

振動試験用治具の固有振動数への数値解析条件の影響評価

松井 大治

振動試験に使用する治具の固有振動数について、有限要素法(Finite Element Method)を用いた数値解析を行ない、解析条件が固有振動数へ及ぼす影響を確認した。また、振動試験機を用いた実験結果と解析結果の比較を行い、解析条件の妥当性を検証した。

キーワード：有限要素法、FEM、固有値解析、周波数応答解析、振動試験

1. はじめに

振動試験は、製品の振動に対する特性の評価や、振動に対する耐久性を評価する際に行われる試験である。振動試験時には、試料を振動試験機の加振台に取り付けるために治具を使用することが多いが、試料に加わる振動が過大又は過小になることを防ぐためには、治具の振動特性を把握して、十分な剛性をもたせるなどの対策をしておくことが重要である。振動特性を把握する手段としては、実機を使用した振動試験や、有限要素法を用いた数値解析が使用される。数値解析を行う際には、負荷条件や拘束条件の設定が重要で、解析結果にも大きく影響する。適切な解析条件を選定するためには、実験と解析の両方を行い、解析の妥当性検証を行うことが重要である。

本報では、当センターで保有している大型振動試験機用の垂直補助テーブル(以下、補助テーブル)を評価対象として、有限要素法を用いた数値解析と、振動試験を行なった結果について報告する。補助テーブルは、振動試験を行う時に、試料を取り付けるために使用する治具である。補助テーブルの振動特性を把握して、数値解析のための条件を理解しておくことで、振動試験の際の事前検証の効率が上がる。数値解析では、固有値解析と周波数応答解析を行い、拘束条件の違いによる固有振動数への影響を確認した。

最後に、解析結果を評価する際には、材料物性値のばらつきや、製品寸法のばらつきを考慮して行うことが推奨されている⁽¹⁾。材料物性値と製品の寸法ばらつ

きを考慮した解析を行い、解析結果への影響を調査した。

2. 試験方法

2.1 垂直補助テーブルの形状

今回、評価対象として使用した垂直補助テーブルを図1に示す。

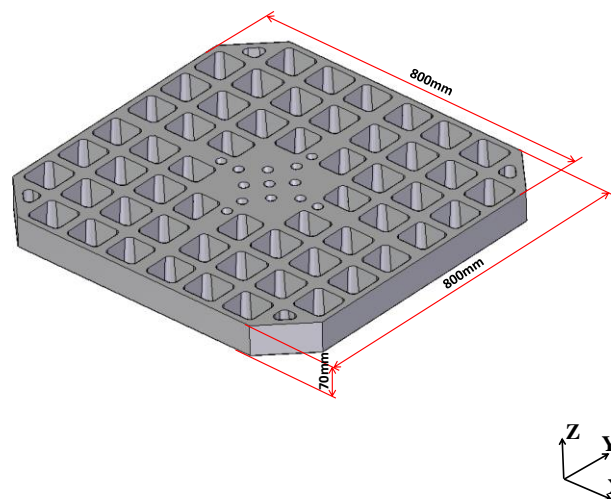


図1 垂直補助テーブルのCADモデル

2.2 有限要素法を用いた数値解析

数値解析では、当センターが所有する三次元CADシステムの機能の一つである、SolidEdge Simulationの構造解析機能を使用して、固有値解析と周波数応答解析の2種類の解析を行った。

数値解析を行う際には、計算負荷低減のため、解析結果への影響が少ない形状を省略する。今回は、実物

の補助テーブルに取り付けられている吊り上げ用のボルトや、小さい穴、C 面取り形状などの微小形状を省略したデータを用いて解析を行った。

2.2.1 固有値解析の解析条件

解析に使用した材料物性値と解析条件を表 1 に示す。補助テーブルは、M10 ボルトを使用して、13 か所の固定用の穴部で振動試験機に取り付けられる。固定用の穴部の拘束条件の違いによる固有振動数及び振動モードへの影響を検証するために、図 2(b)に示す固定方法を模した 7 種類の拘束条件を用意した。また、13 か所は全て同じ拘束条件とした。拘束条件の固定は、X、Y、Z の 3 方向の並進方向の動きを完全に拘束することを意味する。拘束条件を表 2 に示す。

解析時の要素数については、事前に要素数を複数回変更して予備解析を行った結果から決定した。

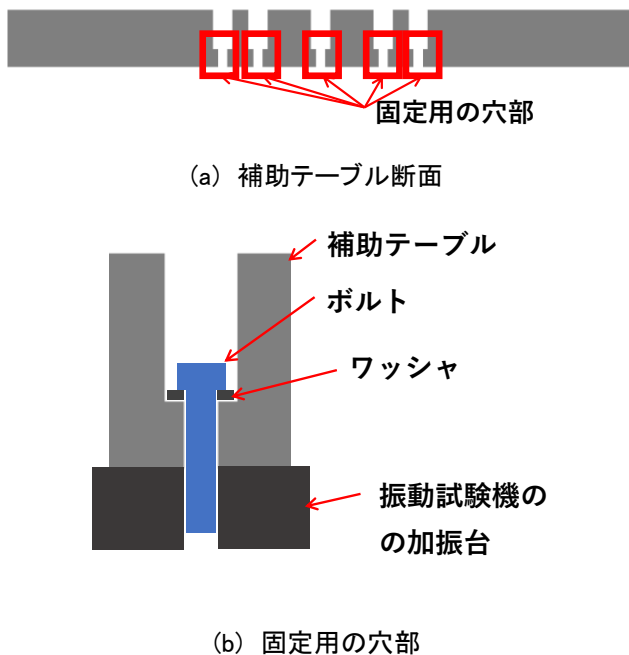


図 2 振動試験機への補助テーブルの固定方法

表 1 解析に使用した材料物性値と解析条件

項目	設定条件
ヤング率	71.71GPa
密度	2712kg/m ³
ポアソン比	0.33
解析する振動数範囲	10~400Hz
拘束条件	表2のとおり
解析する最大モード数	10
要素数	42.8万要素
要素の種類	4面体2次要素

表 2 固定用の穴部(補助テーブル)の拘束条件

	各条件の概略	
拘束条件 1		固定穴の上下の面を、ワッシャ径の範囲で固定
拘束条件 2		固定穴の上下の穴円周部を固定
拘束条件 3		ボルト穴円筒面を固定
拘束条件 4		固定穴の下面のみをワッシャ径の範囲で固定
拘束条件 5		ボルト穴の下部円周部を固定
拘束条件 6		固定穴の上面のみをワッシャ径の範囲で固定
拘束条件 7		ボルト穴の上部円周部を固定

2.2.2 周波数応答解析の解析条件

固有値解析では加振方向を考慮できないため、加振方向を考慮して解析が行える周波数応答解析を実施した。

材料物性値、要素数及び要素の種類は、2.2.1の固有値解析と同じである。その他の解析条件を表3に示す。

表3 周波数応答解析のその他の解析条件

項目	設定条件
解析する周波数範囲	150~400Hz
解析する周波数間隔	5Hz
変位振幅	1mm
加振方向	図1に示すZ方向
減衰係数	0.053
拘束条件	表2の拘束条件7

2.3 振動試験

振動試験は、当センターで所有するIMV社製i240/SA3Mを使用して、正弦波掃引振動試験を行った。試験条件を表4に示す。制御及び評価用の加速度ピックアップの取付位置を図3に示す。

表4 試験条件

項目	設定条件
振動数範囲	50~400Hz
加速度振幅	10m/s ²
掃引速度	0.25Hz/秒
加振方向	上下 (図3の紙面垂直方向)

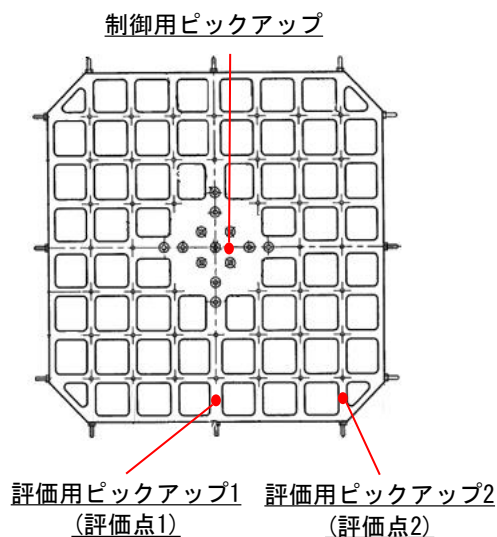


図3 加速度ピックアップ取付位置

2.4 材料物性値及び寸法による影響評価

固有振動数は、1自由度のバネと質点を用いたモデルの場合には、以下の式(1)で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Hz}) \quad \dots \text{式(1)}$$

f: 固有振動数(Hz)

k: バネ定数(N/m)

m: 質量(kg)

このことから、質量と剛性が固有振動数に影響を与えることがわかる。質量に相当する密度と、剛性に相当するヤング率を、2.2.1で使用した物性値から、±5%変化させて固有値解析を行い、固有振動数への影響を確認した。また、材料寸法のうち、曲げ剛性への寄与が大きい厚み寸法を±0.5mm変化させた場合の固有振動数への影響を確認した。

3. 試験結果及び考察

3.1 試験結果

3.1.1 固有値解析の結果

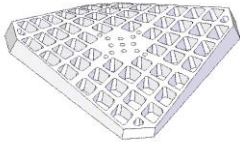

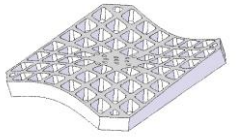

7種類の拘束条件の全てで、400Hzまでに1~4次の4個の振動モードが現れた。拘束条件の違いにより、固有振動数は異なるが、振動モード形状は1~4次まで同じであった。固有振動数と振動モード形状を表5に示す。

3.1.2 周波数応答解析の結果

今回の評価対象の垂直補助テーブルについて、周波数応答解析の予備解析を行ったところ、4次の振動モード形状による共振のみが確認できた。そのため、4次の振動モード形状の振動数が、実験で確認できた共振点の振動数と最も近い、拘束条件7で周波数応答解析を実施した。振動試験時に、評価用ピックアップを取り付けた位置と同じ位置での、周波数(Frequency)に対する伝達率(Transmission Rate)の変化を図4に示す。伝達率は、入力の変位振幅1mmに対して、評価点での変位が何倍になっているかを表す指標である。

共振点は評価点 1、評価点 2 とともに 294.7Hz であった。
この時の伝達率は、評価点 1 で 12.2、評価点 2 で 24.7
であった。

表 5 固有振動数(Hz)と振動モード形状

	拘束条件	固有振動数 (Hz)	振動モード形状
1次	1	202.6	
	2	194.3	
	3	199.8	
	4	201.3	
	5	193.7	
	6	194.9	
	7	186.8	
2次	1	270.7	
	2	255.3	
	3	264.7	
	4	266.2	
	5	242.0	
	6	262.3	
	7	236.7	
3次	1	271.8	
	2	256.4	
	3	265.8	
	4	267.3	
	5	243.1	
	6	263.5	
	7	237.7	
4次	1	321.0	
	2	307.6	
	3	316.8	
	4	319.1	
	5	303.8	
	6	311.6	
	7	295.4	

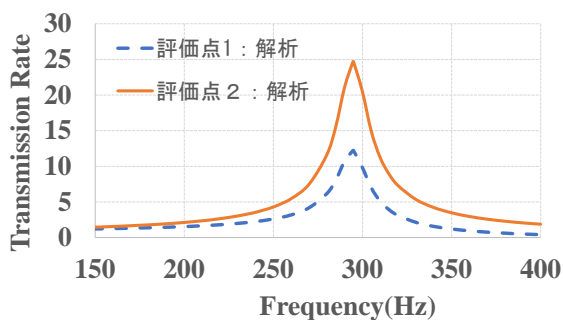
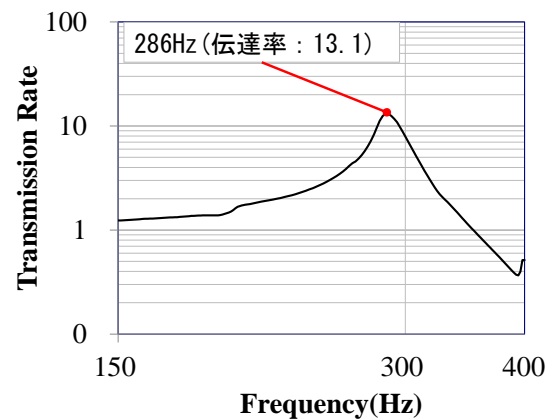


図 4 周波数応答解析の結果

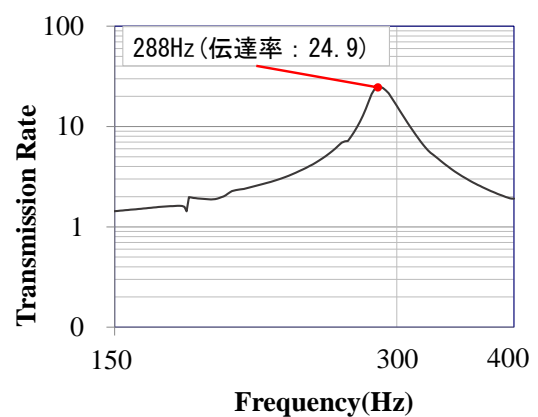
3.1.3 振動試験の結果

正弦波掃引振動試験の結果を図 5 に示す。横軸が振動数で、縦軸が伝達率である。

図 5 から、伝達率が最大となっている評価点 1 における 286Hz と、評価点 2 における 288Hz が共振点と考えられる。



(a) 伝達率(評価点 1)



(b) 伝達率(評価点 2)

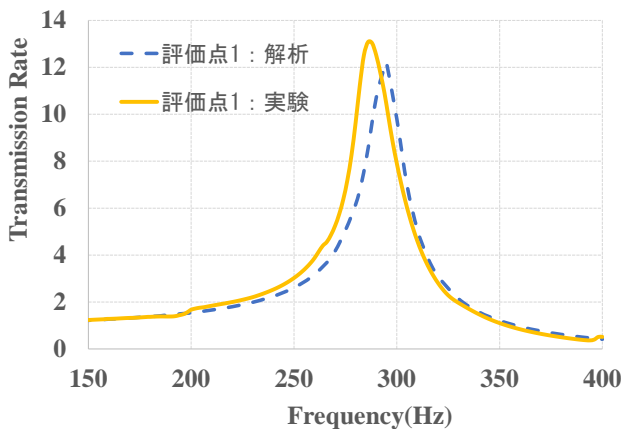
図 5 正弦波掃引振動試験の結果

3.2 考察

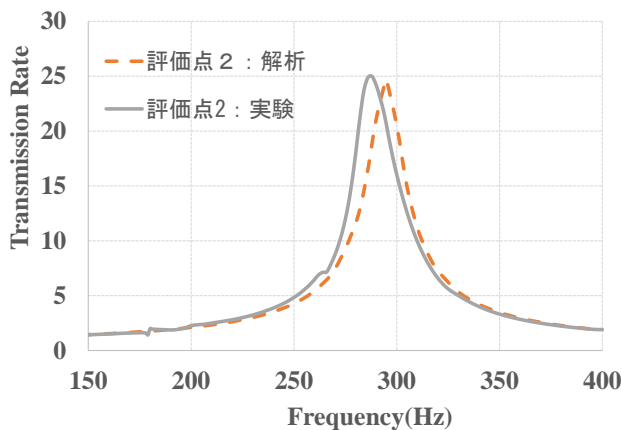
3.2.1 実験及び解析結果についての考察

固有値解析の結果から、1~4 次のいずれの固有振動数も、拘束条件 1 で最も高く、拘束条件 7 で最も低くなっていた。拘束される節点数が増えることで固定部の剛性が上がり、固有振動数は高くなるため、固有値解析の結果はこれを反映している。

実験結果と周波数応答解析の結果との比較を図 6 に示す。



(a) 評価点 1



(b) 評価点 2

図 6 実験結果と周波数応答解析結果の比較

共振点について、評価点 1 は、実験値 286Hz に対して解析値 294.7Hz で、差は 3.0%であった。評価点 2 は、実験値 288Hz に対して解析値 294.7Hz で、差は 2.3%であった。伝達率については、評価点 1 は、実験値 13.1 に対して解析値 12.2 で、差は-6.7%であった。評価点 2 は、実験値 24.9 に対して解析値 24.7 で、差は-0.8%であった。このことから、共振点の振動数と伝達率のいずれも実験値と解析値がよく一致していると思われる。

固有値解析では、4 個の振動モードが確認できたが、周波数応答解析では 1 個の振動モードしか確認できなかった。この理由については、ある振動モードと同じ形の加振力は、その振動モードの振動を生じさせるだけで、他の振動モードは励起しない⁽²⁾ためと考える。すなわち、固有値解析は、様々な方向に加振した時の振

動モードが生じるが、周波数応答解析及び振動試験では、固定されている補助テーブル中央部に上下方向の加振力が加わった状態を再現しているため、その加振力により励起されうる 4 次のモードしか励起されなかったと考えられる。

3.2.2 材料物性値及び寸法のばらつきによる固有値解析結果への影響

材料物性値のうちヤング率、密度及び補助テーブルの厚さ寸法の値を以下の表 6 のように変更して、固有値解析を行った。

表 6 変更した物性値及び補助テーブル厚さ寸法

条件		密度 (kg/m ³)	ヤング率 (GPa)	厚み (mm)
1	ノミナル値	2712	71.05	70
2	ヤング+5%	2712	75.29	70
3	ヤング率-5%	2712	68.12	70
4	密度+5%	2848	71.05	70
5	密度-5%	2576	71.05	70
6	厚さ+0.5mm	2712	71.05	70.5
7	厚さ-0.5mm	2712	71.05	69.5

表 7 材料物性値と治具厚さのばらつきの影響

単位 (Hz)

パラメータ	1次	2次	3次	4次
ノミナル値	193.9	242.5	243.3	304.3
ヤング率 +5%	198.7	248.5	249.3	311.8
	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
ヤング率 -5%	189	236.4	237.1	296.5
	-2.5%	-2.5%	-2.5%	-2.6%
密度 +5%	189.2	236.7	237.4	296.9
	-2.4%	-2.4%	-2.4%	-2.4%
密度 -5%	198.9	248.8	249.6	312.2
	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%
厚さ +0.5mm	195.8	244	244.8	306.8
	1.0%	0.6%	0.6%	0.8%
厚さ -0.5mm	192.9	241.6	242.2	302.4
	-0.5%	-0.4%	-0.5%	-0.6%

結果をまとめると表 7 のとおりである。上段が固有振動数、下段がノミナル値の固有振動数に対する増減割合である。ヤング率のばらつきによる固有振動数への影響は、-2.6~+2.5%であった。密度のばらつきによる固有振動数への影響は、-2.4~+2.6%であった。厚さ寸法のばらつきによる固有振動数への影響は-0.6~+1.0%であった。

4. まとめ

- 1 固有値解析において、拘束条件が固有振動数に及ぼす影響について確認した。
- 2 実験結果、固有値解析結果及び周波数応答解析結果から、今回の解析対象については、拘束条件 7 が妥当な拘束条件だと考えられる。実験結果と周波数応答解析結果の差は、共振点の周波数で 2.3~3.0%、伝達率で-6.7~-0.8%であった。
- 3 ヤング率、密度及び厚さ寸法のばらつきによる固有振動数への影響を確認した。

おわりに、本調査で使用した三次元 CAD システム及び大型振動試験機は、公益財団法人 JKA の公設工業試験研究所等における機械設備拡充により整備したものである。

参考文献

- (1) 山田貴博、米国機械学会 V&V 標準の動向、日本機械学会誌 第 123 卷(2020 年) 1222 号 P.6
- (2) 長松昭男、モード解析入門(1993 年)、P.95、コロナ社