

卒業論文

振動特性を予測するボルト締結の
モデリング手法開発

令和2年1月31日提出

03-180223 波多野 陽平

指導教員 泉 聡志 教授 

振動特性を予測するボルト締結のモデリング手法開発

波多野 陽平 指導教員: 泉 聡志 教授

Keywords: Finite Element Method, Bolt and nut fastening body, Simplified model, Frequency, Accelerance

1. 緒言

1.1 研究背景

ボルト締結は安価、簡便等の理由により幅広い機械構造物に使用されているが、締結部は特異脆弱な部位であるため、強度、振動特性の観点から十分な信頼性の確保が要求される。しかし、多数のボルト締結を用いる構造物の設計に対して全てのボルト締結を詳細にモデル化することは、計算負荷の観点から現実的ではないため、簡素かつ高精度なモデルが求められる。

このようなモデルとして、柳原[1]は多点拘束を用いたシェル・ビーム要素による簡易モデル（以下、柳原の簡易モデル）を提案し、締結部の剛性・応力の精度評価を行ったが、振動特性に関しては未検証であった。そこで、殿垣[2]はボルト穴が丸穴の場合の柳原の簡易モデルの妥当性を検証し、振動特性は概ね一致することを確認したが、ボルト穴が長穴の場合の振動特性に関する評価はなされていない。

1.2 目的

本研究ではソリッド要素を用いたボルト締結体有限要素モデル（以下、ソリッドモデル）による解析結果を試験と比較し、ボルト締結体の振動特性について考察する。また、これまでに精度評価が行われていないボルト穴が長穴の柳原の簡易モデルについても振動特性に関する妥当性を検証し、より高精度な簡易モデリング手法の構築を目的とする。

2. 締結体ソリッドモデルの予測精度確認

2.1 試験条件および解析モデル

株式会社日立製作所にて行われた打撃試験（Fig.1）と、ソリッドモデルにおける解析の結果を比較した。解析は接触部にペナルティ法による接触を定義したモデルによる過渡応答解析（非線形解析）であり、有限要素解析ソフト LS-DYNA Version R9.3.0（陽解法、陰解法）を用いて行った。ボルト締結部の形状について、ボルト、ナット部のねじ山を省略したリベット形状の締結体モデル（以下、リベットモデル）およびねじ山を再現した締結体モデル（以下、ねじ山モデル）の2つを用いた。また、ボルト穴部について、丸穴、横方向長穴、縦方向長穴の3種類の形状を用いた。

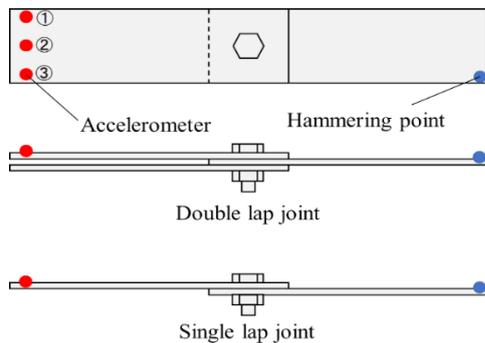


Fig. 1 Configuration of transient response analysis

2.2 解析結果

過渡応答解析の試験との比較を横方向長穴のせん断継手を一例に示した（Fig.2）。リベットモデル、ねじ山モデル共に試験片形状、加速度計位置によらず600 Hz付近の2次のピークまでは高い精度で一致したが、1000 Hz以降の高周波領域でずれが出ており、リベットモデル、ねじ山モデル共に概ね低周波側にずれる傾向を示した。

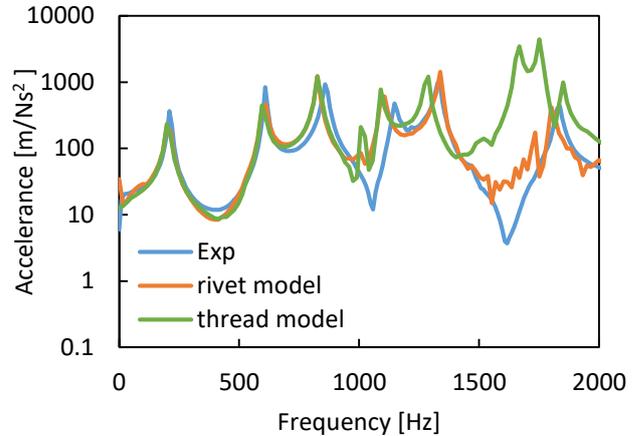


Fig. 2 Accelerance of single lap joint of horizontal slot

3. 柳原の簡易モデルの精度評価

3.1 試験条件および解析モデル

柳原の簡易モデルについて、打撃試験に加えモード解析試験を行い、実験値と比較しその予測精度を確認した。また、殿垣の先行研究においては未適用だった、ボルト穴が長穴形状のモデルについても解析を行った。

3.2 解析結果

過渡応答解析の試験との比較を横方向長穴のせん断継手を一例に示した（Fig.3）。ソリッドモデルでの解析よりも柳原の簡易モデルでの解析の方が高い精度となった。また、モード解析での予測精度はいずれの形状においても10%以内の誤差に収まった。

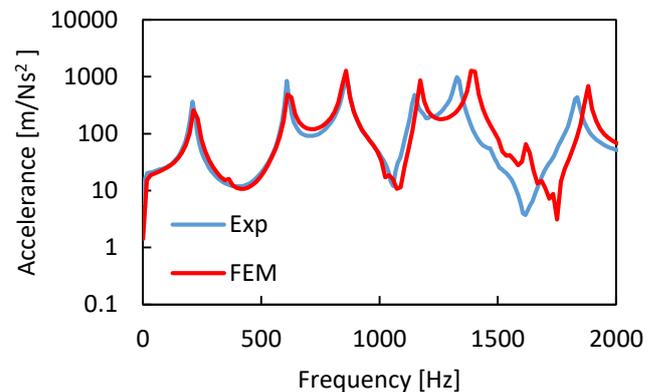


Fig. 3 Accelerance of single lap joint of horizontal slot

4. 結言

本研究ではボルト締結体ソリッドモデルの丸穴締結、長穴締結の継手をリベットモデル、ねじ山モデルを用いて振動特性の評価を行い、低周波領域でのアクセラランスは一致することを確認した。また、柳原の簡易モデルではソリッドモデルより高い精度で一致した。

参考文献

- [1]柳原崇志, “鉄道車両用ボルト締結体の有限要素モデルの妥当性評価と高精度化”東京大学大学院修士論文, 2018.
- [2]殿垣佳治, “簡易モデリング手法開発に向けた鉄道車両用ボルト締結体の振動特性の解明”東京大学卒業論文, 2019.

目次

図一覧.....	4
表一覧.....	6
第1章 序論.....	7
1.1 研究背景.....	7
1.2 本研究の目的.....	8
1.3 本論文の構成.....	8
第2章 締結体ソリッドモデルの予測精度確認.....	9
2.1 緒言.....	9
2.2 打撃試験.....	9
2.3 解析について.....	11
2.3.1 締結体モデル.....	11
2.3.2 解析条件.....	14
2.3.3 軸力の発生および入力荷重.....	16
2.3.4 減衰の設定.....	17
2.4 結果.....	19
2.5 考察.....	27
2.5.1 試験における誤差.....	27
2.5.2 ねじ山モデルについて.....	28
2.5.3 リベットモデルについて.....	29
2.6 結言.....	30
第3章 ボルト頭打撃時における振動特性の評価.....	31
3.1 緒言.....	31
3.2 目的および手法.....	31
3.3 解析条件.....	32
3.4 解析結果と考察.....	32
3.5 結言.....	35
第4章 柳原の簡易モデルの予測精度確認.....	36
4.1 緒言.....	36
4.2 柳原の簡易モデル [4].....	36
4.3 試験条件.....	39

4.4	解析条件.....	40
4.5	解析結果と考察.....	42
4.6	結言.....	58
第5章	結論.....	59
謝辞	61

図一覽

図 2-1	試験片形状.....	10
図 2-2	長穴の寸法および形状.....	10
図 2-3	測定機器構成.....	11
図 2-4	せん断継手（丸穴）のリベットモデル.....	12
図 2-5	純せん断継手（丸穴）のねじ山モデル.....	12
図 2-6	せん断継手（横方向長穴）のリベットモデル.....	12
図 2-7	純せん断継手（横方向長穴）のねじ山モデル.....	12
図 2-8	せん断継手（縦方向長穴）のリベットモデル.....	13
図 2-9	純せん断継手（縦方向長穴）のねじ山モデル.....	13
図 2-10	リベットモデルのボルト・ナット拡大図.....	13
図 2-11	ねじ山モデルのボルト・ナット拡大図.....	14
図 2-12	殿垣のモデルにおける振動の様子 加速度計①.....	16
図 2-13	入力荷重.....	17
図 2-14	修正後のDsの入力値.....	18
図 2-15	修正後のモデルにおける振動の様子 加速度計①.....	19
図 2-16	せん断継手（丸穴）リベットモデル 加速度計①.....	19
図 2-17	せん断継手（丸穴）ねじ山モデル 加速度計①.....	20
図 2-18	せん断継手（丸穴）加速度計①におけるアクセラランス.....	21
図 2-19	せん断継手（丸穴）加速度計②におけるアクセラランス.....	21
図 2-20	せん断継手（丸穴）加速度計③におけるアクセラランス.....	21
図 2-21	純せん断継手（丸穴）加速度計①におけるアクセラランス.....	22
図 2-22	純せん断継手（丸穴）加速度計②におけるアクセラランス.....	22
図 2-23	純せん断継手（丸穴）加速度計③におけるアクセラランス.....	22
図 2-24	せん断継手（横方向長穴）加速度計①におけるアクセラランス.....	23
図 2-25	せん断継手（横方向長穴）加速度計②におけるアクセラランス.....	23
図 2-26	せん断継手（横方向長穴）加速度計③におけるアクセラランス.....	23
図 2-27	純せん断継手（横方向長穴）加速度計①におけるアクセラランス.....	24
図 2-28	純せん断継手（横方向長穴）加速度計②におけるアクセラランス.....	24
図 2-29	純せん断継手（横方向長穴）加速度計③におけるアクセラランス.....	24
図 2-30	せん断継手（縦方向長穴）加速度計①におけるアクセラランス.....	25
図 2-31	せん断継手（縦方向長穴）加速度計②におけるアクセラランス.....	25
図 2-32	せん断継手（縦方向長穴）加速度計③におけるアクセラランス.....	25

図 2-33 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス	26
図 2-34 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス	26
図 2-35 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス	26
図 2-36 せん断継手（丸穴） 試験 加速度計①におけるアクセラランス	27
図 2-37 純せん断継手（丸穴） 試験 加速度計①アクセラランス	28
図 2-38 図 2-15 の 0MSEC から 20MSEC における拡大図	29
図 3-1 解析モデル形状	32
図 3-2 リベットモデルの締付トルクの違いによるアクセラランス比較 加速度計②	33
図 3-3 リベットモデルの締付トルクの違いによるアクセラランス比較 加速度計④	33
図 3-4 ねじ山モデルの締付トルクの違いによるアクセラランス比較 加速度計②	34
図 3-5 ねじ山モデルの締付トルクの違いによるアクセラランス比較 加速度計④	34
図 4-1 等価圧縮体とせん断継手 [5]	37
図 4-2 柳原の簡易モデルの拘束関係 [4]	38
図 4-3 試験片形状 せん断継手	39
図 4-4 試験片形状 純せん断継手	39
図 4-5 柳原の簡易モデル せん断継手（丸穴）	41
図 4-6 柳原の簡易モデル 純せん断継手（横方向長穴）	41
図 4-7 せん断継手（丸穴） 試験 振動モード	43
図 4-8 せん断継手（丸穴） 解析 振動モード	43
図 4-9 純せん断継手（丸穴） 試験 振動モード	44
図 4-10 純せん断継手（丸穴） 解析 振動モード	44
図 4-11 せん断継手（横方向長穴） 試験 振動モード	45
図 4-12 せん断継手（横方向長穴） 解析 振動モード	45
図 4-13 純せん断継手（横方向長穴） 試験 振動モード	46
図 4-14 純せん断継手（横方向長穴） 解析 振動モード	46
図 4-15 せん断継手（縦方向長穴） 試験 振動モード	47
図 4-16 せん断継手（縦方向長穴） 解析 振動モード	47
図 4-17 純せん断継手（縦方向長穴） 試験 振動モード	48
図 4-18 純せん断継手（縦方向長穴） 解析 振動モード	48
図 4-19 せん断継手（丸穴） 加速度計①	49
図 4-20 せん断継手（丸穴） 加速度計①におけるアクセラランス	50
図 4-21 せん断継手（丸穴） 加速度計②におけるアクセラランス	50
図 4-22 せん断継手（丸穴） 加速度計③におけるアクセラランス	50
図 4-23 純せん断継手（丸穴） 加速度計①におけるアクセラランス	51
図 4-24 純せん断継手（丸穴） 加速度計②におけるアクセラランス	51
図 4-25 純せん断継手（丸穴） 加速度計③におけるアクセラランス	51

図 4-26	せん断継手（横方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス	52
図 4-27	せん断継手（横方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス	52
図 4-28	せん断継手（横方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス	52
図 4-29	純せん断継手（横方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス	53
図 4-30	純せん断継手（横方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス	53
図 4-31	純せん断継手（横方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス	53
図 4-32	せん断継手（縦方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス	54
図 4-33	せん断継手（縦方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス	54
図 4-34	せん断継手（縦方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス	54
図 4-35	純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス	55
図 4-36	純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス	55
図 4-37	純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス	55

表一覽

表 2-1	物性値表	14
表 2-2	リベットモデル 解析条件表	15
表 2-3	ねじ山モデル 解析条件表	15
表 4-1	接手の等価座面領域径	40
表 4-2	解析条件表	41
表 4-3	せん断継手（丸穴） 固有振動数	43
表 4-4	純せん断継手（丸穴） 固有振動数	44
表 4-5	せん断継手（横方向長穴） 固有振動数	45
表 4-6	純せん断継手（横方向長穴） 固有振動数	46
表 4-7	せん断継手（縦方向長穴） 固有振動数	47
表 4-8	純せん断継手（縦方向長穴） 固有振動数	48
表 4-9	せん断継手（丸穴） モード解析と過渡応答解析における固有振動数	56
表 4-10	純せん断継手（丸穴） モード解析と過渡応答解析における固有振動数	56
表 4-11	せん断継手（横方向長穴） モード解析と過渡応答解析における固有振動数	57
表 4-12	純せん断継手（横方向長穴） モード解析と過渡応答解析における固有振動数	57
表 4-13	せん断継手（縦方向長穴） モード解析と過渡応答解析における固有振動数	57
表 4-14	純せん断継手（縦方向長穴） モード解析と過渡応答解析における固有振動数	57

第1章 序論

1.1 研究背景

機械・構造物を組み立てる際に使用されるボルト締結は、作業者の技量に依らない締結を行える点、価格が安い点、取り外しが簡便な点等の理由により、幅広い機械製品に使用されている。一方、ボルト締結を有する機械構造物において、締結部は強度的な弱点となることが多く、設計段階において十分な信頼性の確保が要求されるため、CAEを用いた高精度な締結部の強度・振動特性の評価が求められる。

CAEを用いたボルト締結部のモデリング手法はこれまで様々に提案されており、ねじ山の螺旋形状をすべてソリッド要素で再現し、ボルト、ナット、被締結体の各接触面に接触を定義したモデルでは、接触面でのすべりやねじ山への応力集中などを高い精度で再現することができる [1]。しかし、このようなモデルは多数のボルト締結を用いる構造物や大規模な構造物の設計に対しては、計算負荷の観点から現実的ではない。

ボルト締結体の簡易なモデル化手法として、ボルト締結をビーム要素、被締結部材をシェル要素で模擬する方法がある。この方法では、要素数を大幅に削減することができる上に、接触計算が不要であることから計算負荷が低く、ボルト締結を多数含む大規模な構造物の解析が可能になる。しかしながら、荷重がシェル要素とビーム要素の結合点1点に集中し、その近傍で局所的な変形が起きてしまうため、ボルト締結部近傍の応力分布や変形、振動特性などを高精度に予測できない欠点がある。

ボルト締結体の強度を高精度に再現する簡易モデルに関する先行研究として、成瀬ら [2] [3]は締結によって圧縮力が伝播する領域（以下、等価圧縮体）を考慮したシェル要素とビーム要素を用いた簡易モデル（以下、スパイダーモデル）を提案している。また、柳原 [4]は等価圧縮体の中立面シェル上断面（以下、等価座面領域）内節点とビーム節点を補間剛体要素により拘束したモデル（以下、柳原の簡易モデル）を提案し、スパイダーモデルに比べて締結部近傍の応力分布と剛性値が改善されることを確認している。

一方、ボルト締結体の振動特性を再現する簡易モデルに関して、成瀬らにより単純な形状の継手に対するハンマリング試験の結果とスパイダーモデルのモード解析の結果が殆ど一致することが確認されている [2]。しかしながら柳原の簡易モデルの振動特性に関する妥当性は未検証であったため、殿垣 [5]は柳原の簡易モデルの妥当性を検証し、ボルト穴が丸穴の場合振動特性は概ね一致することを確認したが、長穴の場合の柳原の簡易モデルの振動特性に関する研究はなされていない。

1.2 本研究の目的

本論文では、株式会社日立製作所にて行われる打撃試験およびモード解析試験と、ソリッド要素を用いたボルト締結体有限要素モデル（以下、ソリッドモデル）による解析結果を比較し、ボルト締結体の振動特性について考察する。殿垣の研究ではボルト、ナット部のねじ山を省略したリベット形状の締結体を用いたモデル使用していたため、本研究においてはボルト、ナット部のねじ山を詳細に再現したモデルでの解析を行う。

また、これまでに精度評価が行われていないボルト穴が長穴の柳原の簡易モデルについても振動特性に関する妥当性を検証し、より高精度な簡易モデリング手法の構築を目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含め全5章で構成される。各章の概要を以下で述べる。

第1章では、本研究の背景および目的、本論文の構成について述べた。

第2章では、ボルト締結体に対し打撃試験を行い、ボルト、ナット部のねじ山を省略したリベット形状の締結体を用いたソリッドモデル（以下、リベットモデル）およびねじ山を再現した締結体を用いたソリッドモデル（以下、ねじ山モデル）と結果を比較し、モデルの振動特性について評価する。

第3章では、異なる打撃点における打撃試験についてねじ山モデルとリベットモデルの解析を行い、その振動特性の相違点について考察する。

第4章では、打撃試験に加えてモード解析試験を行い、柳原の簡易モデルの結果と比較し、その精度評価を行う。

第5章では、本研究の結論についてまとめ、今後の展望を述べる。

第2章 締結体ソリッドモデル の予測精度確認

2.1 緒言

本章では、株式会社日立製作所にて行われた試験と、リベットモデルおよびねじ山モデルの過渡応答解析により、周波数応答特性を比較、評価する。また、殿垣の先行研究においては丸穴の被締結材のリベットモデルのみ研究されており、本章では長穴の被締結材への適用も試みた。

2.2 打撃試験

試験は2枚板のせん断継手および3枚板の純せん断継手の2種類の継手で行った。継手試験片の形状・寸法を図2-1に示す。

被締結体の材質には、車両構体にも用いられるA6061合金板を用いている[6]。ボルトの材質はSCM435、呼び径M10を用いた。ナットの材質はS45Cである。なお、被締結材の穴の形状は丸穴と長穴の2種類があり、丸穴の直径は10.5mm、長穴の形状および寸法は図2-2に示す。また、長穴の継手は長手方向に長い長穴（以下、縦方向長穴）と継手の幅方向に長い長穴（以下、横方向長穴）の2種類について実験を行った。継手の締付トルクは、せん断継手、純せん断継手のどちらも23.5Nmであった。

継手試験片を非常に柔らかい断熱材の上に置いた自由支持とし、図2-1に示した打点をインパルスハンマーで打撃加振した。加速度計は、試験片の打点の向かい側に3つ取り付け、それぞれの加速度計でのアクセラランスを算出した。試験による測定誤差を小さくするために打撃加振は5回ずつ行い、平均値を試験値とした。また、測定機器の構成を図2-3に示した。

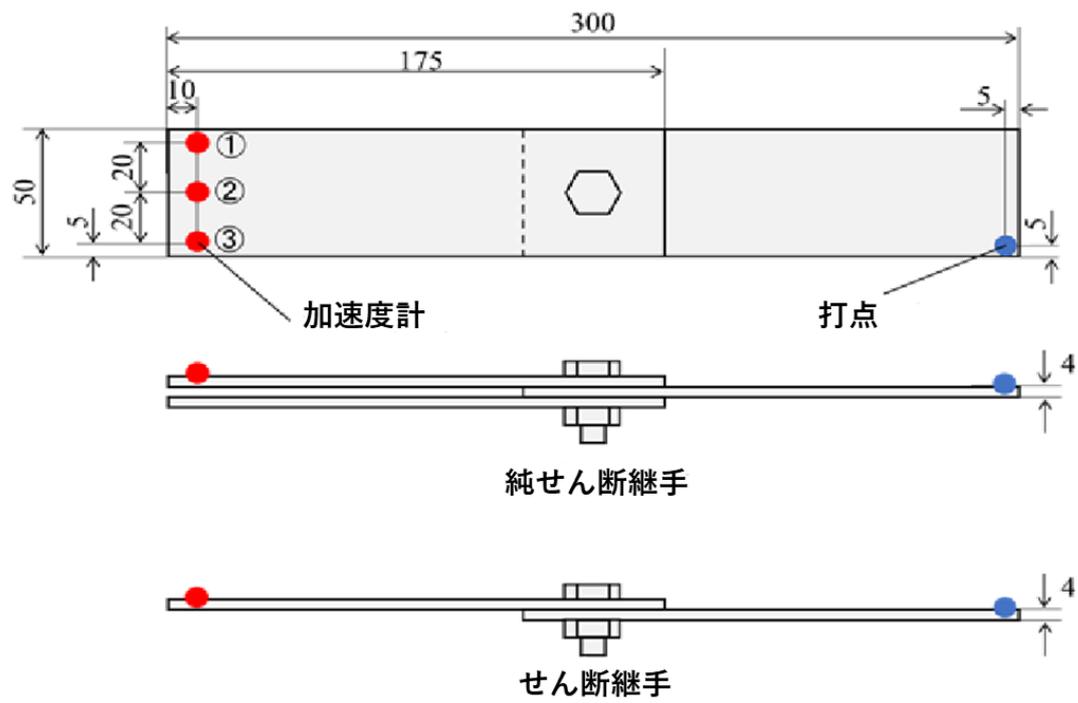


図 2-1 試験片形状

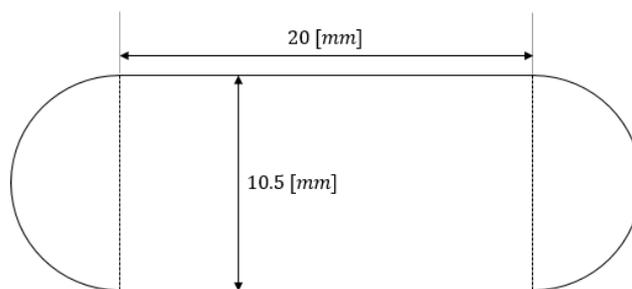


図 2-2 長穴の寸法および形状

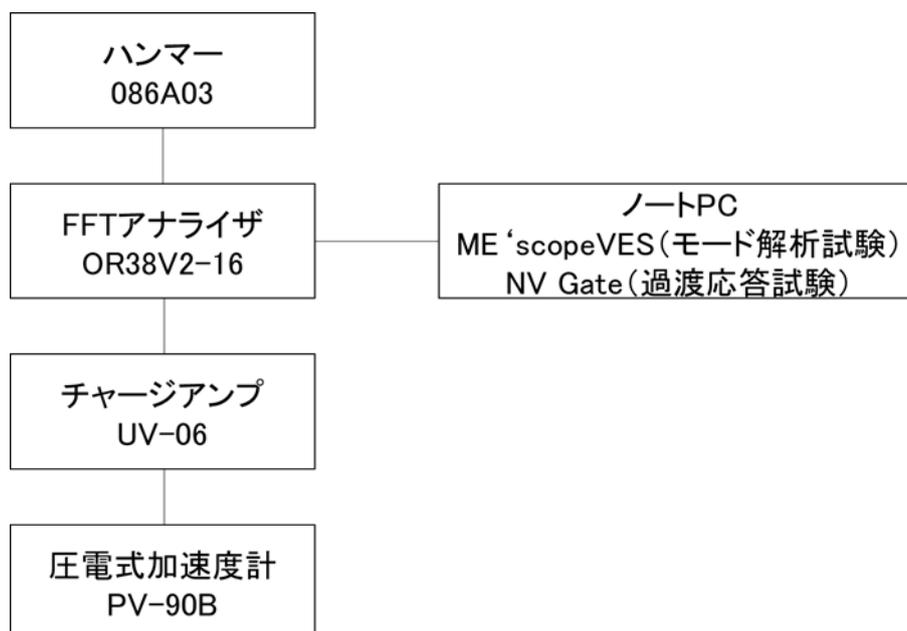


図 2-3 測定機器構成

2.3 解析について

2.3.1 縮結体モデル

本解析は有限要素法解析ソフト LS-DYNA Version R9.3.0（陰解法，陽解法）を用いて行った。材料は等方性材料とし，物性値は表 2-1 に示したものをを用いた。また，モデルはすべて六面体一次要素によってモデリングしている。殿垣の先行研究においては，ボルト・ナット部のねじ山を省略したリベットモデルで丸穴のせん断継手，純せん断継手のみに対して解析を行ったが，今回は丸穴に加えて長穴のせん断継手，純せん断継手について解析を行い，さらにボルト・ナット部のねじ山を再現したねじ山モデルでも丸穴，長穴のせん断継手，純せん断継手について解析を行った。全モデルで計 12 種類あるが，解析モデルの例を図 2-4 から図 2-9 に示す。

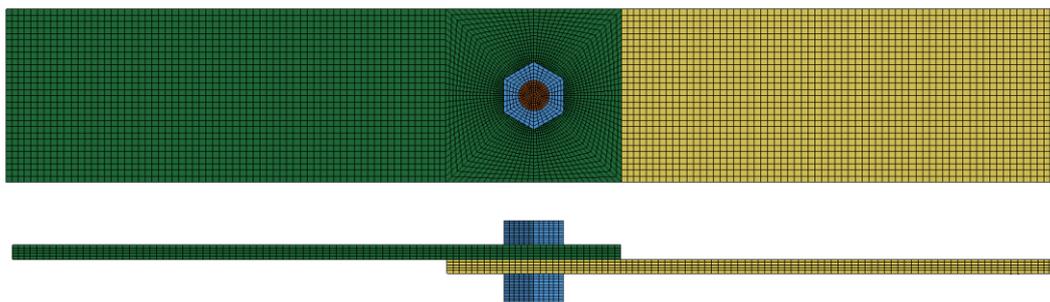


図 2-4 せん断継手（丸穴）のリベットモデル

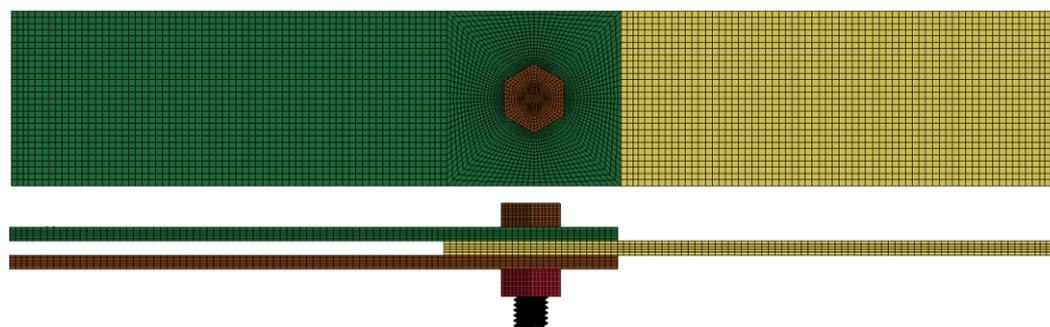


図 2-5 純せん断継手（丸穴）のねじ山モデル

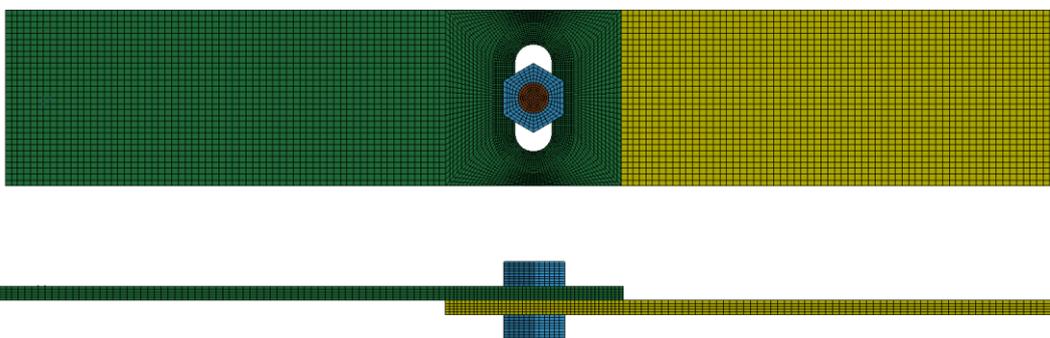


図 2-6 せん断継手（横方向長穴）のリベットモデル

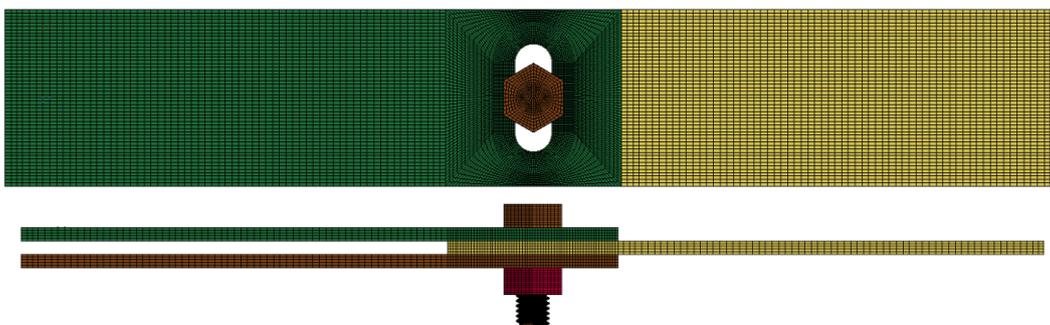


図 2-7 純せん断継手（横方向長穴）のねじ山モデル

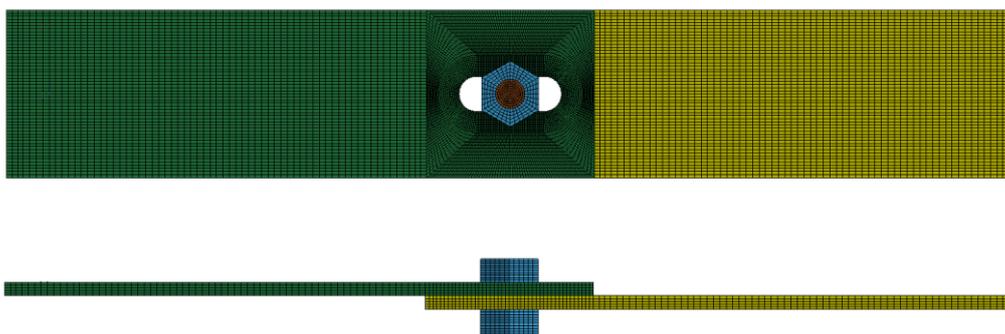


図 2-8 せん断継手（縦方向長穴）のリベットモデル

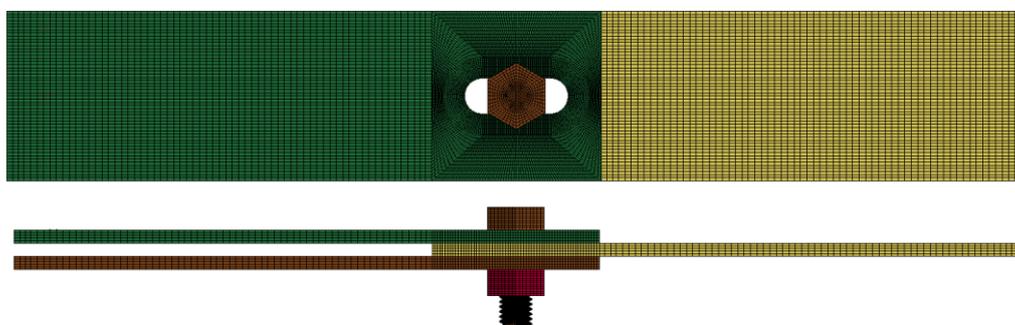


図 2-9 純せん断継手（縦方向長穴）のねじ山モデル

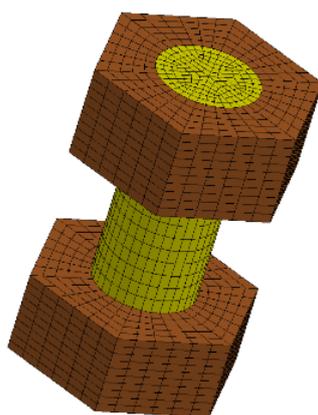


図 2-10 リベットモデルのボルト・ナット拡大図

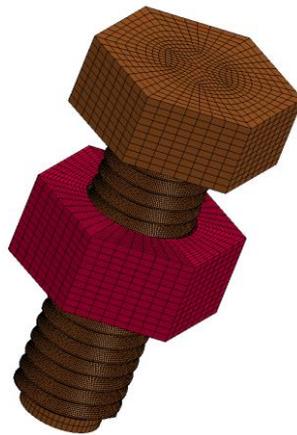


図 2-11 ねじ山モデルのボルト・ナット拡大図

2.3.2 解析条件

接触や摩擦を考慮した非線形解析のため、リベットモデルではボルト座面と被締結体間、ナット座面と被締結材間、被締結材間で、ねじ山モデルではそれらの接触に加えてボルトとナットのねじ面接触部で*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACEによりペナルティ法による接触を定義した。すべての接触において摩擦係数は 0.17 を用い対称接触とした。

拘束条件は、軸力を付与する際にのみ被締結体の四隅の並進自由度を拘束し、軸力発生後は拘束を解除した自由状態で解析を行った。

表 2-1 物性値表

	質量密度 [t/mm ³]	ヤング率 [MPa]	ポアソン比
ボルト・ナット	7.8E-09	2.05E+05	0.3
被締結体	2.7E-09	6.86E+04	0.33

表 2-2 リベットモデル 解析条件表

	丸穴		横方向長穴		縦方向長穴	
	せん断継手	純せん断継手	せん断継手	純せん断継手	せん断継手	純せん断継手
要素	六面体一次要素					
要素数	56063	79863	64263	92163	106763	155913
軸力発生解析 (動的緩和法)	陰解法		陽解法			
打撃解析	陽解法					
単位系	[mm][N][s]					
接触定義	ペナルティ法					

表 2-3 ねじ山モデル 解析条件表

	丸穴		横方向長穴		縦方向長穴	
	せん断継手	純せん断継手	せん断継手	純せん断継手	せん断継手	純せん断継手
要素	六面体一次要素					
要素数	187595	211395	229035	273555	238295	287445
軸力発生解析 (動的緩和法)	陰解法		陽解法			
打撃解析	陽解法					
単位系	[mm][N][s]					
接触定義	ペナルティ法					

2.3.3 軸力の発生および入力荷重

本解析では、ボルトの締め付けを行うために軸力を発生させる解析と、試験での打撃を模擬した入力をする解析の二つを行っている。図 2-12 において、およそ 0msec から 50msec に観測される振動がボルト締結の軸力を発生させたことによるもので、およそ 160msec 以降の振動が、打撃を模擬した荷重を入力したことによる振動である。なお、軸力を発生させる解析は、図 2-12 には書かれておらず、0msec の時点で軸力は発生し終えている。図 2-12 のように、軸力を発生させることによる振動が収束するのを待ってから打撃を模擬した荷重を入力している。入力荷重は正弦曲線を用いている（図 2-13）。この条件において過渡応答解析を行った。

軸力を発生させる解析においては、ボルト軸中央部を通る断面に *INITIAL_STRESS_SECTION により軸力を付与した。応力を付与することによって発生する振動は動的緩和法により軽減させた。軸力を発生させる解析は陽解法、陰解法のどちらでも可能だが、従来の殿垣のモデル（丸穴のせん断継手および純せん断継手）は解析時間が短いという利点から陰解法を用いて軸力を発生させていたが、長穴のモデルの場合、陰解法による収束計算が収束しなかったため、陽解法により軸力を発生させた。

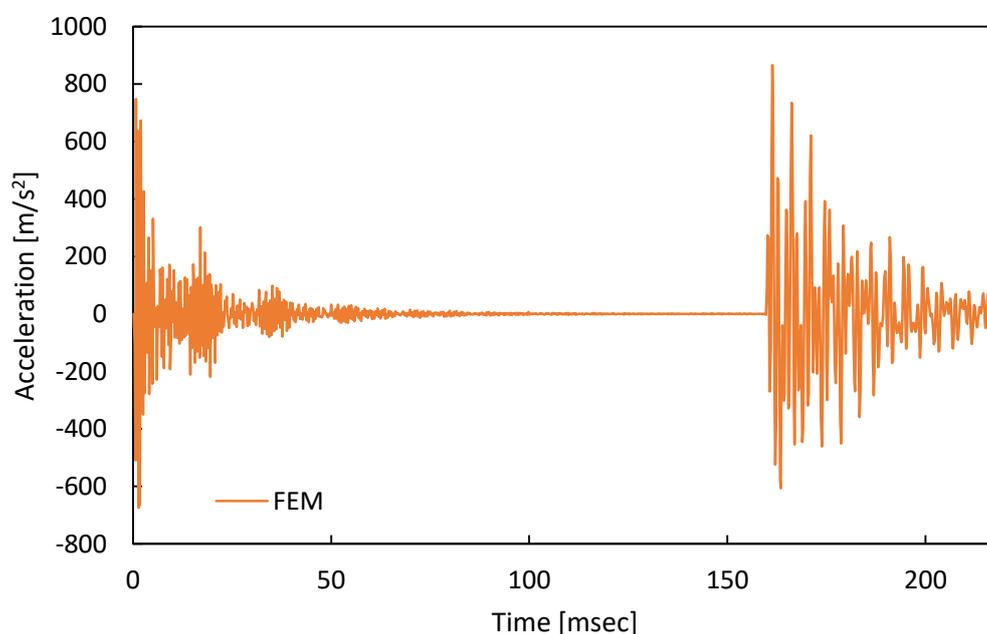


図 2-12 殿垣のモデルにおける振動の様子 加速度計①

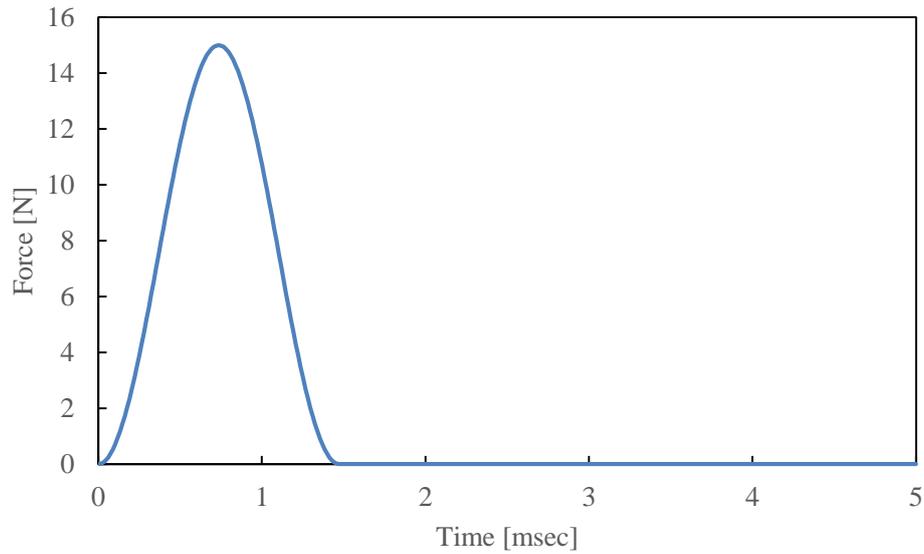


図 2-13 入力荷重

2.3.4 減衰の設定

軸力を発生させる解析では、動的緩和法を用いて振動を減衰させているが、その後の打撃荷重を入力する解析での減衰はレイリー減衰を用いている。

レイリー減衰はパラメータ α 、 β を用いて式 (2-1) のように表され、着目した周波数 ω_1 、 ω_2 の範囲で減衰比 ζ_i を設定することができる。

$$\zeta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (2-1)$$

この式から、 α は低周波で支配的、 β は高周波で支配的な値となる。

また、 α 、 β は周波数 ω_1 、 ω_2 、減衰比 ζ を用いて、式 (2-2) のように求まる。

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2\omega_1\omega_2\zeta}{\omega_1+\omega_2} \\ \beta &= \frac{2\zeta}{\omega_1+\omega_2} \end{aligned} \quad (2-2)$$

ここで、有限要素法解析ソフト LS-DYNA Version R9.3.0 においては、 α 、 β は入力パラメータ D_s 、COEF を用いて式 (2-3) のように表される。高周波領域における臨界減衰係数を C_{cri} とした。ただし、 β の値は解析ソフトの開発元からロジック詳細が公開されていないため、不確定なものとなっている。

$$\begin{aligned}\alpha &= D_s \\ \beta &= C_{cri} \times COEF\end{aligned}\quad (2-3)$$

本解析において D_s は、過減衰とならないために減衰比 ζ が 1 より大きくならない値、すなわち、式 (2-1) から $2\omega_{min}$ (ω_{min} : 最小固有角周波数) よりも小さい値を用いることが必要であり、その上で試験と解析で振動の振幅、減衰が同程度となるように設定する。試験における継手の最小固有角周波数 ω_{min} はおよそ 1400rad/s であったため、その 2 倍の 2800 より小さい値を D_s に設定しなければならない。試行錯誤の結果、試験と解析で振動の振幅、減衰が同程度となる値として、 $D_s=85$ を適用した。また、COEF に関しては概ね高周波領域における減衰比に対応しているため、金属の一般的な値として、COEF=0.05 を用いた。

軸力発生後の打撃荷重を入力する解析において、従来は一定の減衰 ($D_s=85$ 、COEF=0.05) をかけていたが、軸力を発生させたことによって発生する振動を待つ時間を短縮するために、図 2-14 のように軸力発生後から荷重を入力する直前 (9msec) まで一時的に非常に大きい減衰をかけることによって振動を抑えた。その結果、殿垣のモデルで観測された 0msec から 50msec での振動は抑えられ、図 2-15 のように 10msec の時点で打撃荷重を入力することが可能となり、解析にかかる時間は従来の半分程度となった。

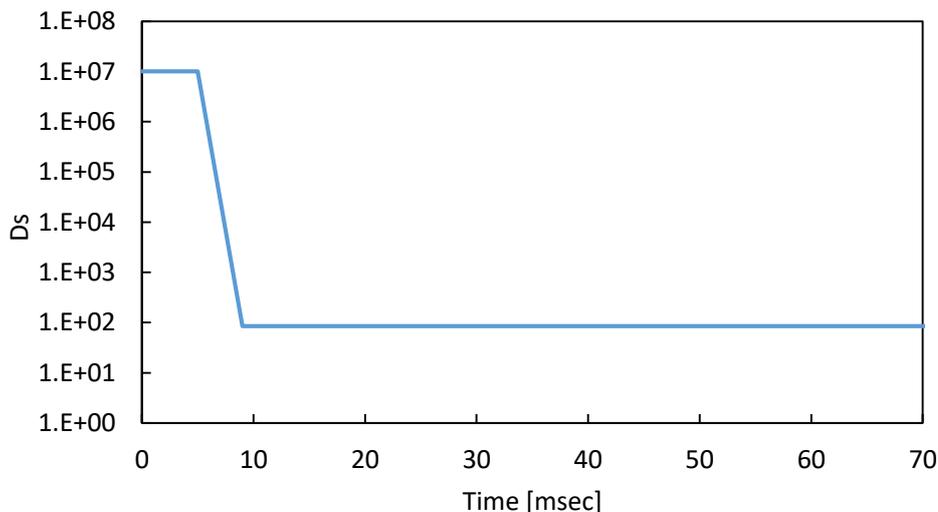


図 2-14 修正後の D_s の入力値

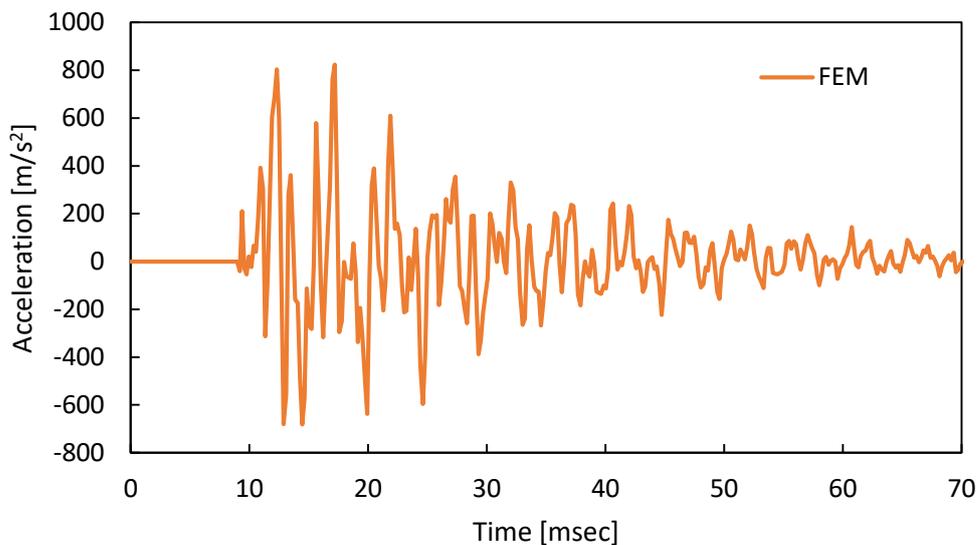


図 2-15 修正後のモデルにおける振動の様子 加速度計①

2.4 結果

全 12 種類のモデルの例として、丸穴のせん断継手の加速度履歴を示す。試験とリベットモデルの解析の比較を図 2-16 に、ねじ山モデルの解析との比較を図 2-17 に示す。リベットモデル、ねじ山モデル共に同様の減衰を設定したにもかかわらず、ねじ山モデルではおよそ 0msec から 15msec の時間で加速度が少し大きく出ているが、リベットモデルでは全体的な減衰は試験と解析で同様である。

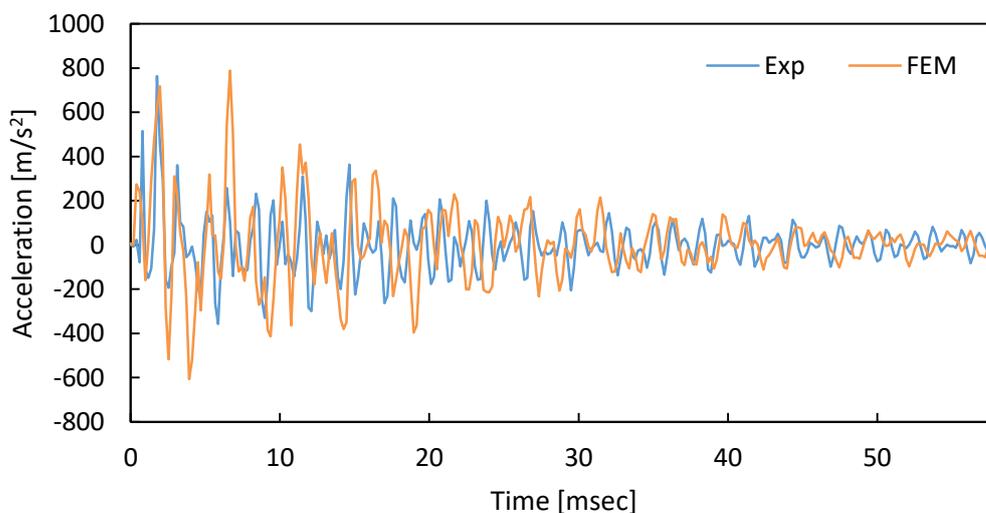


図 2-16 せん断継手（丸穴）リベットモデル 加速度計①

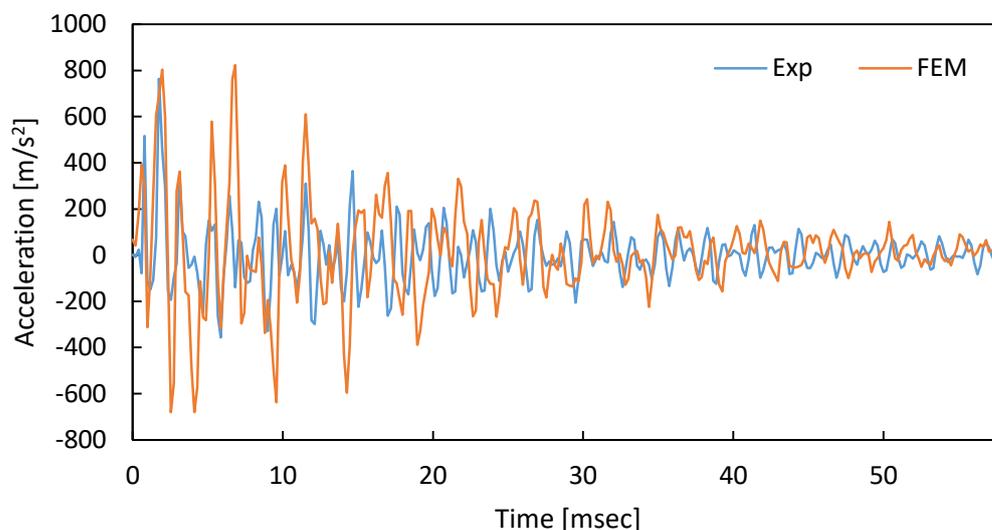


図 2-17 せん断継手（丸穴） ねじ山モデル 加速度計①

試験，リベットモデル，ねじ山モデルでの解析の加速度計①～③におけるアクセラレーションをそれぞれ図 2-18 から図 2-35 に示す。試験片形状，加速度計位置によらず 600 Hz 付近の 2 次のピークまでは高い精度で一致しているが，1000Hz 以降の高周波領域でのずれが大きい。

試験とリベットモデルでの解析を比較すると，2 次のピーク以降，試験片形状，加速度計位置によらず全体的に低周波側にずれており，特に長穴形状よりも丸穴のせん断継手，純せん断継手において顕著に見られる。

試験とねじ山モデルでの解析を比較すると，解析では高周波領域での周波数の乱れが大きく，ピークがはっきりと出ていないものが多い。また，ねじ山モデルにおいても試験片形状，加速度計位置によらず全体的に低周波側にずれており，リベットモデルと傾向は似通っている。

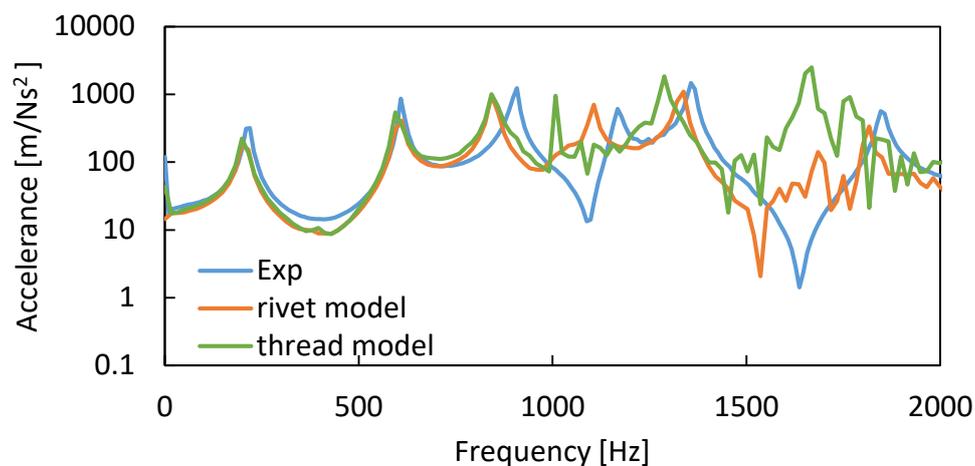


図 2-18 せん断継手 (丸穴) 加速度計①におけるアクセランス

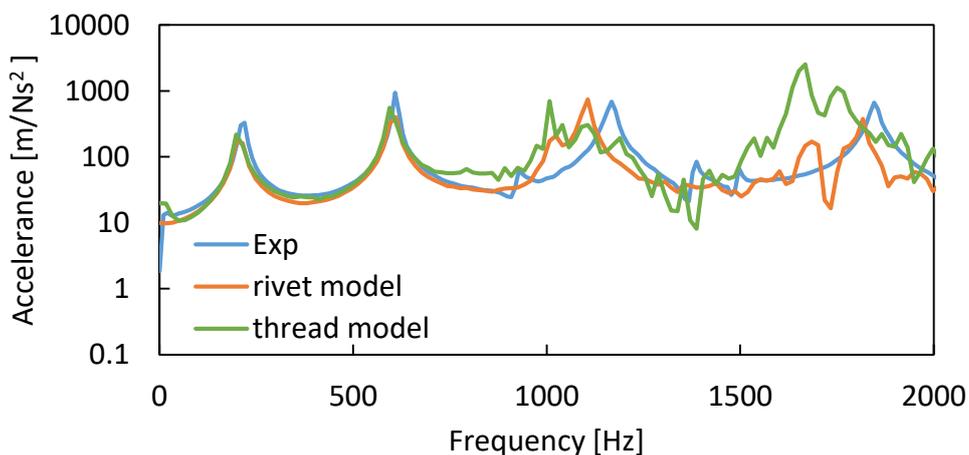


図 2-19 せん断継手 (丸穴) 加速度計②におけるアクセランス

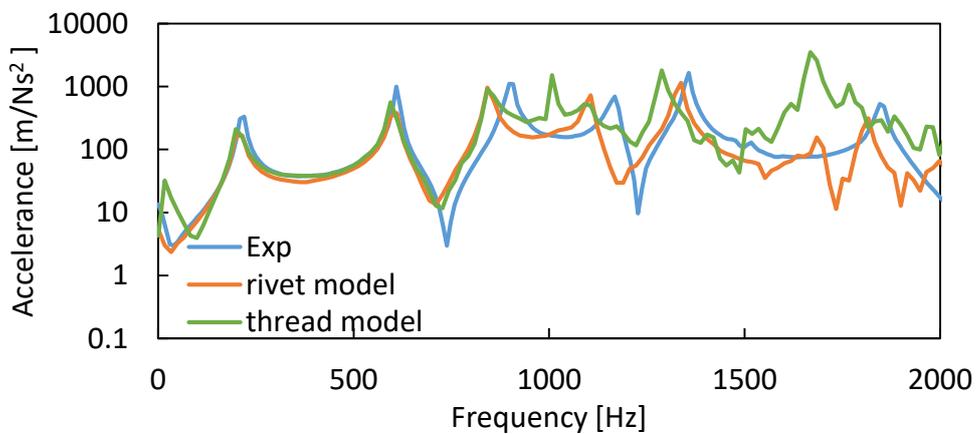


図 2-20 せん断継手 (丸穴) 加速度計③におけるアクセランス

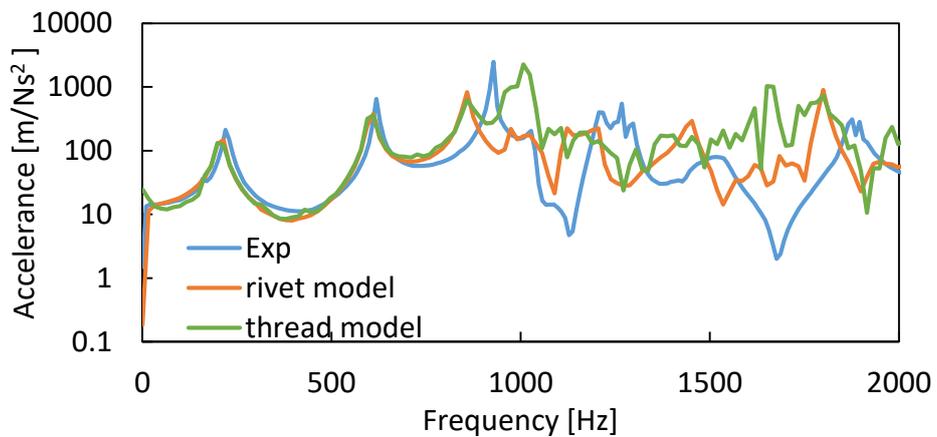


図 2-21 純せん断継手（丸穴） 加速度計①におけるアクセランス

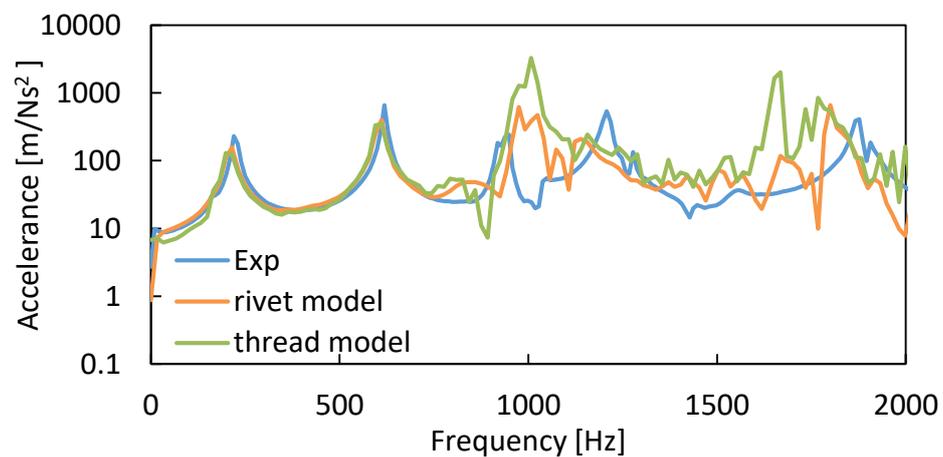


図 2-22 純せん断継手（丸穴） 加速度計②におけるアクセランス

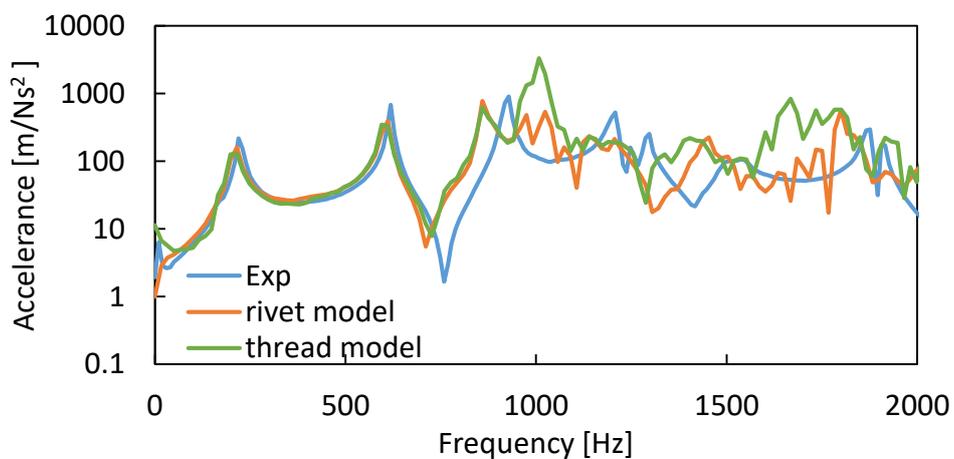


図 2-23 純せん断継手（丸穴） 加速度計③におけるアクセランス

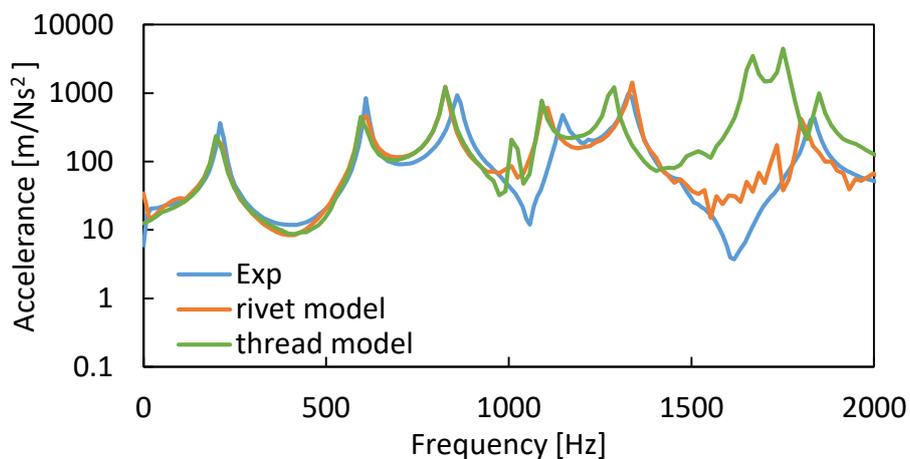


図 2-24 せん断継手（横方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス

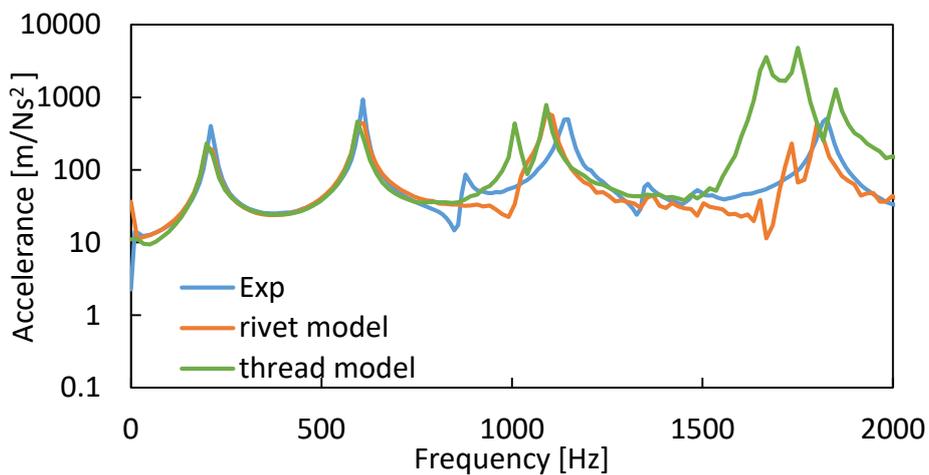


図 2-25 せん断継手（横方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス

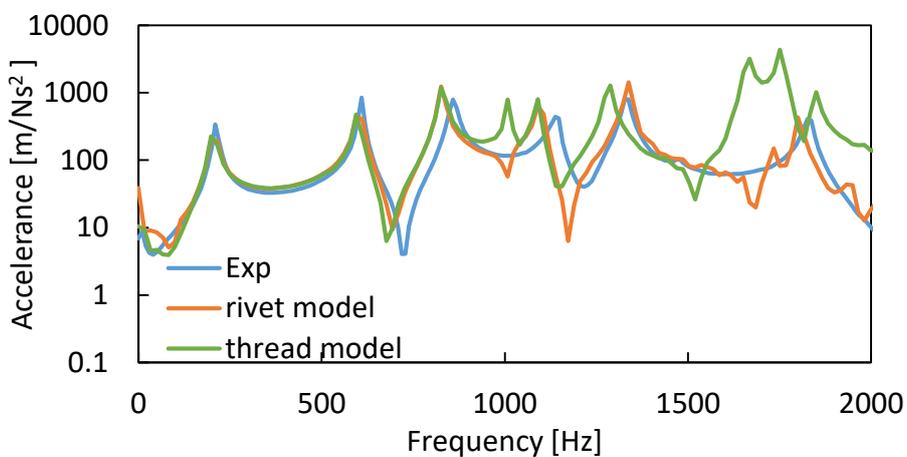


図 2-26 せん断継手（横方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス

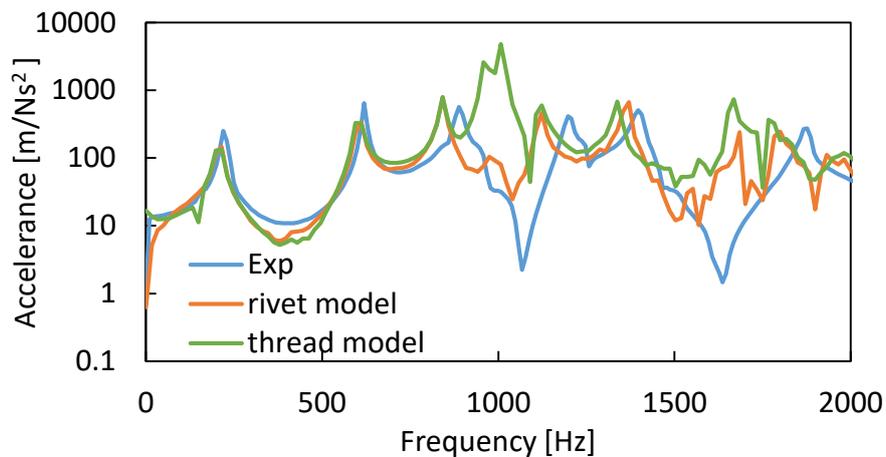


図 2-27 純せん断継手（横方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス

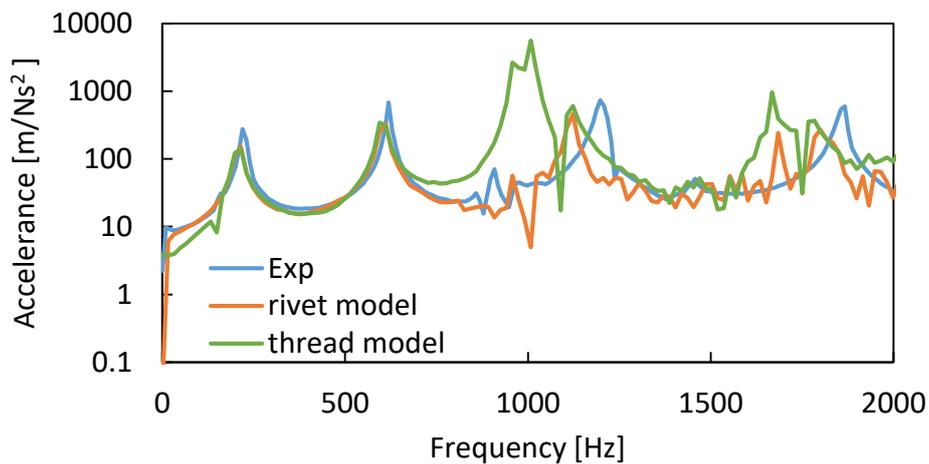


図 2-28 純せん断継手（横方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス

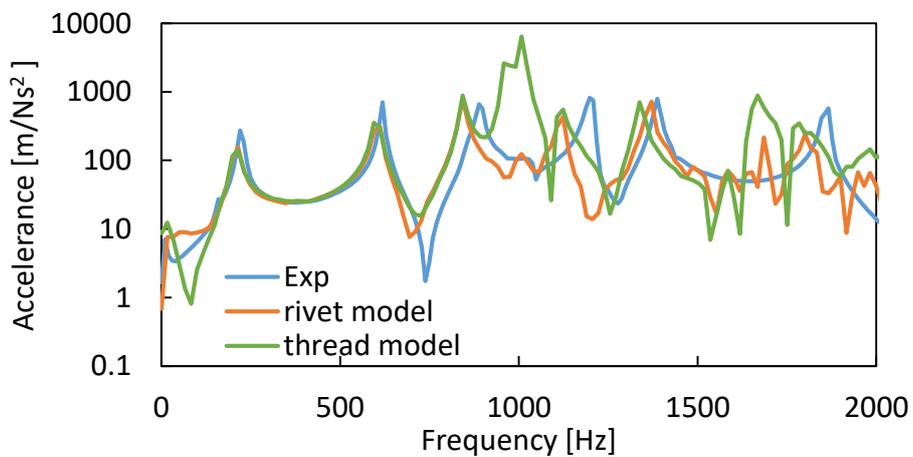


図 2-29 純せん断継手（横方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス

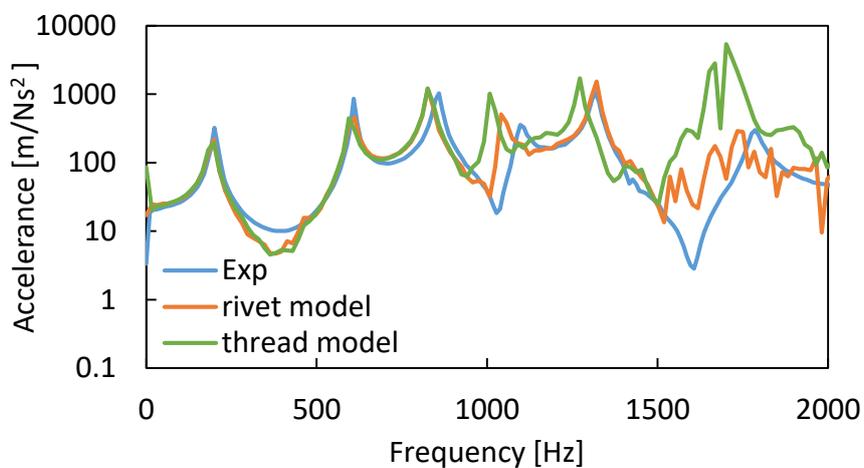


図 2-30 せん断継手（縦方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス

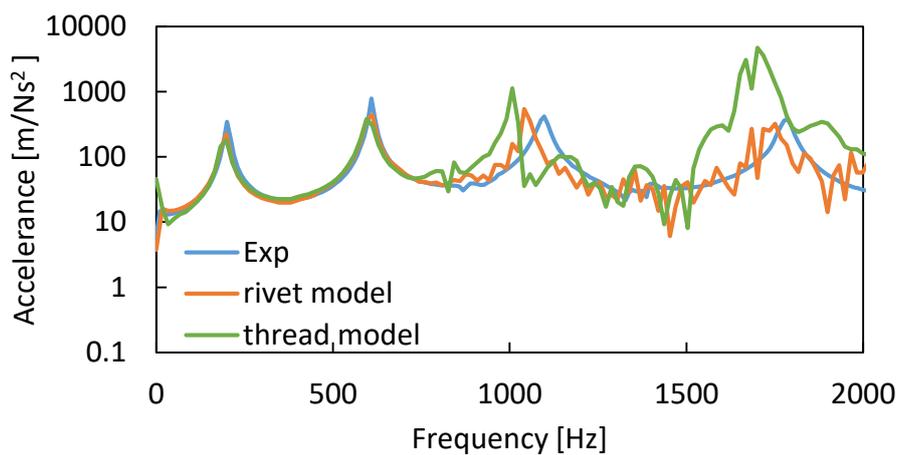


図 2-31 せん断継手（縦方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス

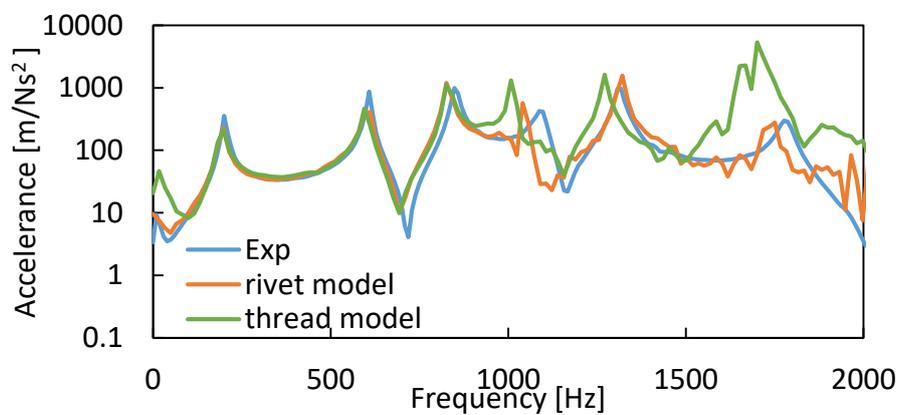


図 2-32 せん断継手（縦方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス

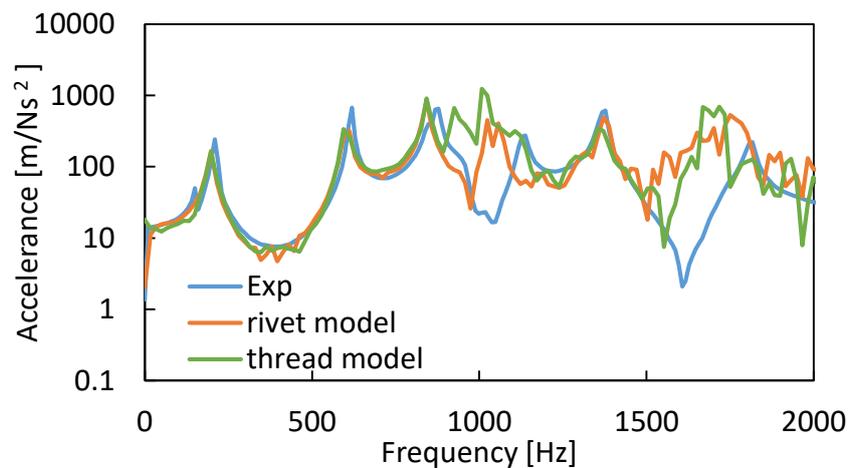


図 2-33 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス

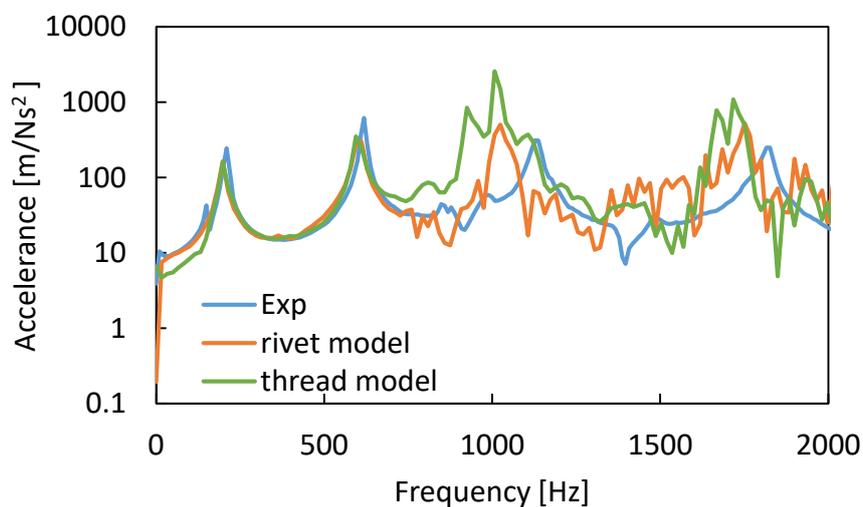


図 2-34 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス

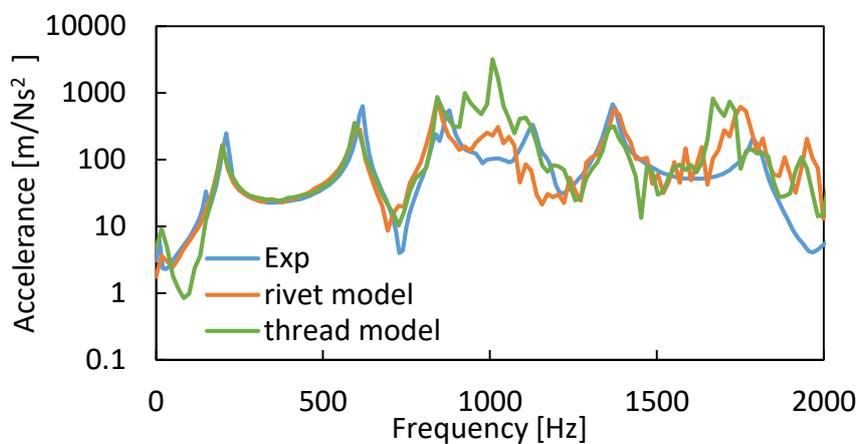


図 2-35 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス

2.5 考察

2.5.1 試験における誤差

試験の比較について丸穴のせん断継手を図 2-36 に、純せん断継手を図 2-37 に示す。Exp1 が 1 回目に行った試験，Exp2 が 2 回目に行った試験結果である。丸穴の試験は 2 回行われたが、長穴の試験は 1 回のみ行われた。本論文において、丸穴については 2 回目に行った Exp2 を、長穴については 1 回のみ行ったものを試験結果として使用している。せん断継手、純せん断継手共にアクセランスの概形は同じであるものの、高周波領域になるほど周波数のずれが大きく出ている。

試験によって周波数応答特性にずれが生じる原因として、本研究における試験では断熱材の上に置いているため、置き加減のわずかな違いにより振動特性に違いが生じたと考えられる。試験のサンプルはこの 2 回のみであるため断定することはできないが、特に本試験においては試験片が周りから反力を極力受けないように注意する必要があり、その難しさゆえに実験の誤差が大きく出たと考えられる。

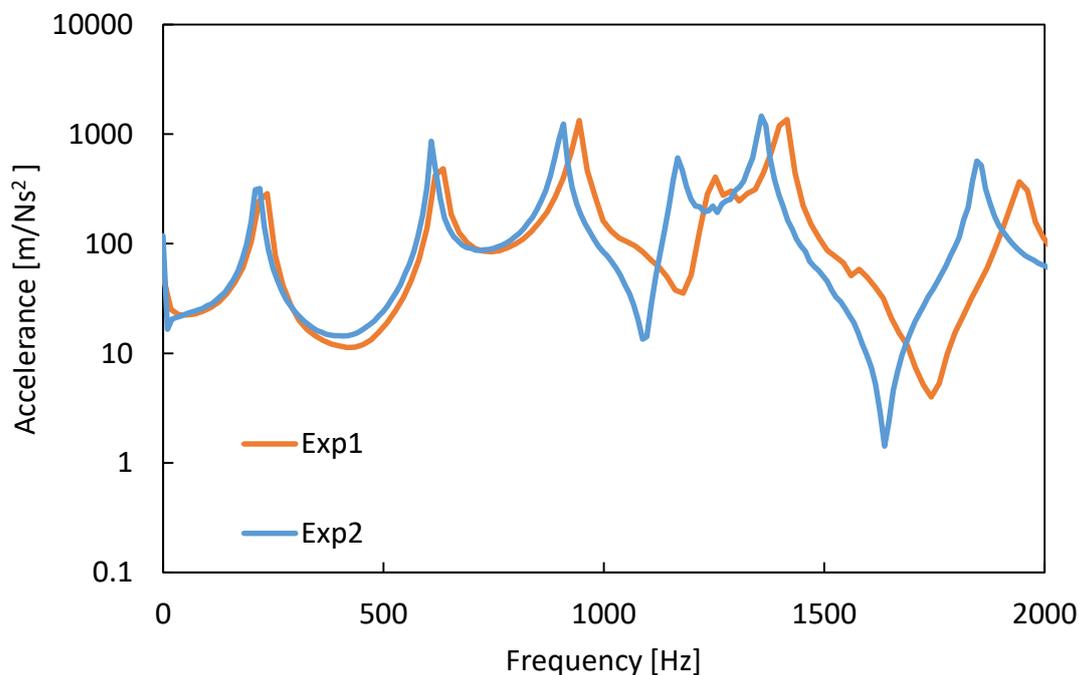


図 2-36 せん断継手（丸穴） 試験 加速度計①におけるアクセランス

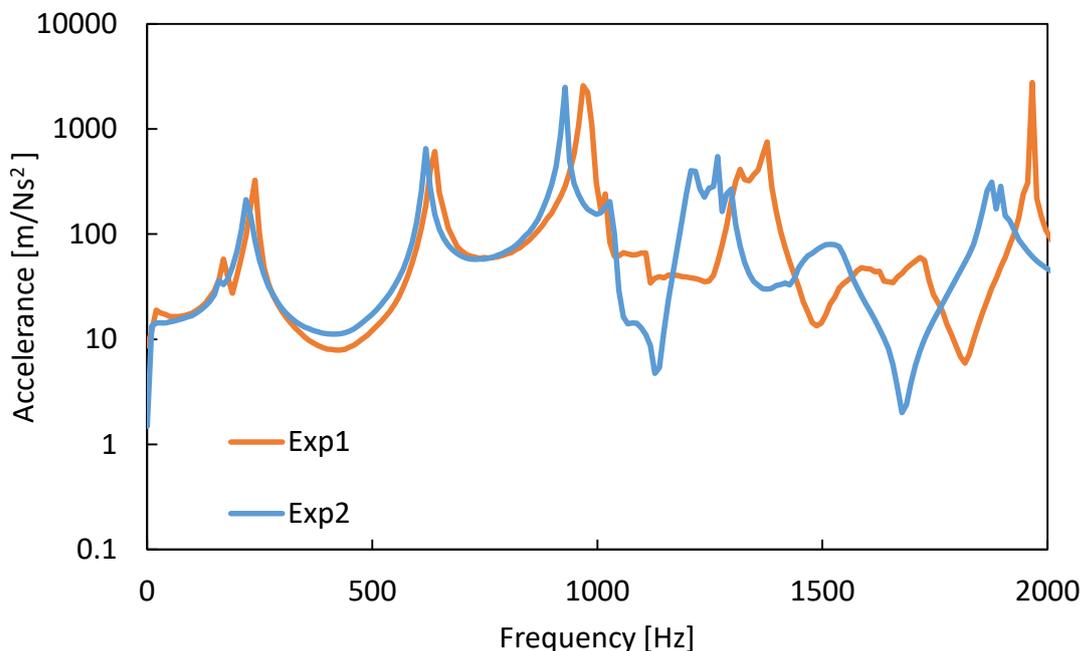


図 2-37 純せん断継手（丸穴） 試験 加速度計①アクセラランス

2.5.2 ねじ山モデルについて

試験とねじ山モデルでの解析を比較すると、解析では高周波領域での周波数の乱れが大きく、ピークがはっきりと出ていないものが多い。考えられる原因として、ボルト、ナット部にねじ山を詳細に再現したことによって、接触面積が大幅に増大し、接触を考慮した解析が複雑化したからだと考えられる。

もしくは、ねじ山モデルの打撃を模擬した荷重を入力する解析において、図 2-38 に示したように、荷重を入力するタイミングは 10msec であるが、それ以前の 9msec 付近に着目するとすでに振動がわずかに発生している。つまり、何らかの原因で打撃荷重を入力する前に振動が発生し、その振動がねじ山モデルの解析結果、特に高周波領域のアクセラランスに影響を及ぼしたとも考えられる。

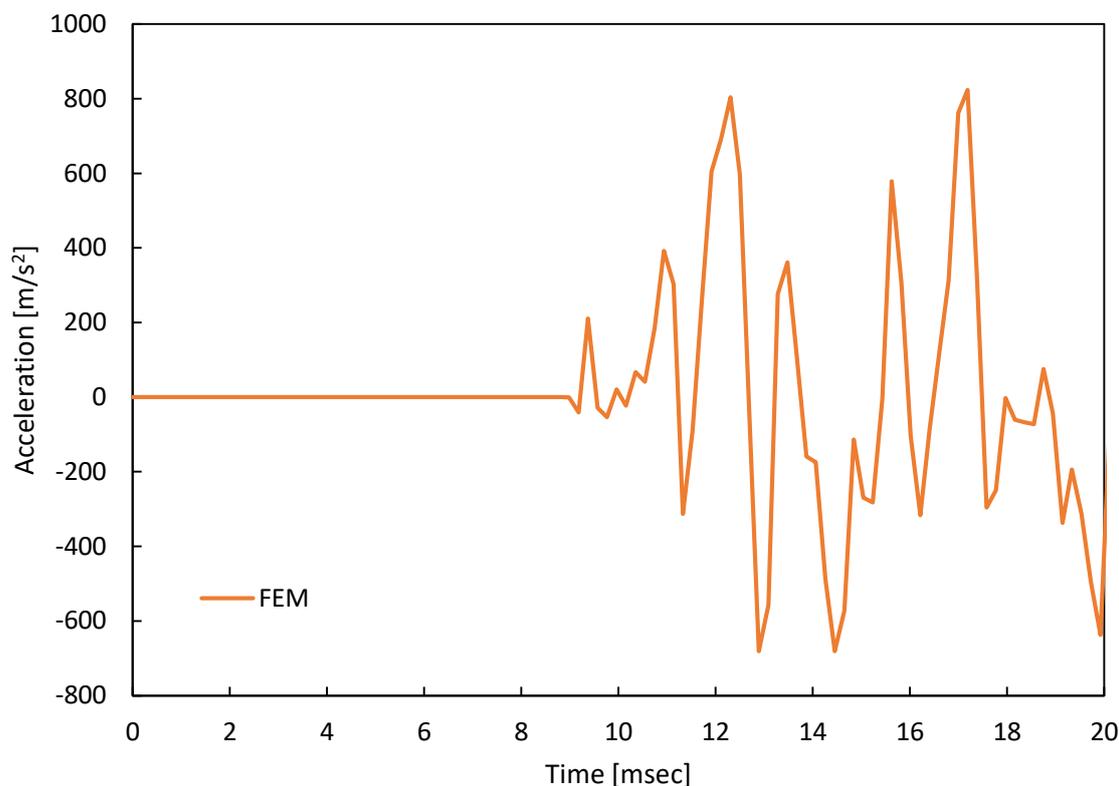


図 2-38 図 2-15 の 0msec から 20msec における拡大図

2.5.3 リベットモデルについて

試験とリベットモデルでの解析を比較するとアクセラランスの概形は一致しているものの、2次のピーク以降、試験片形状、加速度計位置によらず全体的に低周波側にずれており、特に長穴形状よりも丸穴のせん断継手、純せん断継手において顕著に見られるが、長穴の場合は高次のピークにおいても高い精度で一致しているものもあり、一概に低周波側にずれるとは言い切れない。

しかし、2.5.1 で述べた通り試験にも誤差が生じているため、ねじ山モデル、リベットモデルのどちらが実現現象に近いか断定することは困難である。

また、リベットモデルは、試験よりもねじ山モデルに近い周波数応答特性を示しており、特に 1000Hz より小さい低周波領域ではほとんど一致している。ねじ山の有無に関わらず同様の傾向を示す原因として、今回の試験ではボルト締結部から大きく離れた位置で荷重の入力および加速度の測定を行ったため、被締結材自体の特性の方が大きく表れ、ボルト締結部の特性の影響は小さかったからだと考えられる。

2.6 結言

本章では、丸穴、長穴形状のリベットモデルおよびねじ山モデルの周波数応答特性を比較した。リベットモデル、ねじ山モデル共に試験片形状、加速度計位置によらず 600 Hz 付近の 2 次のピークまでは高い精度で一致した一方で、1000Hz 以降の高周波領域でずれが出ており、リベットモデル、ねじ山モデル共に概ね低周波側にずれる傾向を示したが、試験の不確定性のためと考えられる。

第3章 ボルト頭打撃時における振動特性の評価

3.1 緒言

本章では、ねじ山の有無が大きく影響すると考えられるボルト頭部を打撃加振し、締付トルクをパラメータとして、リベットモデルとねじ山モデルで周波数応答特性の比較を行った。

3.2 目的および手法

ボルト締結部の緩みを点検する方法として、ハンマー打撃法や超音波法、トルク管理法などがある。本章で解析を行うハンマー打撃法はボルトやナットを打撃し、音響の変化でボルト締結の緩みを検出する方法である。ハンマー打撃法は特別な機器を必要としないことから他の点検法よりも安価、簡便であり、検査速度も速いという利点があるが、作業者の経験や裁量により判断基準も異なることから、客観性に欠ける部分もある。

そこで行徳ら [7]は、ボルト締結の緩みと打撃音の関係を定量的に比較し、周波数応答特性の違いが現れることを確認した。

本章ではボルト締結の緩み、つまり締付トルクの違いにより打撃音が異なるとされるが、ねじ山を省略したリベットモデルと詳細に再現したねじ山モデルで大きく周波数応答特性の違いが現れるか検証することを目的とする。

3.3 解析条件

丸穴のせん断継手について、第2章と同様の解析条件で過渡応答解析を行うが、打点および測定する加速度の位置を変更した。打点、および加速度計は図 3-1 の通りである。第2章で用いた加速度計に加えてボルト頭の位置のものを加速度計④とした。解析結果は加速度計②、④についての結果を考察する。また解析はリベットモデルとねじ山モデルについて、締付トルクを 30Nm, 23.5Nm, 20Nm, 10Nm, 5Nm, 0Nm の6種類、計 12 種類のモデルで行った。なお、本章では試験は行わず解析のみの比較となっている。

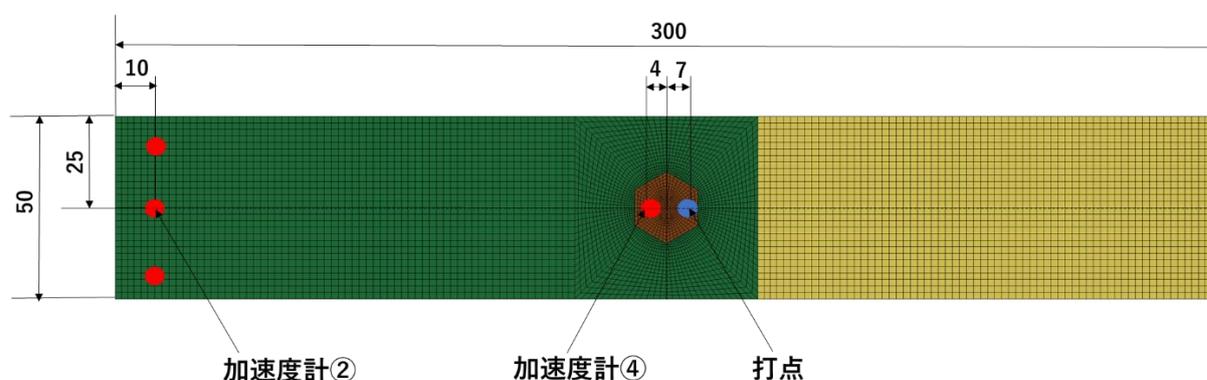


図 3-1 解析モデル形状

3.4 解析結果と考察

0Nm から 30Nm まで締付トルクを変化させた、リベットモデルでの加速度計②および④のアクセラランスの比較を図 3-2, 図 3-3 に、ねじ山モデルでの比較を図 3-4, 図 3-5 に示す。

リベットモデルでは締付トルクの違いによってわずかな違いはあるものの、大きな違いはなかった。一方、ねじ山モデルにおいて、加速度計②では高周領域において締付トルクが大きくなると、周波数が高くなるにつれてアクセラランスが大きくなる傾向にあり、また、加速度計④では締付トルクが大きくなると全体的にアクセラランスが大きくなった。

この結果から、締付トルクが大きくなると被締結材では音が高くなり、ボルト部では音が大きくなると考えられる。

しかし、実際には試験片のすべての位置での振動による音を合成した和音として聞こえるので、正確な音の違いを確認することはできないが、ねじ山の有無により振動特性の違いが現れることを確認した。

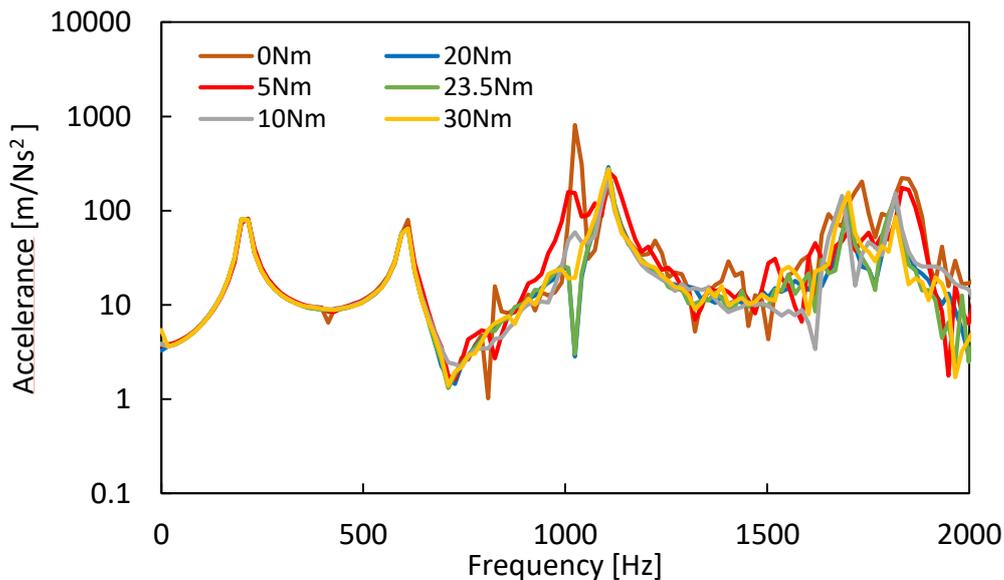


図 3-2 リベットモデルの締付トルクの違いによるアクセラランス比較 加速度計②

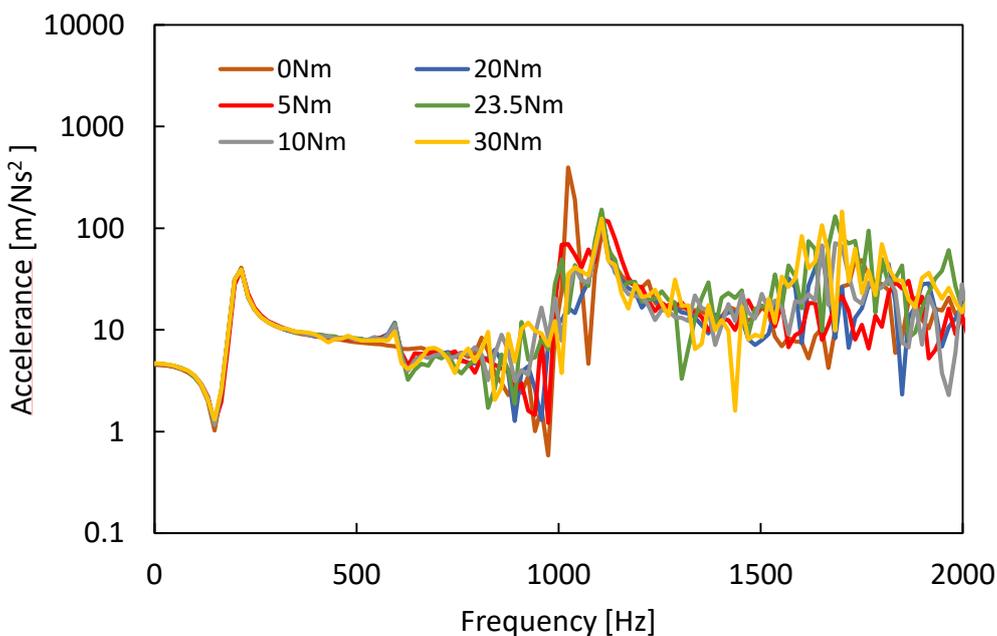


図 3-3 リベットモデルの締付トルクの違いによるアクセラランス比較 加速度計④

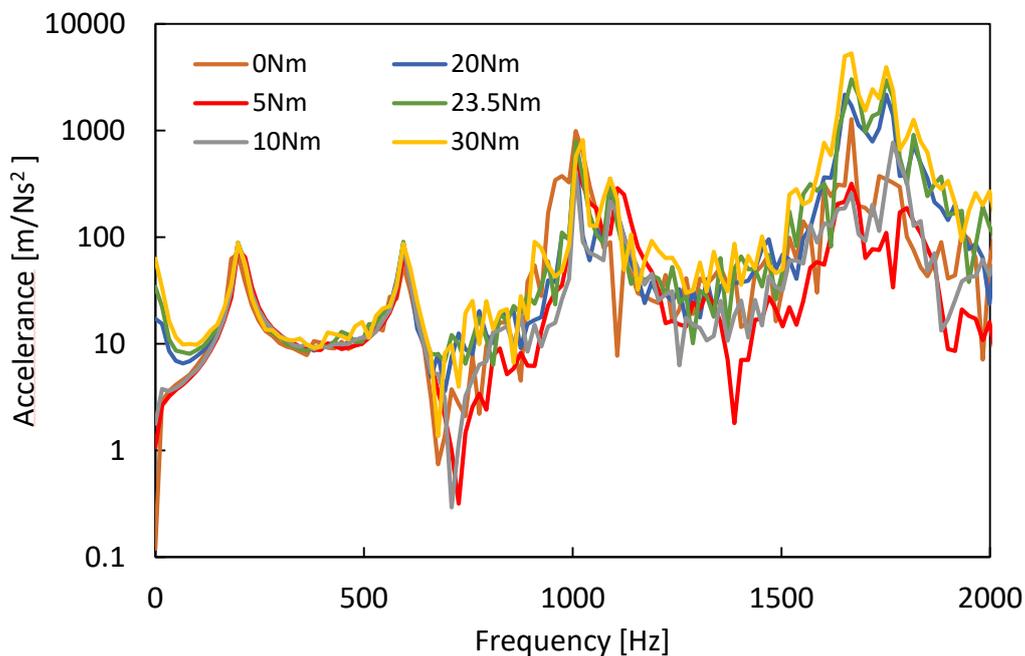


図 3-4 ねじ山モデルの締付トルクの違いによるアクセラランス比較 加速度計②

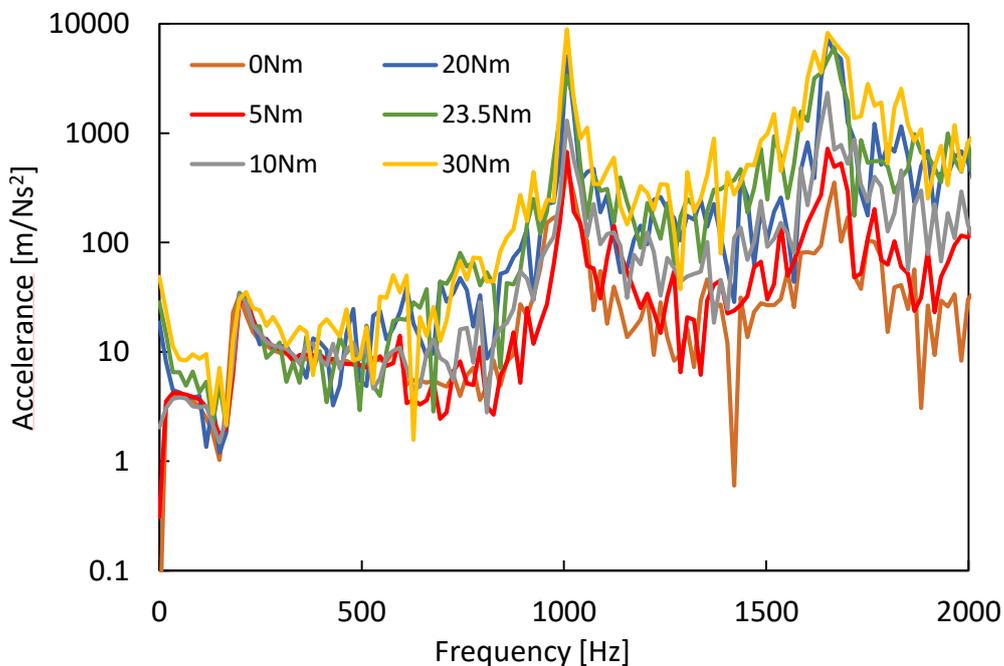


図 3-5 ねじ山モデルの締付トルクの違いによるアクセラランス比較 加速度計④

3.5 結言

本章では、ボルト締結体モデルのボルト頭部を打撃加振し、締付トルクをパラメータとして、リベットモデルとねじ山モデルで周波数応答特性の比較を行った。ねじ山のないリベットモデルでは締付トルクを変化させても周波数応答特性に大きな違いはなかったが、ねじ山を再現したねじ山モデルでは音の大きさや高さが増えると考えられ、ねじ山の有無により振動特性に違いが現れることを確認した。

第4章 柳原の簡易モデルの予測精度確認

4.1 緒言

本章では，柳原 [4]の先行研究において提案された簡易モデルについて，モード解析および打撃試験を行い，実験値と比較しその予測精度を確認する．なお，殿垣 [5]の先行研究においては未適用だった，長穴のモデルについても解析を行った．

4.2 柳原の簡易モデル [4]

ボルト締結体の簡易モデリング手法として，中立面シェルモデルがある．被締結体をシェル要素，ボルト締結をビーム要素として結合する [8]．この手法における問題点として，ボルトが負荷する荷重全てを結合点が支持することとなり，シェル要素が局所的に変形してしまう点が挙げられる．

そこで，ボルト締結部近傍の局所変形を抑えるために成瀬らによって考案された簡易モデリング手法が，スパイダーモデル [2] [3]である．この手法において，ボルトが負荷する荷重を被締結体が中立面上で受け持つ領域を等価座面領域と設定し，その内部を剛体として拘束することで局所変形を抑えている．

ボルトの締結力により圧縮応力が伝わる被締結体の領域，すなわち等価圧縮体は有孔円錐体形状でモデリングされる(図 4-1)．等価圧縮体の円錐角 ϕ は板厚 t が同じ場合，成瀬ら [9]によって式 (4-1) のように定式化されている．

ここで， l_f は締付け長さ， d_w はボルト頭径， D_c は被締結体の外径である．

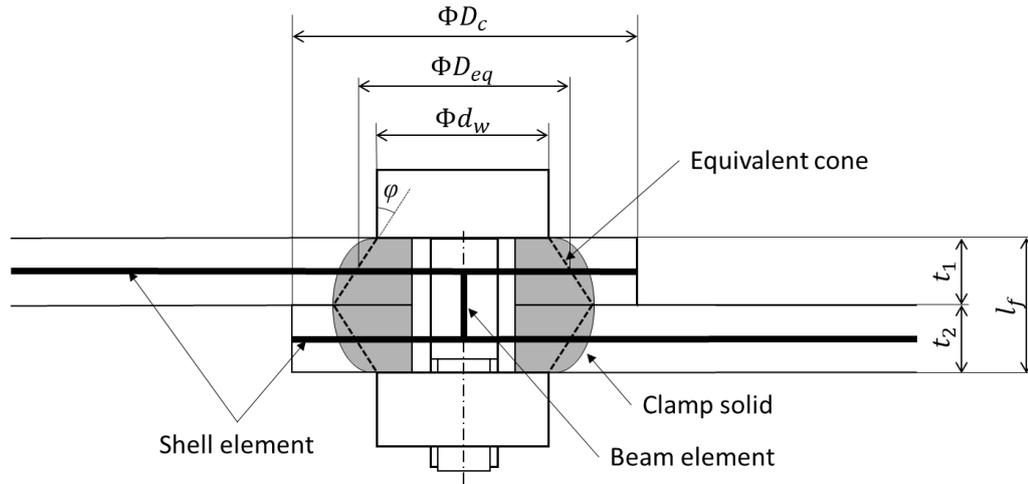


図 4-1 等価圧縮体とせん断継手 [5]

$$\tan \phi = 0.323 + 0.032 \ln \left(\frac{l_f}{2d_w} \right) + 0.153 \ln \left(\frac{D_c}{d_w} \right) \quad (4-1)$$

式 (4-1) より中立面上の等価圧縮体断面，すなわち等価座面領域径 ΦD_{eq} は，ボルト頭もしくはナットから中立面までの距離を l_d とおくと幾何的に式 (4-2) のように求まる。

$$D_{eq} = d_w + 2l_d \tan \phi \quad (4-2)$$

柳原の簡易モデルでは，等価座面領域はせん断力を受けたとき，被締結体間接触面から面内方向への摩擦を受けつつ，弾性体として等価座面領域外と共に変形すると考えられる．そこで，ビーム節点と等価座面領域内節点の面内方向に関する自由度を RBE3 (Rigid Body Element 3 : 補間剛体要素) によって定義することで，等価座面領域の面内方向変形を許容する。

RBE3 では，主節点对従節点セットで拘束方程式を定義し，主節点の並進・回転自由度が従節点の並進自由度の線形結合によって表されており，主節点の運動が従節点セットの運動の平均となるように拘束方程式の係数を決定する． 図 4-2 に主節点と従節点の位置関係を示す．等価座面領域半径内にある全ての従節点 (Node Set 1) と主節点の間に式 (4-3) で示される拘束方程式を定義する．

$$\begin{aligned} u_x^m &= \sum \alpha_{xi} u_{xi}^s + \sum \alpha_{yi} u_{yi}^s \\ u_y^m &= \sum \beta_{xi} u_{xi}^s + \sum \beta_{yi} u_{yi}^s \\ r_z^m &= \sum \gamma_{xi} u_{xi}^s + \sum \gamma_{yi} u_{yi}^s \end{aligned} \quad (4-3)$$

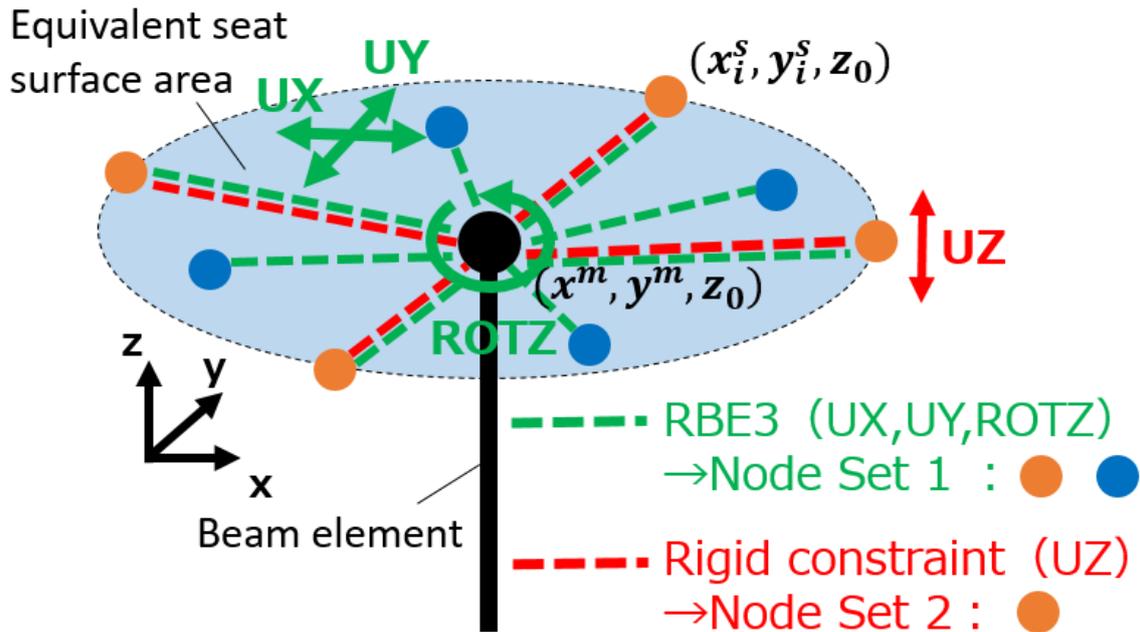


図 4-2 柳原の簡易モデルの拘束関係 [4]

また、被締結体中立面シェル同士を結ぶビーム要素には、ボルトと等価圧縮体が一体の弾性体として振る舞うとの考え方からそれらの合剛性は定義され、継手の並進剛性に関しては Kou らによって定式化されており [10]、被締結体の横弾性係数 G_c 、板厚 t 、ボルト座面径 d_w 、等価圧縮体の円錐角 ϕ 、ボルト穴径 d_h 、被締結体間の負担荷重 F_c 、被締結体の摩擦係数 μ_p 、ボルトの初期締結力 P_{pre} を用いると、 i 枚目の被締結体の並進剛性 k_{pli} は以下のように表される。

$$k_{pli} = \frac{G_c}{4t} \pi ((d_w + 2t \tan \phi)^2 - d_h^2) \left(1 - \frac{F_c}{\mu_p P_{pre}}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (4-3)$$

よって、板厚が等しいせん断継手での等価ビームのせん断剛性 G_{1lap} は式 (4-5)、純せん断継手の等価ビームの横せん断剛性 G_{2lap} は式 (4-6) のように定義される。ここで、 t は板厚である。

$$G_{1lap} = \frac{1}{2} t k_{pli} \quad (4-5)$$

$$G_{2lap} = t k_{pli} \quad (4-6)$$

4.3 試験条件

試験は第 2 章で行った打撃試験に加えて、モード解析試験を行った。継手試験片の形状・寸法および材質は打撃試験と同様である。また、測定機器も同様に図 2-3 に示した通りである。継手試験片を非常に柔らかい断熱材の上に置いた自由支持とし、図 4-3 および図 4-4 に示した打点（せん断継手 26 点、純せん断継手 40 点）をそれぞれ 5 回ずつインパルスハンマーで打撃加振し試験を行い、固有モード及びその固有振動数を求めた。

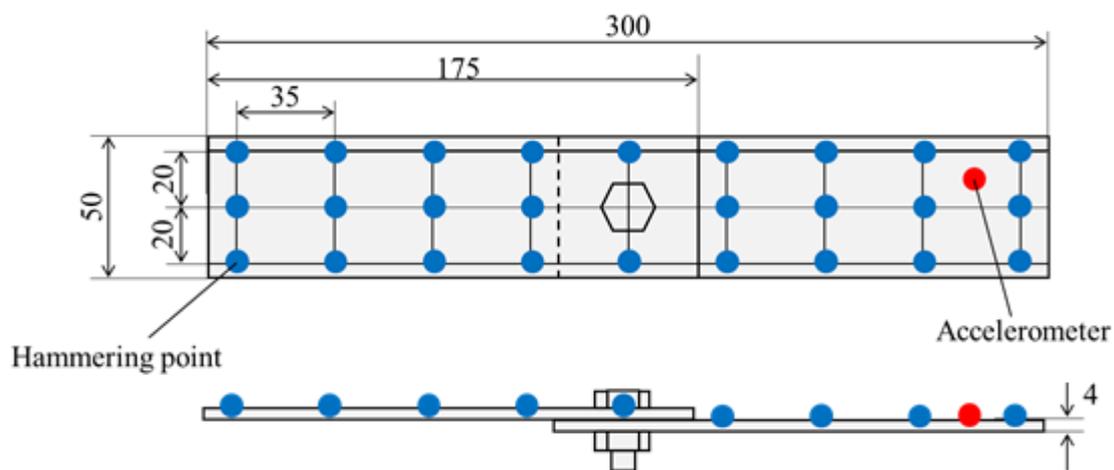


図 4-3 試験片形状 せん断継手

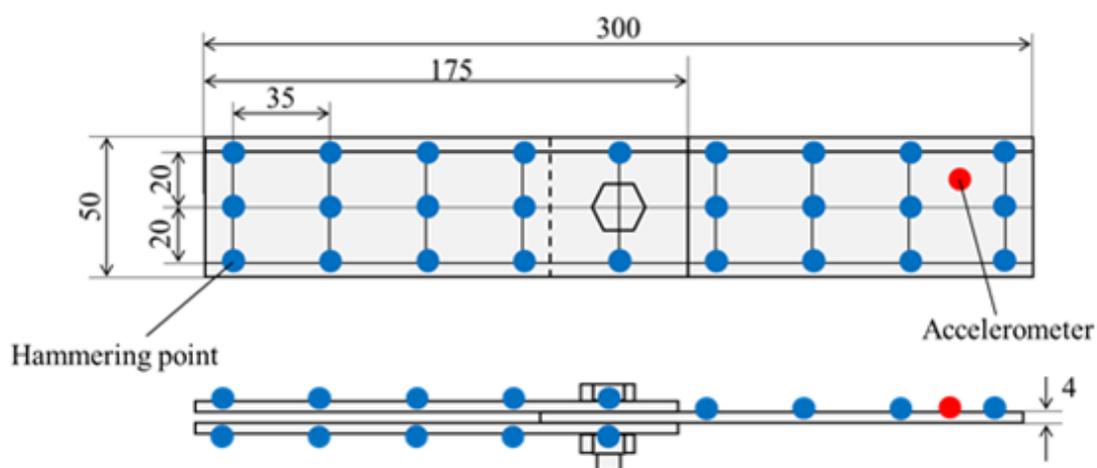


図 4-4 試験片形状 純せん断継手

4.4 解析条件

有限要素法解析ソフト ANSYS17.0 で柳原 [4]が作成した形状，メッシュデータを LS-DYNA に移行し，ビーム・シェル要素間の拘束を定義し直したものを解析した． ANSYS 等での RBE3 による拘束は LS-DYNA では*CONSTRAINED_INTERPOLATION という拘束に相当する．せん断継手，純せん断継手における等価座面領域径は，表 4-1 の通りである．モデルはすべて四辺形一次要素によってモデリングした．接触は定義しない線形解析である．

線形解析であるため，第 2 章での非線形解析では扱えなかったモード解析を行うことが可能である．モード解析では固有モードおよびその固有振動数を求めた．

また，打撃試験を模擬した過渡応答解析は第 2 章で用いた方法を踏襲し解析を行った．柳原の簡易モデルはボルト締結の締め付けを考慮したモデルとなっているため，軸力を発生させる解析は行わず，打撃を模擬した荷重を入力する解析のみ行った．減衰については 2.3.4 で述べた，レイリー減衰であり，一定の値 ($D_s=85$ ， $COEF=0.05$) を用いた．

殿垣の先行研究 [5]においては，丸穴のせん断継手，純せん断継手のみに対してモード解析および周波数応答解析を行ったが，本研究では丸穴に加えて長穴のせん断継手，純せん断継手についてモード解析および過渡応答解析を行った．解析条件を表 4-2 に示す．なお，丸穴のせん断継手については同じモデルを用いているが，純せん断継手のビーム要素の物性値に一部誤りがあったため，正しい値に修正し解析を行った．解析モデルの例として図 4-5 に丸穴のせん断継手，図 4-6 に横方向長穴の純せん断継手のモデルを示す．

表 4-1 接手の等価座面領域径

	せん断継手	純せん断継手
1 枚目の被締結体の等価座面領域径 $D_{weq1}[mm]$	18.8	18.8
2 枚目の被締結体の等価座面領域径 $D_{weq2}[mm]$	18.8	22.5
3 枚目の被締結体の等価座面領域径 $D_{weq3}[mm]$	—	18.8

表 4-2 解析条件表

	丸穴		横方向長穴		縦方向長穴	
	せん断継手	純せん断継手	せん断継手	純せん断継手	せん断継手	純せん断継手
要素	四辺形一次要素					
要素数	17884	27209	17860	26792	17866	26805
モード解析	陰解法					
過渡応答解析	陽解法					
単位系	[mm][N][s]					



図 4-5 柳原の簡易モデル せん断継手（丸穴）

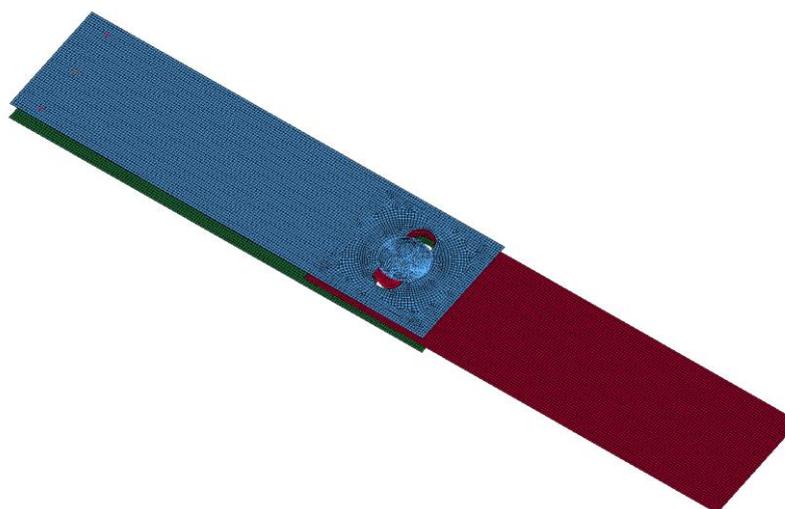


図 4-6 柳原の簡易モデル 純せん断継手（横方向長穴）

4.5 解析結果と考察

まず、モード解析について図 4-7 から図 4-18 に試験および解析の振動モード、表 4-3 から表 4-8 にモード形状ごとの固有振動数と実験値との誤差をまとめた。

せん断継手での振動モードは丸穴、長穴共に試験と解析ですべて一致した。

一方、純せん断継手では試験のみで見られる振動モードや、解析のみで見られる振動モードが観測された。試験のみで観測された振動モードは一つあり、丸穴の3次モードのみ解析で観測されなかった。しかし、解析の4次と5次のモードを重ね合わせると試験の3次のモードに対応すると考えられる。また、丸穴の1次6次7次8次モード、横方向長穴の1次6次モード、縦方向長穴の1次6次8次モードは解析において観測されなかった。ボルト側の板とナット側の板の振動が逆位相となるような曲げの振動モード（1次と6次のモード）が、試験において観測されなかった振動モードの共通点として挙げられる。

固有振動数の予測精度はせん断継手（丸穴、横方向長穴、縦方向長穴）では-3%から7%程度、純せん断継手（丸穴、横方向長穴、縦方向長穴）では-7%から10%程度となり、丸穴の純せん断継手のみ比較的誤差が大きくなった。また、ねじりのモードに対する予測誤差は大きくなる傾向があり、ねじりの場合曲げの場合よりも現象が複雑であるため誤差が大きくなったと考えられる。

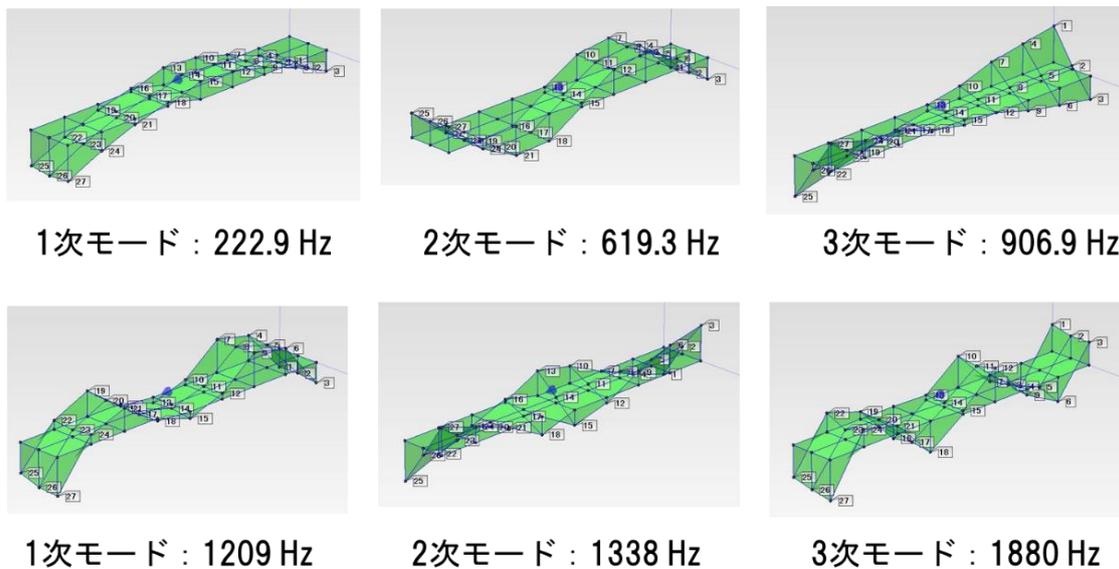


図 4-7 セン断継手 (丸穴) 試験 振動モード

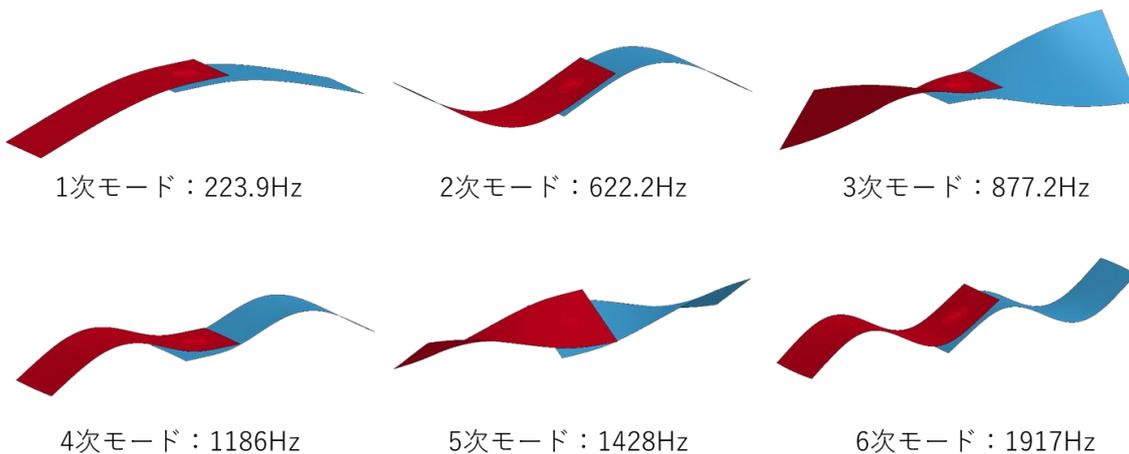


図 4-8 セン断継手 (丸穴) 解析 振動モード

表 4-3 セン断継手 (丸穴) 固有振動数

	1次	2次	3次	4次	5次	6次
試験 [Hz]	222.9	619.3	906.9	1209	1338	1880
解析 [Hz]	223.9	622.2	877.2	1186	1428	1917
誤差	0.4%	0.5%	-3.3%	-1.9%	6.7%	2.0%

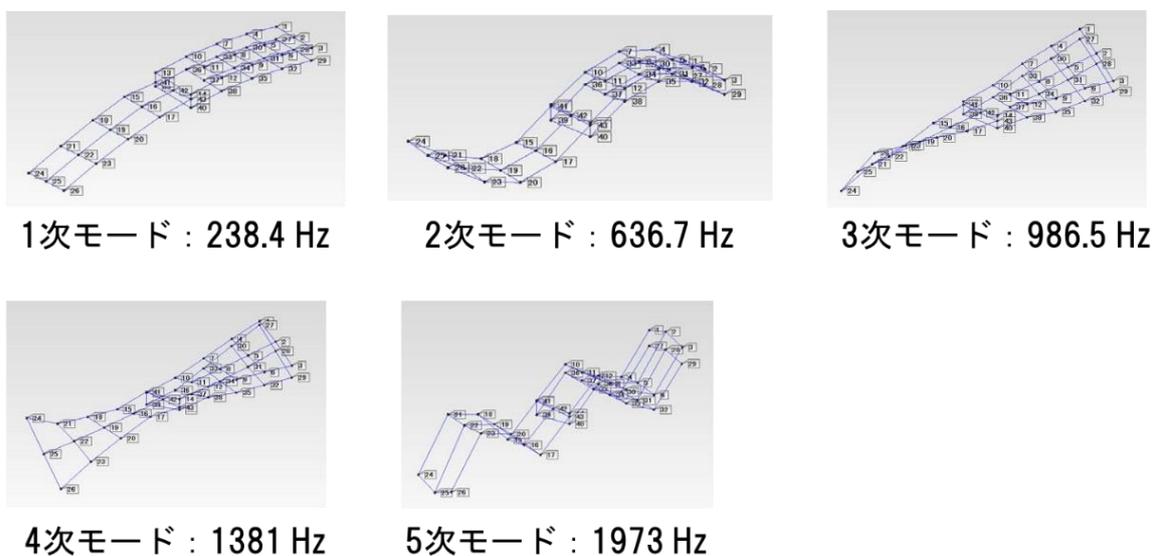


図 4-9 純せん断継手（丸穴） 試験 振動モード

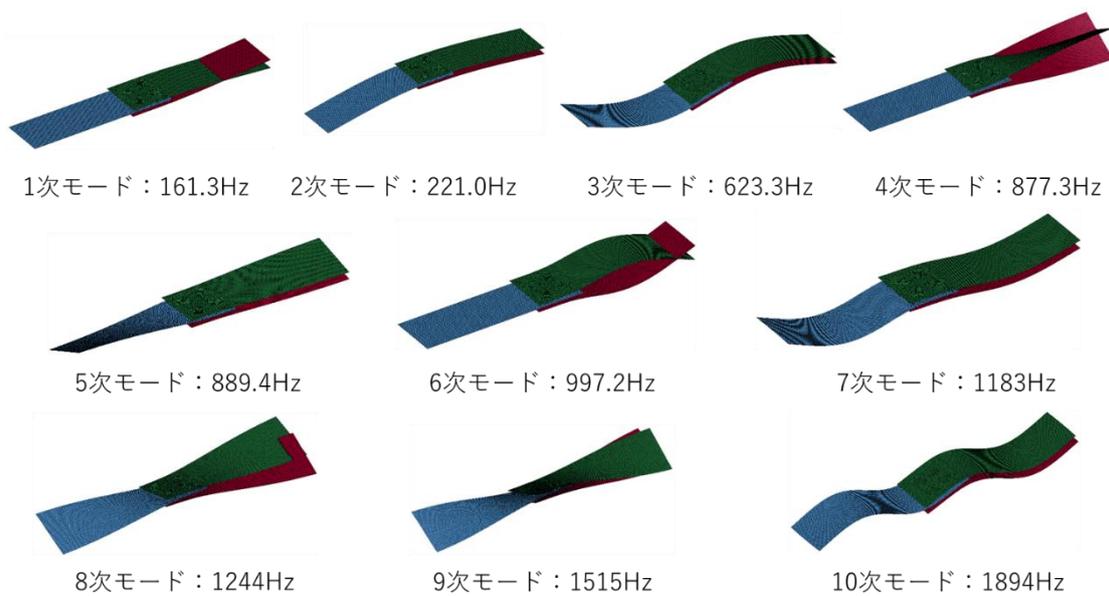


図 4-10 純せん断継手（丸穴） 解析 振動モード

表 4-4 純せん断継手（丸穴） 固有振動数

	1次	2次	3次	4次	5次
試験 [Hz]	238.4	636.7	986.5	1381	1973
解析 [Hz]	221	623.3	-	1515	1894
誤差	-7.3%	-2.1%	-	9.7%	-4.0%

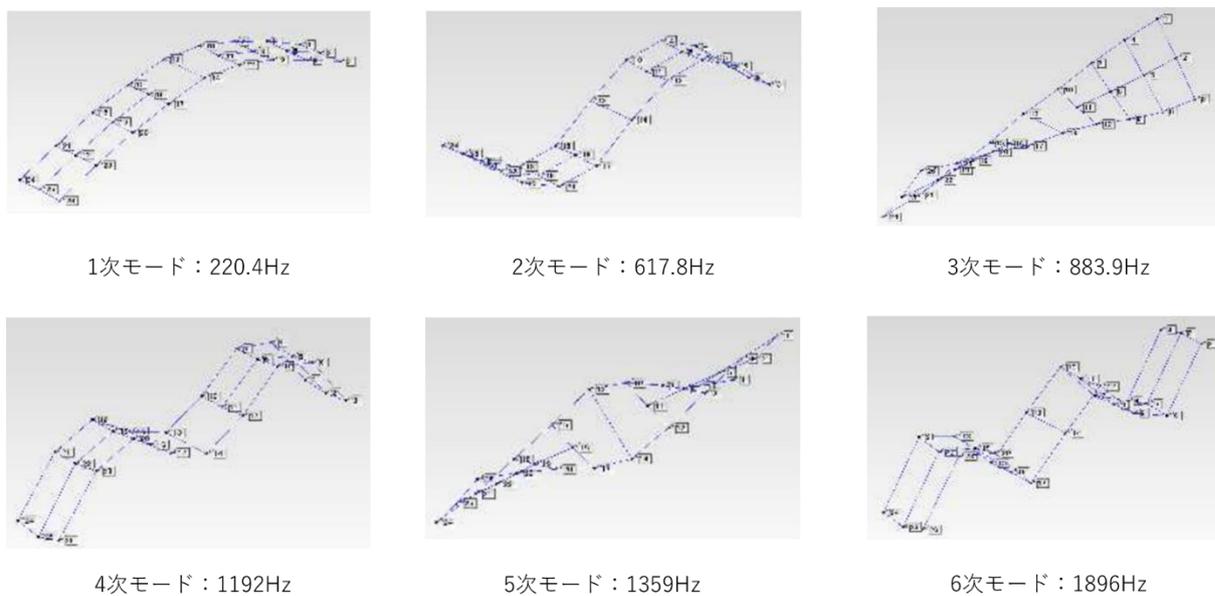


図 4-11 セン断継手（横方向長穴） 試験 振動モード

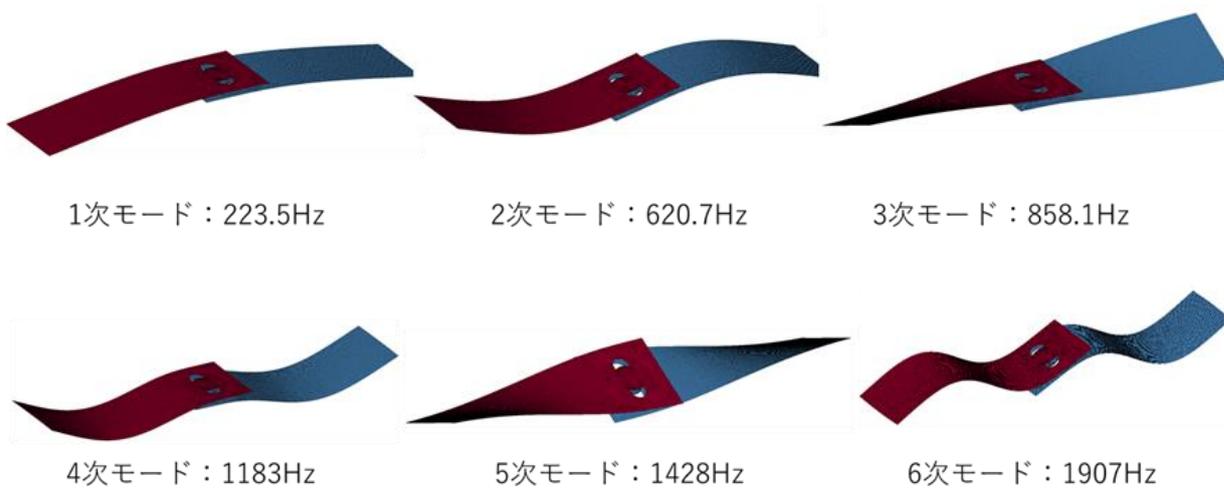


図 4-12 セン断継手（横方向長穴） 解析 振動モード

表 4-5 セン断継手（横方向長穴） 固有振動数

	1次	2次	3次	4次	5次	6次
試験 [Hz]	220.4	617.8	883.9	1192	1359	1896
解析 [Hz]	223.5	620.7	858.1	1183	1428	1907
誤差	1.4%	0.5%	-2.9%	-0.8%	5.1%	0.6%

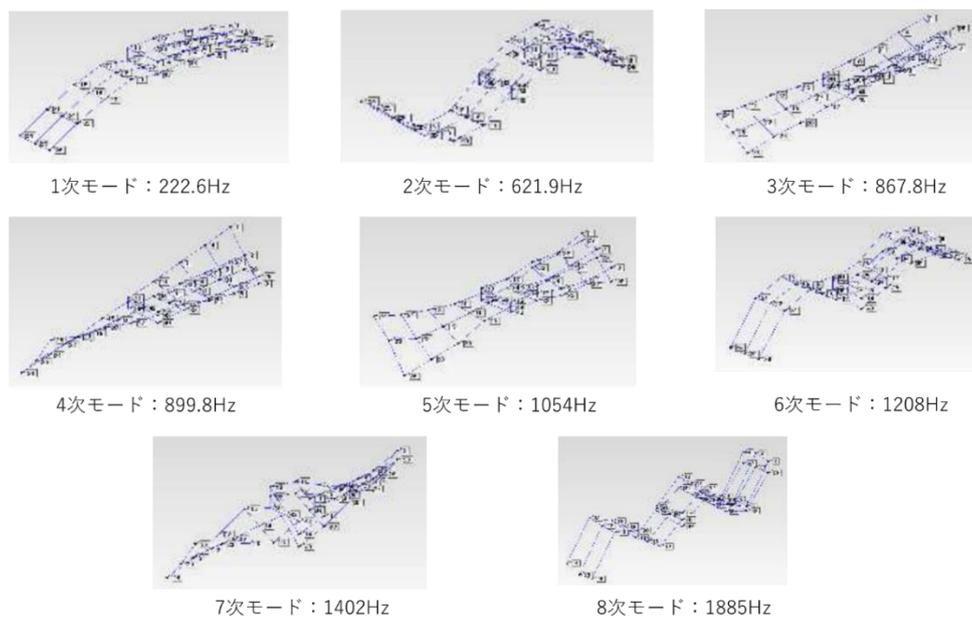


図 4-13 純せん断継手（横方向長穴） 試験 振動モード

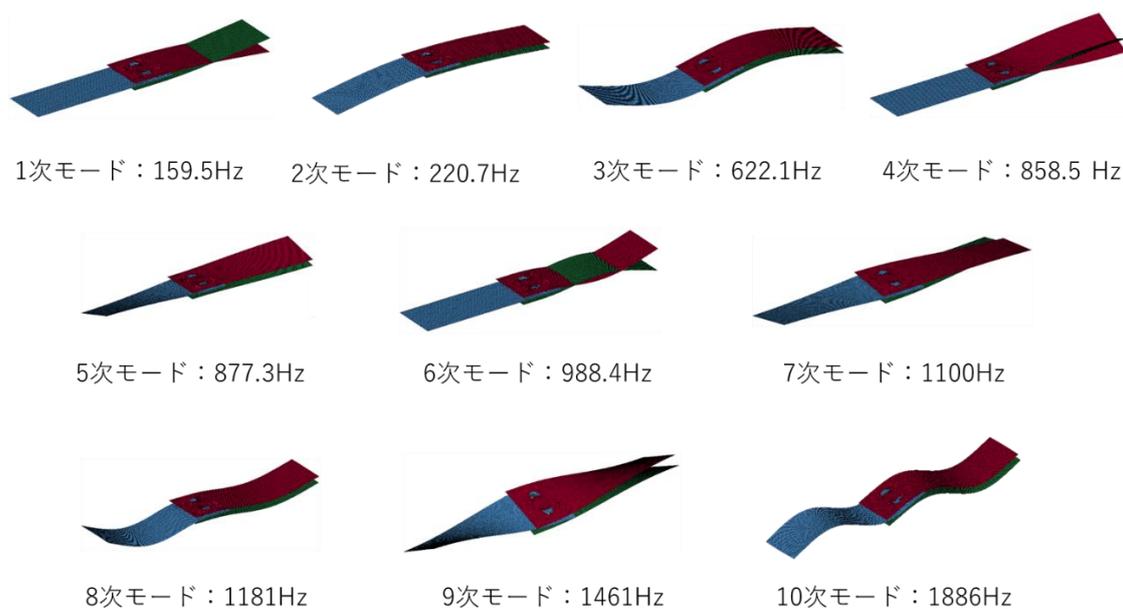


図 4-14 純せん断継手（横方向長穴） 解析 振動モード

表 4-6 純せん断継手（横方向長穴） 固有振動数

	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次
試験 [Hz]	222.6	621.9	867.8	899.8	1054	1208	1402	1885
解析 [Hz]	220.7	622.1	858.5	877.3	1100	1181	1461	1886
誤差	-0.9%	0.0%	-1.1%	-2.5%	4.4%	-2.2%	4.2%	0.1%

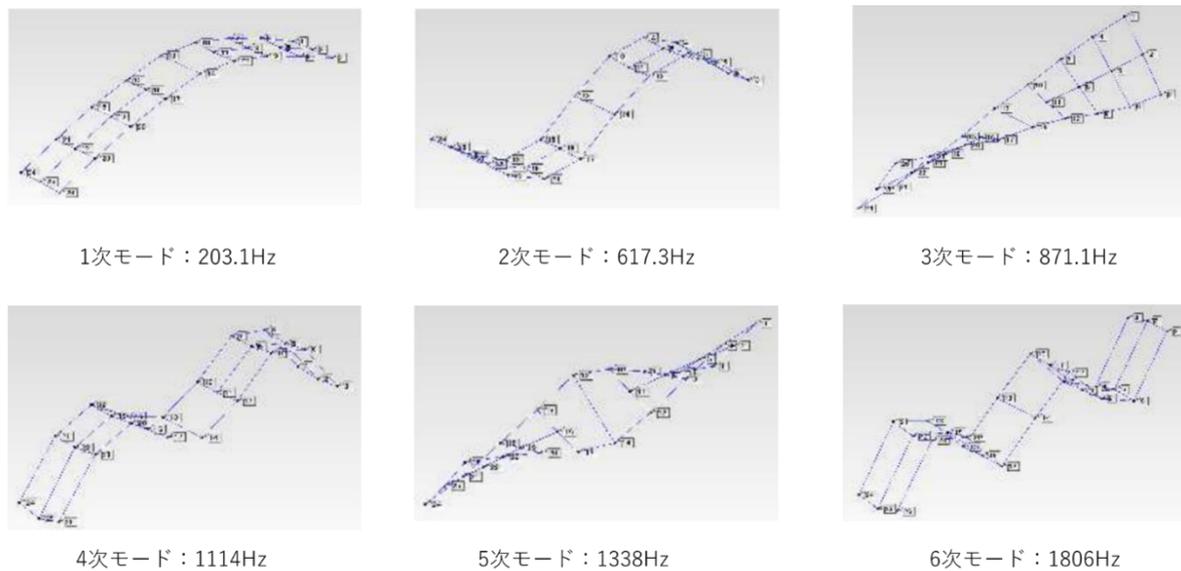


図 4-15 セン断継手（縦方向長穴） 試験 振動モード

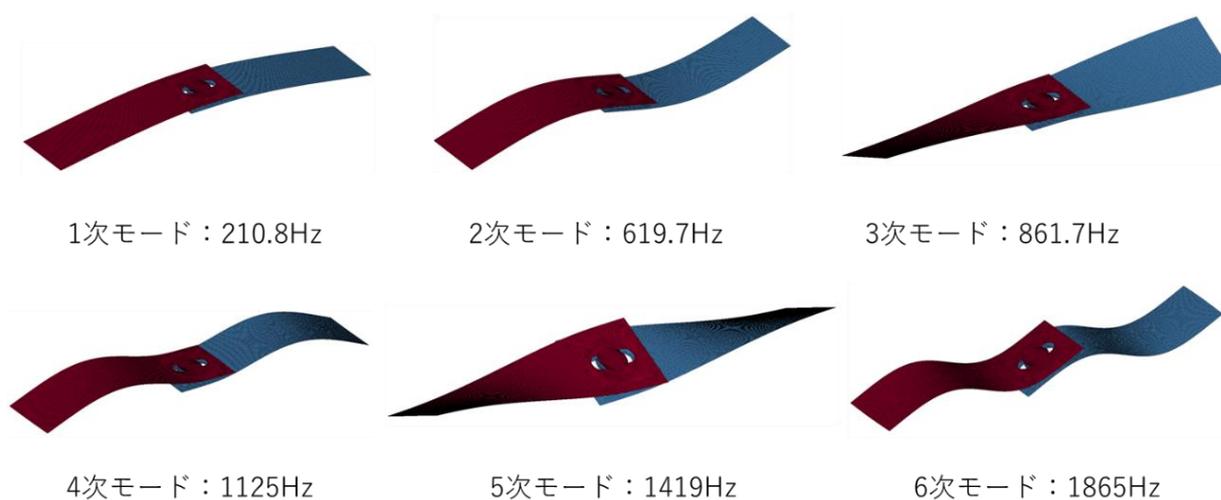


図 4-16 セン断継手（縦方向長穴） 解析 振動モード

表 4-7 セン断継手（縦方向長穴） 固有振動数

	1次	2次	3次	4次	5次	6次
試験 [Hz]	203.1	617.3	871.1	1114	1338	1806
解析 [Hz]	210.8	619.7	861.7	1125	1419	1865
誤差	3.8%	0.4%	-1.1%	1.0%	6.1%	3.3%

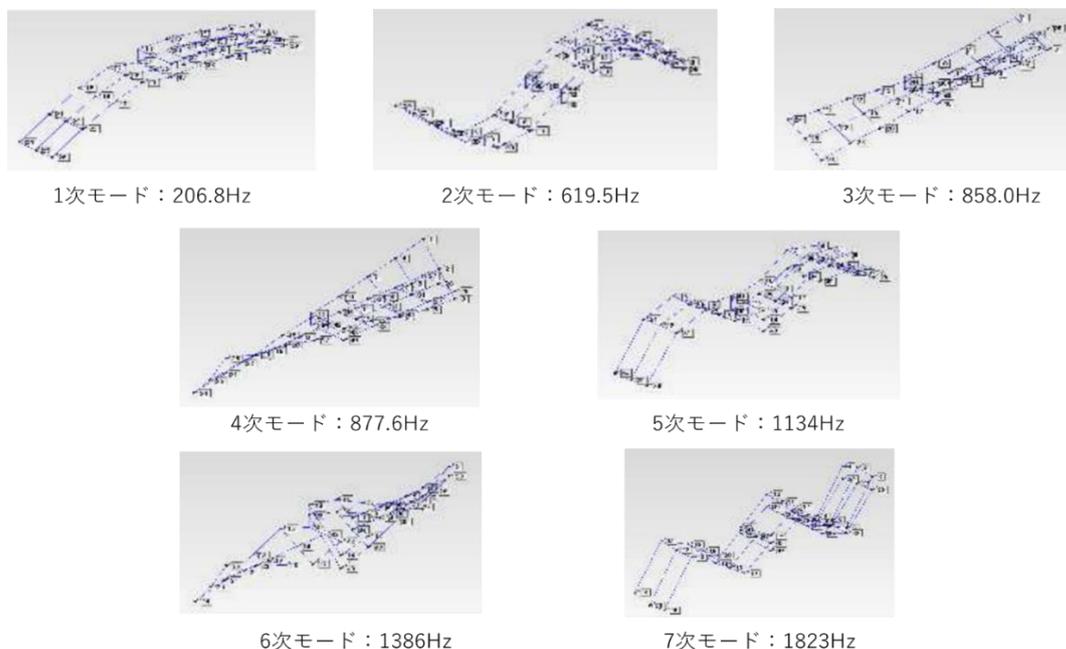


図 4-17 純せん断継手（縦方向長穴） 試験 振動モード

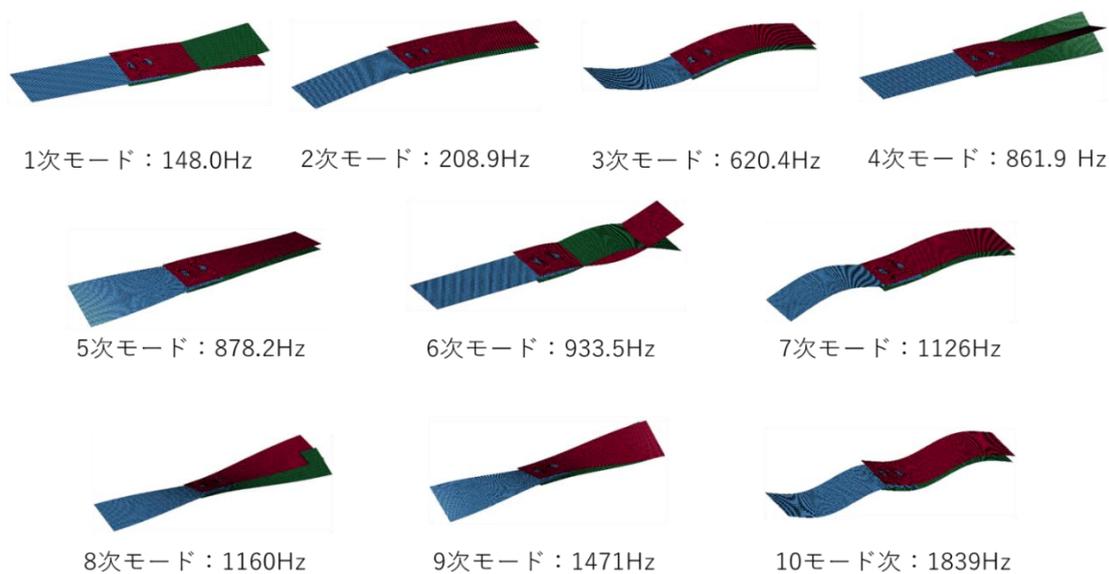


図 4-18 純せん断継手（縦方向長穴） 解析 振動モード

表 4-8 純せん断継手（縦方向長穴） 固有振動数

	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
試験 [Hz]	206.8	619.5	858	877.6	1134	1386	1823
解析 [Hz]	208.9	620.4	861.9	878.2	1126	1471	1839
誤差	1.0%	0.1%	0.5%	0.1%	-0.7%	6.1%	0.9%

次に、過渡応答試験とその解析について、図 4-19 に丸穴せん断継手の加速度計①の加速度履歴を示す。一部加速度が大きく出ている箇所はあるが、全体的な減衰は試験と解析で同様であった。

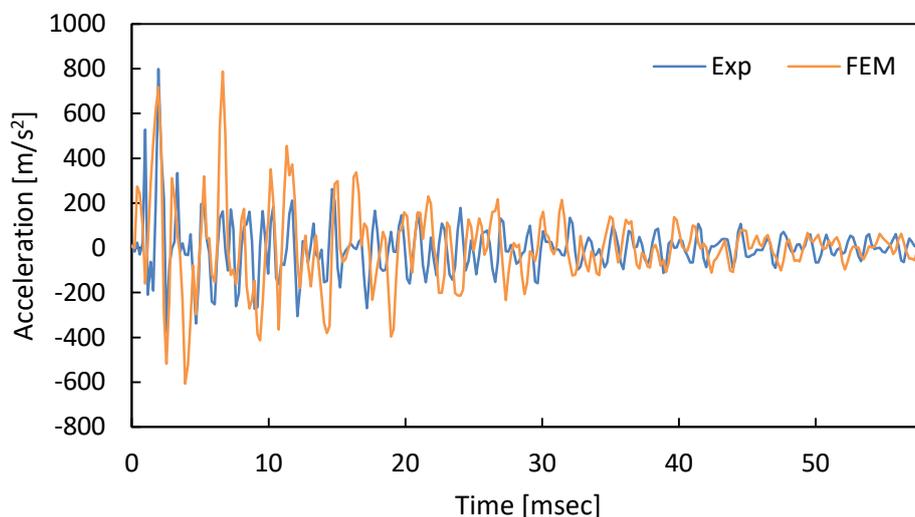


図 4-19 せん断継手（丸穴） 加速度計①

また、試験、および解析の丸穴長穴のせん断継手、純せん断継手について、加速度計①～③の位置のアクセラランスをそれぞれ図 4-20 から図 4-37 に示す。

加速度計①と③は試験片長手方向に関して対称の位置にあるため、似通った結果となっているが、加速度計②ではモード解析において 800 から 900Hz 付近で観測されたモードのピークが出ていない。考えられる原因として、その周波数における振動モードはねじりのモードであり、幅方向に関して中央の位置にあることにより節となっていたためピークが現れなかったと考えられる。一方、試験での縦方向長穴のせん断継手、純せん断継手以外の試験片において、加速度計②ではわずかにピークが現れており、解析とは異なり試験では完全に中央の位置で加速度を計測できないことに起因している。

試験片形状、加速度計の位置によらず、1次と2次の周波数のピークはほとんど一致した。また、約 1000Hz 以降の高周波領域で若干のずれがあるもの、1次と2次以外のピークでも一致しているものが多い。

しかし、丸穴の純せん断継手のみピークの位置がずれ、試験にはない周波数でピークが出るなど、ほかのモデルとは多少違う傾向を示した。丸穴の純せん断の解析モデルでは他のモデルと大きく変更した点もなく、解析は妥当なものだと考えられるため、実験の誤差によるものだと考えられる。

また、本章で行った簡易モデルの解析は第2章で行ったソリッドモデルによる解析よりも高い精度であった。

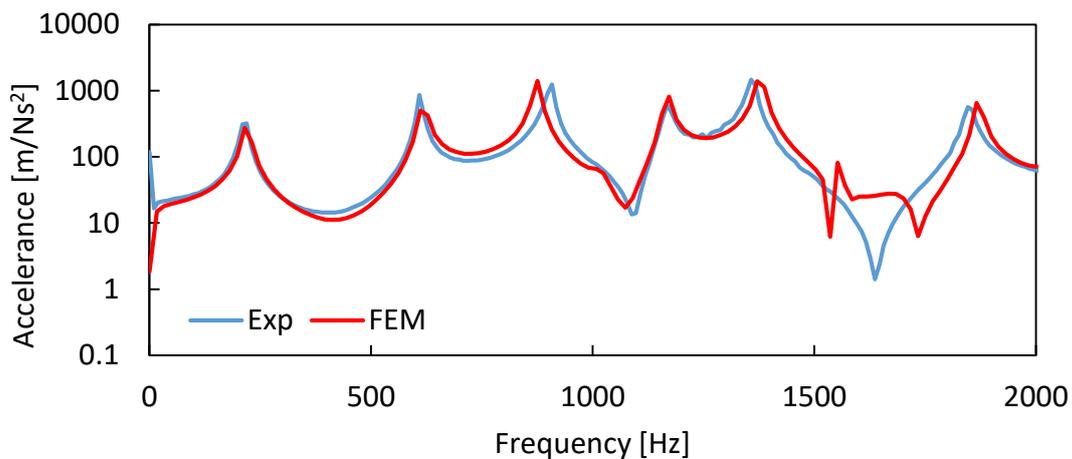


図 4-20 せん断継手 (丸穴) 加速度計①におけるアクセラランス

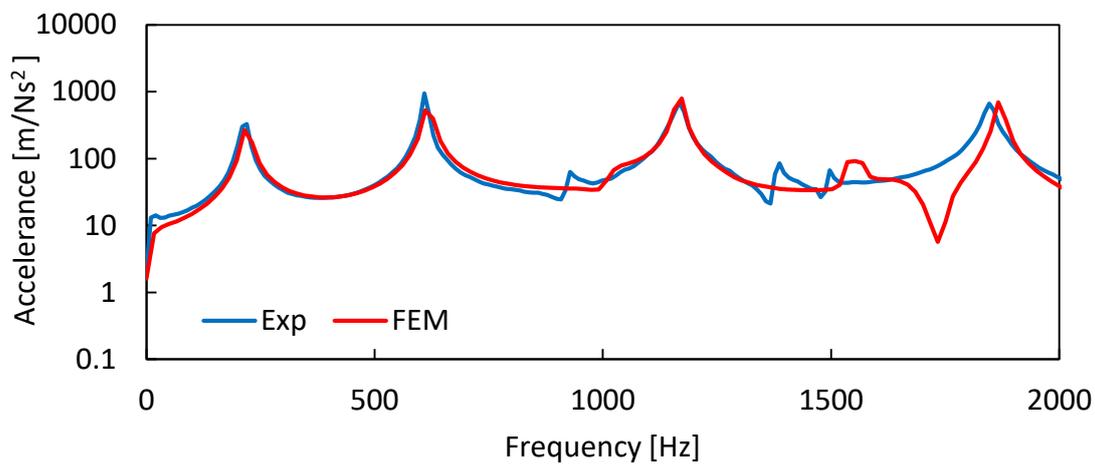


図 4-21 せん断継手 (丸穴) 加速度計②におけるアクセラランス

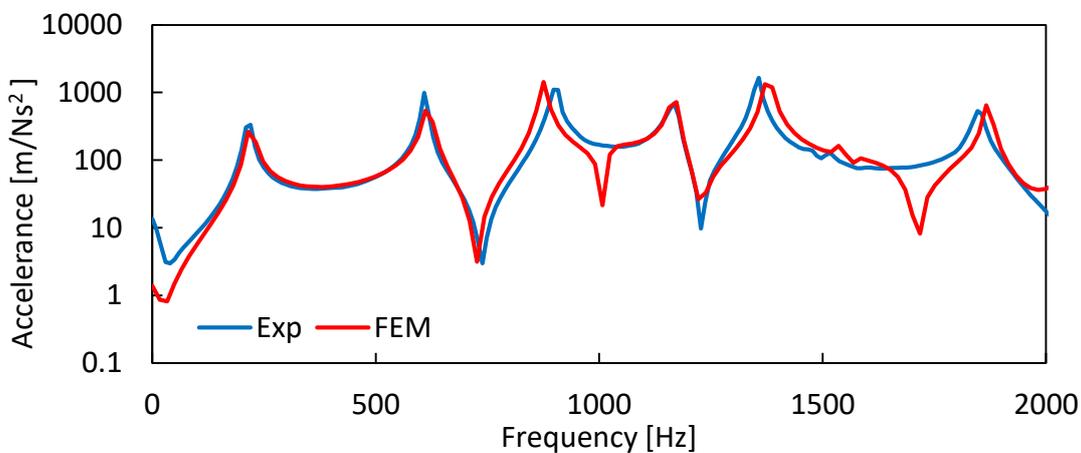


図 4-22 せん断継手 (丸穴) 加速度計③におけるアクセラランス

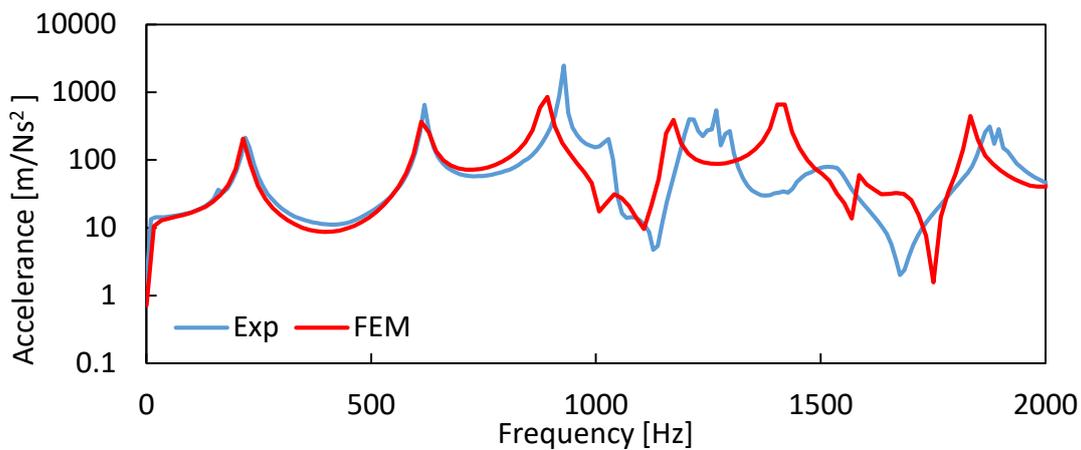


図 4-23 純せん断継手（丸穴） 加速度計①におけるアクセランス

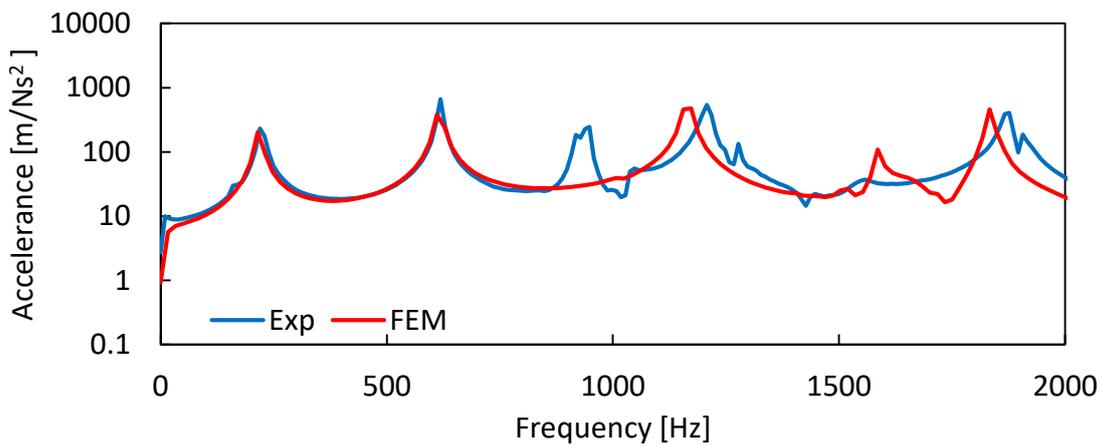


図 4-24 純せん断継手（丸穴） 加速度計②におけるアクセランス

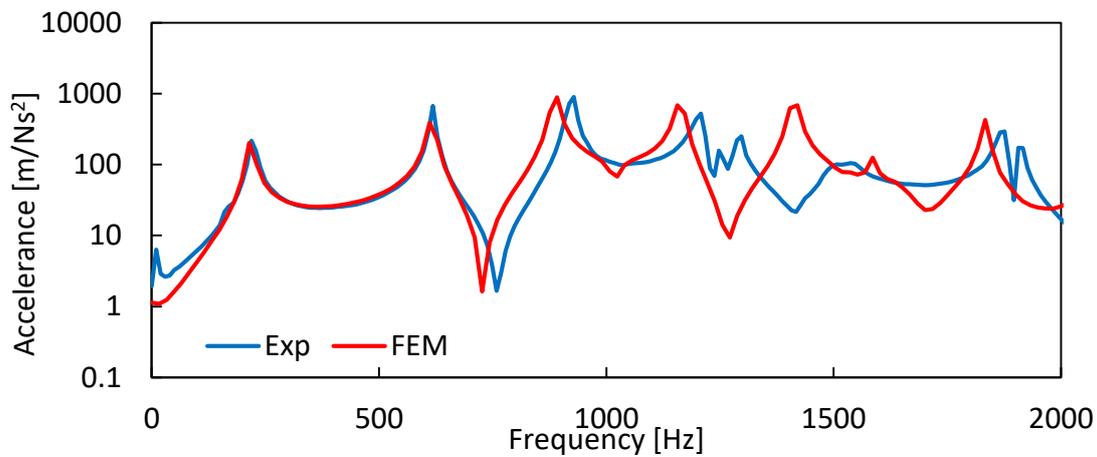


図 4-25 純せん断継手（丸穴） 加速度計③におけるアクセランス

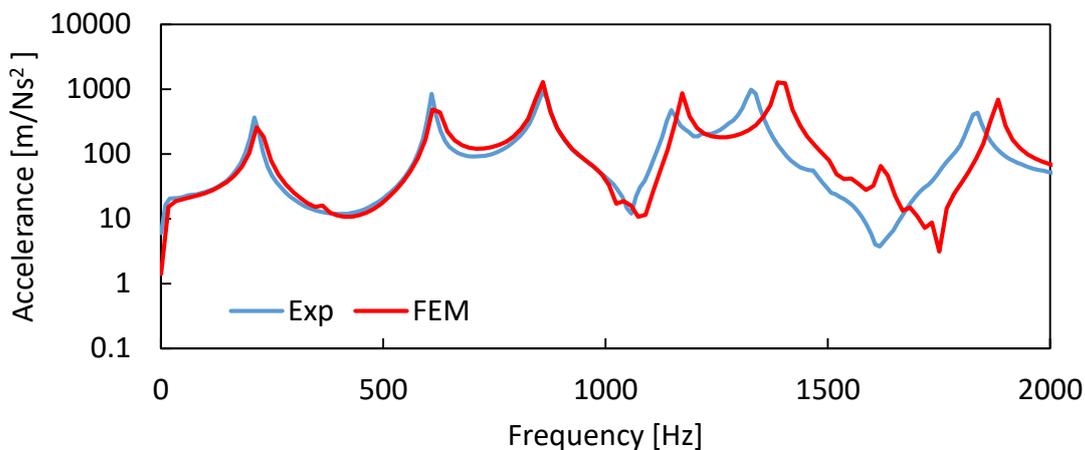


図 4-26 せん断継手（横方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス

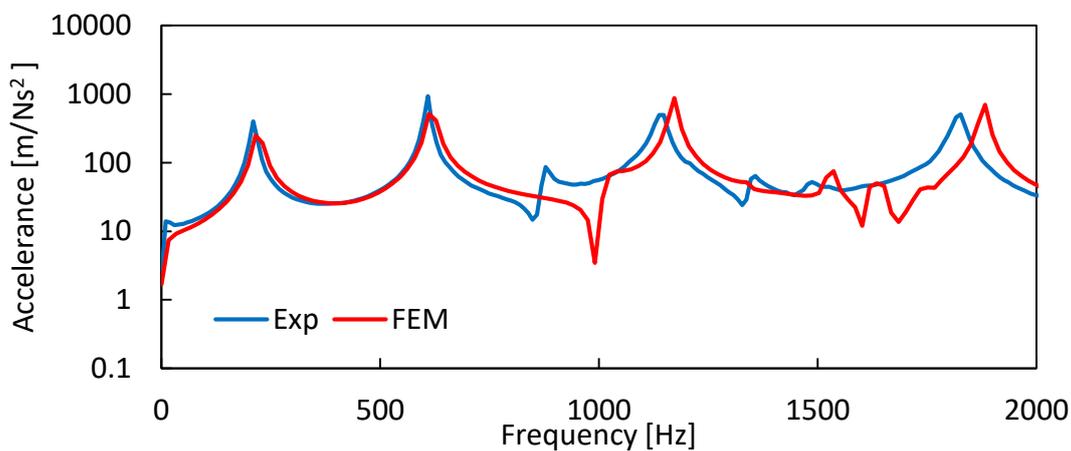


図 4-27 せん断継手（横方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス

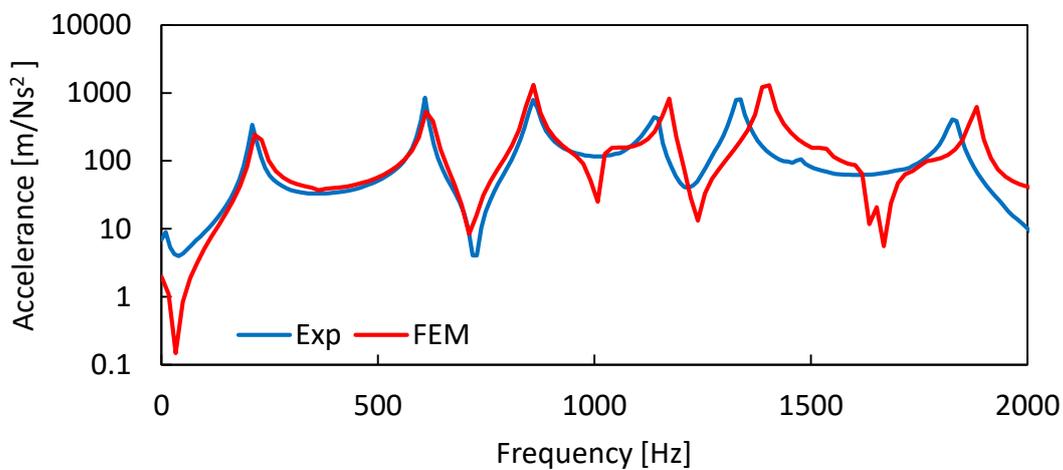


図 4-28 せん断継手（横方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス

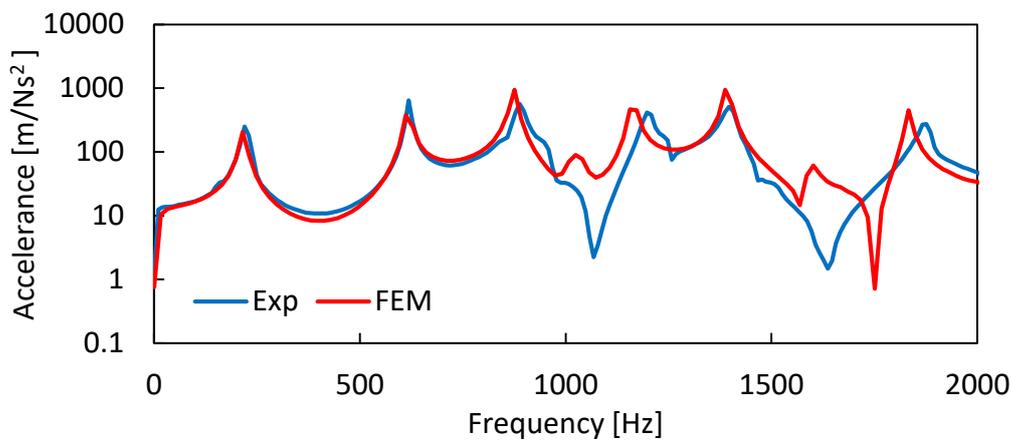


図 4-29 純せん断継手（横方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス

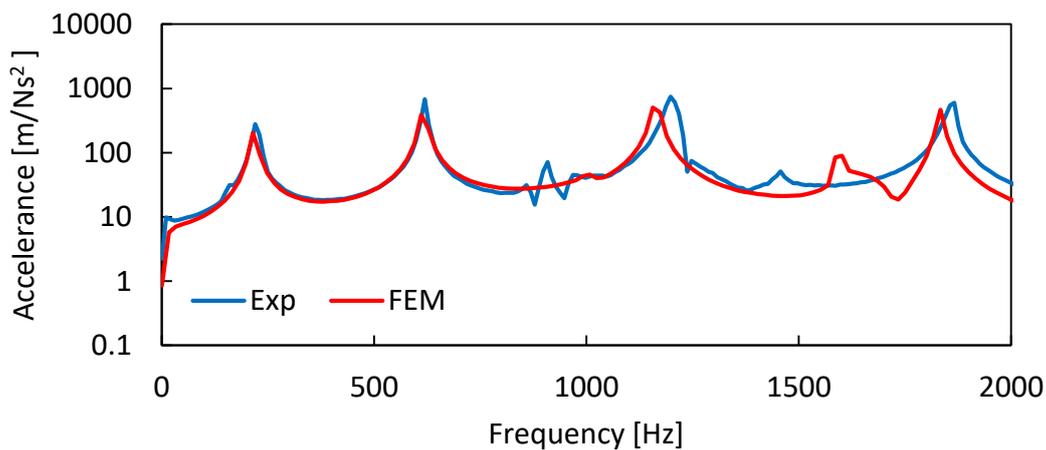


図 4-30 純せん断継手（横方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス

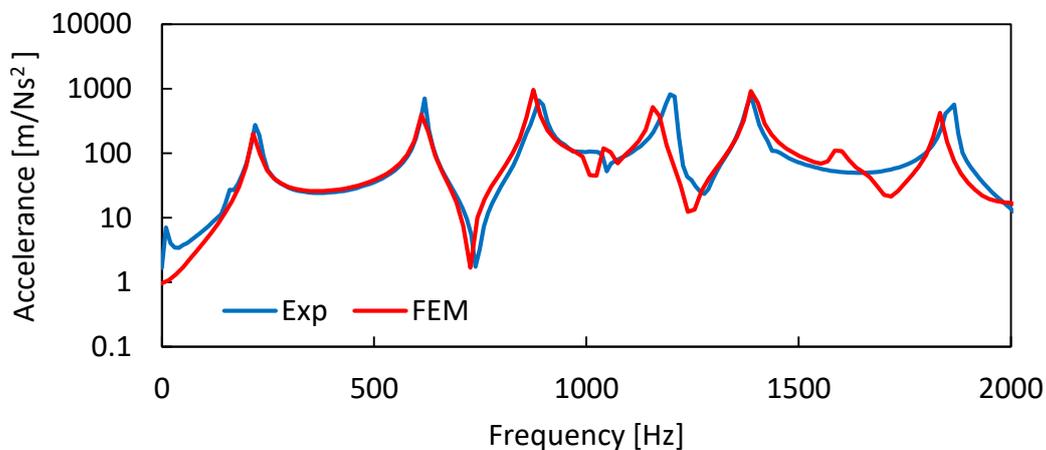


図 4-31 純せん断継手（横方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス

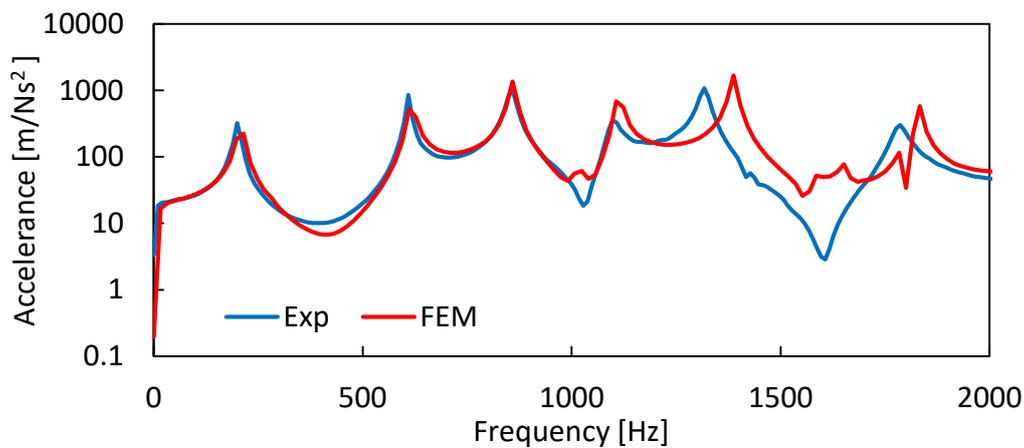


図 4-32 せん断継手（縦方向長穴） 加速度計①におけるアクセランス

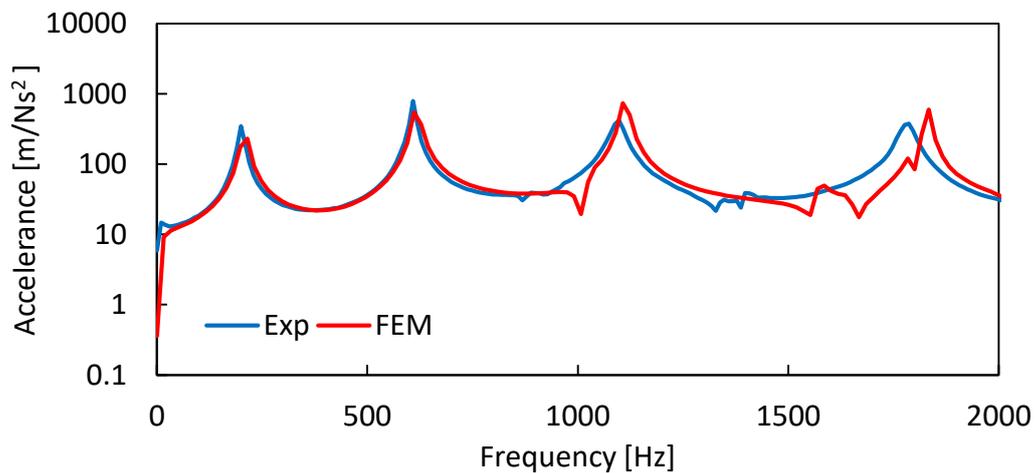


図 4-33 せん断継手（縦方向長穴） 加速度計②におけるアクセランス

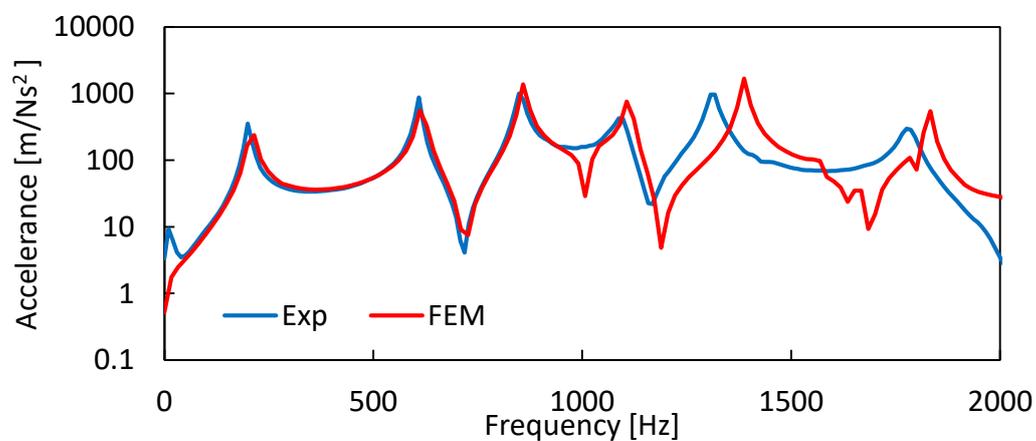


図 4-34 せん断継手（縦方向長穴） 加速度計③におけるアクセランス

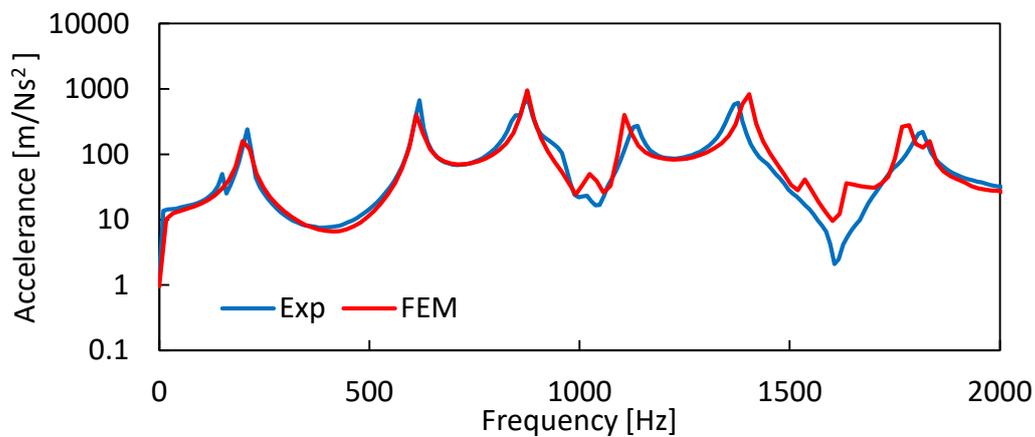


図 4-35 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計①におけるアクセラランス

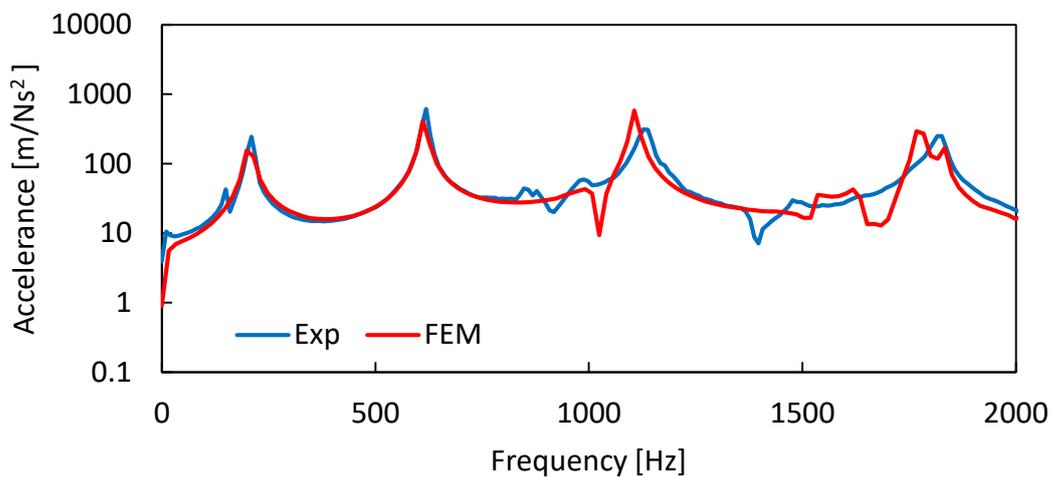


図 4-36 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計②におけるアクセラランス

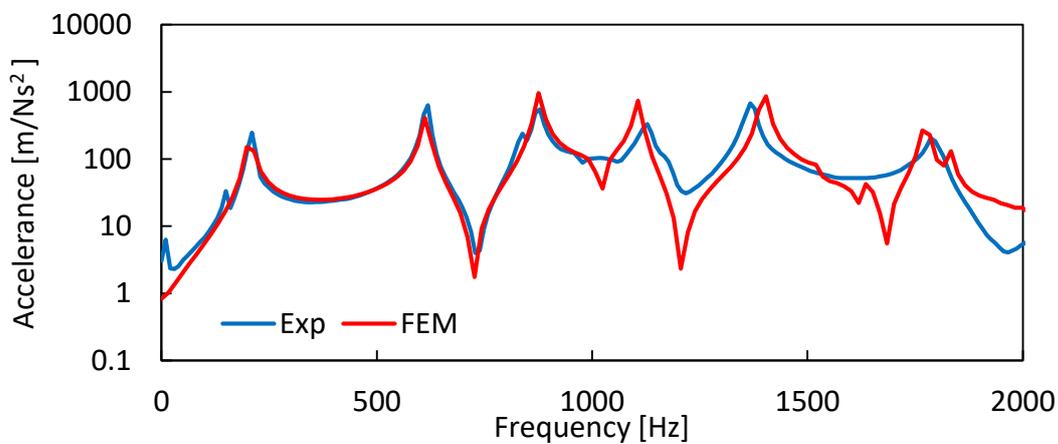


図 4-37 純せん断継手（縦方向長穴） 加速度計③におけるアクセラランス

モード解析及び過渡応答の試験および解析の結果を、丸穴長穴のせん断継手、純せん断継手についてそれぞれ表 4-9 から表 4-14 にまとめた。なお、過渡応答試験および解析の結果は加速度計①における値である。周波数のピークが現れなかった、横方向長穴の純せん断継手の 5 次のモードと、ピークが明確でない、丸穴の純せん断継手の 4 次のモードにおける周波数は記入していない。また、横方向長穴、縦方向長穴の純せん断継手における 3 次、4 次の近接する二つのモードは、一つのピークとして現れたと考えられる。

二つの試験同士の結果を比較するとそれぞれ非常に近い値となっているが、値は異なる。考えられる原因として、モード解析試験においては、継手の数十箇所を打撃しているため試験での正確な値が出ているのに対し、過渡応答試験においては、一箇所のみ打撃しているため試験による誤差が大きいからであると考えられる。

また、過渡応答試験および解析において、モード解析で現れた固有値が、加速度を計測する位置によってはピークが現れない場合もあるが、それぞれの振動モードに対応して周波数のピークが現れることを確認した。

表 4-9 せん断継手（丸穴）モード解析と過渡応答解析における固有振動数

		1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次
モード解析	試験 [Hz]	223	619	907	1209	1338	1880
	解析 [Hz]	224	622	877	1186	1428	1917
過渡応答	試験 [Hz]	216	610	908	1168	1358	1848
	解析 [Hz]	216	615	875	1172	1374	1868

表 4-10 純せん断継手（丸穴）モード解析と過渡応答解析における固有振動数

		1 次	2 次	3 次	4 次	5 次
モード解析	試験 [Hz]	238	637	987	1381	1973
	解析 [Hz]	221	623	-	1515	1894
過渡応答	試験 [Hz]	220	618	928	-	1875
	解析 [Hz]	215	613	890	1412	1834

表 4-11 セン断継手（横方向長穴）モード解析と過渡応答解析における固有振動数

		1次	2次	3次	4次	5次	6次
モード解析	試験 [Hz]	220	618	884	1192	1359	1896
	解析 [Hz]	224	621	858	1183	1428	1907
過渡応答	試験 [Hz]	210	609	859	1148	1328	1834
	解析 [Hz]	216	615	858	1173	1395	1882

表 4-12 純せん断継手（横方向長穴）モード解析と過渡応答解析における固有振動数

		1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次
モード解析	試験 [Hz]	223	622	868	900	1054	1208	1402	1885
	解析 [Hz]	221	622	859	877	1100	1181	1461	1886
過渡応答	試験 [Hz]	220	618	890		-	1202	1387	1864
	解析 [Hz]	216	612	875		-	1157	1388	1833

表 4-13 セン断継手（縦方向長穴）モード解析と過渡応答解析における固有振動数

		1次	2次	3次	4次	5次	6次
モード解析	試験 [Hz]	203	617	871	1114	1338	1806
	解析 [Hz]	211	620	862	1125	1419	1865
過渡応答	試験 [Hz]	200	608	850	1092	1313	1780
	解析 [Hz]	212	612	859	1108	1388	1833

表 4-14 純せん断継手（縦方向長穴）モード解析と過渡応答解析における固有振動数

		1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次
モード解析	試験 [Hz]	207	620	858	878	1134	1386	1823
	解析 [Hz]	209	620	862	878	1126	1471	1839
過渡応答	試験 [Hz]	209	618	875		1135	1375	1815
	解析 [Hz]	200	612	875		1107	1402	1775

4.6 結言

本章では、柳原の簡易モデルのモード解析および過渡応答解析を行い、振動特性の予測精度を確認した。モード解析での予測精度はいずれの形状においても 10%以内の誤差に収まった。過渡応答解析ではソリッドモデルよりも柳原の簡易モデルの方が高い精度であった。

第5章 結論

本研究では、ソリッド要素を用いた有限要素法解析によって丸穴締結、長穴締結の継手をリベットモデル、ねじ山モデルを用いて振動特性の評価を行った。また、リベットモデルとねじ山モデルの振動特性の違いを明らかにするため、締付トルクをパラメータとした打撃解析を行った。さらに、柳原 [4]の先行研究において提案された簡易モデルについて、丸穴形状に加え長穴形状においても振動特性の予測精度を確認した。以下に結論を示す。

まず、リベットモデル、ねじ山モデル共に試験片形状、加速度計位置によらず低次のピークでは高い精度で一致したが高周波領域でずれが大きくなっており、概ね低周波側にずれる傾向を示した。

次に、締付トルクをパラメータとしたボルト頭部の打撃解析により、リベットモデルとねじ山モデルでのねじ山の有無により周波数応答特性の違いが現れることを確認した。

また、柳原の簡易モデルでのモード解析では、予測精度はいずれの試験片形状においても10%以内の誤差に収まった。過渡応答解析ではソリッドモデルよりも柳原の簡易モデルの方が高い精度であった。

参考文献

- [1] 福岡 俊道, 野村 昌孝, 森 雄哉, “ねじ山らせん形状の高精度なモデリングと有限要素解析,” 日本機械学会論文集. A 編 = Trans. Japan Soc. Mech. Eng. A, vol. 72, no.723, pp. 1639-1645, 2006.
- [2] 成瀬 友博, 川崎 健, 服部 敏雄, “シェル要素とビーム要素を用いたボルト締結部の簡易モデル化手法と強度評価：第 1 報, モデル化手法,” 日本機械学会論文集. A 編 = Trans. Japan Soc. Mech. Eng. A, vol. 73, no. 728, pp. 522-528, 2007.
- [3] 成瀬 友博, 川崎 健, 服部 敏雄, “シェル要素とビーム要素を用いたボルト締結部の簡易モデル化手法と強度評価：第 2 報, 強度評価法,” 日本機械学会論文集. A 編 = Trans. Japan Soc. Mech. Eng. A, vol. 73, no. 728, pp. 529-536, 2007.
- [4] 柳原 崇志, “鉄道車両用ボルト締結体の有限要素モデルの妥当性評価と高精度化,” 東京大学工学部機械工学科, 修士論文, 2018.
- [5] 殿垣 佳治, “簡易モデリング手法開発に向けた鉄道車両用ボルト締結体の振動特性の解明,” 東京大学工学部機械工学科, 卒業論文, 2019.
- [6] 森 久史, 辻 太郎, “車両用材料技術の変遷,” RRR, vol. 67, no. 3, pp. 8-11, 2010.
- [7] 行 陽平, 齊 建一, 松 大樹, “ボルト締結部のゆるみと打撃音・振動の関係,” 日本機械学会, 2010.
- [8] J. Andersson and J. Deleskog, Fatigue Life and Stiffness of the Spider Spot Weld, 2014.
- [9] 成瀬 友博, “ボルト締結体の等価剛性と それを用いた構造物の解析手法 および強度評価に関する研究,” 大阪大学大学院, 2010.
- [10] J. Kou, F. Xu, W. Xie, X. Zhang, and W. Feng, “A theoretical 4-stage shear model for single-lap torqued bolted-joint with clearances,” Compos. Struct., vol. 186, 15 February 2018, Pages 1-16, 2018.

謝辞

本研究は、泉教授のご指導のもとで進められました。泉教授にはご多忙の中多くのご指導や助言をいただき、無事このような形で論文を執筆できたことに深く感謝申し上げます。

また、波田野講師、榎間さんからは日々の研究で様々な手助けや助言をしていただきました。厚く御礼申し上げます。

日立製作所の皆様には、打ち合わせ等を通じて広くご支援頂きました。ここに感謝の意を表します

株式会社 JSOL の千代延真様には、ソフトウェアについてご協力賜り、誠にありがとうございました。

そして、研究室の先輩方、同期と過ごした1年間は楽しいものでした。ありがとうございました。

最後に、これまで心身両面から私を支えてくださった家族にも別段の感謝を捧げます。

2020年1月31日

波多野 陽平

以上

P.1~P.61 完

卒業論文

03-180223 波多野 陽平

指導教員 泉 聡志 教授