

卒業論文

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

2019 年 2 月 1 日

指導教員 泉 聡志 教授

03-170224 殿垣 佳治

目次

図目次.....	3
表目次.....	5
1 序論.....	7
1.1 研究背景	8
1.2 本研究の目的.....	8
1.3 本論文の構成.....	9
2 継手の振動モード及び周波数応答特性評価	10
2.1 緒言	11
2.2 モード解析試験	11
2.3 過渡応答試験.....	12
2.4 解析条件および締結体モデル	13
2.4.1 ペナルティ法接触モデルによる打撃試験再現解析	13
2.4.2 固着モデル固有値解析・周波数応答解析.....	16
2.5 結果と考察	17
2.6 結言	36
3 柳原の簡易モデルの予測精度確認	37
3.1 緒言	38
3.2 柳原の簡易モデル[4]	38
3.3 解析条件	40
3.4 解析結果と考察	41
3.5 結言	46
4 結論.....	47
4.5 結論	48
4.6 今後の展望	48
謝辞	49
参考文献.....	50

図目次

図 2-1 継手試験片形状・寸法	12
図 2-2 測定機器構成	12
図 2-3 過渡応答試験 試験片	13
図 2-4 解析モデル	15
図 2-5 入力加重	16
図 2-6 振動モード	18
図 2-7 加速度計① 加速度履歴	20
図 2-8 継手形状・加速度計ごとのアクセラランス	23
図 2-9 すべての締付トルクでのアクセラランス	29
図 2-10 加速度計① ピーク 1 付近拡大図	31
図 2-11 純せん断継手 締付トルク 30Nm 接触非線形解析 変形図 (scale×100)	32
図 2-12 2 枚目被締結体 表面圧力[MPa]	32
図 2-13 表面圧力分布	33
図 2-14 等価圧縮体領域	33
図 2-15 固着領域	34
図 2-16 純せん断継手 試験と固着域 2 線形解析 アクセラランス比較	35
図 3-1 等価圧縮体とせん断継手	38
図 3-2 柳原の簡易モデルの拘束関係	39
図 3-3 柳原の簡易モデル せん断継手	41
図 3-4 柳原の簡易モデル 振動モード	42
図 3-5 継手形状・加速度計ごとのアクセラランス	46

表目次

表 2-1 解析条件表	14
表 2-2 物性値表	14
表 2-3 固着線形解析 解析条件表	16
表 2-4 継手形状ごとの固有周波数	18
表 3-1 解析条件表	40
表 3-2 継手形状ごとの固有周波数	42

1 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、コストが安い点、作業者の技量に依らない締結を行える点、取り外しが可能なために点検が容易な点等の理由により、幅広く使用されている。一方、ボルト締結を有する機械構造物において、締結部は特異脆弱な部位であり、設計段階において十分な信頼性を確保することが必要なため、CAE を用いたより高精度な締結部の強度・振動特性の評価手法が求められる。

CAE におけるボルト締結部のモデリング手法には様々なものがある。ボルト・ナットねじ山の螺旋形状を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、接触面のすべりやねじ山への応力集中などを高精度に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モデリング工数や計算負荷の観点から現実的ではない。

簡易なモデル化手法としては、被締結体同士を一本のビーム要素やカップリング拘束、ばね要素等で結合するものがある。要素数を削減でき、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型構造物の解析が可能になるものの、剛性が正しく表現されないことや締結部の局所変形を招くことなど、解析精度の観点から実用上十分な注意が必要である。

このような条件下で、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研究がいくつか行われている。成瀬ら[2][3]は締結による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]はビーム節点と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、締結部近傍の剛性値と応力分布がスパイダーモデルに比べて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する研究については、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固有値解析の結果が一致することが確認されている[2]ものの、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る。また、締結部の形状、締め付けトルク、表面状態等が固有値に及ぼす影響は未解明であり、簡易モデリング手法は未だ確立されていない。

1.2 本研究の目的

本研究では、株式会社日立製作所にて行われる打撃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ながら、ボルト締結体の振動特性への影響因子解明と柳原の簡易モデルの妥当性評価を行う。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す.

第1章「序論」

本研究の背景および研究の目的について述べた.

第2章「継手の振動モード及び周波数応答特性評価」

継手のモード解析試験・過渡応答試験とソリッドモデルによる固有値解析・周波数応答解析・打撃試験再現解析により, ボルト締結体の振動モードと周波数応答特性を評価する.

第3章「柳原の簡易モデルの予測精度確認」

柳原の簡易モデルについて固有値解析・周波数応答解析を行い, 振動特性の予測精度を確認する.

第4章「結論」

本研究の結論についてまとめる.

2 継手の振動モード及び周波数応答特性評価

2.1 緒言

本章では，株式会社日立製作所で行われた試験により，継手の振動モード及び周波数応答特性を評価する．また，ソリッドモデルでの有限要素法解析による振動モード及び周波数応答特性の予測精度を確認し，締付トルクの振動特性への影響を評価する．

2.2 モード解析試験

試験は純せん断継手及びせん断継手の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．また，測定機器の構成を図2-2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．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．締付トルクは，せん断継手，純せん断継手のどちらでも 23.5Nm であった．

継手試験片をガラス繊維断熱材上に置いた自由支持とし，図2-1に示した打点を順次インパルスハンマーで打撃加振して試験を行った．

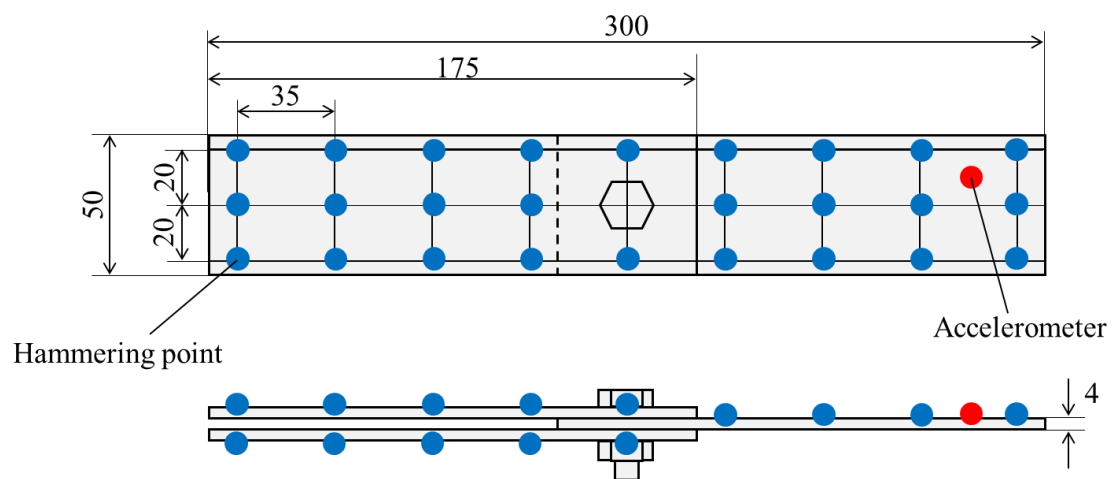


図 2-1(a) 純せん断継手

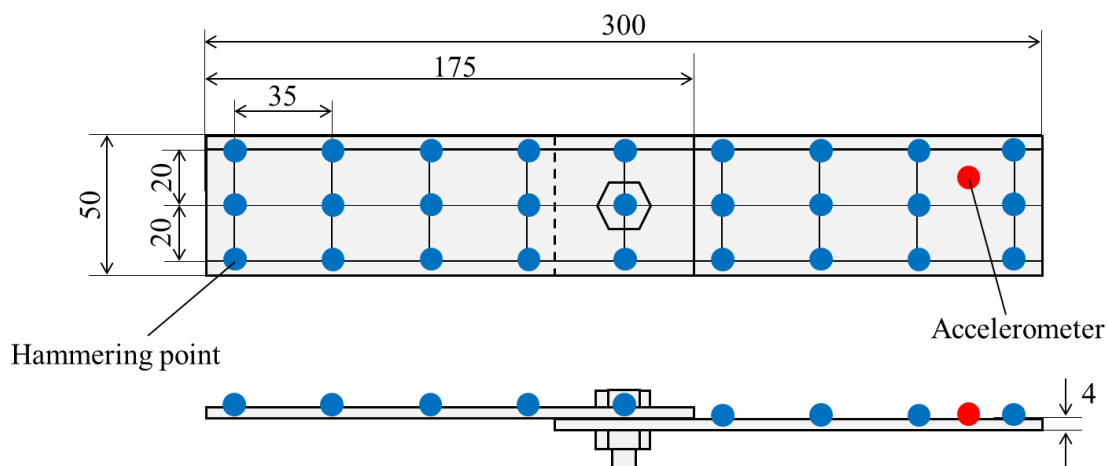


図 2-1(b) せん断継手

図 2-1 継手試験片形状・寸法

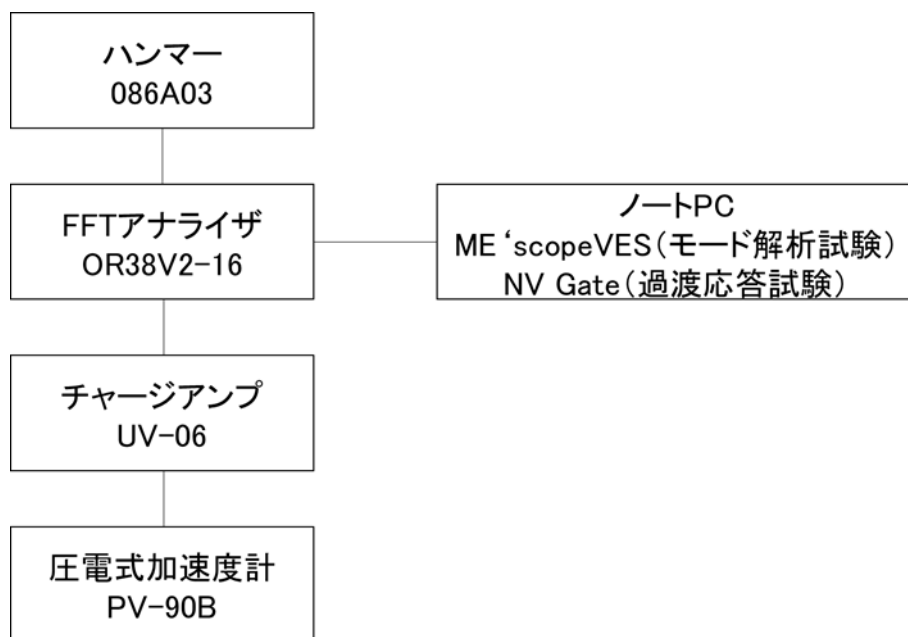


図 2-2 測定機器構成

2.3 過渡応答試験

継手試験片の形状・寸法及び材質は前節のモーダル解析試験と同様である。また測定機器の構成は図 2-2 で示した通りである。

図 2-3 に示した打点をインパルスハンマーで打撃して加振した。加速度計は、試験片の打点の反対側に 3 つ取り付けた。打撃加振は 5 回行い、平均値を試験値とした。

試験は純せん断継手とせん断継手について、締付トルクを 30Nm, 27.5Nm, 23.5Nm, 20Nm, 10Nm, 5Nm, 0Nm の 7 種類、計 14 種類の試験片で行った。なお、締付トルク 0Nm は手締めによって行った。

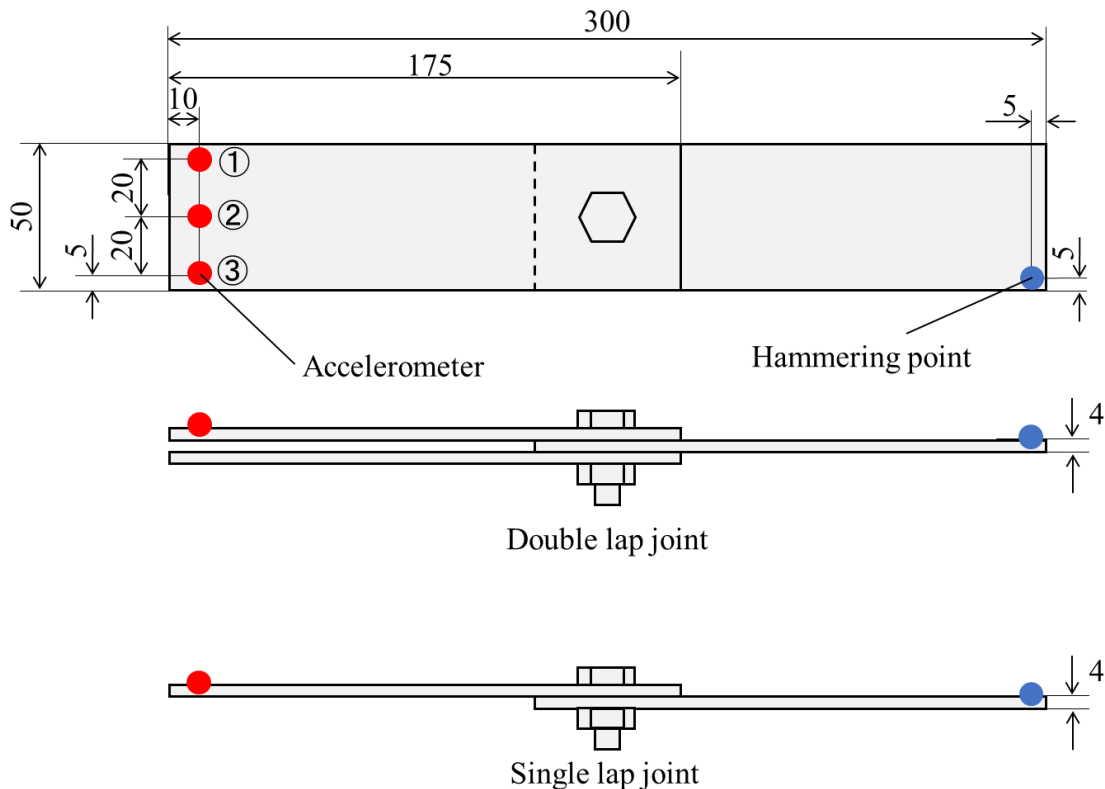


図 2-3 過渡応答試験 試験片

2.4 解析条件および締結体モデル

2.4.1 ペナルティ法接触モデルによる打撃試験再現解析

解析は有限要素法解析ソフト LS-DYNA Version R10.1.0（陰解法，陽解法）を用いて行った．表 2-1 に解析条件表を示す．また，図 2-4 に(a)純せん断継手，(b)せん断継手のモデルを示す．簡単のため，図 2-4(c)のようにボルト・ナットはねじ山を省略したリベット形状のモデルで再現した．また，モデル全体において六面体一次要素によってモデリングしている．材料は等方性材料とし，物性値は表 2-2 に示したものをを用いた．

接触・摩擦を考慮した非線形解析を行うため，被締結体間，ボルト座面と被締結体間，ナット座面と被締結体間において*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE によってペナルティ法による接触を定義した．摩擦係数の値には 0.17 を用いている．また，ボルト・ナットによる初期締結力を発生させるため，陰解法でボルト軸中央部を通る断面に*INITIAL_STRESS_SECTION により初期応力を付与した．応力付与により発生する振動が収束したのち，陽解法で打撃を模擬した荷重を入力した．入力荷重は図 2-5 に示したように正弦曲線を用いている．拘束条件については，陰解法で初期応力を付与する際には被締結体端の並進自由度を拘束し，応力付与後の陽解法では拘束を解除した自由状態で解析を行

った。

表 2-1 解析条件表

	純せん断継手	せん断継手
要素	六面体一次要素	
要素数	79860	56060
拘束条件	締結力付与時のみ図 2-4 の 4 点を xyz 方向固定．締結力付与後は拘束なし	
単位系	[mm][N][s]	
接触定義	ペナルティ法	

表 2-2 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

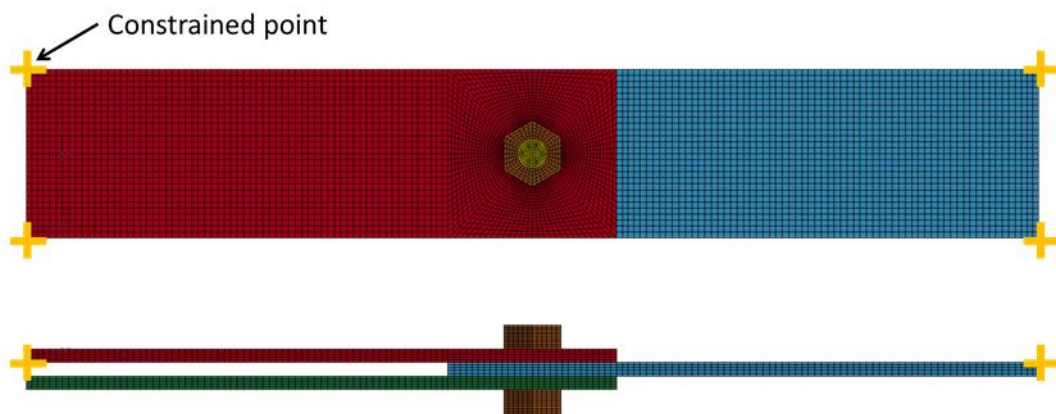


図 2-4(a) 純せん断継手 解析モデル

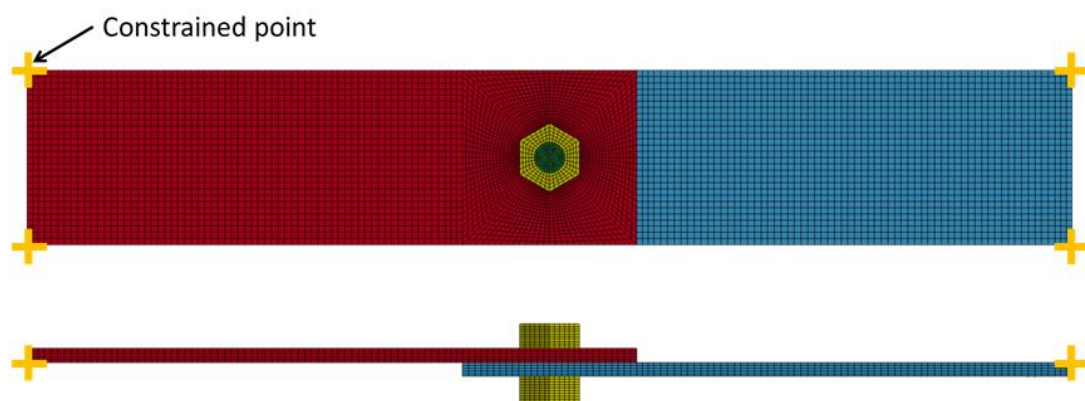


図 2-4(b) セン断継手 解析モデル

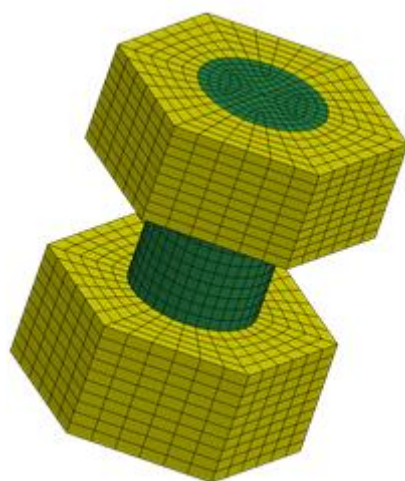


図 2-4(c) ボルト・ナット部拡大図

図 2-4 解析モデル

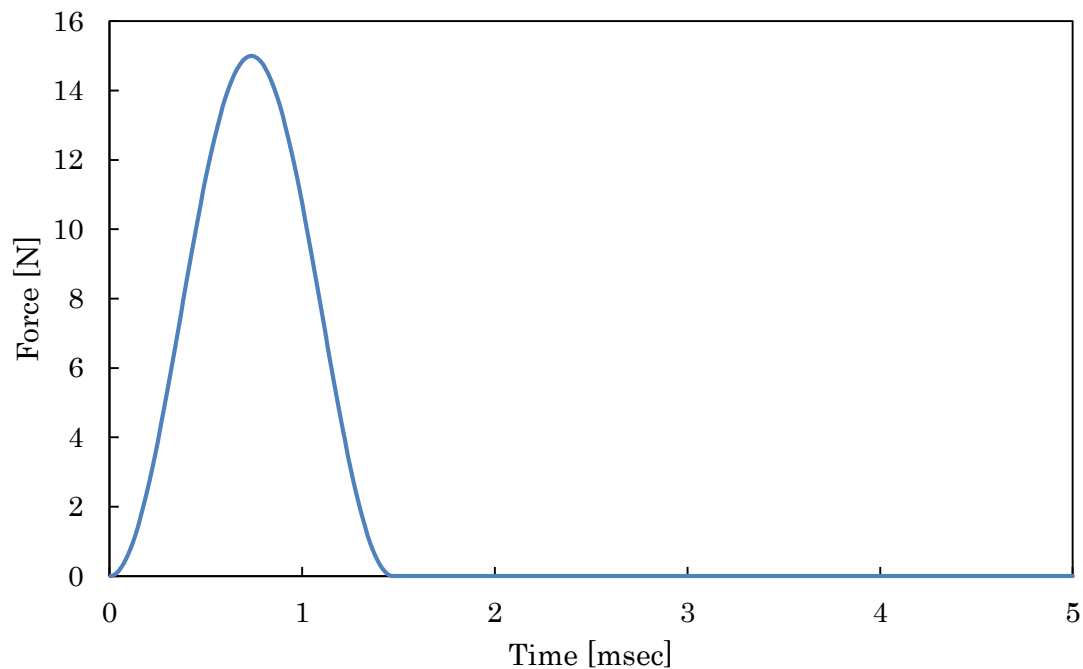


図 2-5 入力加重

2.4.2 固着モデル固有値解析・周波数応答解析

固有周波数，振動モードを調べるため，LS-DYNA Version R10.1.0（陰解法）により，固有値解析及び周波数応答解析を行った．解析に用いたモデルの形状，物性値は前節のモデルと同様である．表 2-3 に解析条件表を示す．

非線形の接触現象は線形解析である固有値解析では扱えないため，モデルの各接触部は*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACEにより固着させた．周波数応答解析の振動励起点，応答出力点は試験における打点，加速度計と同じ位置に設定した．また，モデルは拘束を付加しない自由状態で解析を行った．

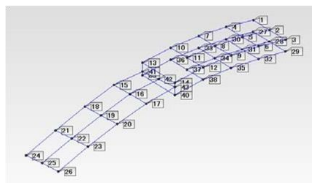
表 2-3 固着線形解析 解析条件表

	純せん断継手	せん断継手
要素	六面体一次要素	
要素数	79860	56060
拘束条件	拘束なし	
単位系	[mm][N][s]	
接触定義	固着	

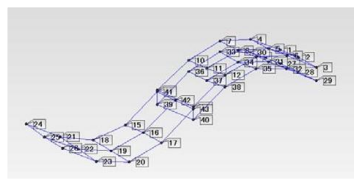
2.5 結果と考察

試験及び固着線形解析での振動モードを図 2-6(a)～(c)に示す。純せん断継手の固着線形解析では、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振動モードがみられたが、そのような振動モードは試験では観測されず、ボルト側の板とナット側の板が 1 枚の板材として振動するモードのみがみられた。せん断継手については、試験と固着線形解析で振動モードは一致した。

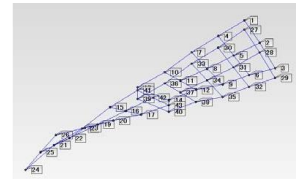
表 2-4(a), (b)に継手形状ごとの固有周波数を示す。なお、純せん断継手に関しては試験で観測されたモードのみ記載している。固有周波数の予測精度は純せん断継手では-2%～6%程度、せん断継手では 0～11%程度であった。



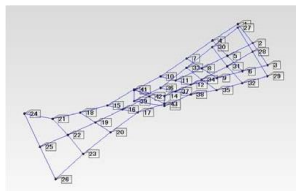
1次モード : 238.4 Hz



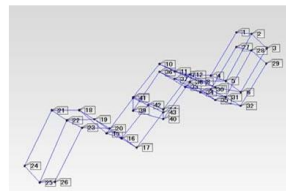
2次モード : 636.7 Hz



3次モード : 986.5 Hz

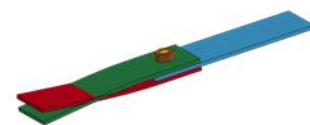


4次モード : 1381 Hz

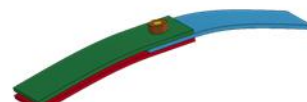


5次モード : 1973 Hz

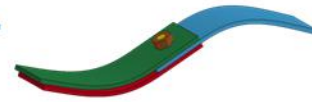
図 2-6(a) 純せん断継手 試験 振動モード



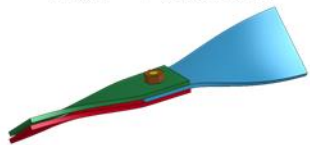
1次モード : 201.8Hz



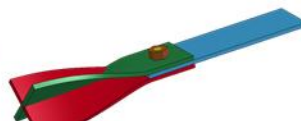
2次モード : 253.4Hz



3次モード : 625.1Hz



4次モード : 1013Hz



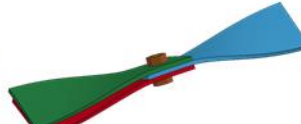
5次モード : 1032Hz



6次モード : 1254Hz



7次モード : 1378Hz



8次モード : 1398Hz



9次モード : 2017Hz

図 2-6(b) 純せん断継手 固着線形解析 振動モード

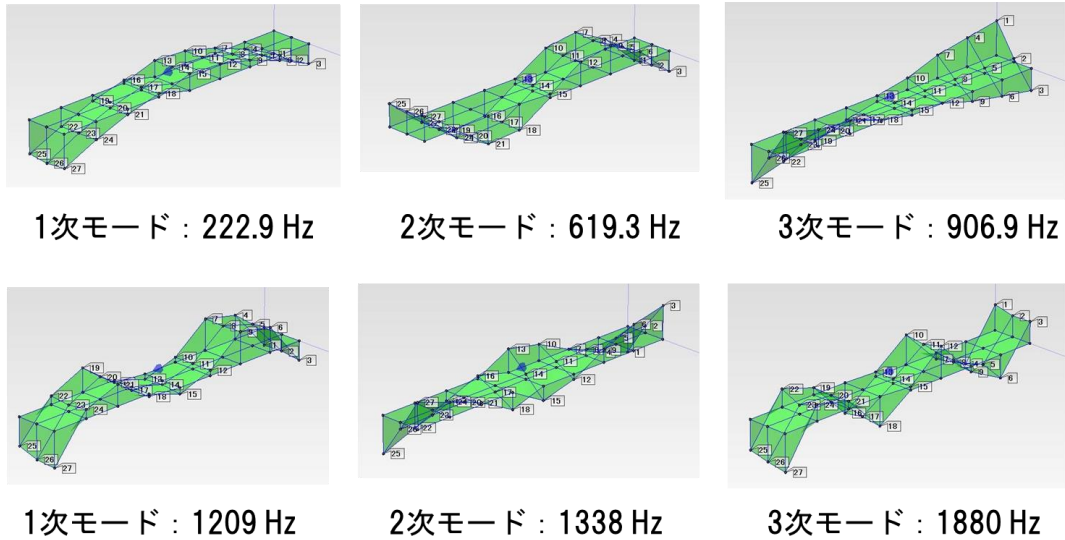


図 2-6(c) セン断継手 試験 振動モード

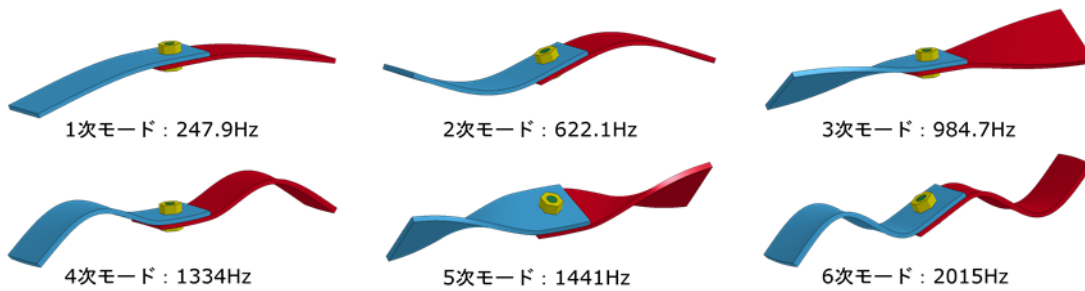


図 2-6(d) セン断継手 固着線形解析 振動モード

図 2-6 振動モード

表 2-4 継手形状ごとの固有周波数

表 2-4(a) 純せん断継手 固有周波数

	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次
試験 [Hz]	238.4	636.7	986.5	1381	1973
解析 [Hz]	253.4	625.1	1013	1398	2017
誤差	6.3%	-1.8%	2.7%	1.2%	2.2%

表 2-4(b) せん断継手 固有周波数

	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]	247.9	622.1	984.7	1334	1441	2015
誤差	11.2%	0.5%	8.6%	10.3%	7.7%	7.2%

次に，過渡応答試験と接触非線形解析について，図 2-7 に(a)純せん断継手，締付トルク 30Nm 及び(b)せん断継手，締付トルク 30Nm の加速度計①の加速度履歴を示す．どちらの継手形状でも，全体的な減衰は試験と解析で同様であった．

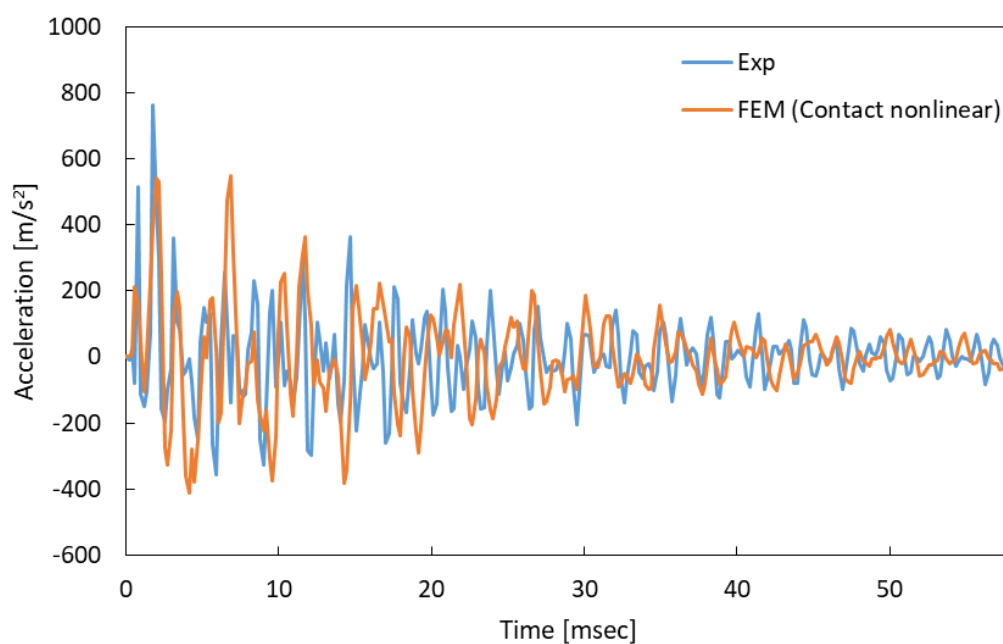


図 2-7(a) 純せん断継手 締付トルク 30Nm 加速度計①

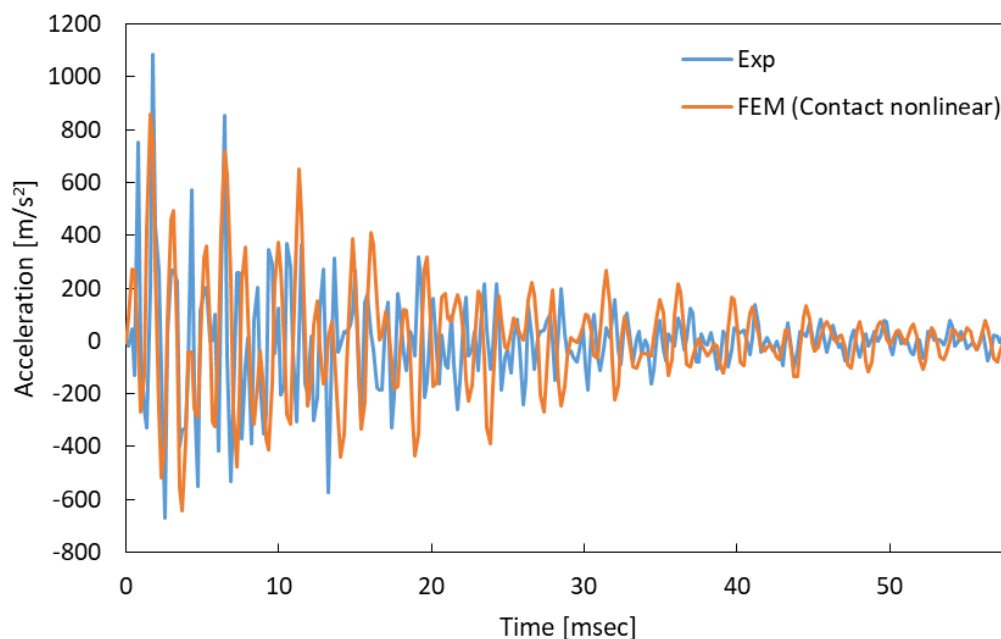


図 2-7(b) セン断継手 締付トルク 30Nm 加速度計①

図 2-7 加速度計① 加速度履歴

また、試験、接触非線形解析、固着線形解析の加速度計①～③位置アクセラランスをそれぞれ図 2-8(a)～(f)に示す。試験片形状、加速度計位置によらず 600 Hz 付近の第 2 ピークまでは類似したアクセラランスを示した。それより高周波の成分に関しては、接触非線形解析では試験より低周波側にずれ、固着線形解析では試験より高周波側にずれる傾向を示した。固着線形解析では接触部をすべて固着させているが、実現象において締結体間が固着している領域は一部に限られ、その他の接触領域では部分的にすべりが生じると考えられる。そのため、締結体間をすべて固着することは現実の締結部よりも剛性を過大に表現していることが試験との差異の要因だと考えられる。一方で、接触非線形解析が低周波側にずれる要因としては、ボルト部をリベット形状でモデリングしている点や、試験においてはガラス繊維断熱材上に置いているが解析では自由状態としている点などが考えられるが、試験との差を説明するには至っていない。

また、モード解析試験においてはボルト側の板とナット側の板が逆位相となるような振動モードは観測されなかったが、固着線形解析においてもこれらの振動モードに対応するピークはみられなかった。振幅が小さく、減衰によって他のピークに埋もれてしまうために試験において観測することが困難であると考えられる。

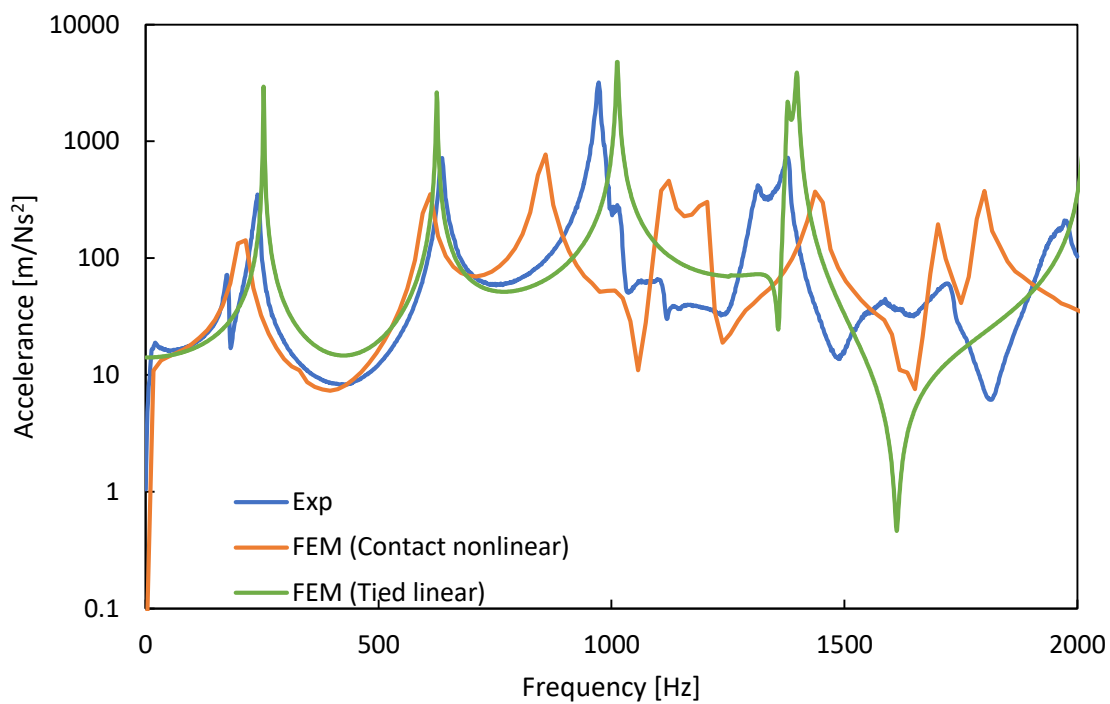


図 2-8(a) 純せん断継手 締付トルク 30Nm 加速度計①アクセラランス

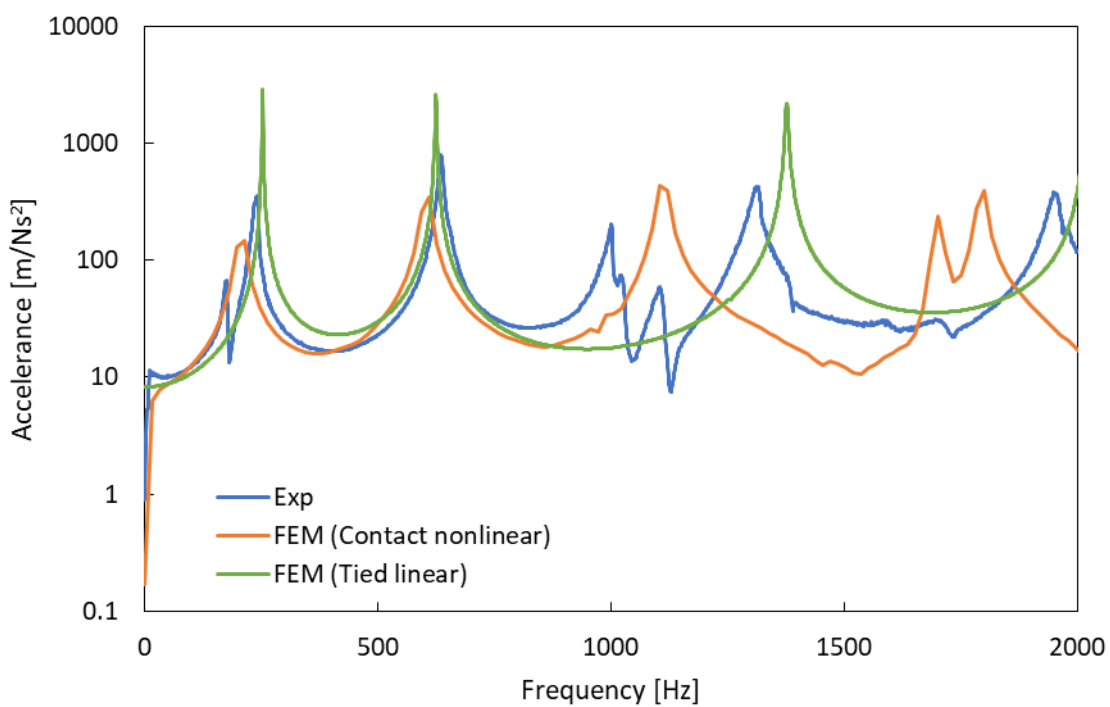


図 2-8 (b) 純せん断継手 締付トルク 30Nm 加速度計②アクセラランス

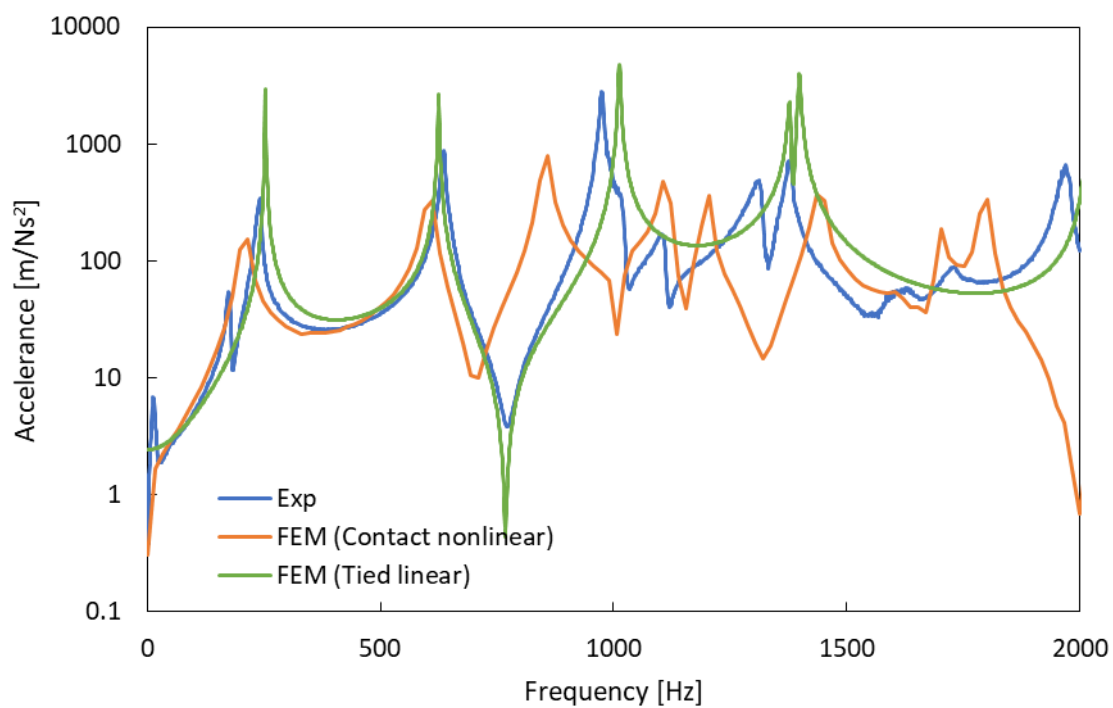


図 2-8 (c) 純せん断継手 締付トルク 30Nm 加速度計③アクセラランス

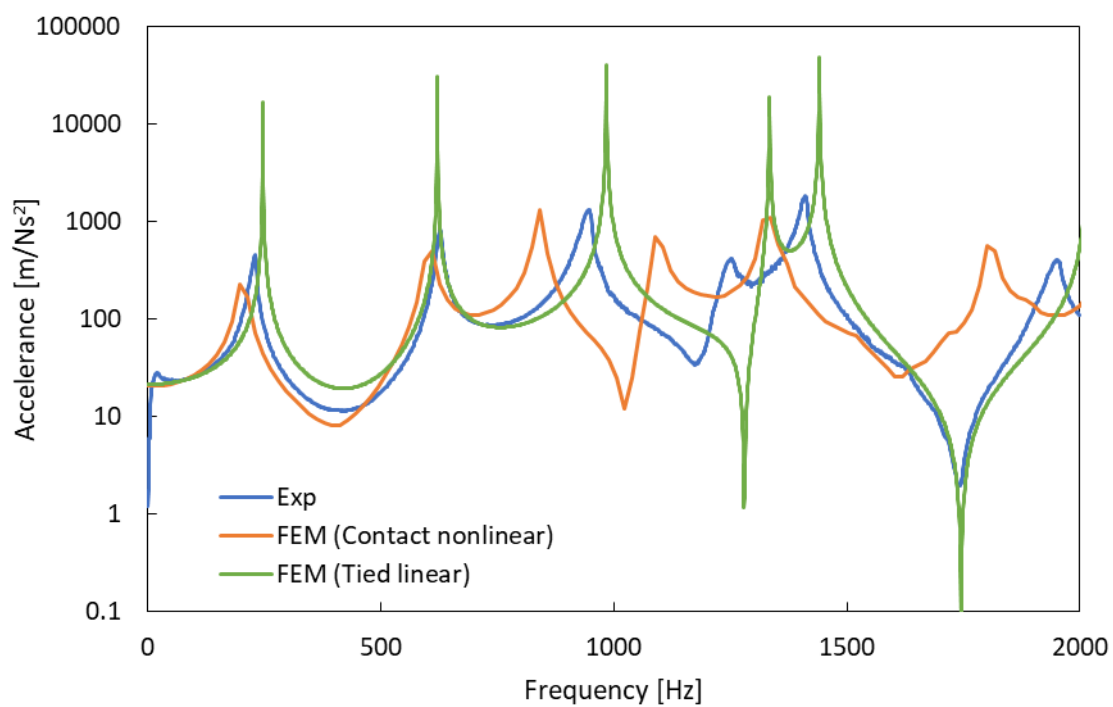


図 2-8 (d) せん断継手 締付トルク 30Nm 加速度計①アクセラランス

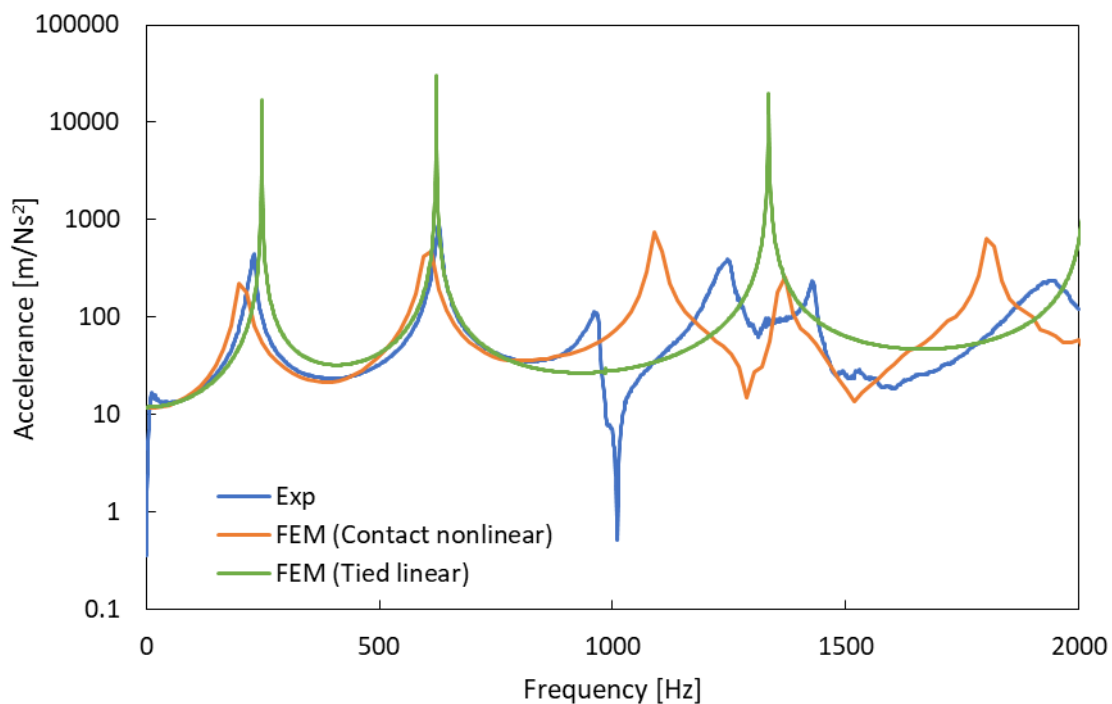


図 2-8 (e) せん断継手 締付トルク 30Nm 加速度計② アクセランス

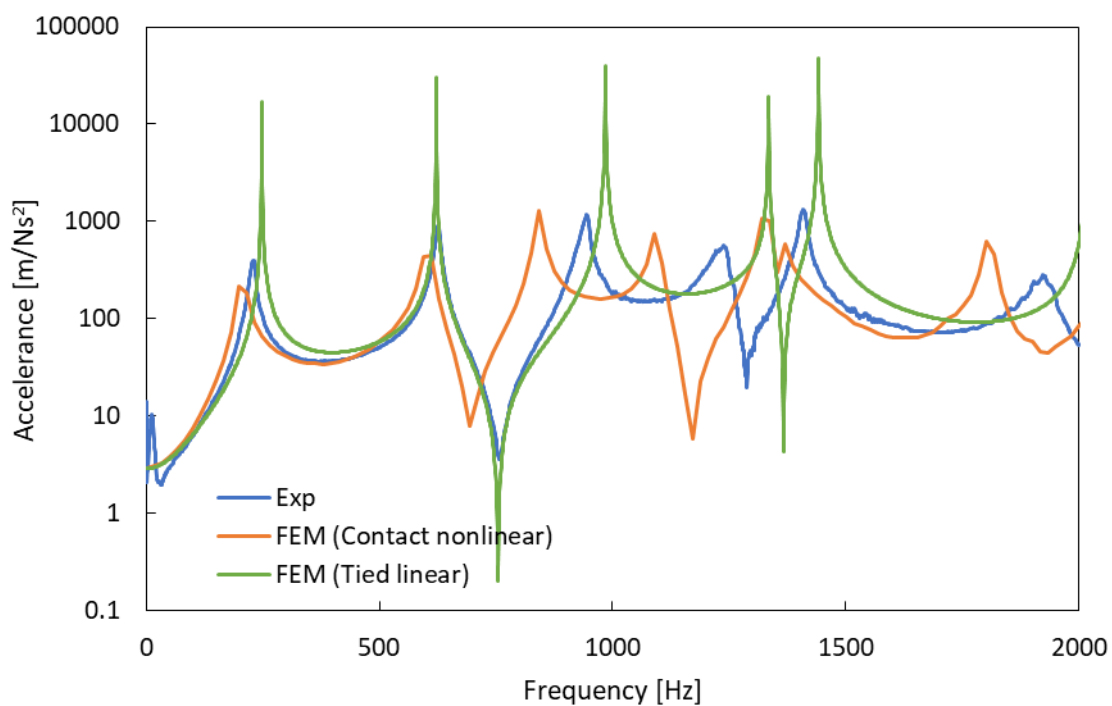


図 2-8(f) せん断継手 締付トルク 30Nm 加速度計③ アクセランス

図 2-8 継手形状・加速度計ごとのアクセランス

次に、継手形状と加速度計ごとに 7 種類すべての締付トルクでのアクセランスを図 2-9(a)～(l)に示す。また、加速度計①のピーク 1 付近の拡大図を図 2-10(a)～(d)に示す。試験においては、純せん断継手、

せん断継手ともに締付トルクが十分大きいときは、アクセラランスは安定してほとんど変化しないが、締付トルクが不足するとアクセラランスや固有周波数は下がる傾向がみられ、高周波成分で不規則な振動が発生する。しかし、接触非線形解析では、締付トルクが小さいときの高周波の不規則な振動は見られたものの、アクセラランスや固有周波数が下がる傾向は締付トルク 0Nm を除いて見られなかった。

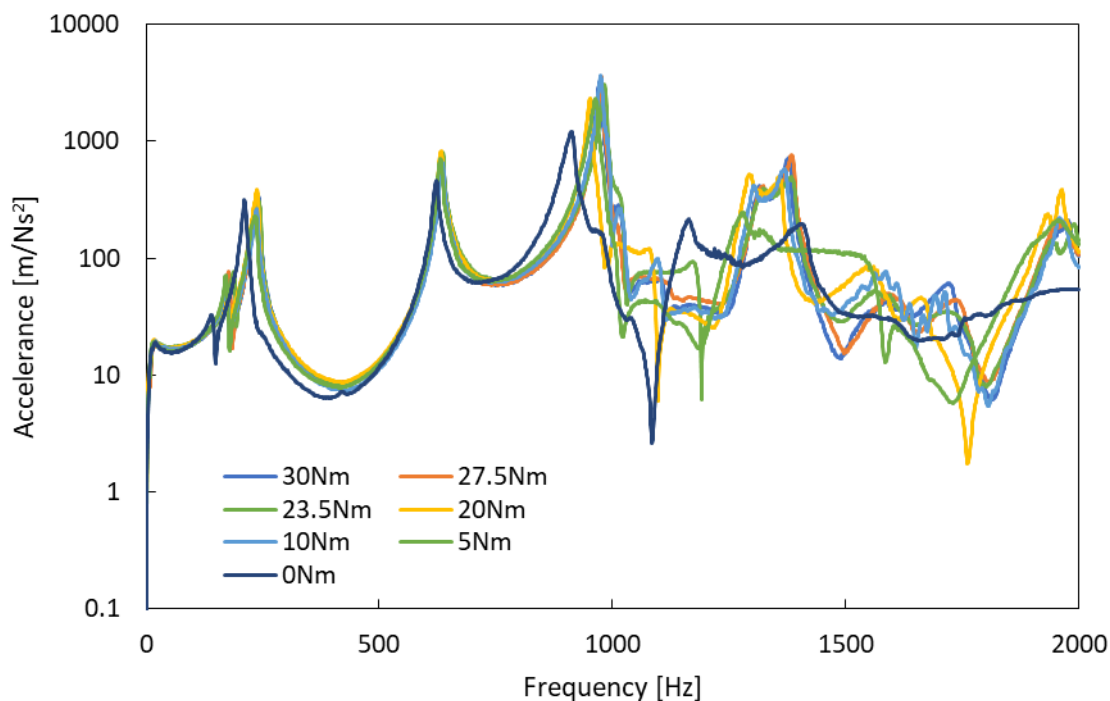


図 2-9(a) 純せん断継手 試験 加速度計①

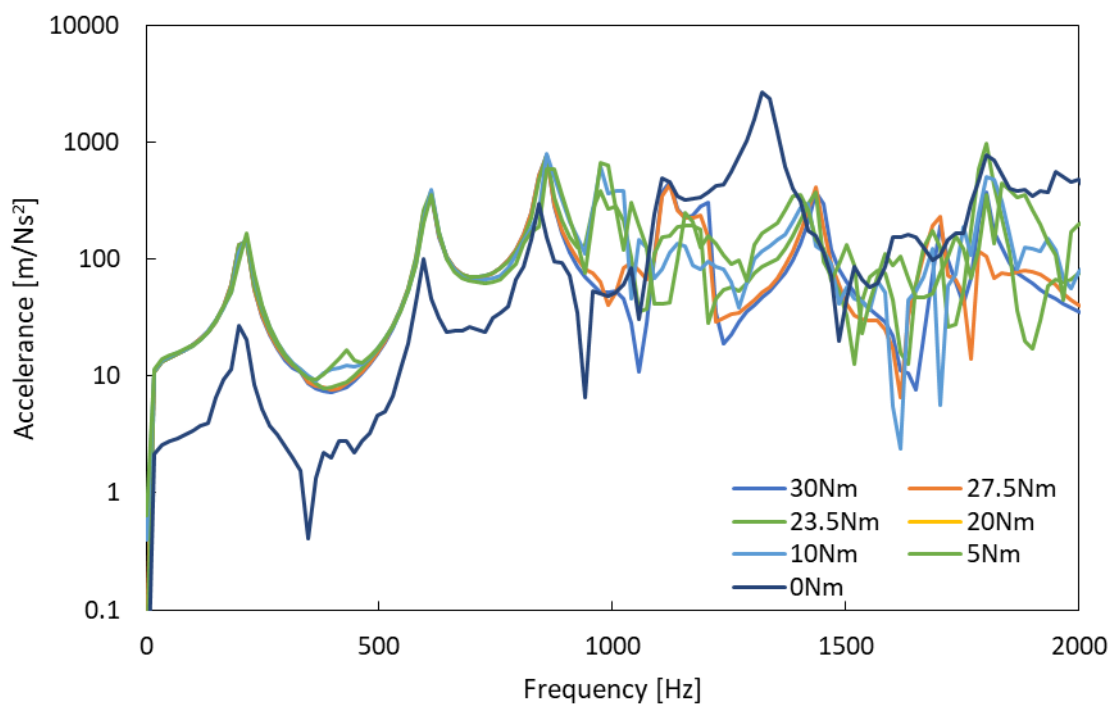


図 2-9 (b) 純せん断継手 接触非線形解析 加速度計①

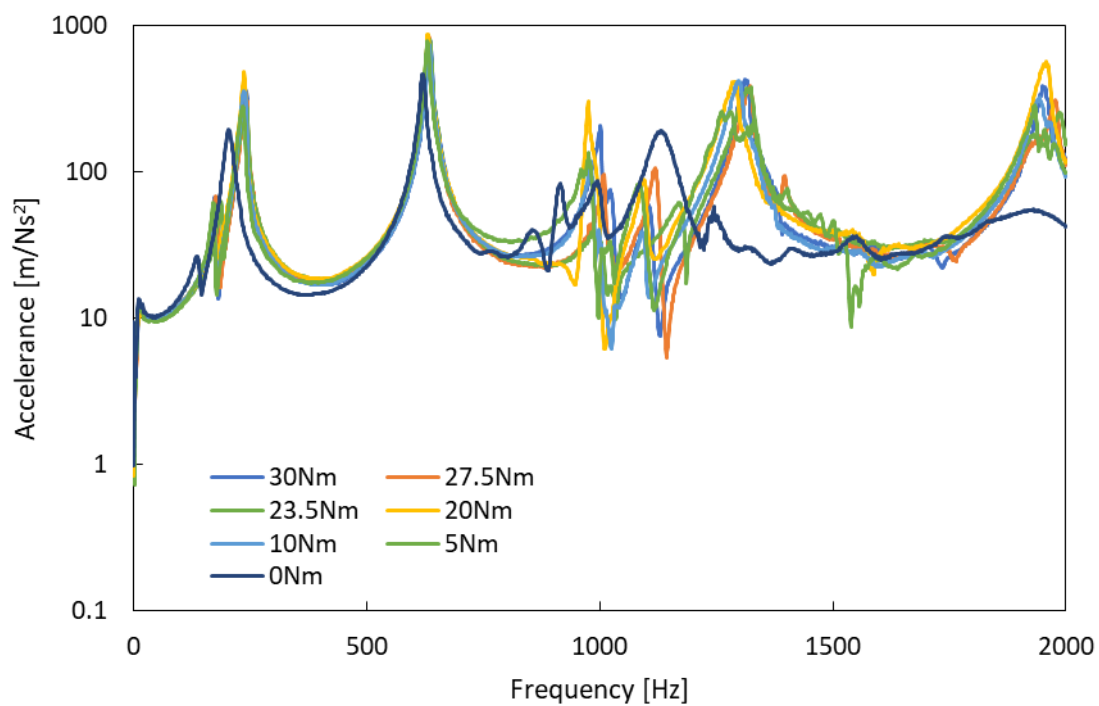


図 2-9 (c) 純せん断継手 試験 加速度計②

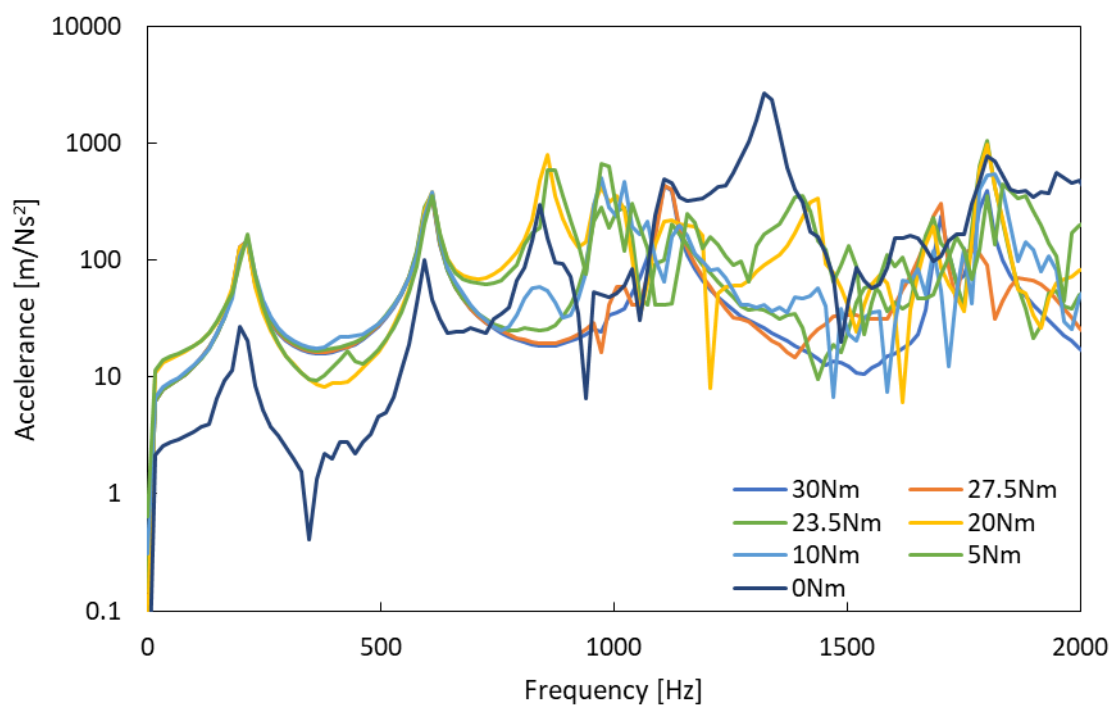


図 2-9 (d) 純せん断継手 接触非線形解析 加速度計②

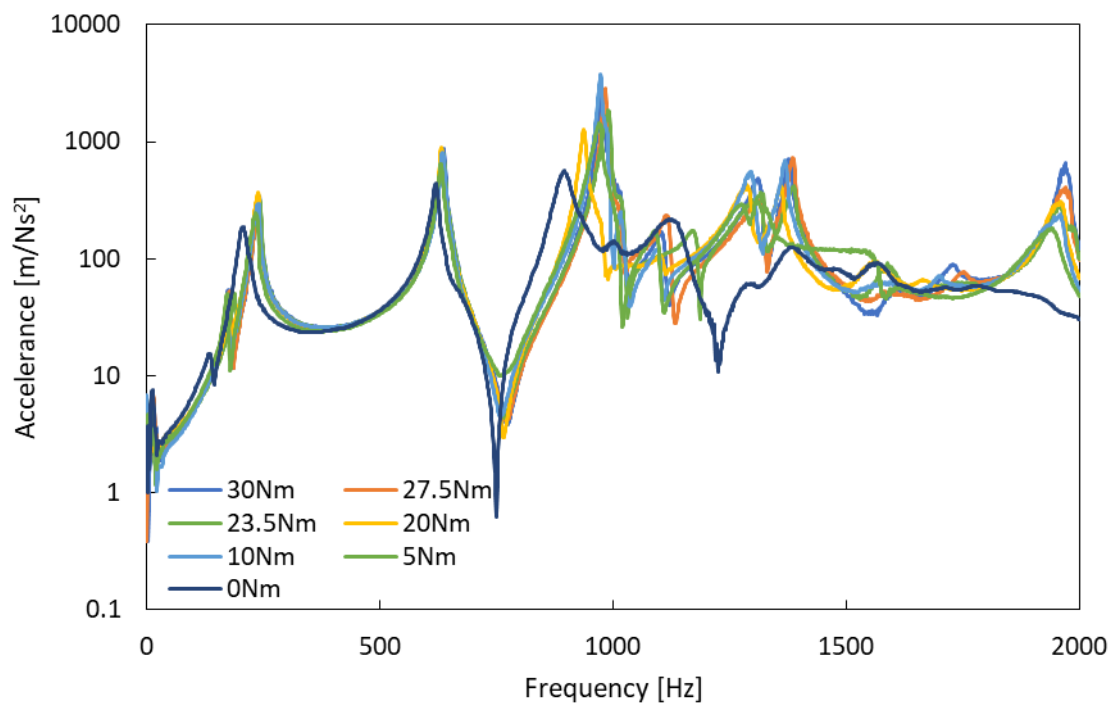


図 2-9 (e) 純せん断継手 試験 加速度計③

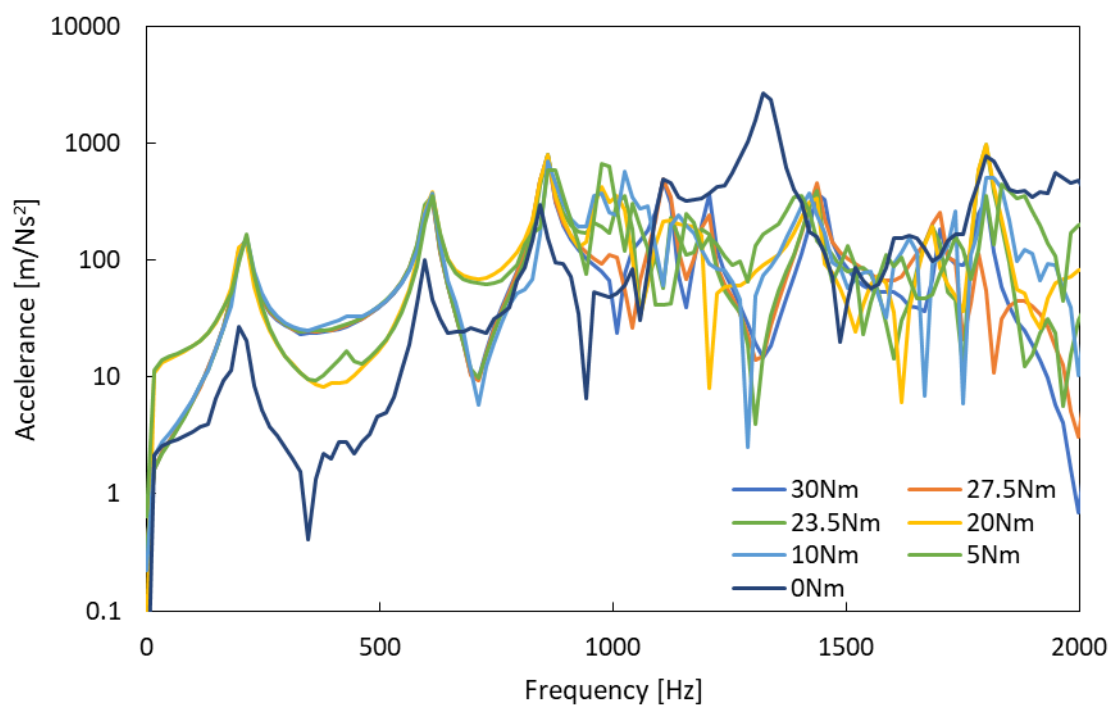


図 2-9 (f) 純せん断継手 接触非線形解析 加速度計③

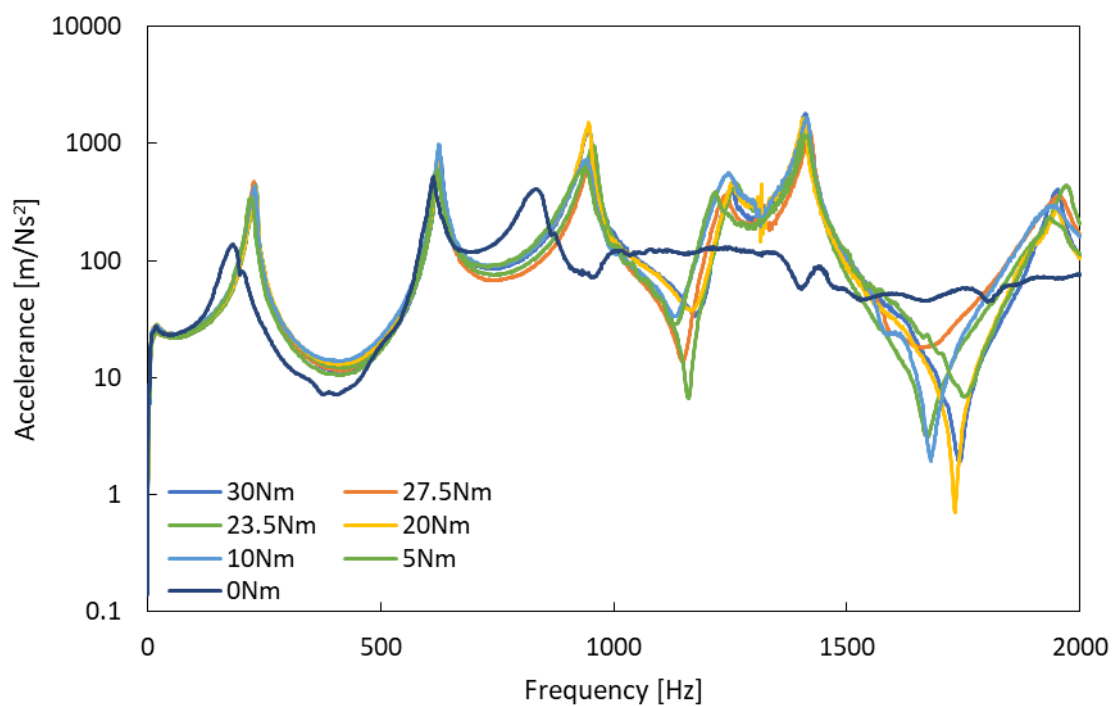


図 2-9 (g) セン断継手 試験 加速度計①

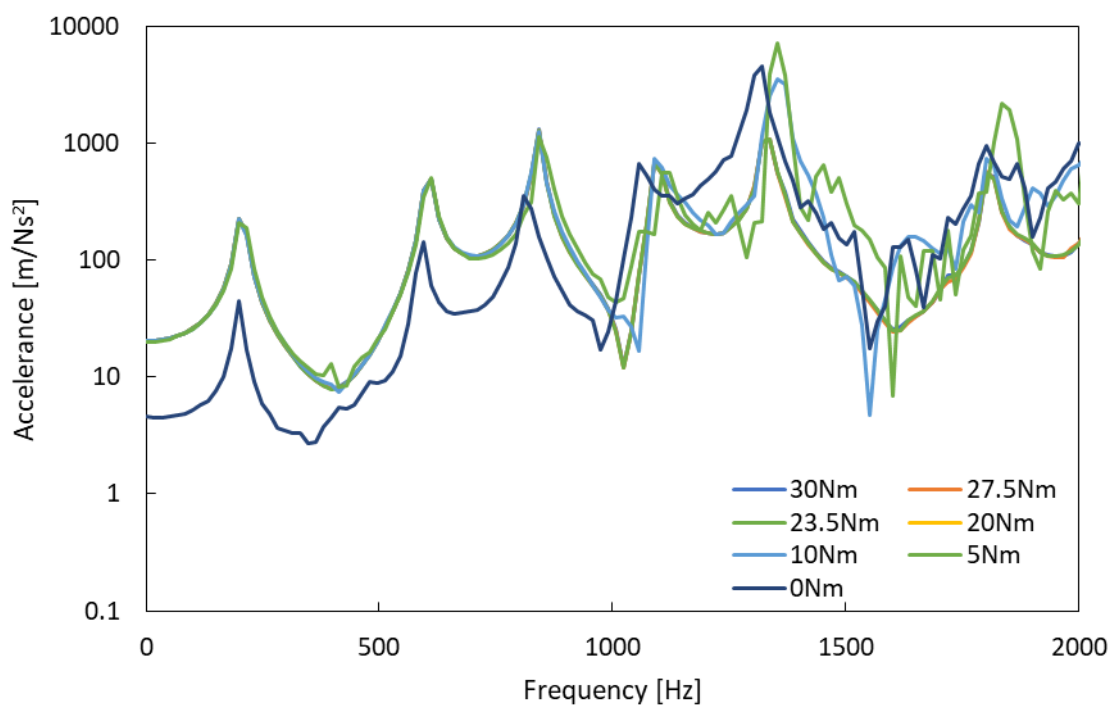


図 2-9 (h) セン断継手 接触非線形解析 加速度計①

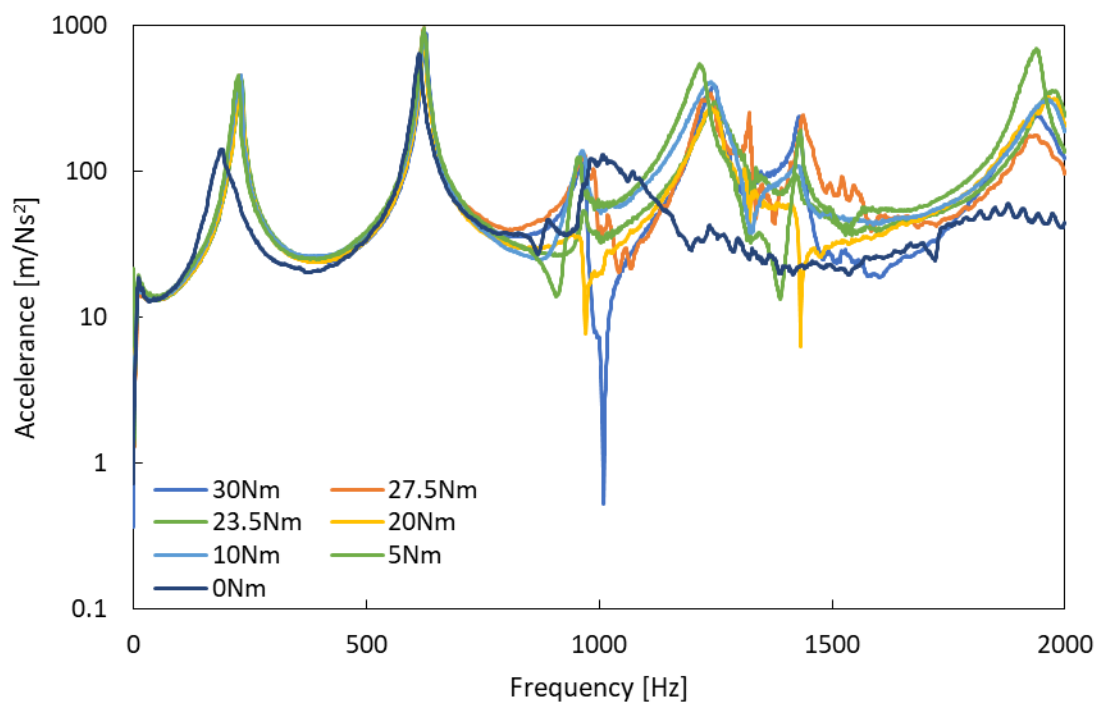


図 2-9 (i) セン断継手 試験 加速度計②

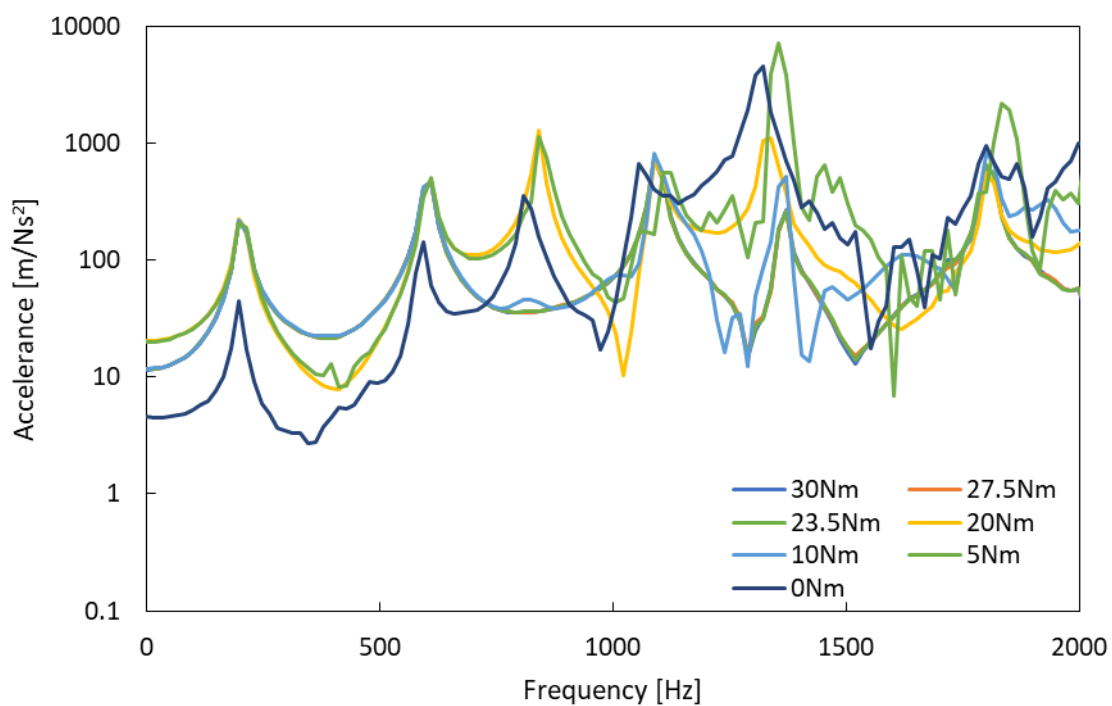


図 2-9 (j) セン断継手 接触非線形解析 加速度計②

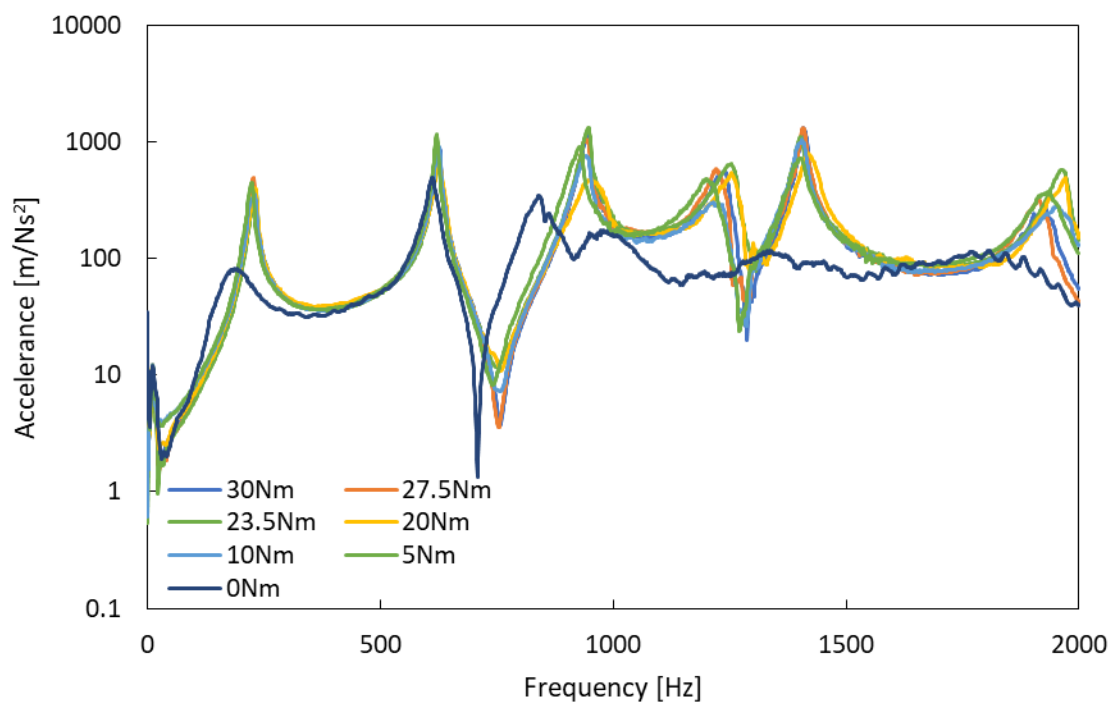


図 2-9 (k) セン断継手 試験 加速度計③

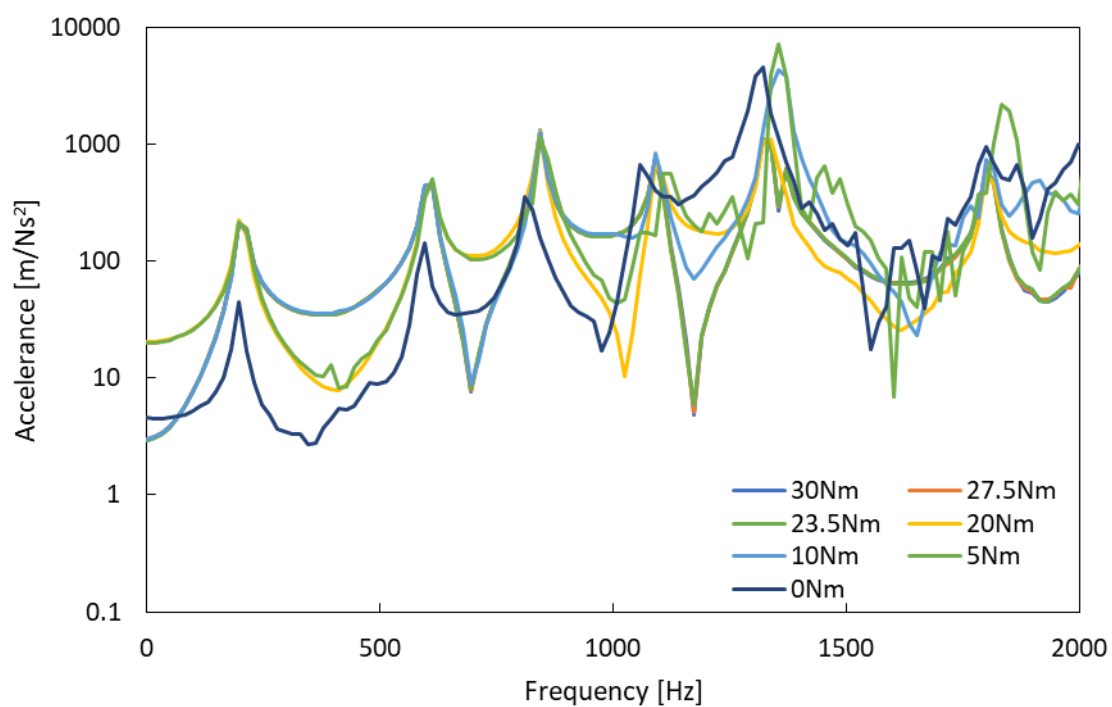


図 2-9(l) セン断継手 接触非線形解析 加速度計③

図 2-9 すべての締付トルクでのアクセランス

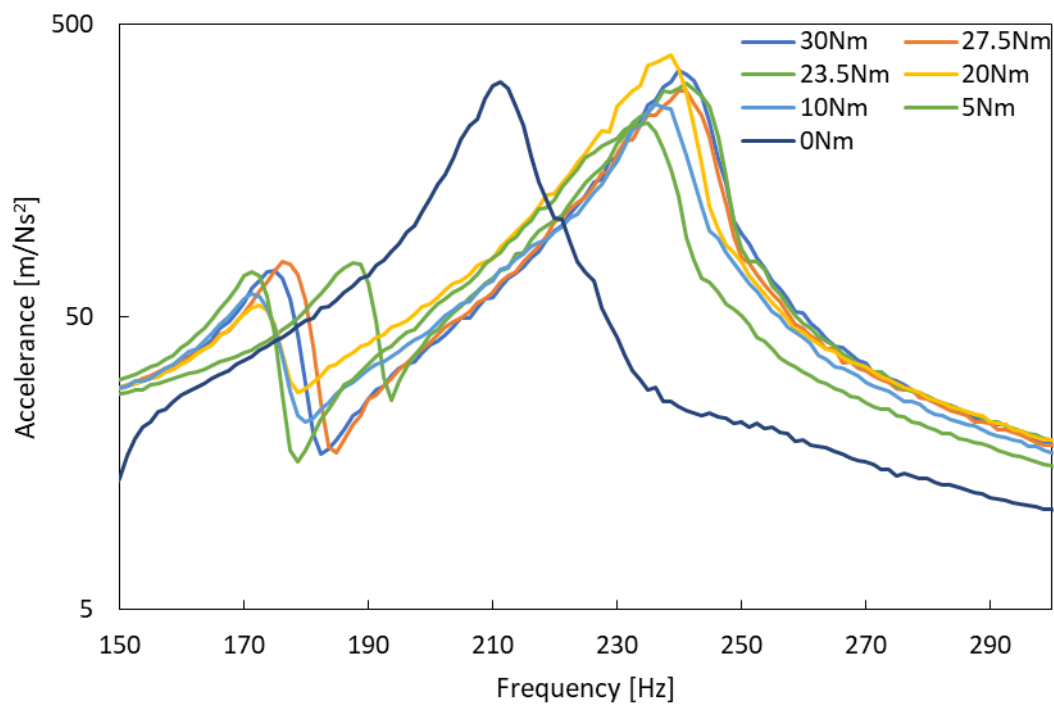


図 2-10(a) 純せん断継手 試験 加速度計① ピーク 1 付近拡大図

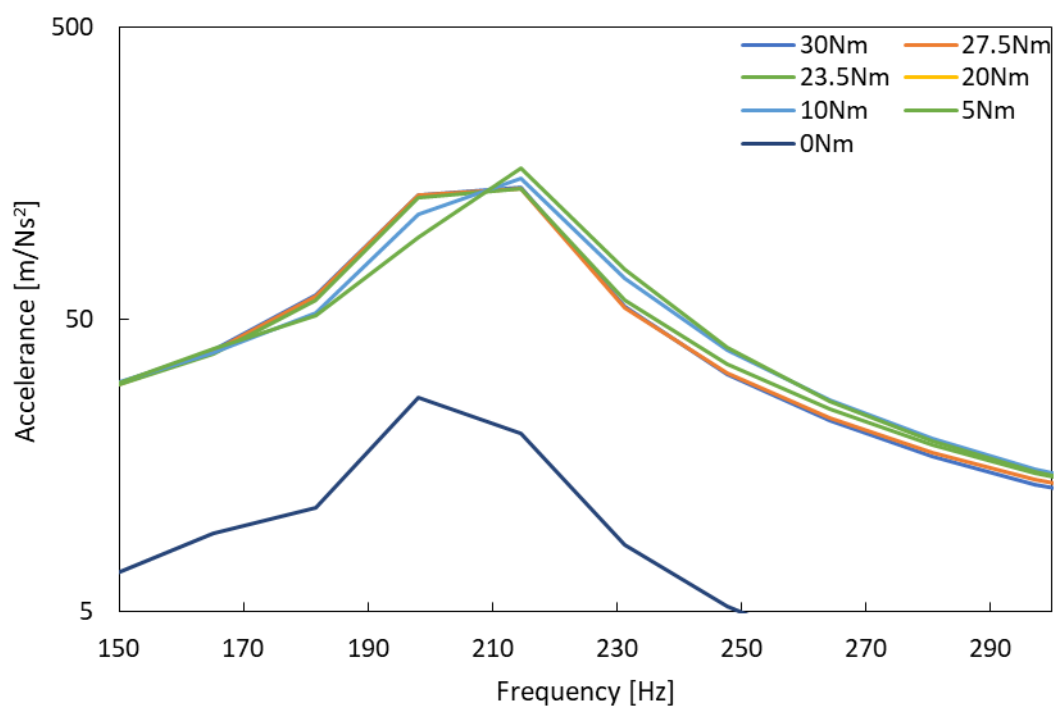


図 2-10 (b) 純せん断継手 接触非線形解析 加速度計① ピーク 1 付近拡大図

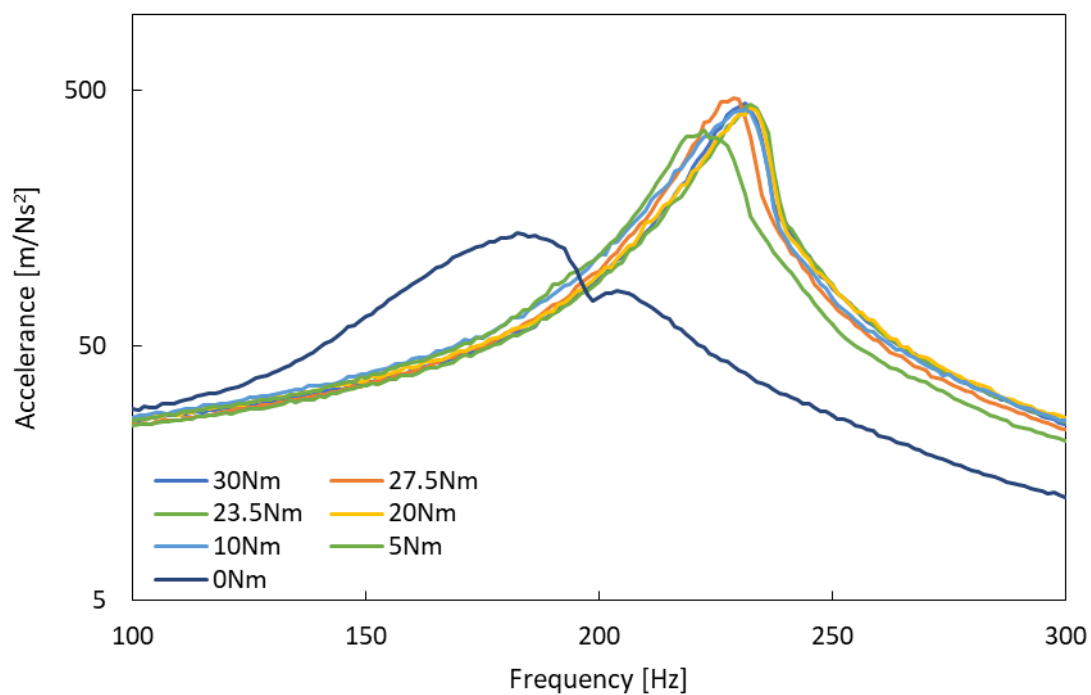


図 2-10 (c) セン断継手 試験 加速度計① ピーク 1 付近拡大図

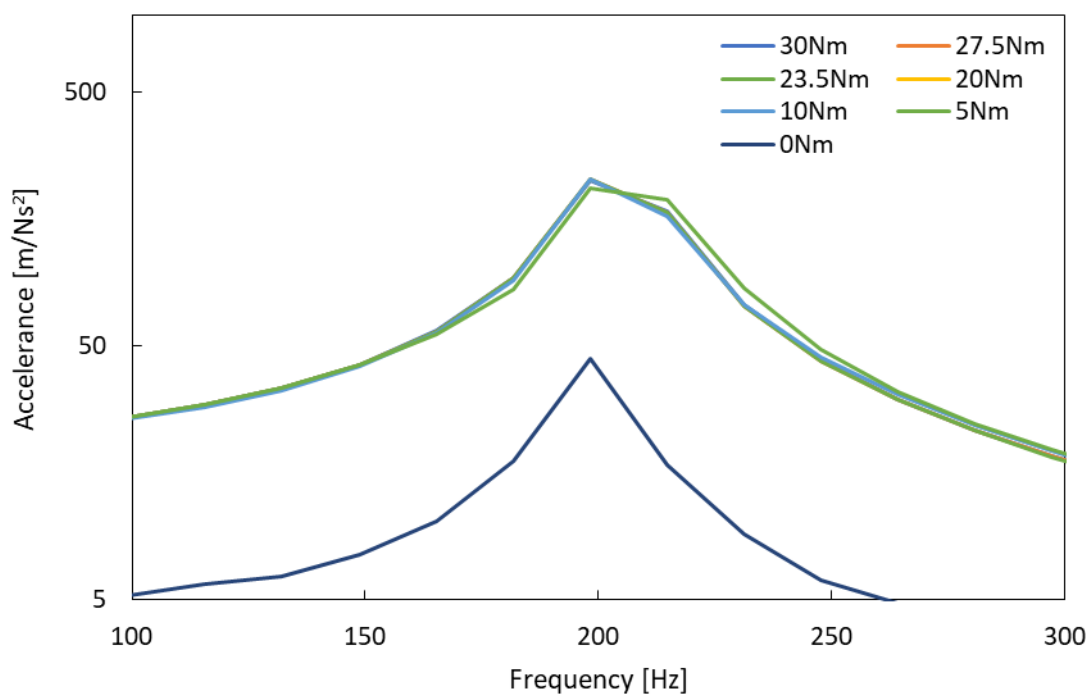


図 2-10(d) セン断継手 接触非線形解析 加速度計① ピーク 1 付近拡大図

図 2-10 加速度計① ピーク 1 付近拡大図

純せん断継手，締付トルク 30Nm の接触非線形解析における締結部の変形図を図 2-11 に示す．また，2 枚目被締結体の表面圧力コンタ図を図 2-12 に，図 2-12 中に示した線上での表面圧力分布グラフを図 2-13 に示す．軸力により被締結体が反るように変形しており，直径約 26mm より外側の領域では接触していない．

ボルト締結による圧縮力が伝播する領域，すなわち等価圧縮体は図 2-14 のように有孔円錐体形状で表現される．成瀬ら[5]によれば，被締結体の板厚が等しいとき，円錐角 ϕ は式 (2-1) のように表される．

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

式 (3-1) を用いて等価圧縮体の被締結体間接触域径 D を求めると $D = 20.6$ となり，接触非線形解析における接触領域の大きさは妥当だと考えられる．

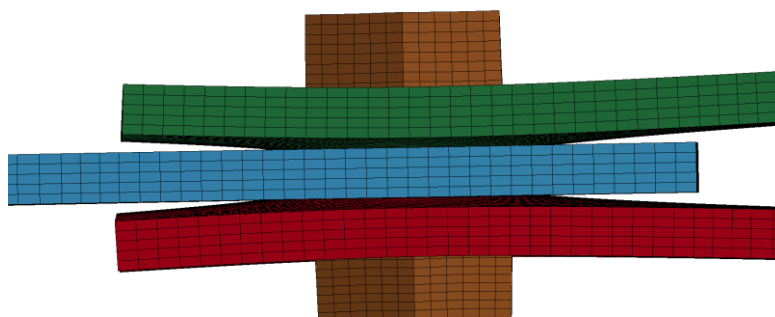


図 2-11 純せん断継手 締付トルク 30Nm 接触非線形解析 変形図 (scale×100)

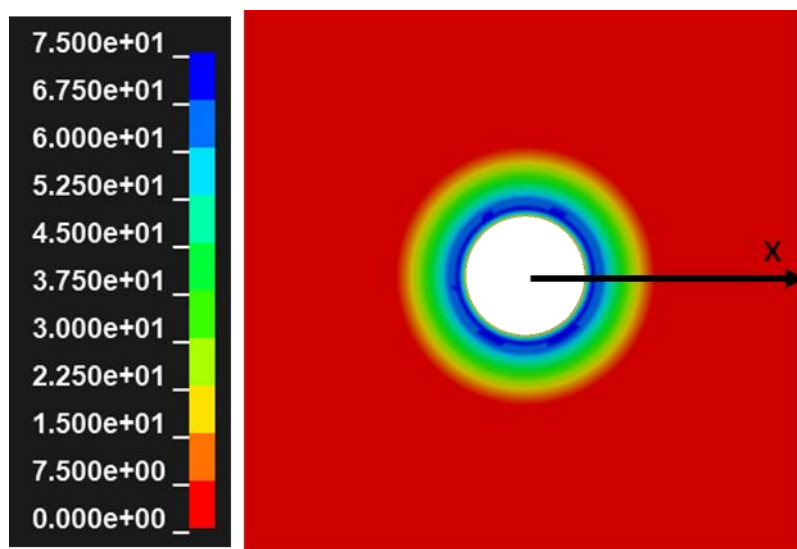


図 2-12 2 枚目被締結体 表面圧力[MPa]

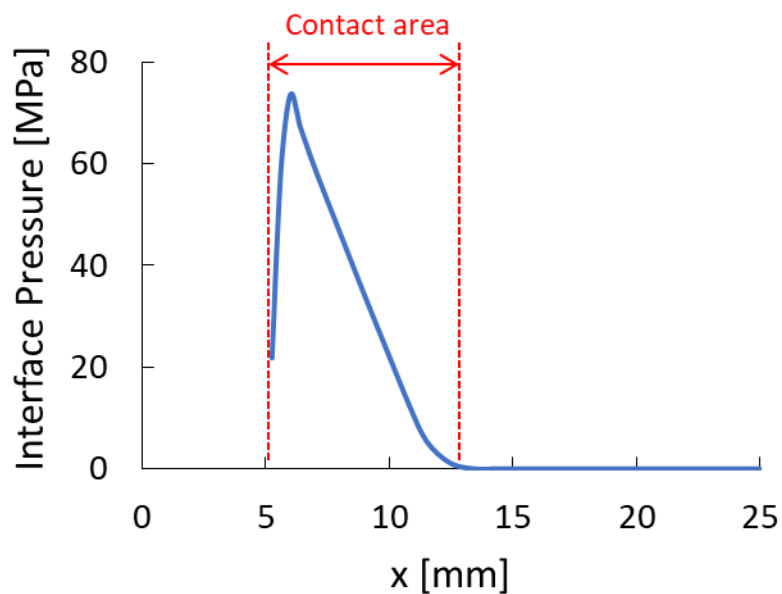


図 2-13 表面圧力分布

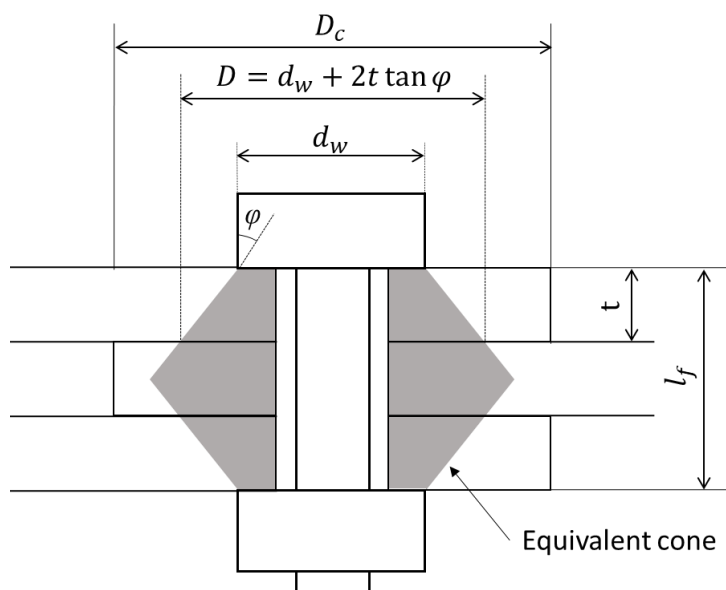


図 2-14 等価圧縮体領域

図 2-15 に示すように、等価圧縮体領域のみ固着させたモデル（固着域 1）と、等価圧縮体径の 2.2 倍領域を固着させたモデル（固着域 2）での線形解析では、図 2-16(a),(b) のようなアクセラランスとなった。固着域 1 線形解析は接触非線形解析と同様のアクセラランスを示しており、接触モデルと固着域 1 モデルはほぼ同等であると言える。また、固着域 2 線形解析は試験結果と概ね同様のアクセラランスを示した。しかし、実現象において被締結体間が固着している領域は等価圧縮体とほぼ一致していると考えられるため、これらは矛盾した結果となる。そのため、解析において考慮できていない要因があると考えられ、今後の課題となる。

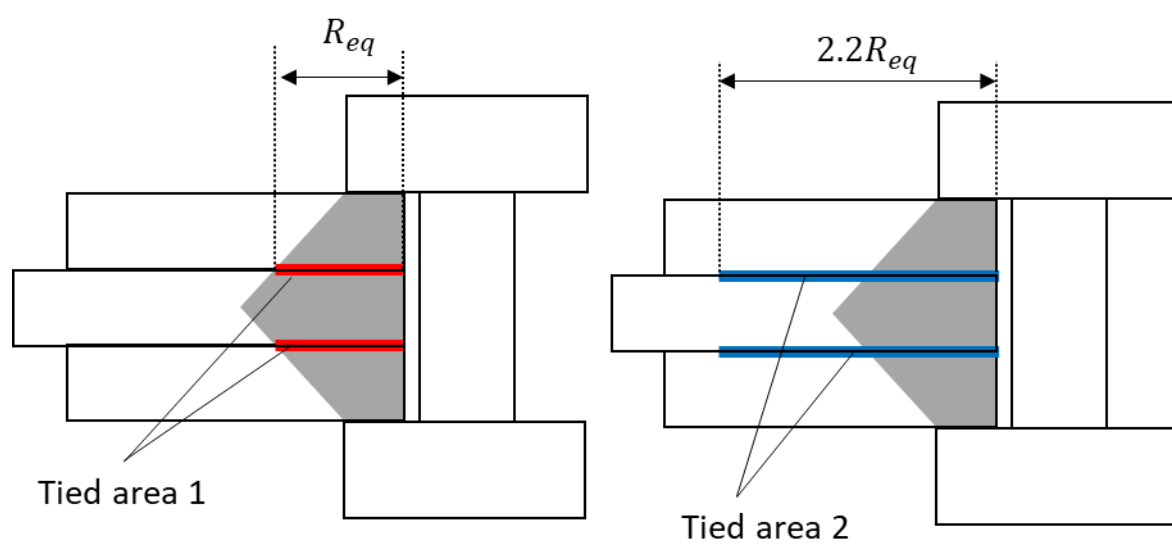


図 2-15 固着領域

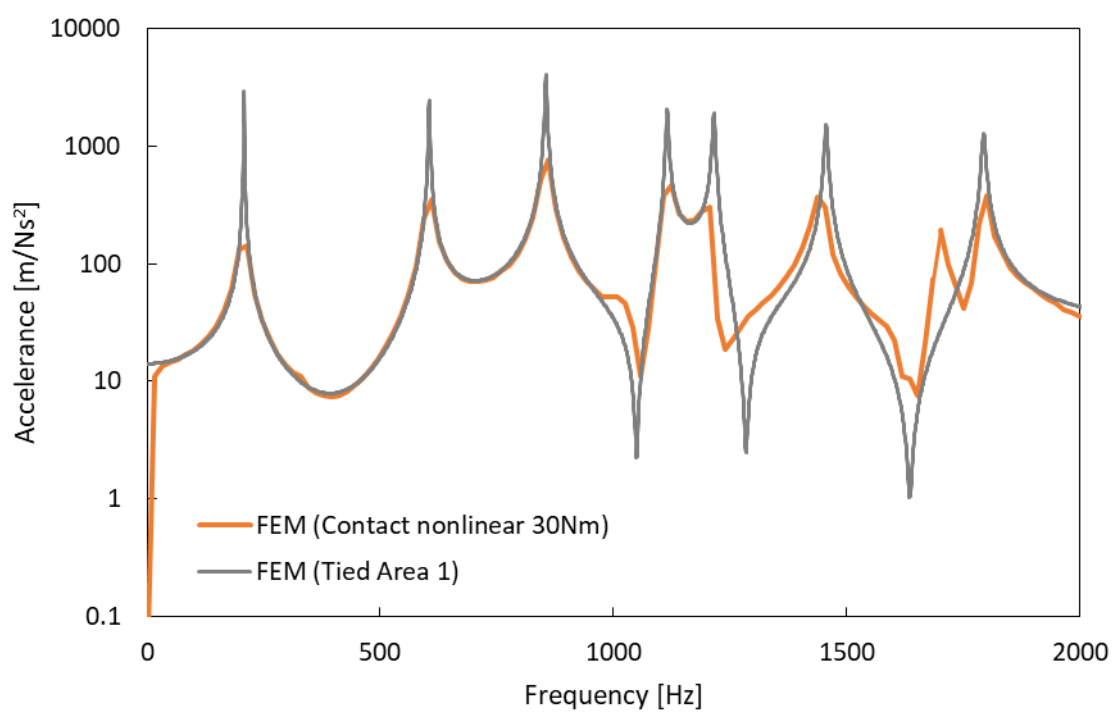


図 2-16 (a) 純せん断継手 接触非線形解析と固着域 1 線形解析 アクセランンス比較

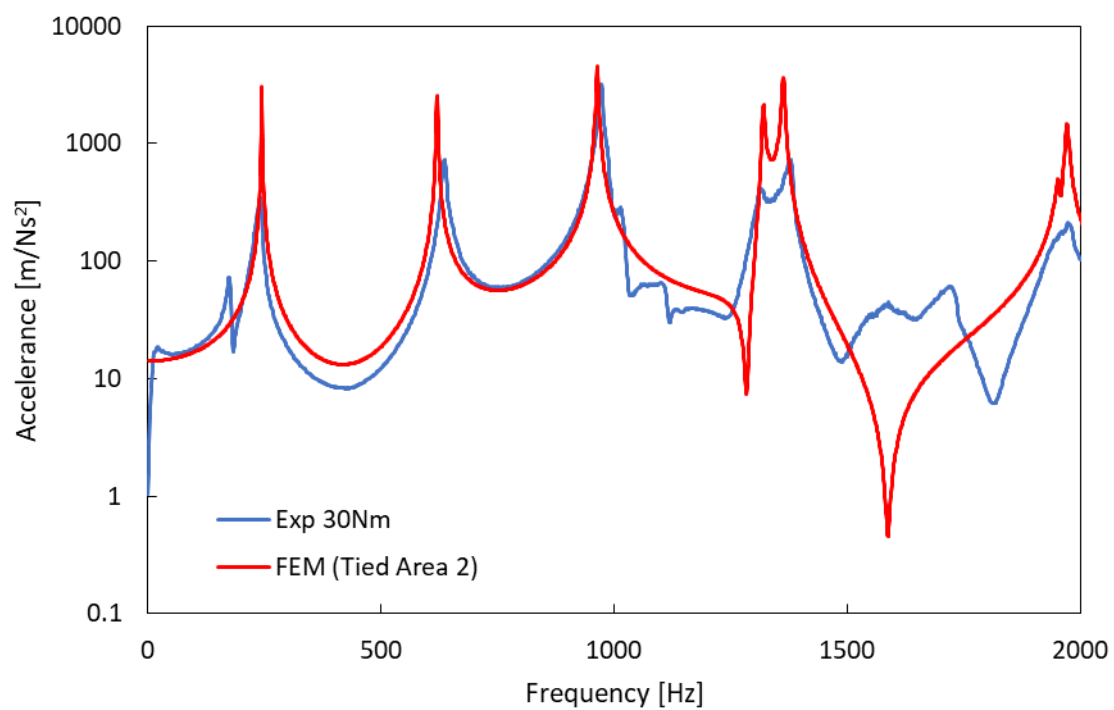


図 2-16 (b) 純せん断継手 試験と固着域 2 線形解析 アクセランス比較

2.6 結言

本章では，締め付けトルクをパラメータとした純せん断継手・せん断継手のモード解析試験・過渡応答試験により，継手の振動モードと周波数応答特性を確認した．継手の接触部を全域固着させた線形解析では，固有周波数を-2%～11%程度の誤差で予測でき，周波数応答特性も類似した傾向を示した．非線形の接触を考慮した解析では，低周波においては試験と類似した周波数応答特性を示すものの，高周波で試験との誤差が顕著にみられ，現象解明には課題が残る．

3 柳原の簡易モデルの予測精度確認

3.1 緒言

本章では，柳原[4]の先行研究において提案された柳原の簡易モデルについて，振動モード及び周波数応答特性の予測精度を確認する．

3.2 柳原の簡易モデル[4]

柳原の簡易モデルは，柳原[4]がスパイダーモデルの締結部近傍の剛性や応力分布を改善するために開発したシェル・ビーム要素によるモデルである．

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 3-1）．等価圧縮体の円錐角 ϕ は成瀬ら[5]によって式（3-1）のように定式化されている．

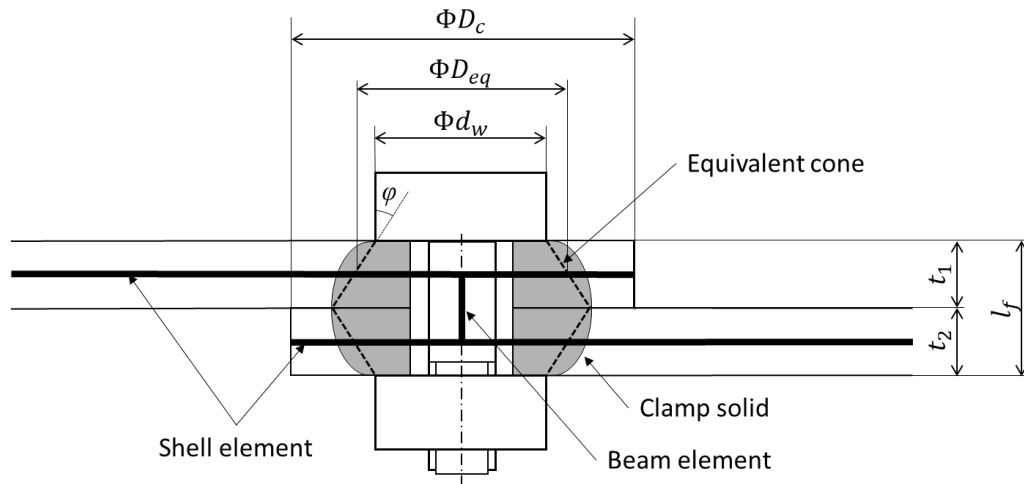


図 3-1 等価圧縮体とせん断継手

$$\tan\phi = 0.323 + 0.032 \ln\left(\frac{l_f}{2d_w}\right) + 0.153\left(\frac{D_c}{d_w}\right) + 0.0717 \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \quad (3-1)$$

(ただし, $t_1 \leq t_2$)

そして，式(3-1)より中立面上の等価圧縮体断面，即ち，等価座面領域径 ΦD_{eq} が以下の様に求まる．

$$D_{eq} = d_w + 0.5l_f \tan\phi \quad (3-2)$$

柳原の簡易モデルでは、等価座面領域がせん断力負荷時、被締結体間接触面から面外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ともに変形するという考え方から、被締結体中立面シェル同士を結ぶビーム要素の端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) によって定義している。これにより面内方向変形を許容する。ビーム要素端節点 (主節点) と等価座面領域内のすべての節点 (従節点) の間には式 (3-3) で表される拘束方程式が定義される。上付き添え字 m は主節点, s は従節点を表す。

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

また、面外方向変位に対する拘束として、ビーム要素端節点 (主節点) と等価座面領域径上節点 (従節点) に式 (3-4) に示す拘束方程式を定義する。これは主節点と従節点を剛体で結合したものと同義である。

$$u_{zi}^s - u_z^m = (y_i^s - y^m)r_x^m - (x_i^s - x^m)r_y^m \quad (3-4)$$

図 3-2 に柳原の簡易モデルのシェル・ビーム要素間の拘束関係を示す。

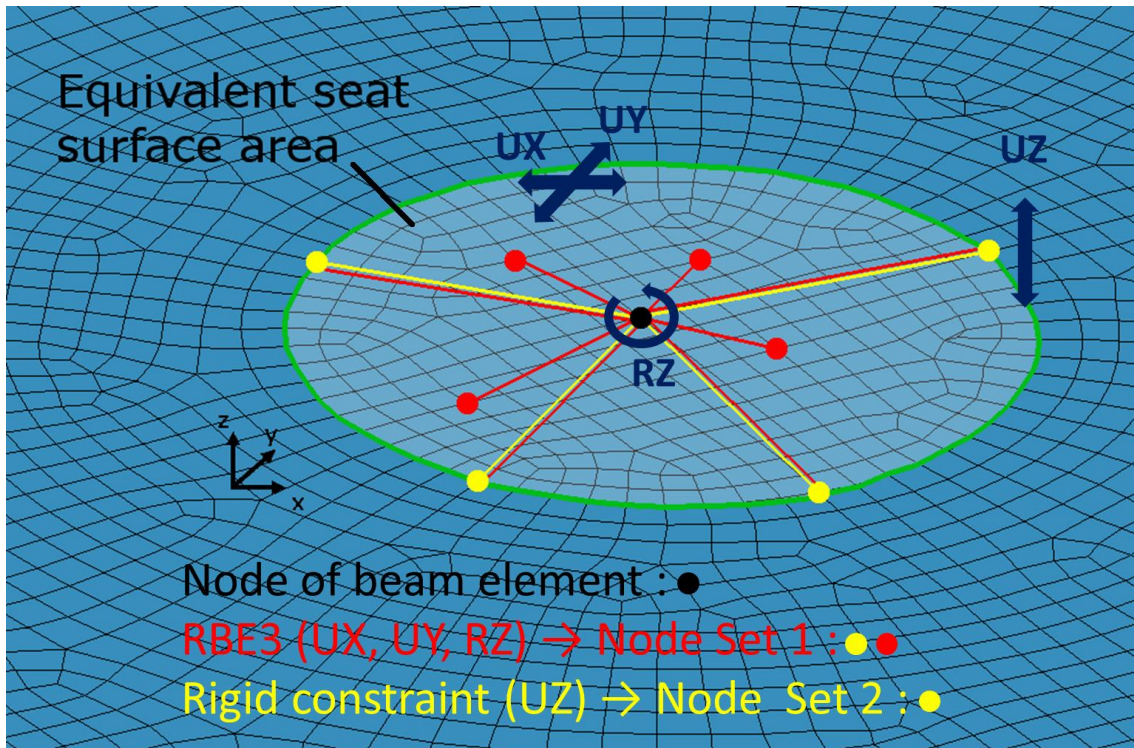


図 3-2 柳原の簡易モデルの拘束関係

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、それらの合剛性を定義する。軸方向剛性、曲げ剛性、ねじり剛性に関しては、成瀬らが提案したスパイダーモデル[2][3]と同様に定義する。また、Kou ら[6]によって定式化されたせん

断剛性をもとに定義される．板厚が等しいせん断継手でのビーム要素せん断剛性 G_{1lap} は式（3-5）で，板厚が等しい純せん断継手のビーム要素せん断剛性 G_{2lap} は式（3-6）のように定義される．ここで， t は板厚である． k_{pli} は被締結体の横弾性係数 G_C ，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 を用いて式（3-7）で表せられる．

$$G_{1lap} = \frac{1}{2}tk_{pli} \quad (3-5)$$

$$G_{2lap} = tk_{pli} \quad (3-6)$$

$$k_{pli} = \frac{G_C}{4t}\pi((d_w + 2t\tan\phi)^2 - d_h^2) \quad (3-7)$$

3.3 解析条件

解析対象とするモデルは，柳原[4]が有限要素法解析ソフト ANSYS17.0 で作成・提案したモデルを LS-DYNA に移行し，ビーム・シェル要素間の拘束を定義しなおしたものを用いた．ANSYS 等での RBE3 は LS-DYNA では*CONSTRAINED_INTERPOLATION が相当する．ビーム要素については，合力型ねじりビームにより軸方向剛性，曲げ剛性，ねじり剛性，せん断剛性を定義した．また，接触は定義しない．このモデルにおいて固有値解析及び周波数応答解析を行った．周波数応答解析での振動励起点及び応答出力点は，第2章で行った過渡応答試験での打点及び加速度計位置（図 2-3）と同様である．表 3-1 に解析条件表を示す．また，図 4-3 にせん断継手のモデルを示す．

表 3-1 解析条件表

	純せん断継手	せん断継手
要素	四辺形一次要素	
要素数	26810	17873
拘束条件	拘束なし	
単位系	[mm][N][s]	

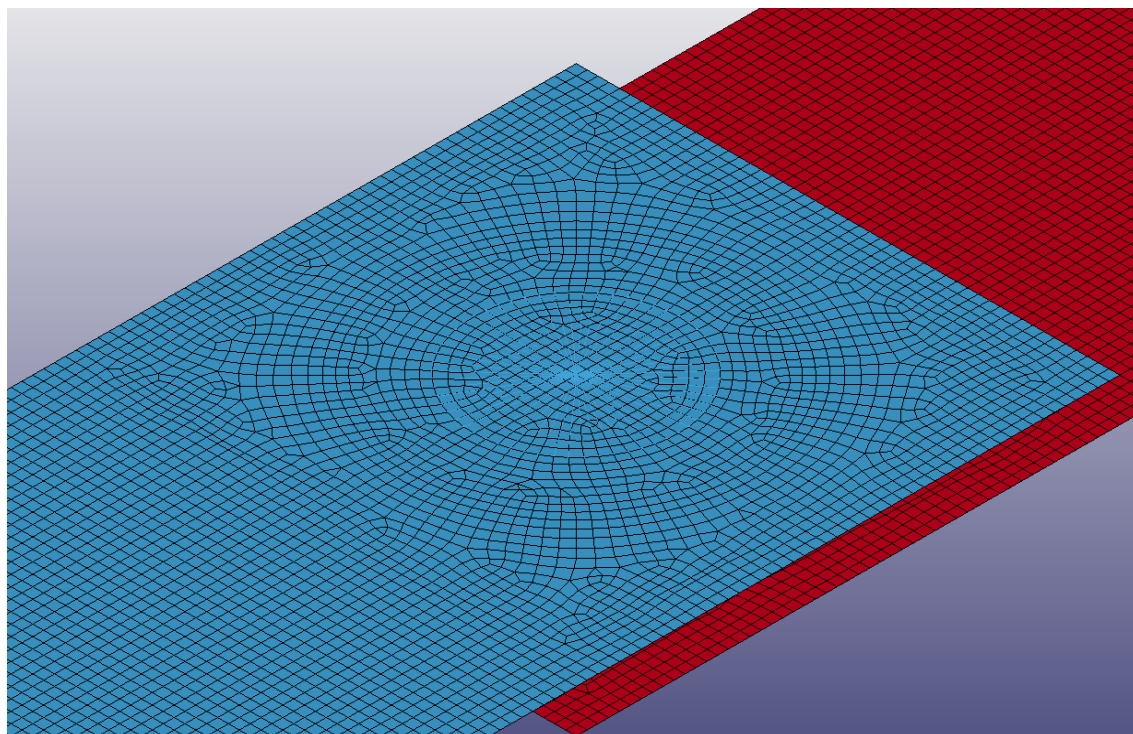


図 3-3 柳原の簡易モデル セン断継手

3.4 解析結果と考察

図 3-4 に(a)純せん断継手と(b)せん断継手の振動モードを示す。2.5 節のモード解析試験結果（図 2-5）と比較すると，純せん断継手の試験で観測された 3 次の振動モードは柳原の簡易モデルではあらわれなかったが，柳原の簡易モデルにおける 4 次と 5 次の振動モードは周波数が近接しており，2 つのモードが重なり合うことで試験での 3 次モードに対応すると考えられる．ボルト側の板とナット側の板が逆位相となるような振動モードがみられる点は，固着モデルでの固有値解析と同様である．せん断継手の振動モードについては試験結果およびソリッドモデル固着線形解析の結果と一致した。

表 3-1(a),(b)継手形状ごとの固有周波数を示す．純せん断継手については，試験で観測されたモードのみ記載している．固有周波数の予測精度は純せん断継手では-12%～5%程度，せん断継手では 3%～7%程度であった。

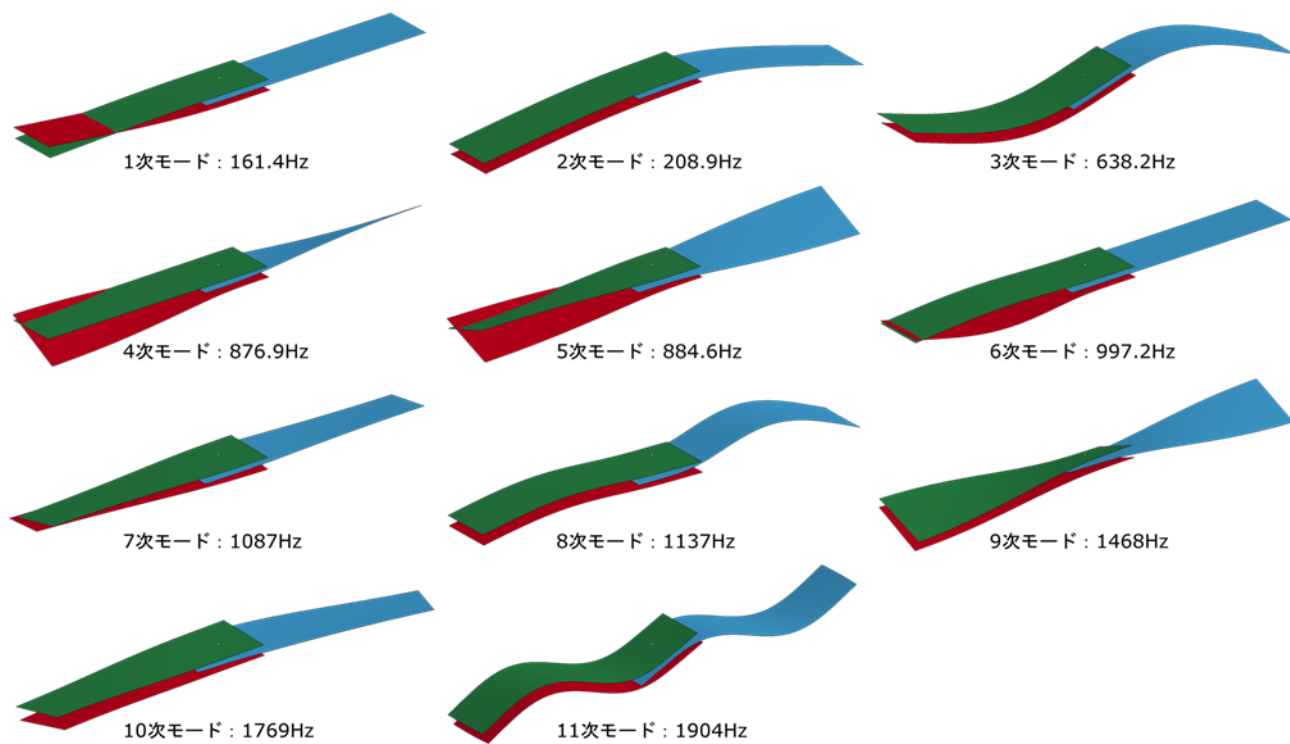


図 3-4(a) 純せん断継手 振動モード

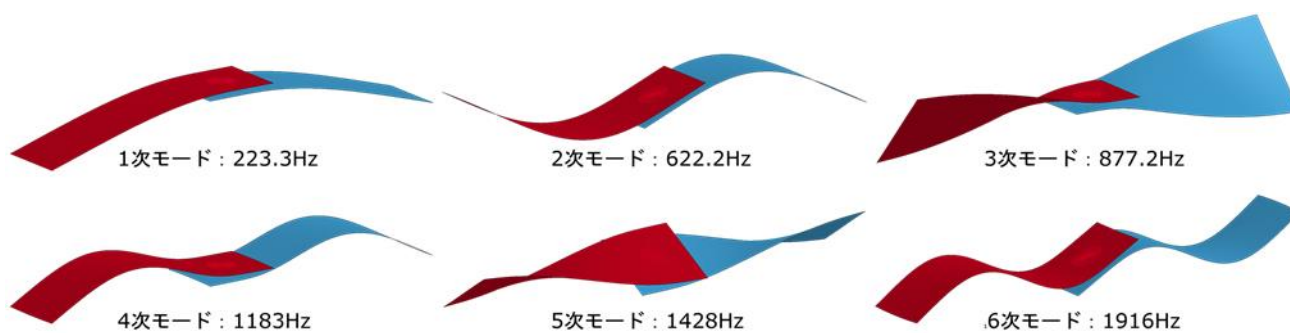


図 3-4(b) せん断継手 振動モード

図 3-4 柳原の簡易モデル 振動モード

表 3-2 継手形状ごとの固有周波数

表 3-2(a) 純せん断継手 固有周波数

	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次
実験 [Hz]	238.4	636.7	986.5	1381	1973
柳原モデル [Hz]	208.9	638.2	-	1468	1904
誤差	-12%	0.24%	-	6.3%	-3.5%

表 3-3(b) セン断継手 固有周波数

	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次
試験 [Hz]	222.9	619.3	906.9	1209	1338	1880
柳原の簡易モデル [Hz]	223.3	622.2	877.2	1183	1428	1916
誤差	0.18%	0.47%	-3.3%	-2.2%	6.7%	1.9%

次に、図 3-5(a)～(f)に加速度計①～③のアクセラランスを示す。どちらの継手形状においても、第 2 ピーク付近までは試験結果とよく一致する。第 2 ピーク以降については、特に純せん断継手の 800～1500Hz で試験との差異が大きくなった

第 2 章で行ったモード解析試験及びソリッドモデル固着線形解析において、純せん断継手、せん断継手ともに約 1000Hz と約 1400Hz において、継手がねじれる振動モードを持っていた (図 2-6)。柳原の簡易モデルは、軸直角方向荷重に対する締結部の剛性は高精度で予測できることが確認されている[4]が、その他の荷重モードに対する妥当性は未確認であり、ねじり荷重に対して締結部の剛性を正しく表現できていないことも考えられる。

一方、面外曲げの振動モードを示す固有周波数付近では、純せん断継手、せん断継手ともに試験結果と類似したアクセラランスを示しており、柳原の簡易モデルの面外曲げに対する剛性は一定の妥当性があるといえる。

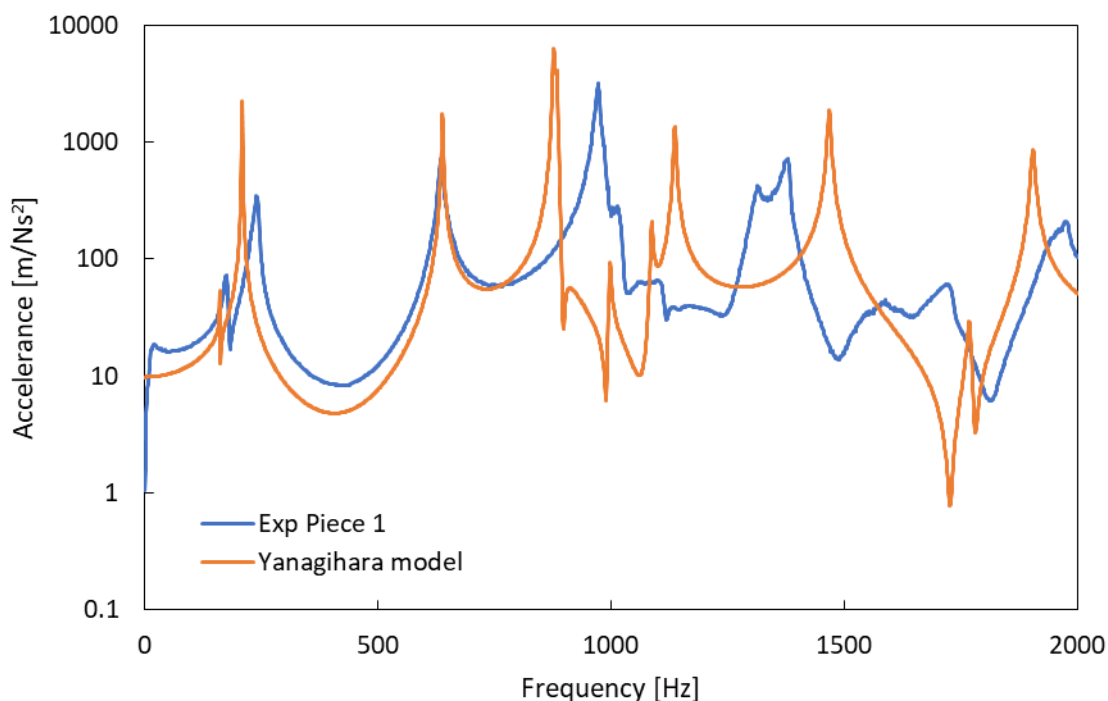


図 3-5 (a) 純せん断継手 加速度計①アクセラランス

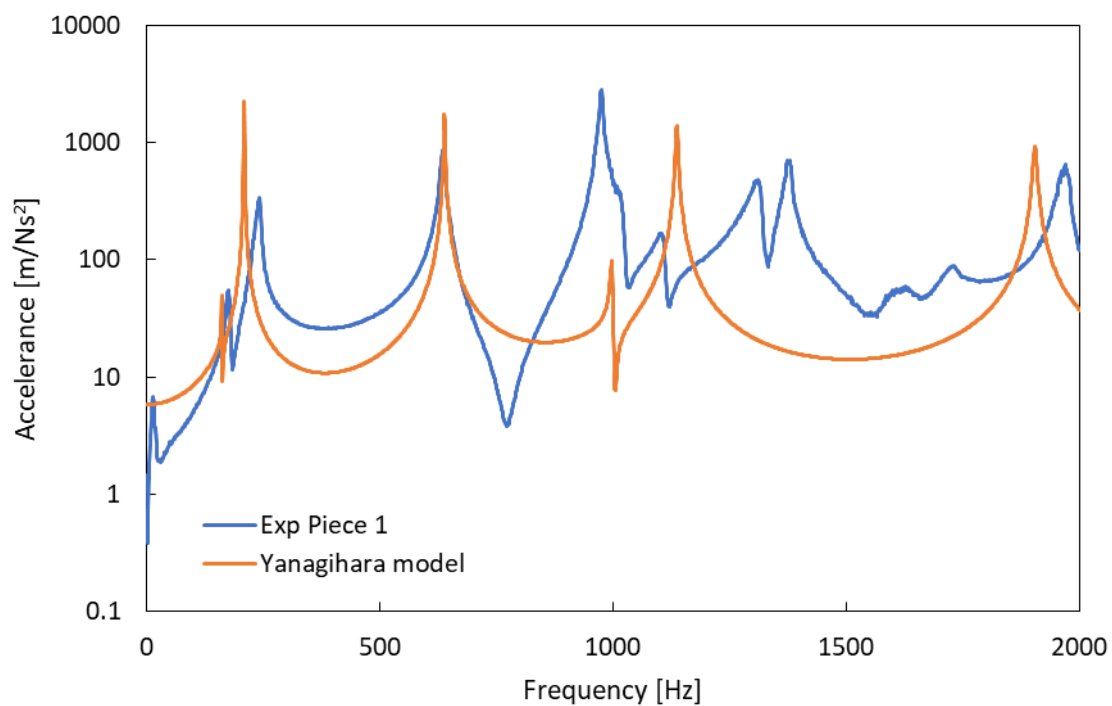


図 3-5 (b) 純せん断継手 加速度計②アクセラランス

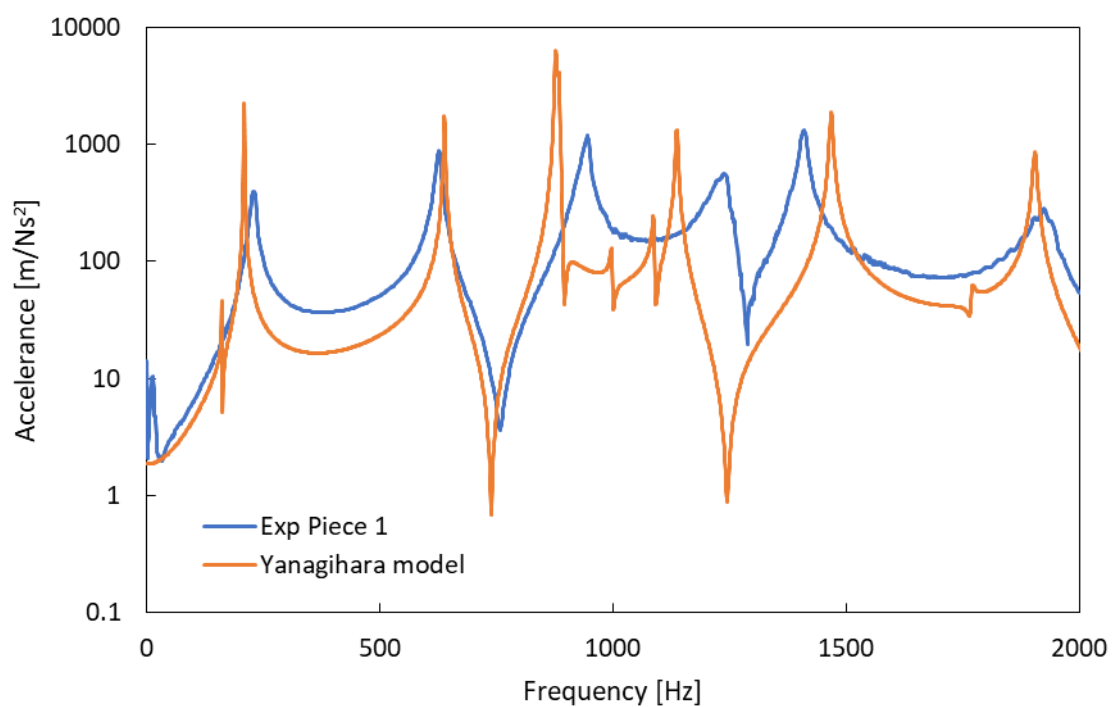


図 3-5 (c) 純せん断継手 加速度計③アクセラランス

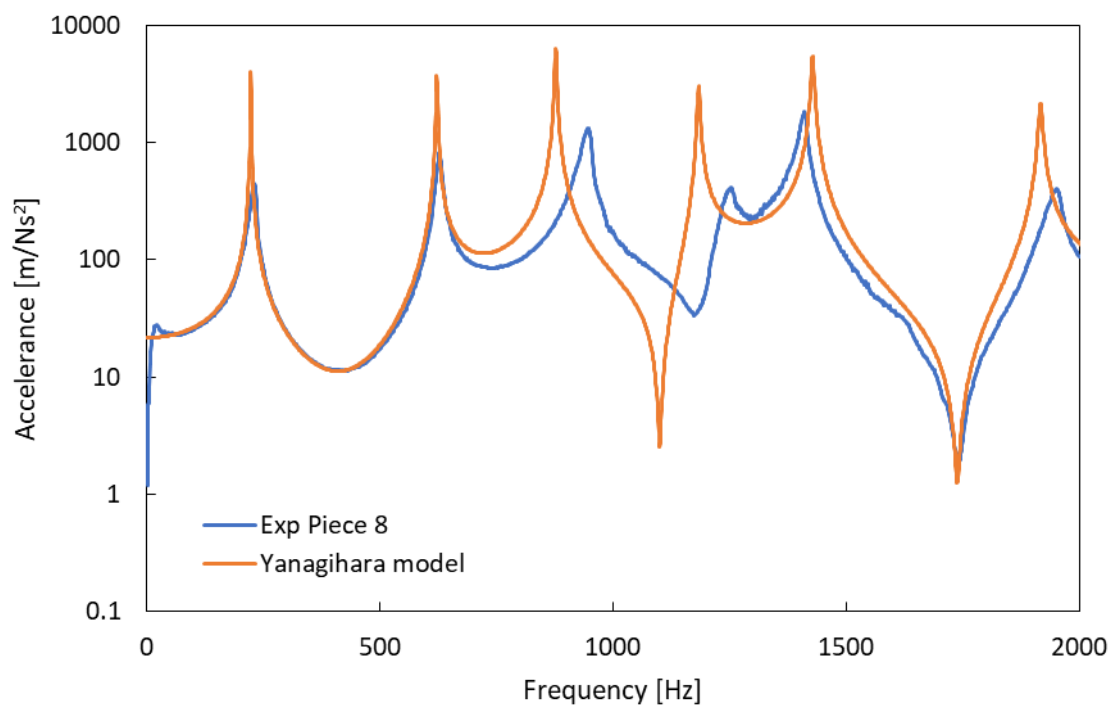


図 3-5 (d) セン断継手 加速度計①アクセラランス

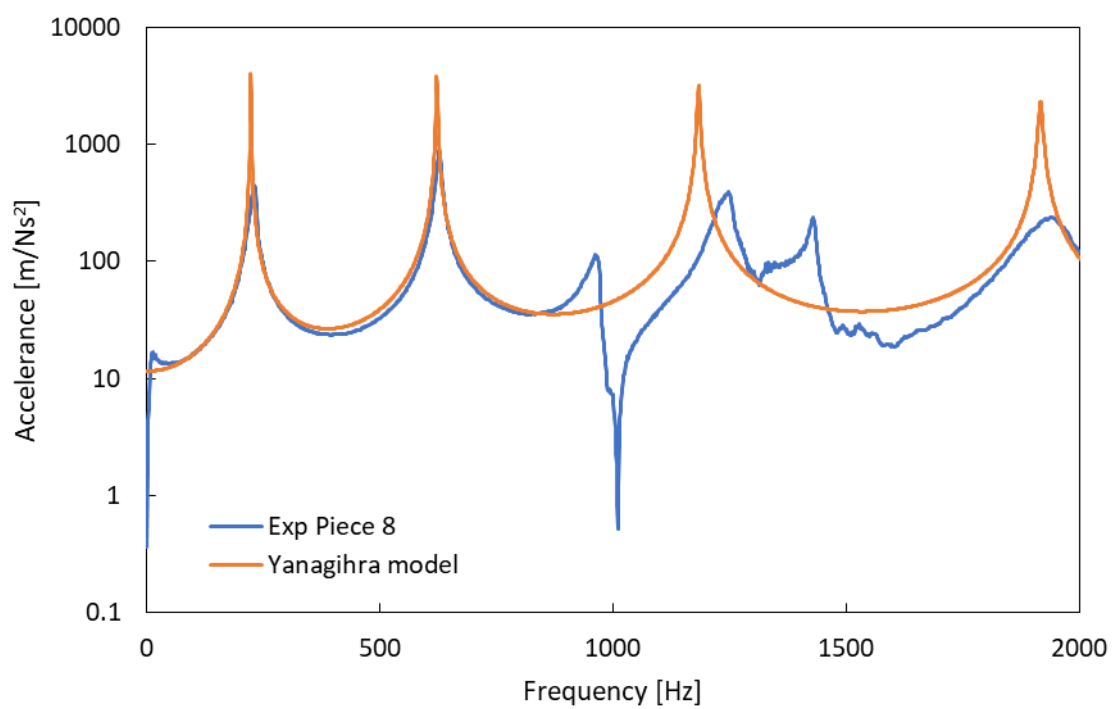


図 3-5 (e) セン断継手 加速度計②アクセラランス

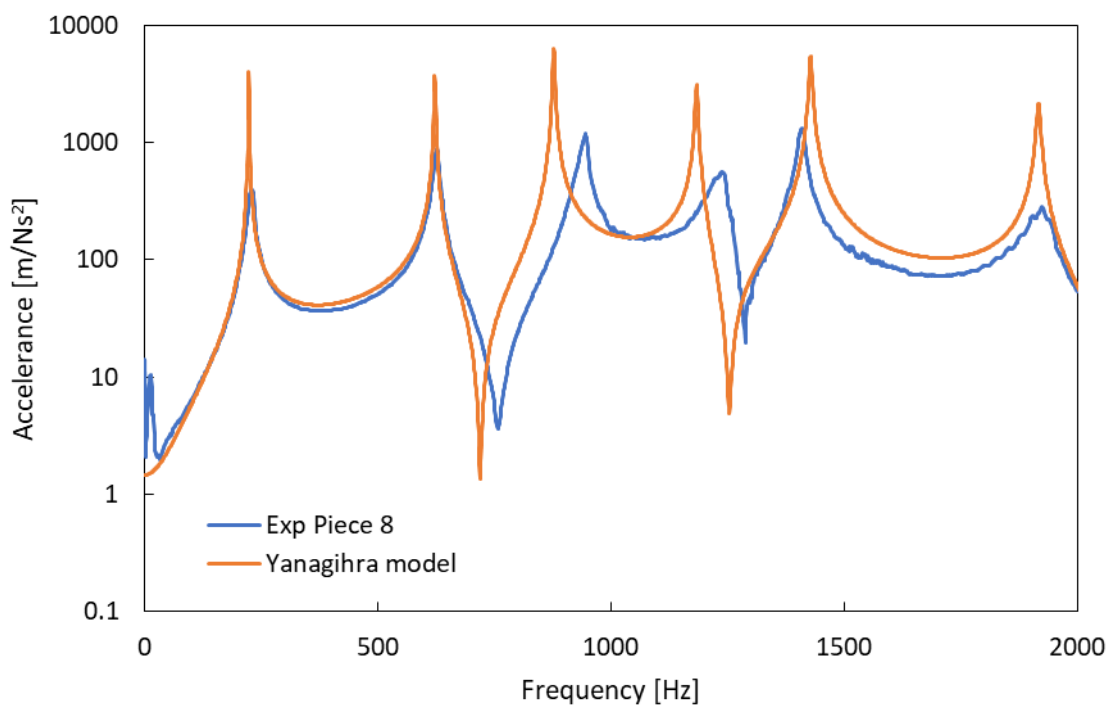


図 3-5(f) せん断継手 加速度計③ アクセラランス

図 3-5 継手形状・加速度計ごとのアクセラランス

3.5 結言

本章では、柳原の簡易モデルの固有値解析及び周波数応答解析を行い、振動特性の予測精度を確認した。特に純せん断継手について、試験と異なるアクセラランスを示す周波数域が存在した。固有周波数の予測誤差は、純せん断継手で最大 12%程度、せん断継手で最大 7%程度であった。

4 結論

4.5 結論

本研究では、ボルト締結体の振動特性を再現する簡易モデルの作成に向け、純せん断継手とせん断継手による試験と有限要素法解析を行った。また、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、振動特性の予測精度を確認した。以下に結論を示す。

まず、ボルト・ナット部をリベット形状でモデリングしたソリッドモデルの固着線形解析により、締結体の振動モード及び固有周波数を確認した。固有周波数の予測誤差は最大で 11%程度であった。

次に、締め付けトルクをパラメータとした過渡応答試験及び接触非線形解析により、アクセラランスの比較を行った。高周波成分では試験結果と解析結果に差異がみられたものの、締め付けトルク低下によってアクセラランスと固有周波数は下がる傾向があることを示した。

また、柳原の簡易モデルでの固有値解析及び周波数応答解析では、継手がねじれるモードの固有周波数付近で試験結果との差異が大きくなり、固有周波数の予測誤差は最大 12%程度であった。

4.6 今後の展望

本研究では、有限要素法解析に用いたソリッドモデルのボルト・ナット部をリベット形状で表現しているが、その妥当性は担保されていない。ボルト・ナットのねじ山までを詳細に再現したモデルでの接触非線形解析により振動特性を評価することが求められる。

また、振動特性の影響因子として確認したのは締め付けトルクのみであり、その他の影響因子を明確化することが求められる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，様々な方にご指導・ご協力をいただきました．

泉教授，波田野講師，高本助教には研究や論文執筆に際してご指導いただきましたことを感謝申し上げます．日々の研究で様々な指摘や手助けをして頂いた榊間さんを始めとして，研究室の先輩方にも感謝しております．

日立製作所の皆様には，打ち合わせ等において多くの貴重なご意見を頂きました．ありがとうございました．

最後に，様々な面で学生生活を支援してくださった両親と兄弟に感謝します．

2019年2月1日

殿垣佳治

参考文献

- [1] 福岡 俊道, 野村 昌孝, 森本 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”, 東京大学修士論文, 2018.
- [5] 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.
- [6] 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, October 2017, pp. 1–16, 2018.

以上

卒業論文

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

2019 年 2 月 1 日

指導教員 泉 聡志 教授

03-170224 殿垣 佳治