いにすべりが生じていない部分。そして橙色の部分はボルトのねじ面とナットのねじ面が接触しているが，すべりが生じている部分。そして黄色の部分はボルのねじ面とナットのねじ面が接触していない部分をそれぞれ表している。

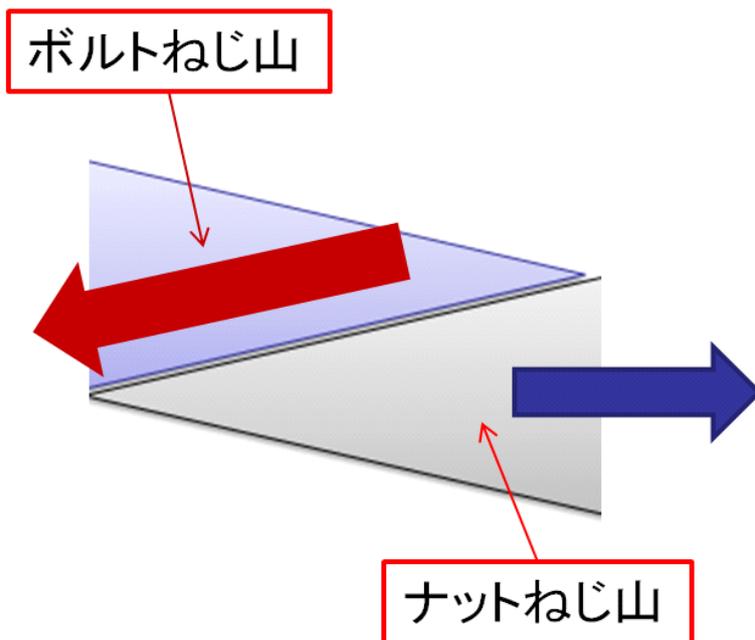


図 3.7 x の正方向側のボルトとナットのねじ山の詳細図

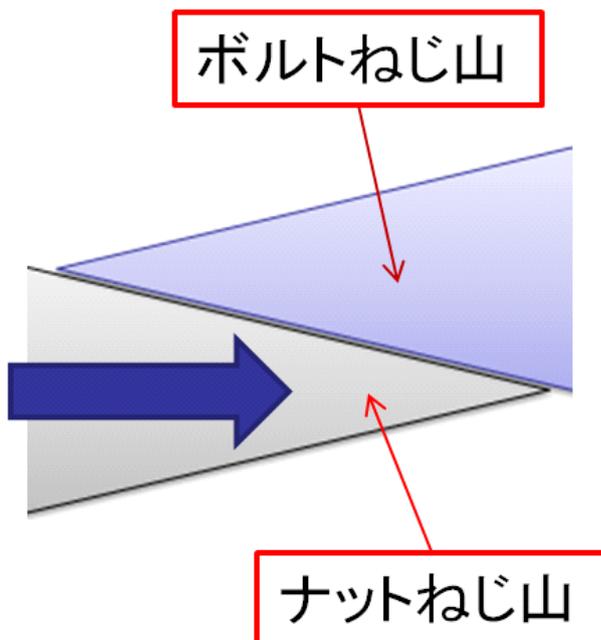


図 3.8 x の負方向側のボルトとナットのねじ山の詳細図

図 3.7 と図 3.8 はそれぞれ x の正方向側，負方向側のボルトとナットのねじ山の詳細図である。レボ板の右に平行移動していくと，ナットのねじ山が右に移動する。（図における青矢印）締結されているボルトは基本的に大きな力で引っ張られているため，ボルト自体は圧縮方向に力が生じている。そこで図 3.7 より，ナットのねじ山が右に移動すると，ボルトのねじ山は下に移動する力が働いているため，ナットのねじ山の斜面を下る分力が生じる。ここでボルトのねじ山とナットのねじ山が固着し，すべりが生じないならば，ボルトのねじ山とナットのねじ山の相対変位は生じないが， x の正方向においてはナットのねじ山がボルトのねじ山から離れるように移動していくため，ボルトのねじ山とナットのねじ山の間の垂直抗力が低下し，最大静止摩擦力が下がることにより，すべりが生じ，ボルトのねじ山がナットのねじ山の斜面を下っていく。図 3.5 のボルトとナットのねじ面の接触状態を見ても x の正方向側（図における右側）においてボルトとナットのねじ面にすべりが生じていることが分かる。

一方，図 3.8 より， x の負方向においては，ナットのねじ山が右に移動することにより，ボルトのねじ山がナットのねじ山の斜面を上っていく方向の分力が生じる。しかし，図 3.5 のボルトとナットのねじ面の接触状態を見てみると， x の負方向側（図における左側）におけるボルトとナットのねじ面は固着しており，すべりが生じていないことが分かる。つまり x の負方向側においてはボルトのねじ山は上方向に移動していない。

以上より，レボ板の並行移動量が小さい場合， x の負方向側におけるボルトのねじ山は移動せず，正方向側におけるボルトのねじ山はボルトの長さが短くなる方向に移動する。ボルトの長さが短くなることで軸力が下がると考えられる。

つまりレボ板の平行移動量が小さいときにはゆるみ回転を伴わないボルトの位置がボルトの長さが短くなる方向に移動することによって，軸力が低下する。

次に，よりレボ板の平行移動量が大きくなった場合について考察する。

レボ板の平行移動量が小さい場合には， x の負方向側のボルトとナットのねじ面において固着していて，すべりが生じていなかったが， x の正方向側のねじ面はすべり移動することによってボルトを回転しようとする力が強くなる。そしてレボ板の平行移動量が大きくなると，図 3.6 より，ボルトとナットの全てのねじ面においてすべりが生じていることが分かる。すると蓄えられたボルトを回転しようとする力が一気に解放され，急激にゆるみ回転が進行する。（図 3.4 参照）そしてゆるみ回転が進行することにより，軸力が低下していくと考えられる。

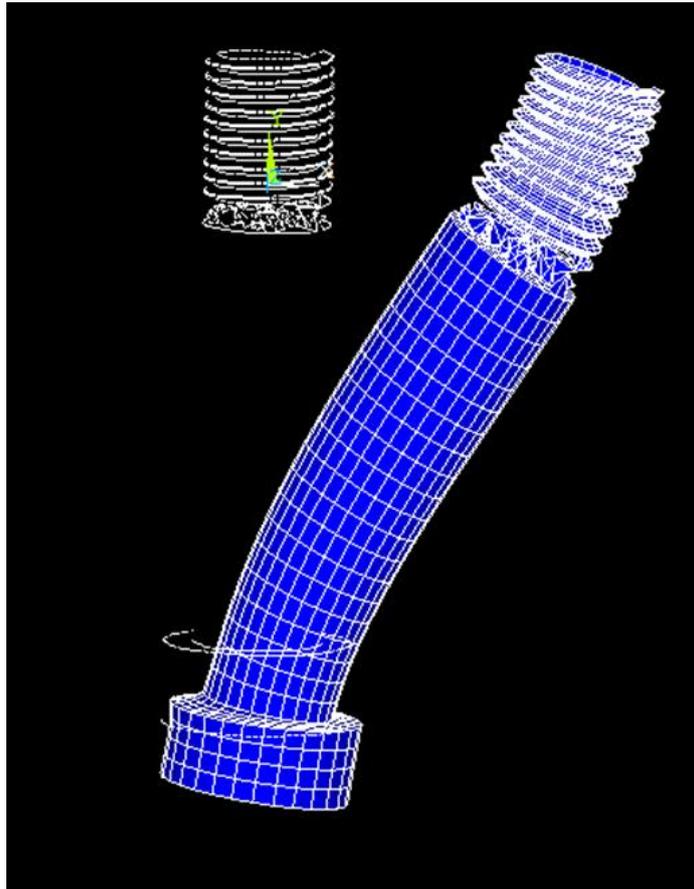


図 3.9 2.0mm 平行移動時のボルトの変形図

※倍率 20 倍

そしてそれ以上レボ板が平行移動していくと，図 3.9 のようにボルトが変形していく．するとゆるみ回転により軸力が低下する影響より，ボルトが曲げ変形することでボルトの長さが長くなることにより軸力が上昇する影響が上回るようになり，全体の軸力の平均は上昇していくと考えられる．

3.4 結言

本章では，三次元有限要素法を用いて，レボ板の平行移動のボルト締結体のゆるみに対する影響を明らかにした．以下に本章の結論を示す．

- レボ板が平行移動していくと，軸力は初めは線形的に低下していき，その後徐々に上昇していき，全体的には下に凸の放物線のように変化していく．
- レボ板の平行移動による軸力の低下には，二通りの原因によって生じている．
- レボ板の平行移動量が小さい場合には，ゆるみ回転は生じず，ボルトの位置が，ボルトの長さが短くなる方向に移動することで，軸力が低下する．
- レボ板の平行移動がより進行していくと，全てのねじ面においてすべりが生じ，ゆるみ回転が急激に進行することにより，軸力が低下する．
- それ以上にレボ板が平行移動していくと，ゆるみ回転により軸力が低下する影響より，ボルトが曲げ変形することでボルトの長さが長くなることにより軸力が上昇する影響が上回るようになり，全体の軸力の平均は上昇していく．

第4章 モーメントと軸直角方向の外力を受けるボルト締結体の挙動について

4.1 緒言

第二章において油圧ショベルの引き上げ落下を紹介した。神谷によって三次元有限要素法を用いて、油圧ショベル全体をモデリングし、衝撃力を準静的な荷重として模擬し、解析を行い、アウターボルトにはどのような外力がかかるのかを明らかにした。

そこで本章では、アウターボルト 1 本を模擬したボルト締結体に神谷による全体解析によって明らかにされた外力を与え、ボルト締結体の挙動を調べた。

以下に本章の構成を示す。

- 緒言
- 全体解析
- 解析手法
- 解析結果
- 結言

4.2 全体解析

4.2.1 解析条件

ここでは神谷によって行われた全体解析について説明する。

アウターボルトにどのような荷重がかかるのか定性的に把握するために ANSYS によって油圧ショベル全体をモデリングし、全体的に 5G の重力がかかるように準静的解析を行った。

以下に全体解析の解析条件を記す。

材料特性はすべてにおいてヤング率 205GPa, ポアソン比 0.3, 摩擦係数はすべてにおいて 0.15 とした。



図 4.1 全体解析モデル

※モデルは(株)小松製作所提供

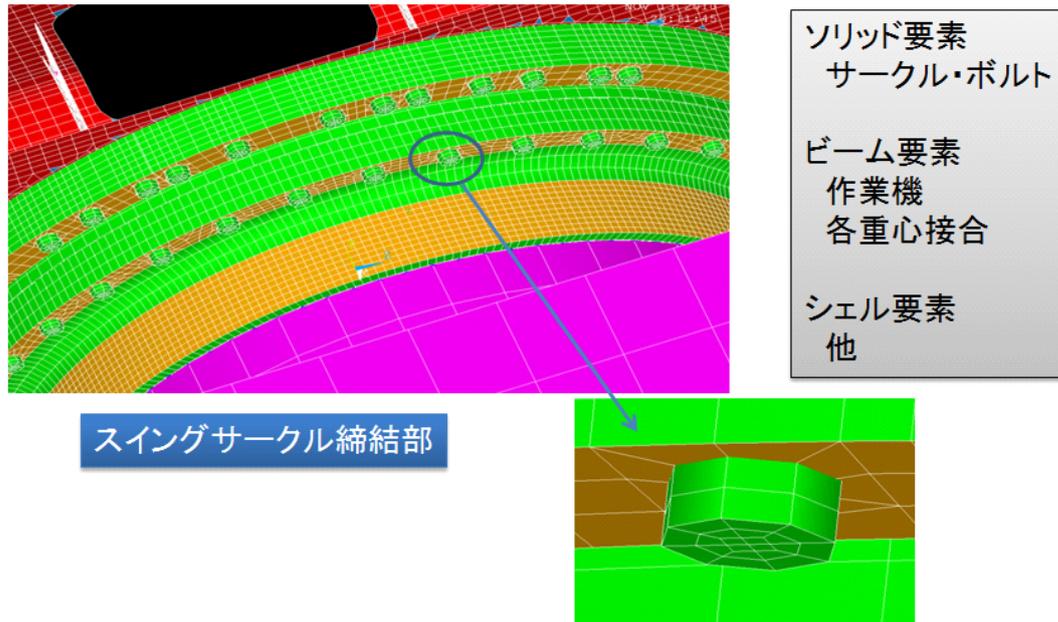


図 4.2 スイングサークル締結部モデル

※モデルは(株)小松製作所提供

4.2.2 解析結果

油圧ショベル全体に 5G の準静的荷重を加えた結果、1 本のアウターボルトにはモーメントと軸方向荷重が主にかかっており、少々の軸直角方向荷重がかかっていることが分かった。軸方向荷重は常にボルトにかかっているため、モーメントと軸直角方向荷重に注目する必要があると考えられる。

以下にボルトの変形図を記す。

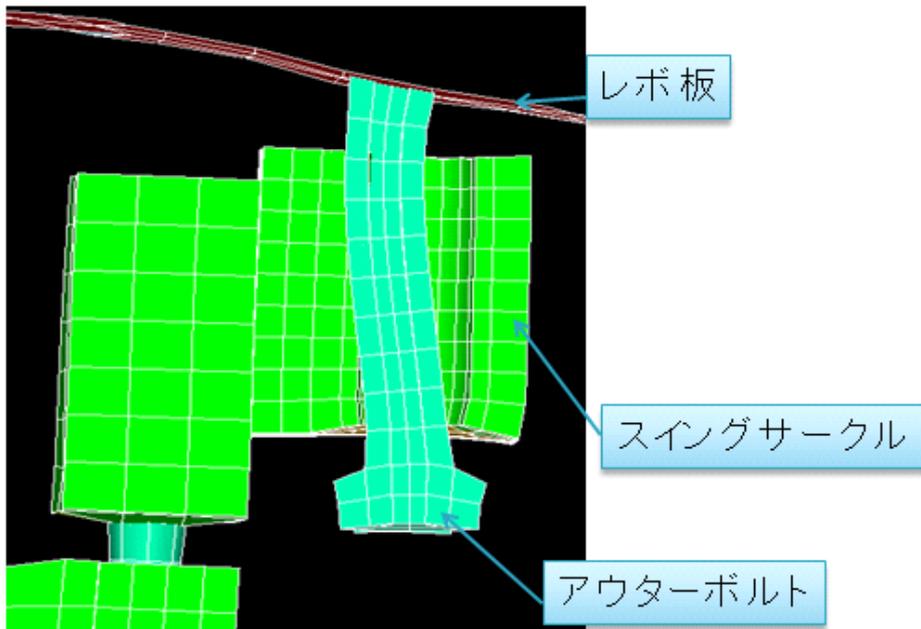


図 4.3 全体解析ボルト変形図
※倍率 100 倍

4.3 解析手法

スイングサークルには 32 本のアウターボルトが締結されており，全体解析の結果からアウターボルトによって定量的な違いがあるが，定性的な変形は一致している。

その中でも最も変形が顕著なボルトでは，レボ板が 0.3° 傾くようにモーメントがかかっていた。（モーメントだけではなく，ボルトのねじ面が 0.05mm 平行移動するような微小な軸直角方向荷重がかかっていた。）

そこで 1 本のアウターボルトの締結体を模擬したモデルに以上の境界条件を与え，ボルト締結体の挙動を調べた。

荷重条件としてはレボ板の下面が 0.3° 傾くようにレボ板の左端（図 4.4 における左端）を変位制御で上方向に荷重をかけた。加えて同様の荷重点に，左方向に変位制御で 0.05mm 荷重をかけた。ちなみに方向については図 4.4 における方向を表している。

それ以外の解析条件については，偏心荷重をかける解析と変更はない。

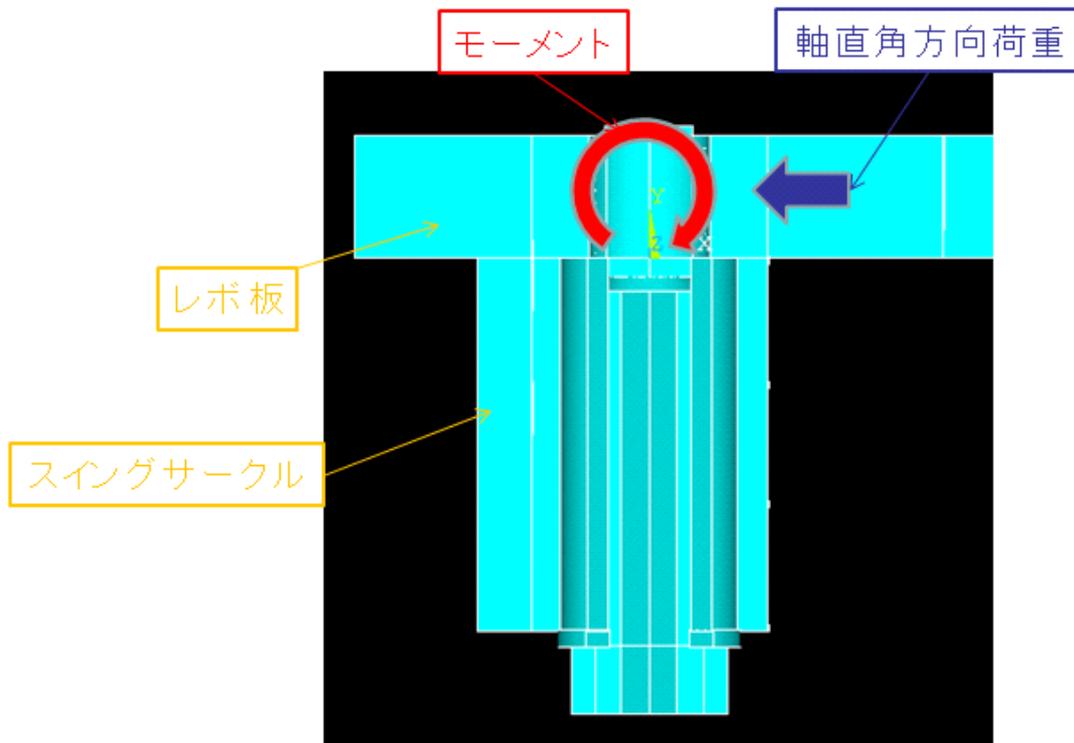


図 4.4 荷重条件

4.4 解析結果

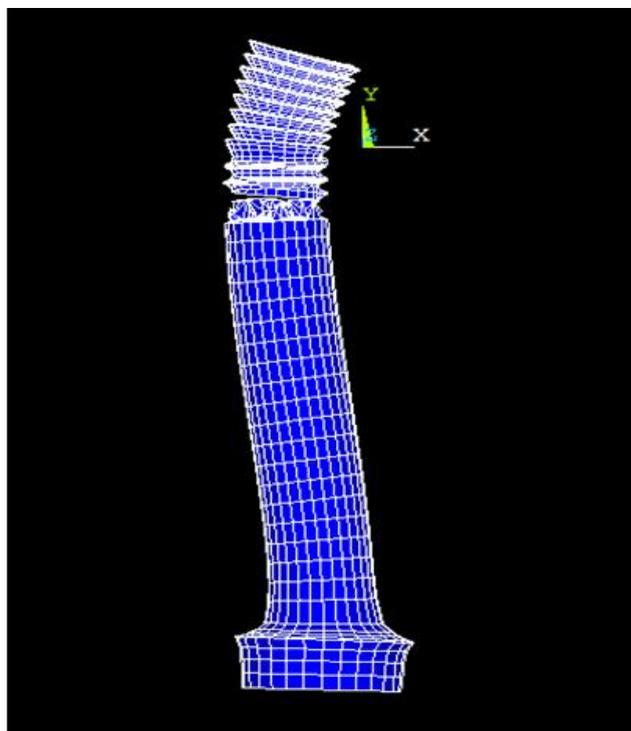


図 4.5 ボルト変形図

※倍率 100 倍

図 4.5 は、変形倍率を 100 倍に設定したボルトの変形図である。全体解析の解析結果におけるボルト変形図（図 4.3）と比較すると、変形形状は一致しており、境界条件が全体解析と定性的に一致していることが分かった。

以下に軸力変化とねじ面における回転角の変化を示す。

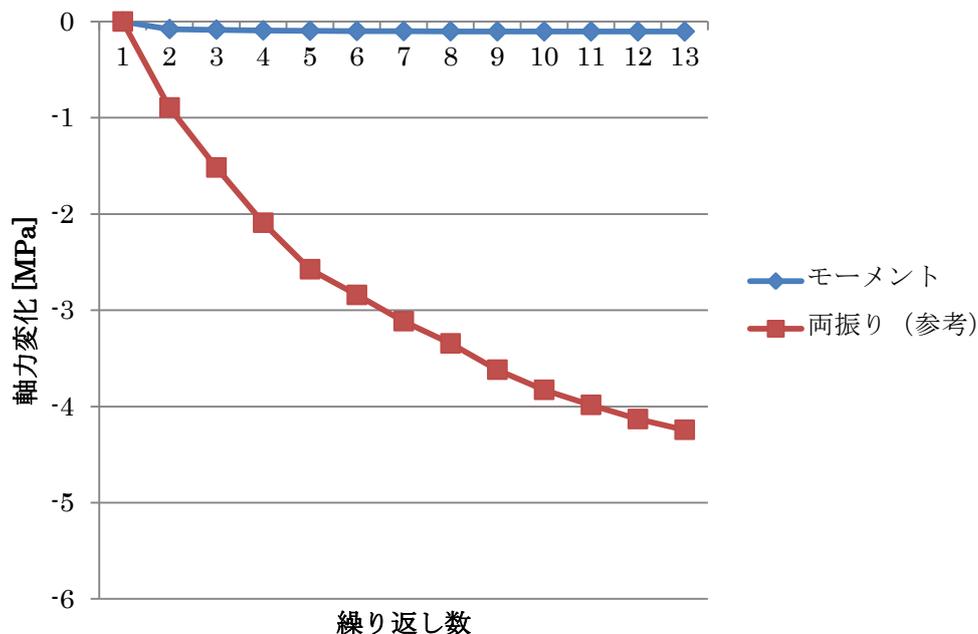


図 4.6 モーメントをかけた場合の軸力変化

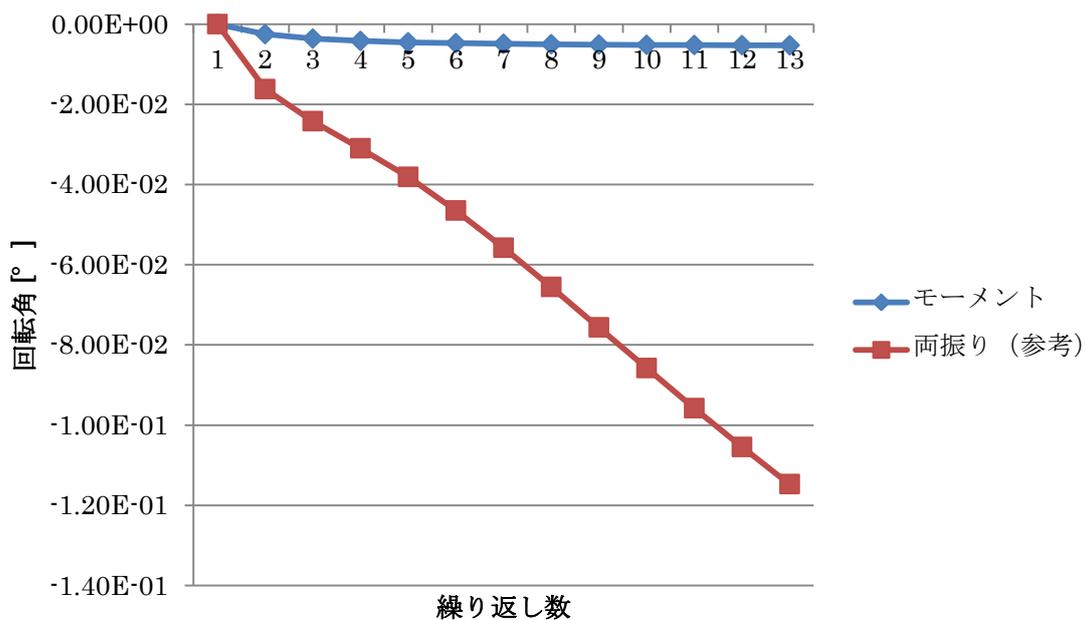


図 4.7 モーメントをかけた場合のねじ先の回転角

レボ板が平行移動する条件における偏心荷重を両振りでかけた場合に比べて、ボルトにモーメントかけた場合は目立った軸力の減少，そしてゆるみ回転の進行は見られなかった。

4.5 結言

本章では，神谷によって行われた全体解析によってアウターボルトにかかる荷重が明らかになったので，三次元有限要素法を用いて，全体解析の結果による荷重がアウターボルト締結体にかかった場合の定量的なゆるみ挙動を明らかにした。

以下に本章の結論を示す。

- 油圧ショベル全体に準静的荷重をかけた場合，アウターボルトには主にモーメントと軸方向外力がかかる。
- ボルト締結体にモーメントをかけた場合では，目立った軸力の低下，ゆるみ回転の進行は見られなかった。

第5章 結論と考察

5.1 結論

三次元有限要素法解析によりボルト締結体に偏心外力やモーメントなど軸直角方向以外の外力がかかる場合のボルト締結体の挙動を調べた。

以下に本論文の結論を示す。

- ・ ボルト締結体に偏心外力を加える場合，下方向にのみ荷重をかける片振り荷重では目立ったゆるみは見られず，上下方向に交互に荷重をかける両振り荷重ではゆるみの進行が見られた．片振り荷重に比べて両振り荷重においてゆるみが見られる原因としてはレボ板の平行移動が挙げられる．
- ・ レボ板の平行移動がボルト締結体のゆるみに大きな影響を与えている．レボ板を平行移動することにより線形的に軸力が低下していくが，より移動させていくと徐々に軸力が上昇していく．しかし軸力が上昇していくのはレボ板の平行移動量が約 **2mm** 以上の場合で，図 5.1 よりその時のボルトには引張強さを超える応力が働くため，塑性変形を起こし，破断を起こす可能性があると考えられる．ちなみにボルトの降伏点は **981MPa** で引張強さは **1098MPa** であるので，図 5.1 よりボルト頭とボルト軸の境で引張強さを大きく超えると考えられる．
- ・ ボルト締結体にモーメントをかけた際にはゆるみが生じなかった．

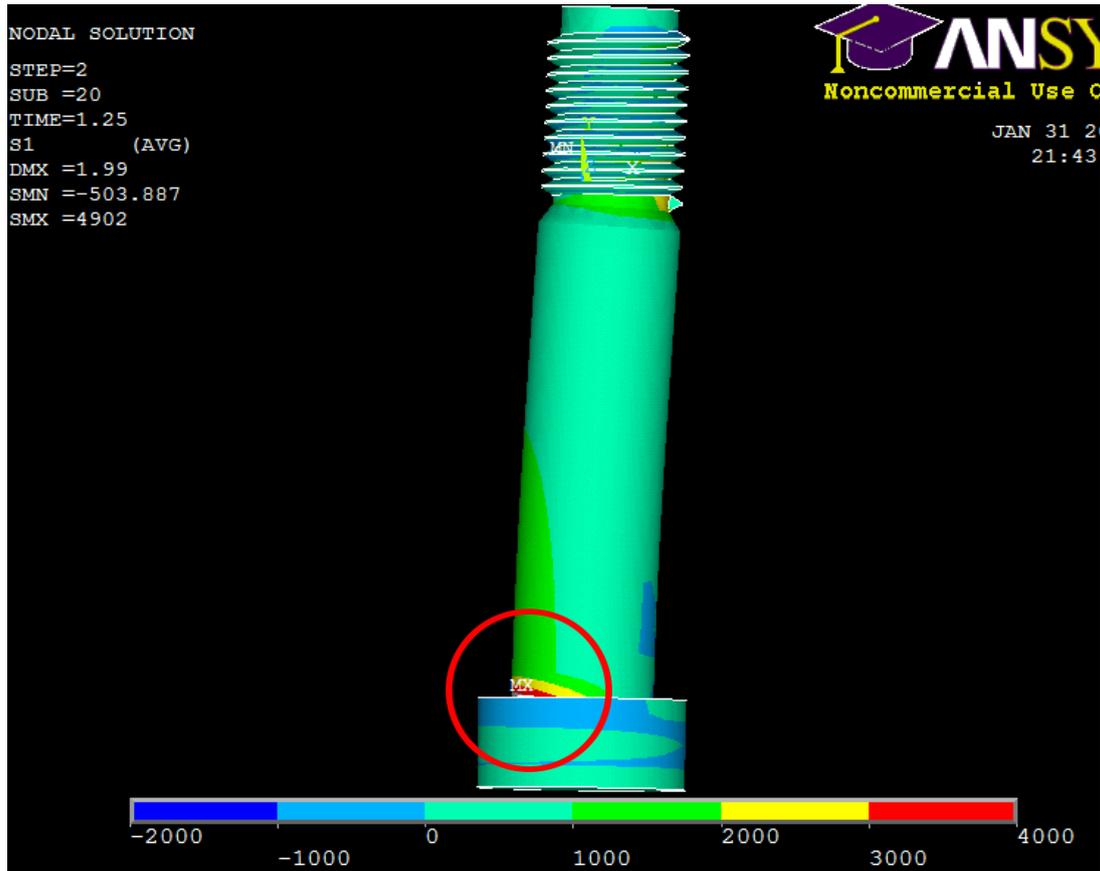


図 5.1 レボ板が 2mm 移動した時のボルトにかかる応力の分布図

5.2 考察

両振り荷重を加えるとゆらみが生じることが分かったが、計算時間の影響から繰り返し数を多くすることが出来なかった。しかし実際の油圧ショベルの使用条件を考慮に入れると、何万回と荷重が加えられる可能性が高い。

そこで以下では、近似曲線を用いて解析で出したデータの値からこのあとの軸力変化を予想してみた。近似曲線の種類としては、データの変化率が急速に増加または減少した後、横ばい状態になる場合に適している対数近似曲線を使用した。

図 5.2 より、実験値に対数近似した場合定性的な一致を見た。

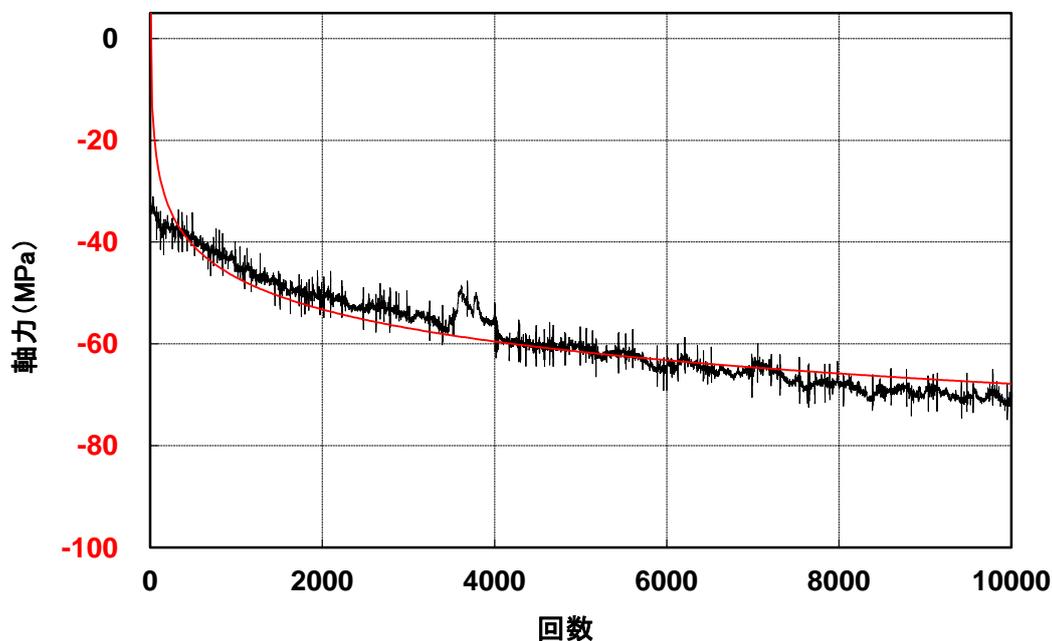


図 5.2 初期軸力 650MPa における軸力変化とその近似曲線

※(株)小松製作所提供データより

i. 初期軸力が 650MPa の場合

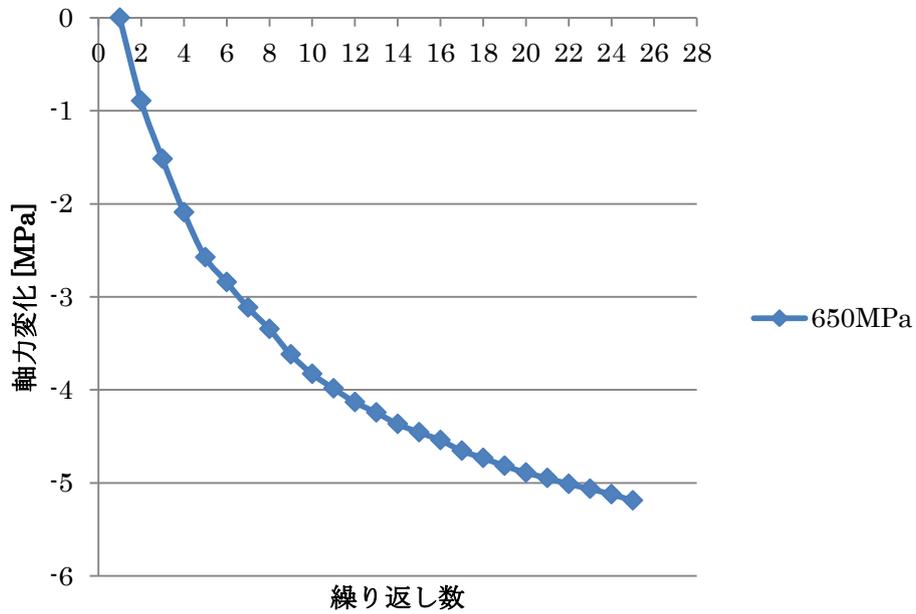


図 5.3 初期軸力 650MPa における軸力変化

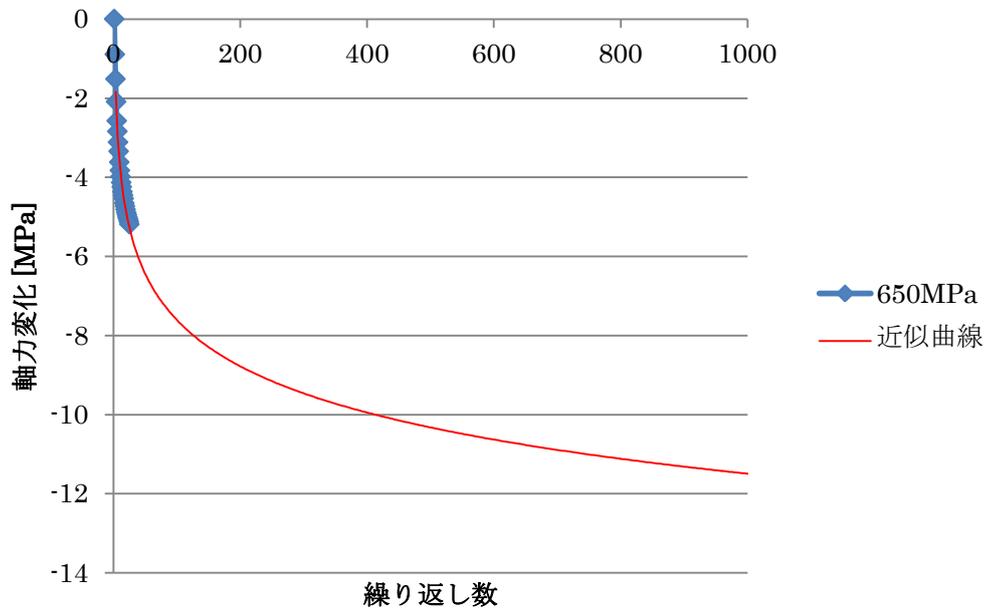


図 5.4 初期軸力 650MPa における軸力変化の予想 (1000 回まで)

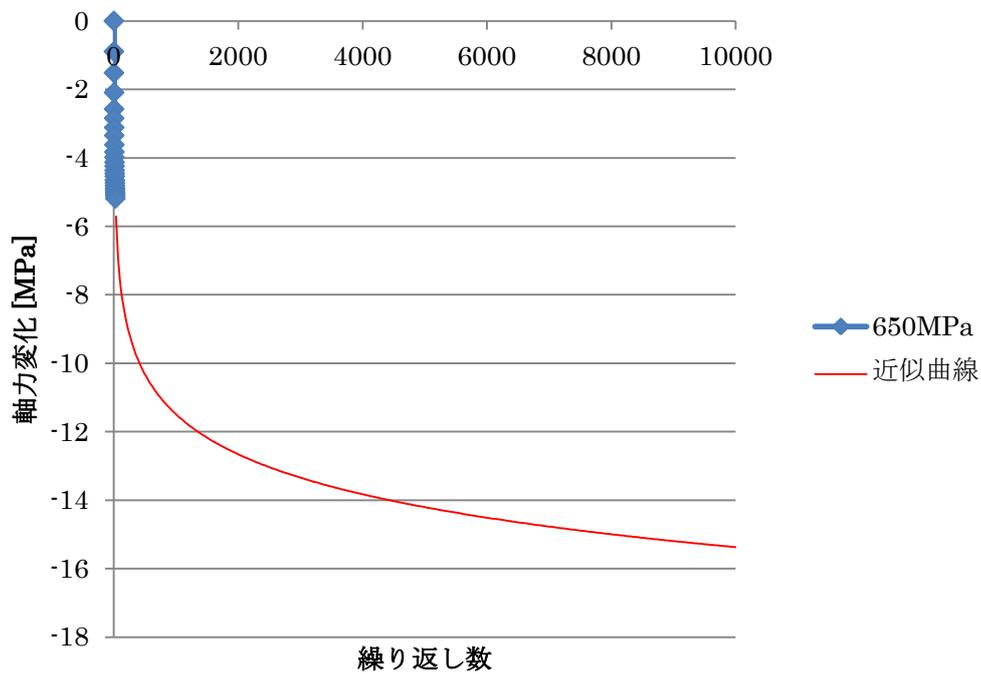


図 5.5 初期軸力 650MPa における軸力変化の予想 (10000 回まで)

ii. 初期軸力が 350MPa の場合

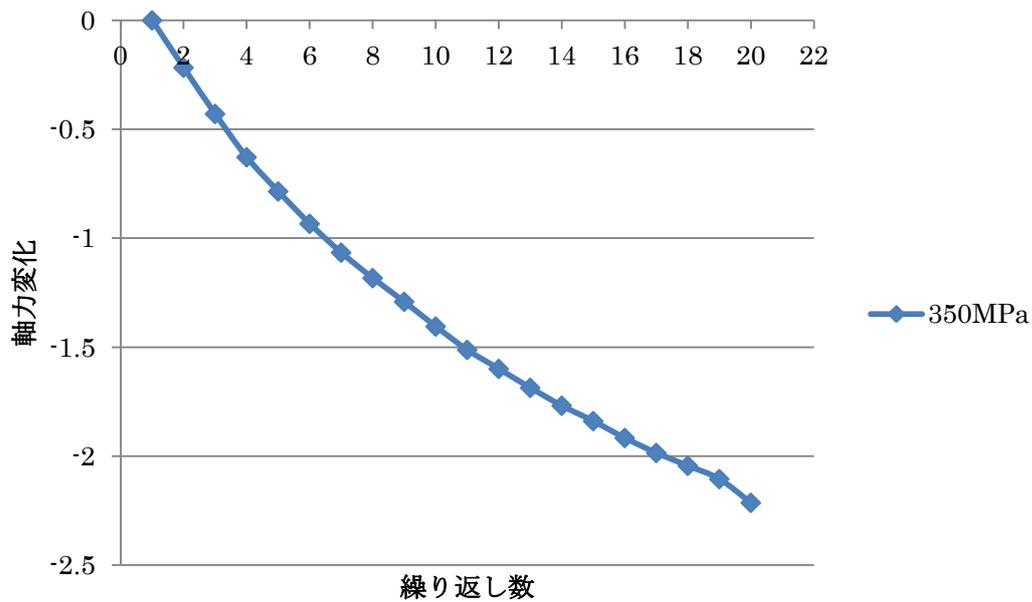


図 5.6 初期軸力 350MPa における軸力変化

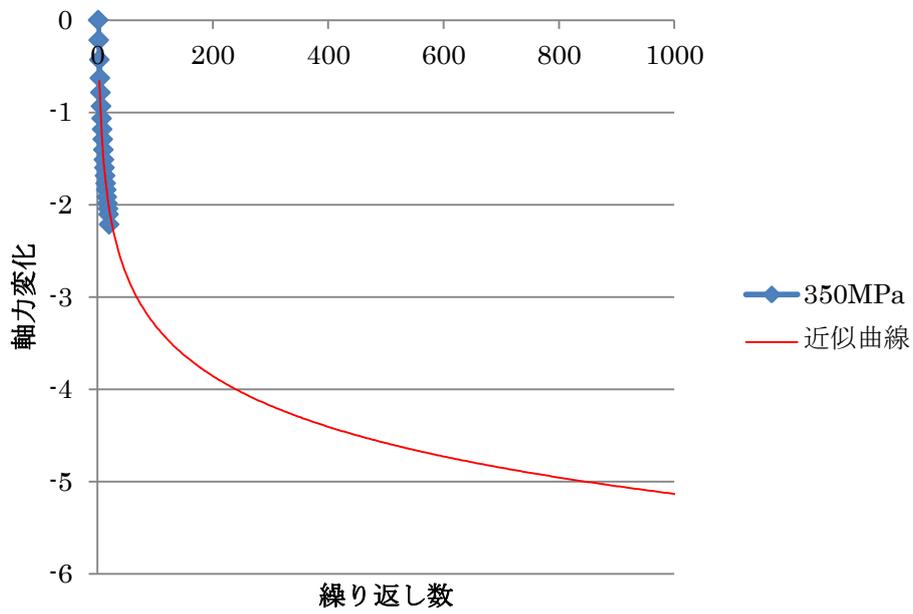


図 5.7 初期軸力 350MPa における軸力変化の予想 (1000 回まで)

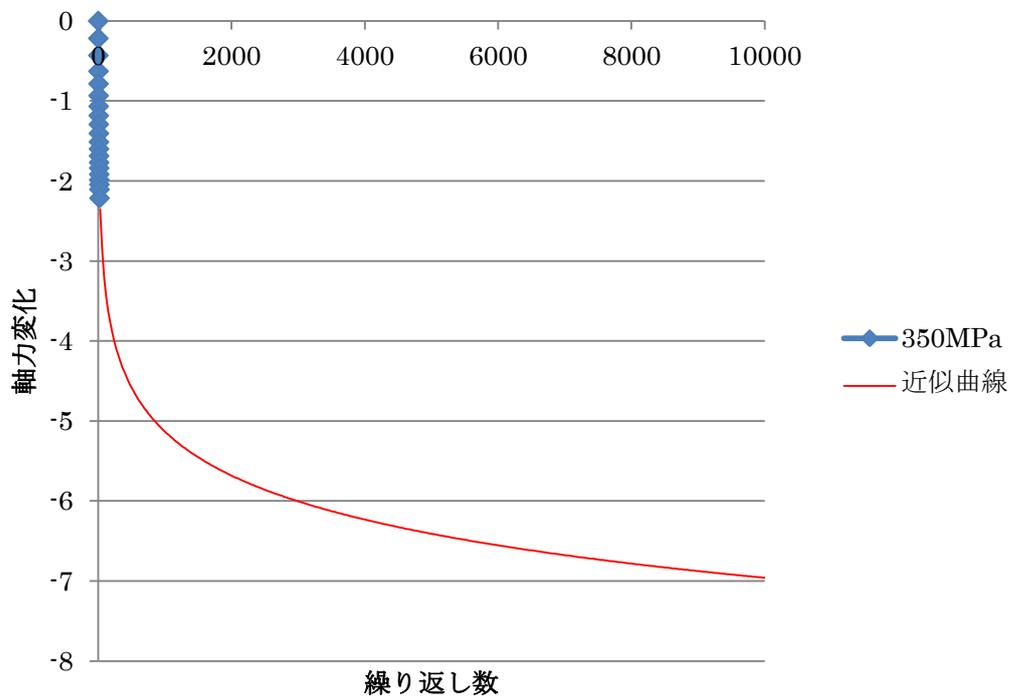


図 5.8 初期軸力 350MPa における軸力変化の予想 (10000 回まで)

iii. 初期軸力が 180MPa の場合

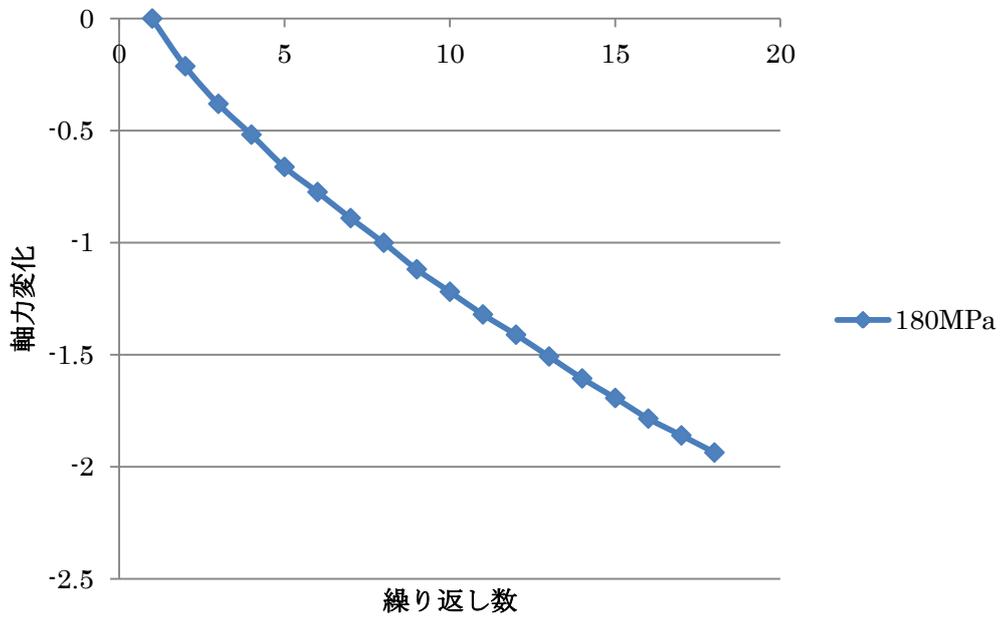


図 5.9 初期軸力 180MPa における軸力変化

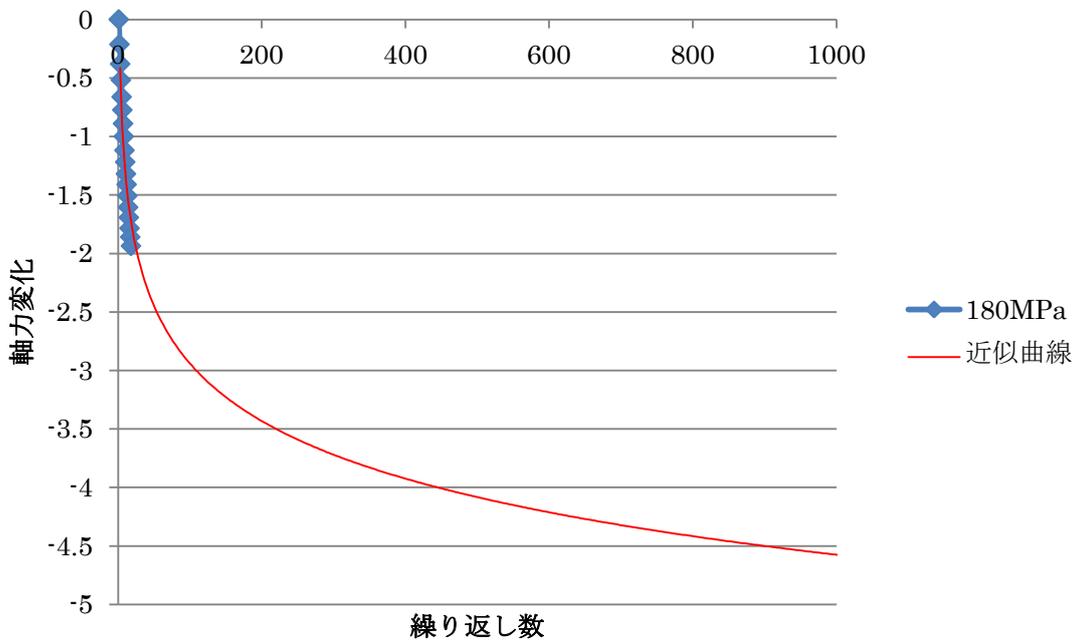


図 5.10 初期軸力 180MPa における軸力変化の予想 (1000 回まで)

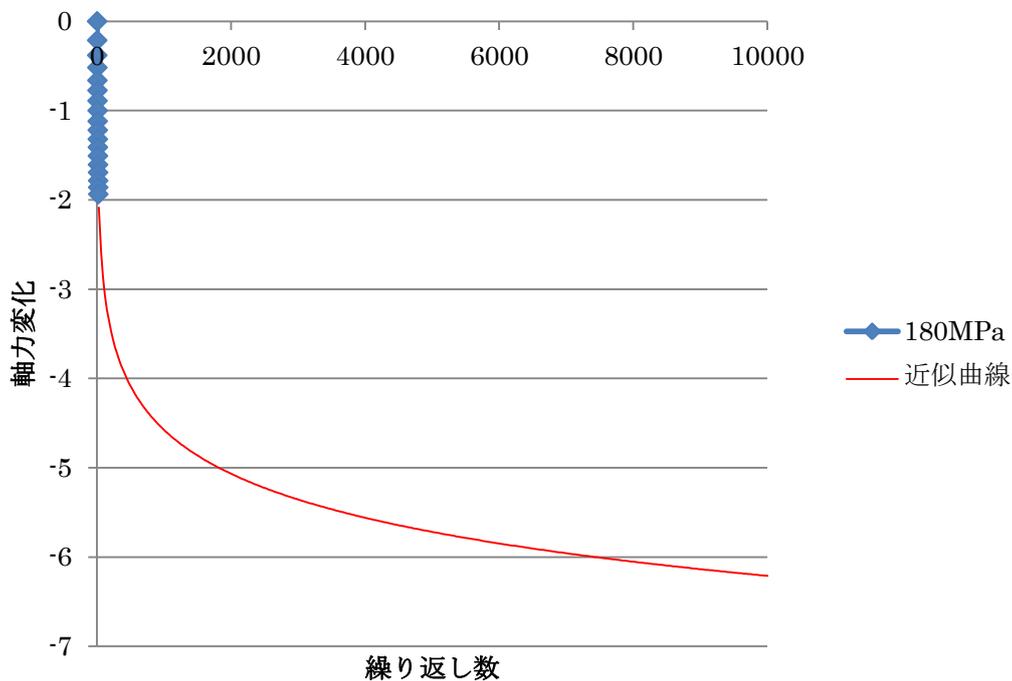


図 5.11 初期軸力 180MPa における軸力変化の予想 (10000 回まで)

初期軸力が 650MPa における軸力変化を実験値と解析値で比較してみる。

実験値が初めから軸力が約 30MPa も下がるのは、荷重を加えられレボ板が移動することにより、ボルトの初期締結位置からより安定する位置に再配列が起こることによる初期ゆるみだと考えられる。解析の場合は初めからしっかりとねじ面が接触しているので再配列による大幅な軸力減少は生じづらいと考えられる。

その他に実験と解析の違いとして挙げられるのは、初期ねじれの有無である。実験の場合、トルクを加えながらねじを締結していくが、締結し終わるときにはねじ面がこれ以上回転しない状態から、よりトルクを加えてボルト頭だけを回転させ、ボルト頭が回転しなくなった状態が締結の完了時である。するとボルト頭の回転位置を基準とすると、初期状態のときにすでにねじ面がゆるむ方向に回転している状態でねじれていると考えられる。しかし解析においては、ボルト頭とワッシャー、ワッシャーとスイングサークルの初期干渉により軸力を出しているため、初期状態においてボルトにねじれは生じていない。

解析を数サイクル進めていくとねじ面のみゆるみ回転を起こし、ボルトにねじれが生じ、実験における初期状態に近づく。

したがって実験において初めの数サイクルの挙動が異なるのは、この初期ねじれの有無が原因であると考えられる。

初期軸力が 650MPa, 350MPa, 180MPa の場合の繰り返し数が 1000 回まで, 10000 回までの軸力変化の予想を示した.

以上の図より, 荷重を繰り返し与えていくと軸力の減少が収束していくことが分かる. つまり軸力の減少が見られる両振り荷重の場合においてもその減少は初期ゆるみによる減少であり, 以降は収束していくのではないかと考えられる.

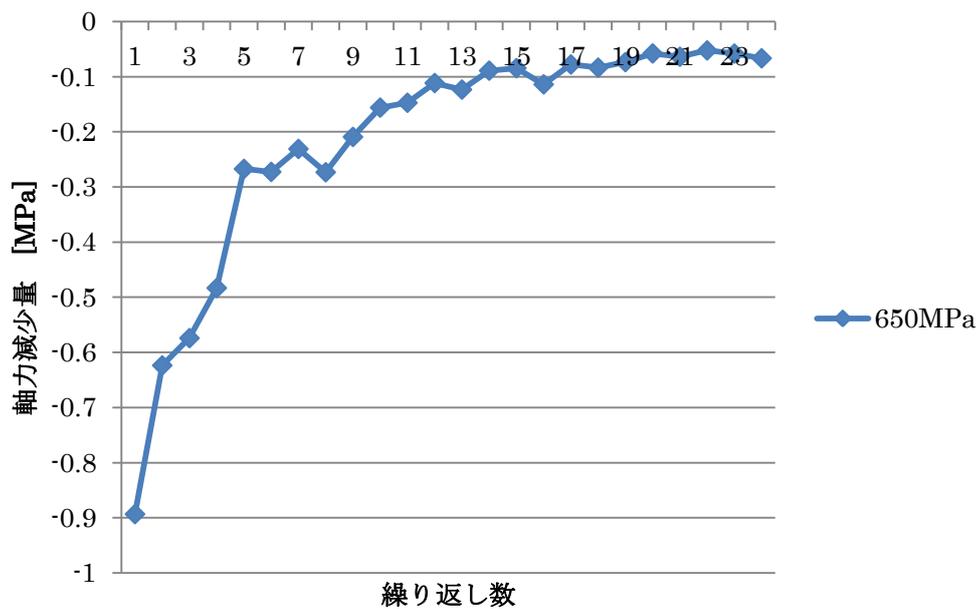


図 5.12 初期軸力 650MPa におけるステップ毎の軸力減少量

図 5.12 は初期軸力 650MPa の両振り荷重における軸力減少量の前のステップからの変化量を表している. これより, 繰り返し数が 21 回以降においては線形的に軸力が減少していることが分かる. ちなみに繰り返し数が 21 回以降における平均軸力減少量は 1 サイクルあたり約 -0.0598MPa であった.

そこで以下では, 解析において定常状態に達し, この後線形的に軸力が減少していくと仮定した場合の軸力の減少量を示し, 実験値との比較を行った.

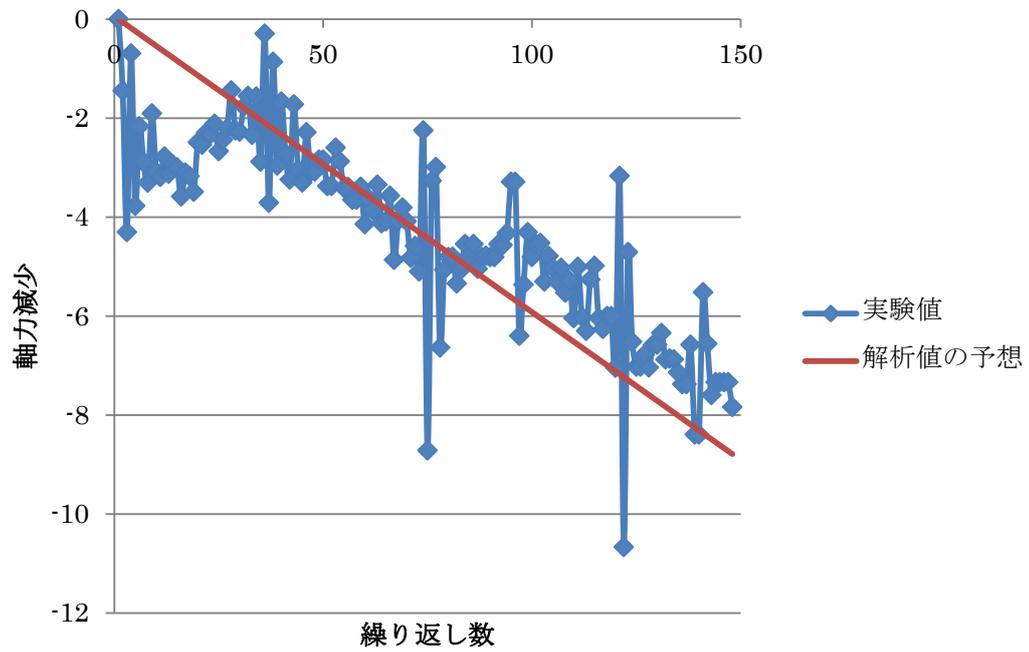


図 5.13 軸力減少についての実験値と解析の予想値の比較 (150 サイクルまで)

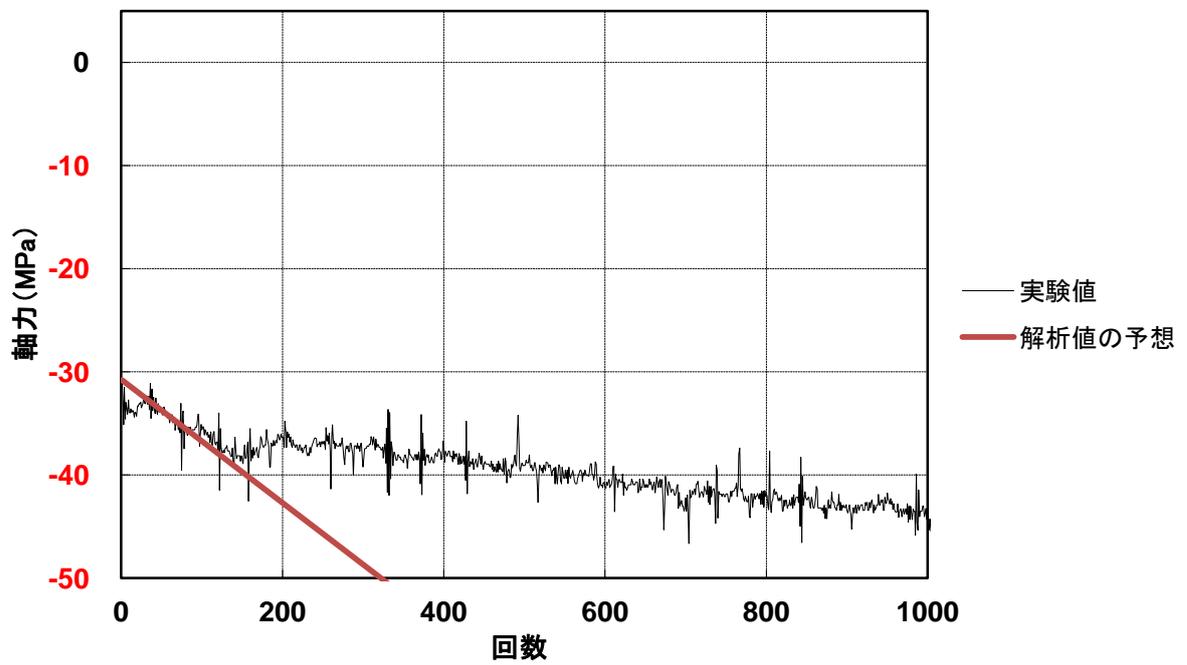


図 5.14 軸力減少についての実験値と解析の予想値の比較 (1000 サイクルまで)

図 5.13 と図 5.14 はそれぞれ 150 サイクルまでと 1000 サイクルまでの軸力減少についての実験値と解析の予想値の比較を表している。

図 5.13 より繰り返し数が小さい場合では、解析において定常状態に達した際の軸力の減少量は、実験における軸力の減少量と定性的に一致していることが分かった。

しかし図 5.14 より、繰り返し数が約 200 のときを境に減少量に変化していることが分かる。

だがあくまで解析を行った繰り返し数が小さい場合においては、解析値と実験値が一致している。それ以降においても解析における軸力減少量が実験におけるそれと一致していることを確認するためには、さらに数百サイクルの解析が必要になるのではないかと考える。

次に図 2.13 の両振り荷重におけるレボ板の平行移動量を外挿することで、軸力減少量の限界を考察したいと思う。

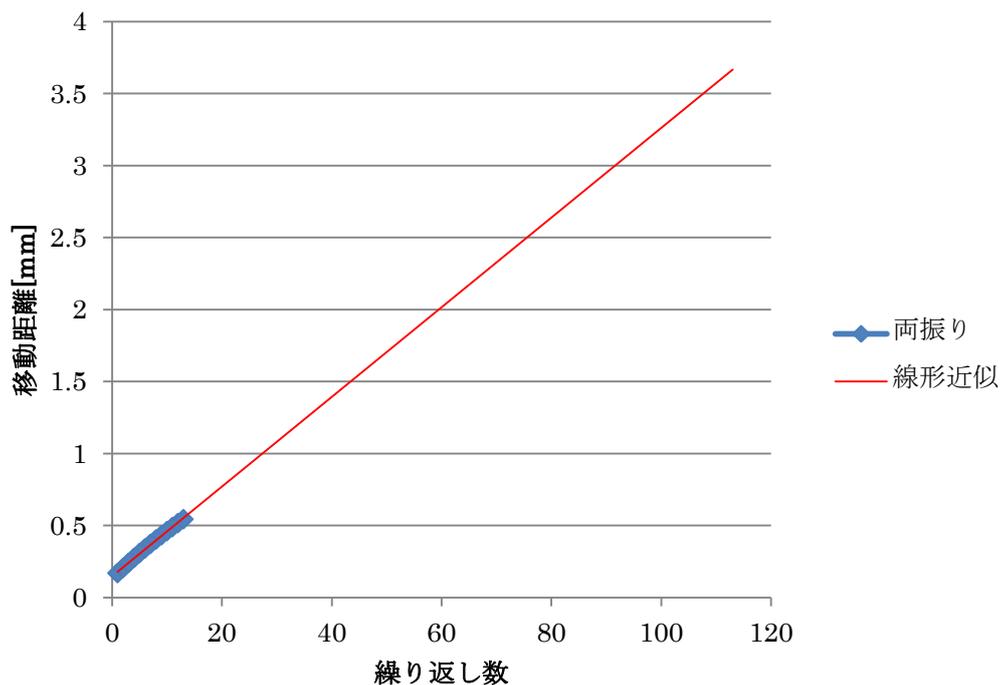


図 5.15 両振り荷重におけるレボ板の平行移動量の外挿

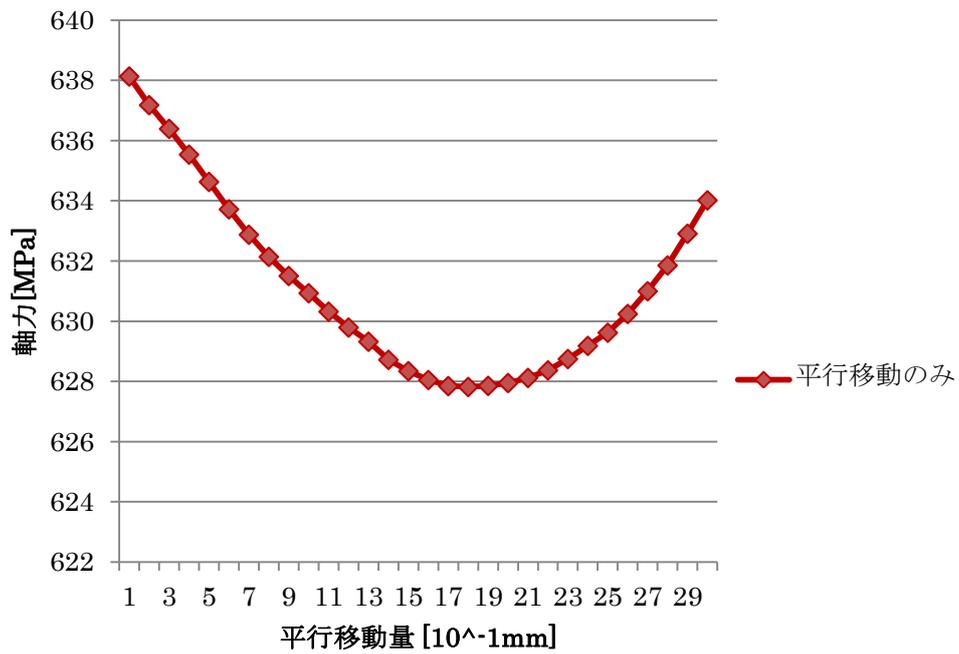


図 5.16 レボ板を平行移動させた場合の軸力変化（再掲）

図 5.16 よりレボ板の平行移動量が 2mm 程度の時が，軸力減少量の下限である。

図 5.15 より 60 サイクル時に，レボ板はおよそ 2mm 平行移動するので，60 サイクル程度で最大で約 10MPa ほど軸力が減少した後，軸力の減少は止まるのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] G. H. Jnker, “New Creteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration”, SAE Transactions, 78, 314 (1969)
- [2] 山本 晃, 賀勢 晋司 “軸直角振動によるねじのゆるみに関する研究ーゆるみ機構の解明”, 精密機械 43 巻 4 号 p 82 (1977)
- [3] 横山 喬, “軸直角方向外力を受けるボルト締結体挙動の力学モデルの構築”, 東京大学博士論文 (2010)
- [4] 横山 喬, “鉄道車両艀装レール締結部の破損リスク評価と三次元有限要素法によるゆるみ挙動解析”, 東京大学修士論文 (2004)
- [5] 木村 成竹, “三次元有限要素法解析によるダブルナット締結法およびばね座金のゆるみ止め性能評価”東京大学修士論文 (2007)
- [6] 木村 成竹, “有限要素法解析によるねじ締結体緩み止め部品の性能評価”東京大学卒業論文 (2005)
- [7] 大石 邦央, “ボルト・ナット締結体の塑性締め有限要素法による有効性検証”東京大学修士論文 (2009)
- [8] 大石 邦央, “三次元有限要素法による皿ばね座金のゆるみ止めの性能評価”東京大学卒業論文 (2007)
- [9] Microsoft Office, “データに最適な近似曲線を選択する”<http://office.microsoft.com/ja-jp/help/HP005262321.aspx>

謝辞

本論文を作成するにあたり、ご指導いただきました酒井教授、泉准教授に深く感謝致します。とりわけ泉准教授にはご指導いただくだけでなく、様々な相談に乗っていただき、心より感謝致します。

研究の方針を示していただき、研究を進めるにあたって様々な御助力をいただきました(株)小松製作所の山田様に深く感謝致します。実験などを行なって頂きました(株)小松製作所に深く感謝致します。中尾・濱口研究室の濱口特任教授、長藤助教にも的確なアドバイスをいただくなど、大変お世話になりました。同じく中尾・濱口研究室の山本さん、大野君にも研究を協力していただき大変感謝致します。

またお忙しい中、ご丁寧にご指導頂きました酒井・泉研究室 OB の横山様に深く感謝致します。

そして展さん。研究室の運営・管理をしていただいただけでなく、日々の非常に面白い会話の数々だけでなく、一緒に日本代表を全力で応援するなど公私ともにお世話になりました。ありがとうございます。

原さん。いつもいつもフランクに話しかけていただき、とても楽しかったです。それが楽しみに研究室に通っていました。ありがとうございます。

浅川さん。研究室の話、工学部の話、大学の話。いろいろな話がとても面白かったです。ありがとうございます。

小山様。交通費の申請など非常にお世話になりました。ありがとうございます。

戒田さん。飲み会やスポーツ大会などでお世話になりました。バドミントンと卓球は練習しておきます。ありがとうございます。

孫さん。院試勉強の際にはいつもご迷惑をおかけいたしました。それでも優しく接していただき、嬉しかったです。ありがとうございます。

緒方さん。ANSYS のことなど相談に乗っていただきました。いつも目の前にあるその優しい笑顔に癒されていました。ありがとうございます。

熊澤さん。いつもまーさんとのからみが面白かったです。オーバーオールとっても似あっていました。ありがとうございます。

田中まーさん。開成の先輩として、時に優しく、時に厳しく接していただきました。fortran を教えていただいた時のまーさん、かつこ良かったです。ありがとうございます。

前田さん。いつも研究と休憩のバランスが最高でした。見習います。ありがとうございます。

松本さん. マウスがおかしくなったときは焦りました. フランスでの芸術鑑賞についてまた詳しく教えて下さい. ありがとうございます.

木村さん. さすが TA 木村でした. ありがとうございます.

桐谷さん. 院試の解答などとてもお世話になりました. 私も GS に行くので宜しくお願いします. ありがとうございます.

曲さん. 三国志の知識では負けていません. ありがとうございます.

四方さん. ふざけるメンバーが多い中, 唯一真面目に話を聞いていただいたのは四方さんだと思います. ありがとうございます.

高尾さん. いつも iPod の充電器をお借りしていました. ありがとうございます.

田矢さん. 最後まで, 敬語で話すかタメ語でいいのか迷っていました. ありがとうございます.

村中. あなたのおかげでこの研究室に出会えました. ありがとう.

森住さん. ポテンシャルが高すぎて, もういろいろお世話になりました. ありがとうございます.

池田. いつも何も言わずに寝袋借りています. ありがとう.

ポク. 結局英語教えてくれませんでしたね. でもポクのメールは面白かったです. ありがとう.

栗山. バナナありがとう.

興石. 基本的に研究室にいなかったのであまり会いませんでしたね. ありがとう.

小林. 基本的に研究室にいたのでよく会いましたね. ありがとう.

成田. 何もやらない B4 の中でしっかりしていましたね. 掃除など仕切ってくれて, ありがとう.

そして最後に神谷さん. 自分がどんなに忙しい時でも貴重な時間を割いて, 親身になって相談に乗って下さいました. 研究が嫌になったときも優しく接していただきました. 神谷さんのおかげで研究も研究室も嫌にならずに, 1年間続けることが出来ました. 研究に関して, 1から1000000くらいまで神谷さんを頼りにしてしまい, 大変申し訳ないです. 人生に出会った先輩の中でも, トップ3に入るほど尊敬している先輩です. そんな神谷さんに心から感謝の意を表したいと思います. ありがとうございます.

以上その他にも学科の友人, 家族と研究活動や研究活動以外においてもお世話になりましたすべての皆様に感謝致します.

以上

卒業論文

p.1～p.64 完

平成 24 年 2 月 3 日提出

100243 白井宏尚