

大型構造物の振動耐久性評価・設計改善技術の開発（第1報）

Development of Technology for Evaluating Vibration Durability and Improving the Design of Large Structures (1st Report)

材料技術部 金属・物性科 工藤弘行 西村将志 佐藤浩樹
材料技術部 機械・加工科 坂内駿平
電子・機械技術部 ロボット・制御科 近野裕太

本研究は、原子力・廃炉分野で使用されることの多い大型構造物の振動耐久性評価や設計改善に関する技術を開発するものである。初年度である本年度は、CAE解析、振動試験、ハンマリング試験を用いて、箱型溶接構造体の振動特性を調べ、各手法の特徴や関係性について考察を行った。この結果、溶接未溶着部をモデルに反映することで、CAE解析精度が向上することを確認した。

Key words: ハンマリング振動試験、CAEモード解析、実験モード解析

1. 緒言

当所では、令和3年度から廃炉産業集積のため、技術的な側面の支援としてコンピュータ・シミュレーション(CAE)を活用し、県内企業の設計力、提案力を高める取り組みを行っている。

原子力、廃炉分野に共通する特徴のひとつとして、数mサイズの大型構造物を扱うことが多い点が挙げられる。機械構造物において、振動の問題は重要度の高い問題であるが、数m以上の大型構造物では測定が困難であるなど特有の扱いづらさがある。

一方、CAE技術の観点では解析精度の面からCAE適用が難しい工学問題として、振動・衝撃などの「動解析」、複数部品の接触を扱う「接触解析」などが挙げられる。このような工学問題では、少なからず実現象からCAEへのフィードバックが必要とされるが、廃炉分野で使用される大型構造物は、いわゆる「一品もの」であるなど、一般的な工業製品に比べて製造個数が極端に少ないため、実製品から設計へのフィードバックが働きづらいという難点がある。

以上より、本研究では、廃炉分野で想定される大型構造物への適用を念頭に、製品を製造する前の設計の時点で、CAE技術を活用し耐振性や耐久性に優れた製品を設計する技術と、その前提となる各種測定・評価技術を開発することとした。初年度となる本年度は、箱型構造の溶接構造試験体を製作し、実験、CAEの両面から振動特性評価をする手法を検討した。

なお、本研究では、機械構造物における基本的構造である「はり構造」と「箱構造」の2つを初めの研究対象としたが、本報告では箱構造について述べる。

「はり構造」については、次年度以降報告する。

2. 実験

2. 1. 溶接構造体試験体の製作

機械構造物における基本構造の一つである箱構造を取り上げ、溶接構造試験体を製作した。

図1に設計した溶接構造体のCAD図を示す。溶接構造試験体は、当所の振動試験機に取り付けを前提にしており、幅500[mm]×奥行700[mm]×板厚15[mm]のベースプレートに、板厚6[mm]の5枚の板を溶接で接合した箱構造とした。箱の3辺の長さは、500、400、300[mm]とした。

図2、図3は溶接構造体の正面図および側面図である。振動特性に変化をつけるため、正面には縦300[mm]、横140[mm]の四角穴を、側面には縦120[mm]、横200[mm]の四角穴を設けている。なお、側面、正面は、穴がある方を「表」、ない方を「裏」と呼ぶこととする。

天面にはクレーン吊り上げのための吊り治具を溶接にて接合している。

ベースプレートの材質はSS400材、その他の部品はSPHC材とした。

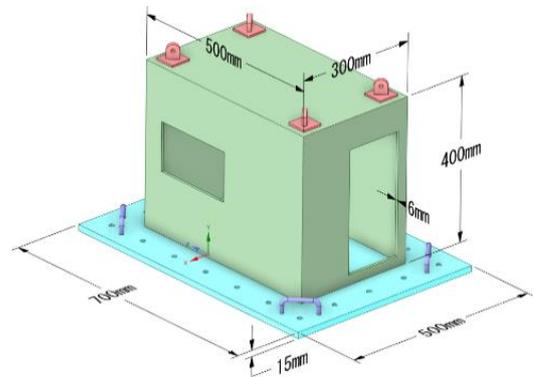


図1 溶接構造体のCAD図（斜視図）

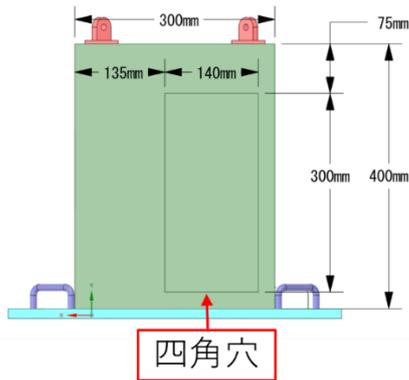


図2 溶接構造体のCAD図（正面図）

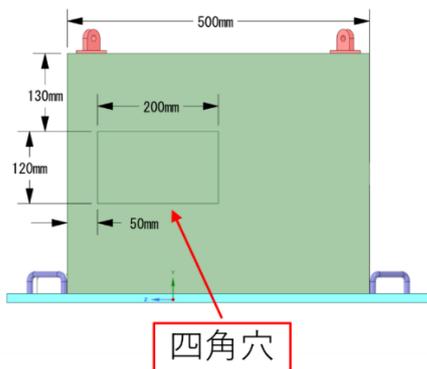


図3 溶接構造体のCAD図（側面図）

2. 2. 溶接構造体の振動試験

溶接構造体の基本的な振動特性を調べるため、当所所有の振動試験機（エミック（株）社製 F-2500BHD/LA25）を用いて振動試験を実施した。

図4に示すように、水平方向セッティングで試験を実施し、溶接構造体の側面に着目した評価を行った。振動試験条件は、周波数範囲 50～500[Hz]、加速度 5[m/s²]、掃引速度 0.5[オクターブ/分]の掃引試験とした。測定点を変えて2回の試験の試験を実施した。図5に加速度センサの取り付け状況を示す。



図4 振動試験の状況

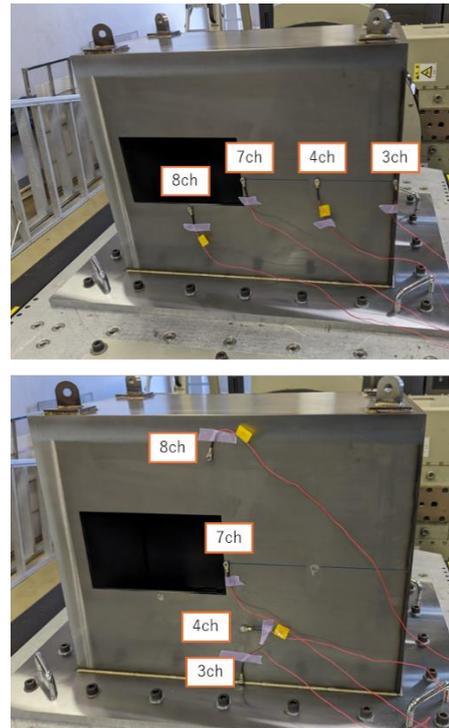


図5 加速度センサの取り付け状況
（左）1回目 （右）2回目

2. 3. 溶接構造体のハンマリング試験

ハンマリング試験とは、インパルスハンマで測定対象物を打撃（加振）し、その結果生じた振動を加速センサで記録、最終的に信号処理により伝達関数などを求める試験方法である。ハンマリング試験は、固定治具を必要とする振動試験に比べると準備が簡単であるが、測定者の習熟度が結果に影響すると言われる。

溶接構造体の振動特性をハンマリング試験で評価するため、図6に示す当所所有のハンマリング振動測定システム（小野測器（株）製 DS-5000 シリーズ）による振動特性評価を行った。本装置は、最大 12 チャンネルの振動加速度センサを取り付け、同時に振動波形を収録、解析することが可能である。

ハンマリング試験は、溶接構造体の天面に着目した評価を行った。図7に、天面へのセンサ取り付け状況を示す。インパルスハンマで図中の打撃点をハンマリングし、10 回打撃の平均値より伝達関数を求めた。

ハンマリング試験の結果を可視化するため、実験モード解析ソフト（Vibrant Technology 社製 ME scope）を用いた。図8に操作画面を示すが、同ソフトでは、ハンマリング試験の結果として得られた多点の伝達関数を入力データとして、変形モードをアニメーションで可視化できる。伝達関数画面上のカーソル機能を用いて、動的剛性とピーク周波数を読み取ると同時に、左側のアニメーション表示で変形モードを視覚的に把握することができる。

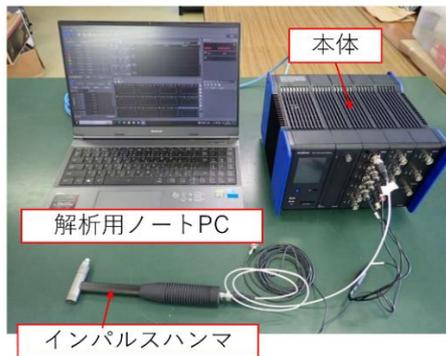


図6 ハンマリング振動測定システムの外観写真

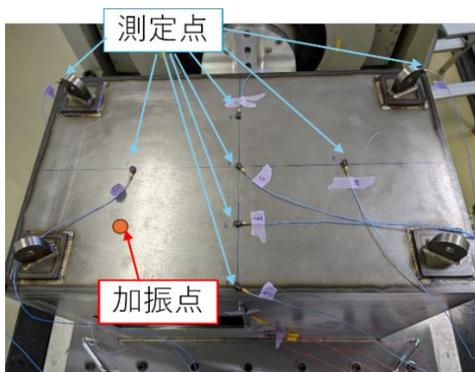


図7 天面板への加速度センサ取り付け状況

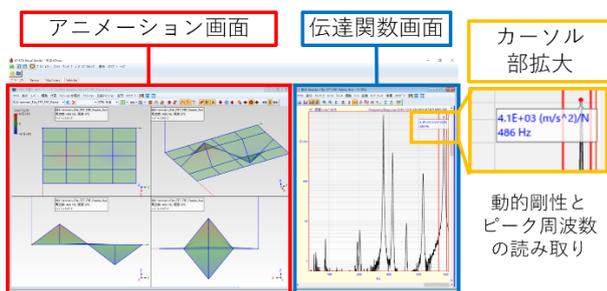


図8 実験モード解析ソフトの操作画面例

され、次数と呼ばれる。

長方形板の固有値モードは、機械力学の基本的な知見として知られている¹⁾。図9は、固有値モードを示したものである。固有値モードは、周波数に基づく呼び方とは別に (m, n) モードでも表記される。ここで、m はX方向の半波数、n はY方向の半波数である。四辺単純支持の境界条件において、固有周波数 f_{mn} は、次式で計算できる。

$$f_{mn} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D}{\rho}} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \dots \text{式 (1)}$$

ここでDは曲げ剛性、 ρ は単位面積当たりの重量、a、bは長方形の長さで $a > b$ とする。なお、四辺完全固定など他の境界条件では近似式が与えられている。

以上を踏まえ、CAE解析では、長方形板材に対し、境界条件を変えた場合の解析を行い、式(1)による計算との比較から、CAEの妥当性を検証した。また、図10に示すように、吊り治具を含む解析も行い、吊り治具の影響を評価した。

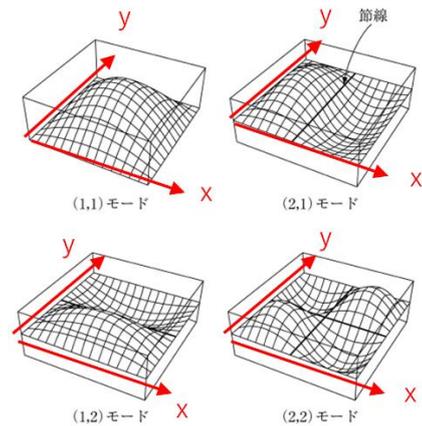


図9 長方形板の固有値モードの例¹⁾

3. CAE解析

3. 1. 長方形板材のCAE動解析

箱構造の振動特性をより良く理解するため、箱型溶接構造体を構成するひとつの面、板材に対するCAE動解析を実施した。「動解析」とは、静的な力の釣り合い状態を解く「静解析」とは異なり、振動や衝撃など荷重が動的に加わり時間的な変化を伴う現象を解析するものである。代表的な解析の種類として、モーダル解析(固有値解析ともいう)、周波数応答解析、時刻歴応答解析(過渡解析ともいう)などがあるが、本項目ではモーダル解析を実施した。モーダル解析とは、構造物固有の共振周波数(以下、固有周波数という)と、その周波数における変形モード(固有値モードともいう)を計算するものである。変形モードはその区別のため、周波数の低い順に、1次、2次、…とラベル付け

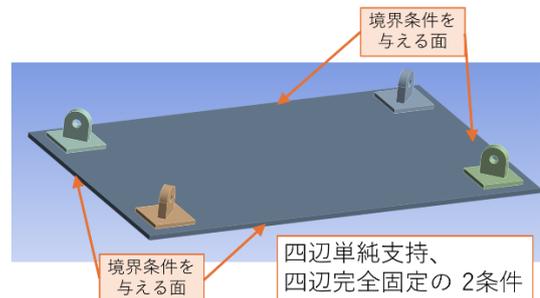


図10 長方形板の解析モデル

3. 2. 溶接構造体試験体のCAE動解析

本項目では箱構造溶接構造体を対象としたモーダル解析と周波数応答解析を実施した。周波数応答解析は、種々の周波数における応答の変化を解析するものである。今回はモーダル解析の結果を利用し、計算負荷を低減できるモード重ね合わせ法を用いた。

図 1 1 に箱構造溶接構造体の解析モデルを示す。境界条件はベースプレートの締結を理想的なものと仮定し、プレート底面を完全固定とした。

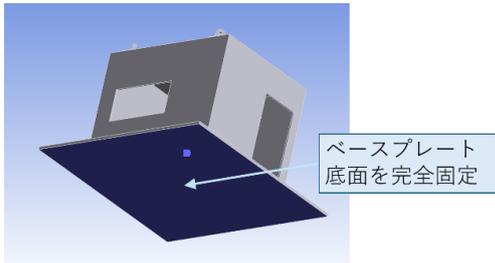


図 1 1 箱型溶接構造体の CAE 解析モデル

4. 実験結果

4. 1. 溶接構造体の振動試験

振動試験結果として図 1 2 に周波数-加速度グラフを示す。このグラフは両対数目盛である。1 次固有周波数近くに 2 つのピークが見られたが、これを区別して扱うこととした。1 次固有周波数が 191 [Hz]、2 次固有周波数が 203 [Hz]であった。表 1 に、共振ピークや変化点を列記した。共振倍率とは、入力である加振器の制御加速度と、出力である各点の加速度の比を倍数で表現したものである。今回の 18~81 倍の共振倍率はかなり激しい共振が生じたものであり、リブ等の補強のない単純な箱構造であることが原因と考えられる。

図 1 3 は最大のピークとなった 2 次固有周波数 203 [Hz] における各点の加速度値を試験体写真に重ねて図示したものである。測定点数は少ないもの側面では (1, 1) モードの共振が生じていると判断できる。

以上の結果と構造の特徴を踏まえると、1 次、2 次共振が極めて近かったのは、表側面、裏側面の構造の違いに起因して、それぞれの固有周波数に僅かな相違が生じたためと推定できる。

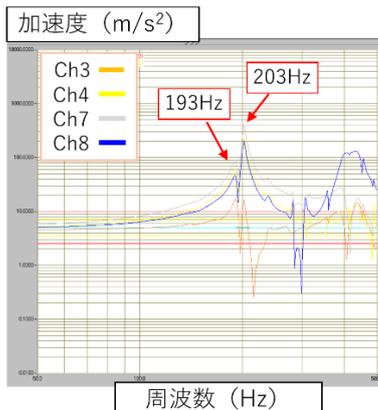


図 1 2 振動試験結果 (1 回目)

表 1 振動試験の特徴点 (1 回目)

周波数 (Hz)	現象	共振倍率 (倍)	測定点
191	ピーク	18	Ch7
203	ピーク	81	Ch7
216	変化点	——	Ch3
283	変化点	——	Ch7、8
303	変化点	——	Ch7、8
358	変化点	——	Ch8
416	変化点	——	Ch7
430	ピーク	26	Ch8
452	変化点	——	Ch8

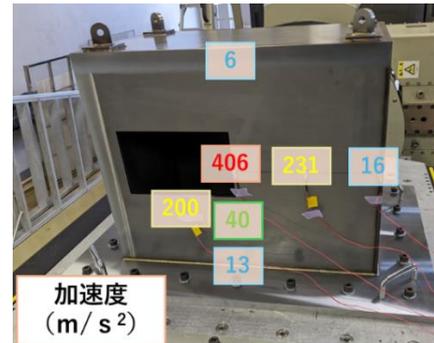


図 1 3 2 次共振点における各測定点の加速度

4. 2. 溶接構造体のハンマリング試験結果

図 1 4 は、天板のハンマリング試験で得られた伝達関数を示したもので、図 1 5 における地点 8、13、18 の結果である。ピークの周波数は共通であるが地点 8、18 では周波数 487 [Hz] のピークが相対的に高いなど、加速度振幅の強弱が地点により異なる。

図 1 6、図 1 7 は、加速振幅が際立って高い 3 次と 7 次の固有周波数のモード可視化結果を示したもので、前者が (1, 1) モード、後者が (2, 1) モードである。

表 2 に伝達関数における各モードの周波数、加速度振幅及び変更モードを記す。ピーク周波数の多くは表 1 の振動試験の特徴点と合致していた。

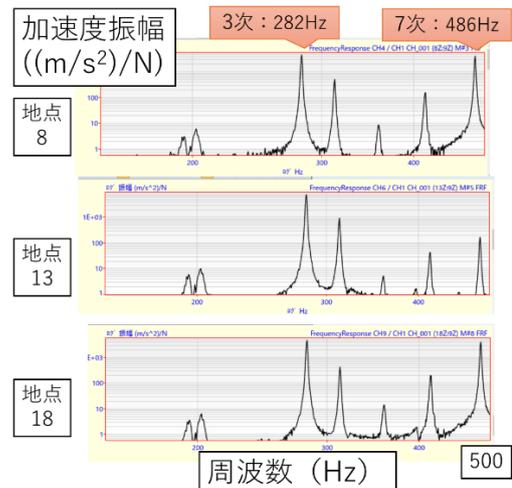


図 1 4 ハンマリング試験による伝達関数評価結果

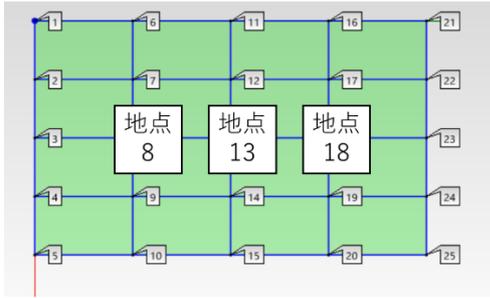


図 15 ハンマリング試験時の測定点のラベル付け

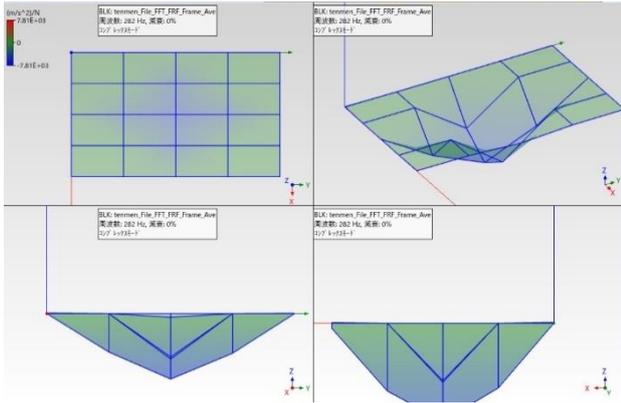


図 16 モード可視化結果（3次モード、282Hz、(1,1)）

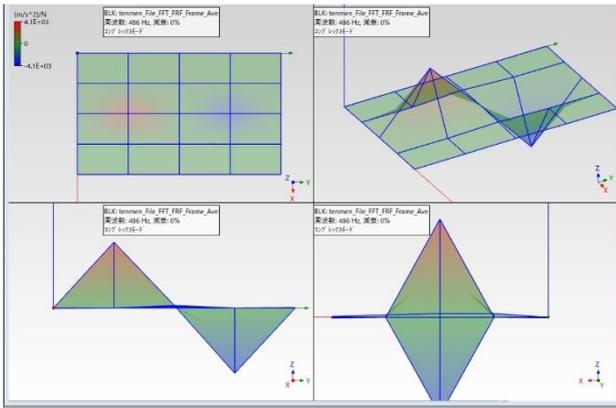


図 17 モード可視化結果（7次モード、486Hz、(2,1)）

4. CAE解析結果

4. 1. 長方形板材のCAE動解析

図 18 に、単純支持条件における長方形板材のモーダル解析結果を示す。得られた結果は、式 (1) の計算と合致し、固有周波数の誤差は 1%未満であり、妥当な計算ができていると判断した。

次に、境界条件の影響と吊り治具部の影響を検討した。解析の結果、固有値モードは同じであったため、固有周波数を表 3 にまとめた。

単純支持に比べ、完全固定の条件では、総じて固有周波数が高く、その比率は同じモードとの比較で 1.3 ~ 1.9 倍ほどである。(表 2 中の比 B/A、比 D/C を参照)

また、吊り治具部が追加されると、固有周波数は若干増加し、その影響は、最大 1.1 倍程度である。(表 2 中の比 C/A、比 D/B を参照)

吊り具は、剛性の向上と重量の増加の 2 つの影響があるが、式 (1) に含まれる固有周波数 $f \propto (D/\rho)^{1/2}$ の関係性を踏まえると、周波数が微増していることから、剛性の寄与が若干大きいと判断できる。吊り治具部のように、剛性や重量の観点で影響がある部材は CAE 動解析のモデルに含めるべきである。

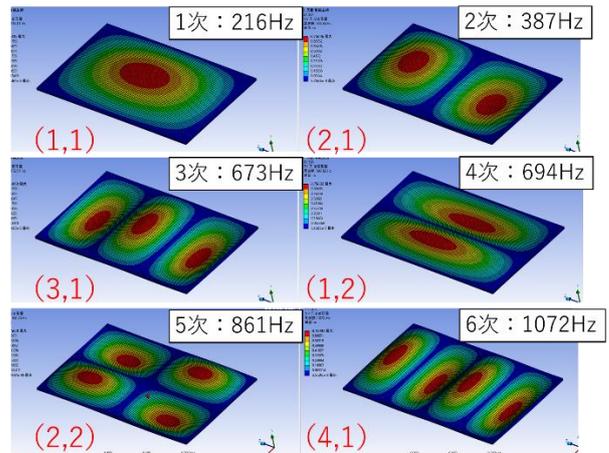


図 18 変形モード図（1～6次モード）

表 2 ハンマリング試験の結果まとめ

次数	周波数 Hz	単位荷重当たりの加速度振幅 (m/s ²) /N			変形 モード
		地点8	地点13	地点18	
1	195	3.10	5.95	3.59	(1,1)
2	203	6.13	10.2	6.51	(1,1)
3	282	4610	7810	4710	(1,1)
4	313	526	955	431	(1,1)
5	359	8.93	5.26	14.4	(2,1)
6	415	157	43.3	203	(2,1)
7	486	4100	171	4050	(2,1)

表 3 固有周波数に対する各条件の影響

		単位: Hz								
次数	変形 モード	長方形板のみ			長方形板+吊り治具					
		単純支持	完全固定	比	単純支持	完全固定	比	比	比	比
		A	B	B/A	C	D	D/C	C/A	D/B	
1	(1,1)	216.1	418.9	1.9	236.4	427	1.8	1.09	1.02	
2	(2,1)	386.9	602.3	1.6	423.9	627.6	1.5	1.10	1.04	
3	(3,1)	672.6	918.8	1.4	705.3	954.1	1.4	1.05	1.04	
4	(1,2)	693.6	1051	1.5	707.8	1062	1.5	1.02	1.01	
5	(2,2)	861.7	1223	1.4	893.3	1257	1.4	1.04	1.03	
6	(4,1)	1072	1359	1.3	1094.9	1390	1.3	1.02	1.02	

4. 2. 溶接構造体試験体の CAE 動解析

はじめにモーダル解析結果を示す。典型的な結果として、図 1 9 に 14 次モードの変形モードを側面表と側面裏の違いが分かるよう 2 視点から示す。なお、モーダル解析では、変位の絶対値は計算できないため、相対値の分布となる点に注意が必要である。各面の变形モードは、長方形板材の固有値モードと共通する变形が見られたことから、(m, n)モード表記を追記した。

表 4 に、CAE 動解析で得られた 17 次まで固有値モードの固有周波数を示す。なお、この表には最大の変位が生じた面 (面 1) と 2 番目に大きい変位が生じた面 (面 2) の場所とモードを併せて記載した。変位比 (面 2/1) とは面 2 の変形の程度を面 1 の変形との比で示したものである。

図 2 0 は、1 次~6 次の変形モード図であるが、箱を構成する各面の低次モードの共振が場所を変えながら、現れることが確認できる。

CAE モーダル解析の結果は、全ての部材の様々な固有値モードが混在して区別しづらいため、振動試験やハンマリング試験と紐づけしやすいよう、表 4 や図 2 0 のように各面の板材の固有値モードの観点で整理する手法を提案する。

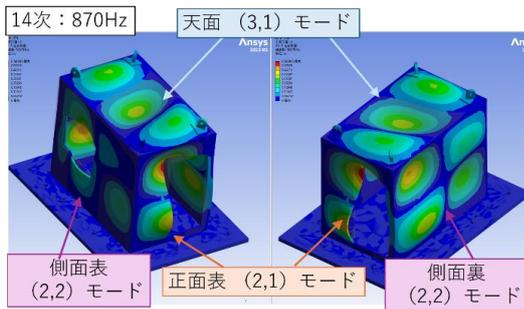


図 1 9 14 次モードの変形モード図 (870Hz)

表 4 箱型溶接構造体の CAE モーダル解析の結果まとめ

次数	周波数 Hz	最大変形面(面1)		2番目に変形する面(面2)		
		場所	モード	場所	モード	変形比
1	245	側面・裏	(1,1)	側面・表	(1,1)	0.4
2	274	側面・表	(1,1)	側面・裏	(1,1)	0.4
3	396	正面・表	(1,1)	天面	(1,1)	0.7
4	402	正面・表	(1,1)	正面・裏	(1,1)	0.6
5	448	正面・表	(1,1)	側面・表	(1,1)	0.5
6	487	正面・表	(1,1)	正面・裏	(1,1)	0.8
7	512	側面・表	(1,1)	側面・裏	(2,1)	0.8
8	588	側面・表	(2,1)	天面	(2,1)	0.6
9	625	側面・表	(2,1)*	天面	(2,1)*	0.4
10	693	側面・表	(2,1)	天面	(2,1)	0.9
11	738	側面・裏	(1,2)	天面	(1,2)	0.5
12	811	正面・表	(2,1)	側面・表	(2,2)	0.6
13	827	側面・裏	(3,1)*	正面・表	(2,1)	0.5
14	870	正面・表	(2,1)	側面・裏	(2,2)	0.7
15	902	側面・表	(2,2)	正面・表	(2,1)	0.8
16	942	側面・裏	(2,2)	正面・表	(2,1)	0.9
17	963	側面・表	(3,1)	正面・表	(2,1)*	0.6

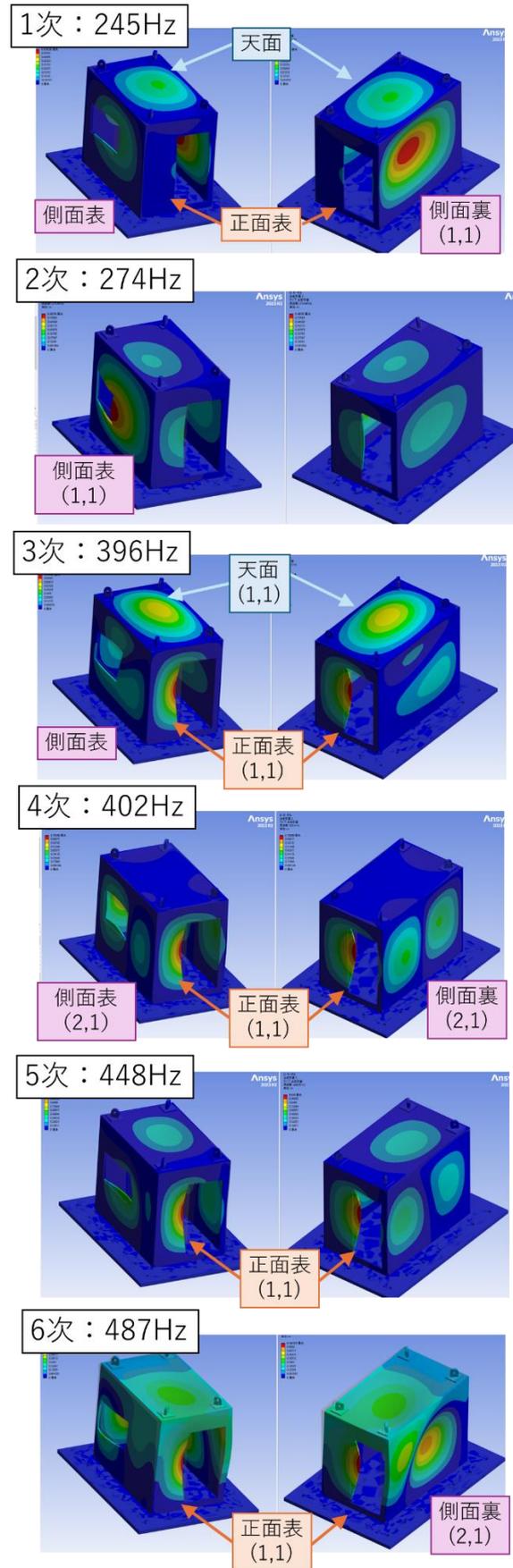


図 2 0 1 次~6 次モードの固有値モード図

次に、周波数応答解析の結果として、地点 13、地点 18 の加速度振幅応答を図 2 1 に示す。

このグラフは、図 1 2 の振動試験結果や図 1 4 のハンマリング試験結果とほぼ同じ形式であり直接比較できる。2 地点のグラフは 500 [Hz] 未満では、ほぼ一致しているが、600 [Hz] 以上では若干異なる挙動を示した。

なお、周波数応答解析では、モーダル解析と異なり応力、変形、加速度などの絶対値を求めることが可能である。図 2 1 で確認できた 10 数点のピークについて、荷重 10 [N] に対する天面の変形量を計算し、代表的な周波数 501 [Hz] および 732 [Hz] における応答を図 2 2 に示す。また、この計算の結果、532 [Hz] のピークまでは全て (1, 1) モード、599 [Hz] から 932 [Hz] までは (2, 1) モード、932 [Hz] のみ (3, 1) モードであった。図 2 1 には、上記の変形モードを追記した。(2, 1) モードでは地点 13 が「節」、地点 18 が「腹」となるため、600 [Hz] 以上のピークの挙動が異なると考えられる。

以上より、CAE 周波数応答解析により、任意の点における周波数応答や、特定の周波数における変形挙動を取得できることを確認した。

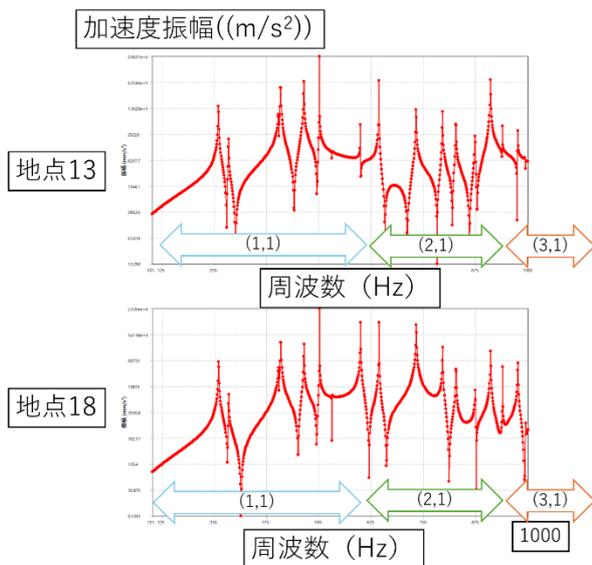


図 2 1 周波数応答解析結果 (加速度応答)

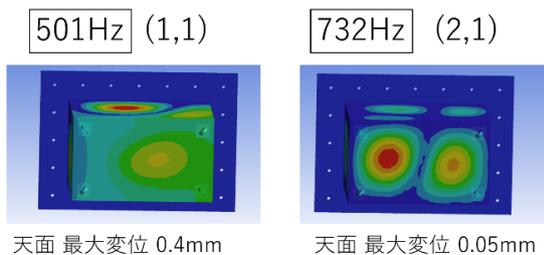


図 2 2 個別の周波数に対する応答解析結果 (変位応答)

5. 考察

振動試験の結果、得られた側面の 1 次及び 2 次固有周波数が 191 [Hz]、203 [Hz] であったのに対して、CAE 解析では 245 [Hz]、274 [Hz] と比較的大きな相違があった。また、ハンマリング試験の結果、得られた天面の固有周波数が (1, 1) モードで 282 [Hz]、(2, 1) モードで 486 [Hz] であったのに対し、CAE 解析の結果、天板の固有周波数は (1, 1) モードで 396 [Hz]、(2, 1) モードで 588、625、693 [Hz] と比較的大きな相違があった。両者をまとめると CAE 解析の結果が、総じて 1.2~1.5 倍ほど、高周波数側にシフトしていると見込まれたため、この原因と対策を検討した。

まず、天面の振動のみを対象とし、固有周波数に影響する原因として境界条件に着目した。境界条件とした単純支持と完全固定は、ともに数式上の理想的な状態であり、実現象は両者の中間のいずれかの状態であると言われる。そこで溶接部の不完全性に着目した。現行の CAE 解析は理想的な溶接を仮定し、箱型を構成する各面の板材が一体化した構造としているが、実際の溶接では施工の制限のため、施工した方向の裏側に完全には接合していない溶接未溶着部が存在することが多い。このため、CAE は実態に比べ完全固定に近い強固な境界条件となり、固有周波数が高周波数側にシフトしたと考えた。溶接未溶着部の影響を調べるため、図 2 3 のように溶接未溶着部をデフォルメした長さ 3 [mm]、幅 0.5 [mm] の溝を設けたモデルで解析を行った。この結果、表 5 に示すように、単純支持と完全固定の中間の固有周波数となった。

次に、溶接未溶着部の改善に加えて、天板を支持する側面の高さを変えた場合の計算も行った。図 2 4 は側面の高さを 100 [mm] とした解析モデルである。この結果、さらに固有周波数が低下した。この結果も併せて表 5 に記載する。

図 2 5 は、側面の高さを 100 [mm] とした場合の天面端部の変位図を仮想断面表示で示したものであるが、溶接未溶着部が開口・閉口し天面の傾きに作用する様子や、天面が側面と協調的に傾くなどの様子が確認できる。

以上より、溶接未溶着部や側面の存在は天面の端部の変形自由度を緩める作用があり、完全固定の結果から離れ、単純支持の結果側にシフトしたと判断した。

最後に、溶接未溶着部を反映した箱構造モデルのモーダル解析結果を表 6 に示す。溶接未溶着部モデルでは、表 4 の旧モデル結果と比べてピーク出現の傾向も変化したため、溶接未溶着部モデルで得られた固有周波数を基準に、旧モデルの CAE 結果、振動試験、ハンマリング試験の合致するモードの結果を並べて記載した。この結果、溶接未溶着部モデルの固有振動数は旧モデルの同一モードの結果に対して、総じて 1~3 割低下し、1 次、2 次固有周波数はかなり近い値となった。

また、ハンマリング試験で加速度振幅が大きかった 282 [Hz]、486 [Hz] のピークも変形モードが合致し、周波数も 10% 以内の誤差に収まった。

以上より溶接未溶着部を反映した CAE モデルで計算することで、CAE 結果が振動試験やハンマリング試験などの実験結果との整合性が高まることを確認した。

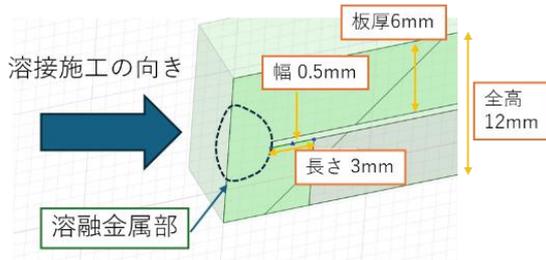


図 2-3 溶接未溶着部のモデル図

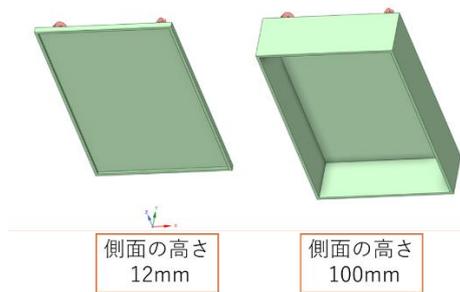


図 2-4 側面の高さ違いモデル図

表 5 固有周波数に対する溶接未溶着部と側面の影響

次数	単位: Hz		変形モード	溶接未溶着3mm + 側面高さ違い	
	天面長方形板 単独モデル			全高 100mm	全高 12mm
	単純支持	完全固定			
1	236.4	427.0	(1,1)	340.6	388.2
2	423.9	627.6	(2,1)	530.7	586.2
3	705.3	954.1	(3,1)	827.0	899.0
4	707.8	1062	(1,2)	869.4	942.0
5	893.3	1257	(2,2)	1059	1161
6	1095	1390	(4,1)	1225	1312

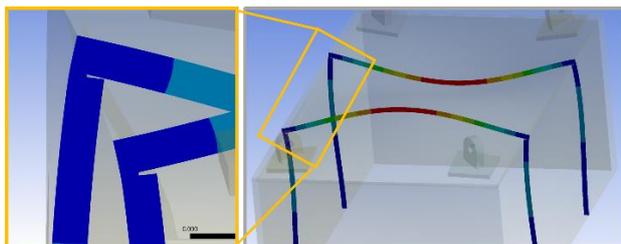


図 2-5 側面高さ違いモデルにおける天面端部の挙動

表 6 箱型構造体 CAE 解析に対する溶接未溶着部の影響

次数	CAE				実験			
	旧モデル	溶接部未溶着3mmモデル			振動試験		ハンマリング試験	
	固有周波数	固有周波数	最も変形する面 (面1)		固有周波数	側面・表	固有周波数	天面
	Hz	Hz	場所	モード	Hz	現象/モード	Hz	モード
1	245	192	側面・裏	(1,1)	191	(1,1)	195	(1,1)
2	274	207	側面・表	(1,1)	203	(1,1)	203	(1,1)
3	396	305	天面	(1,1)	283	変化点	282	(1,1)
4	402	317	正面・表	(1,1)	—	—	—	—
5	—	339	正面・表	(1,1)	—	—	—	—
6	—	373	側面・表	(2,1)	358	変化点	—	—
7	—	392	側面・表	(1,2)	—	—	—	—
8	—	450	側面・表 天面	(2,1)	416	変化点	415	(2,1)
9	—	473	側面・表	(1,2)	—	—	—	—
10	588	516	天面	(2,1)	—	—	486	(2,1)
11	—	538	側面・裏	(1,2)	—	—	—	—
12	—	599	側面・表	(2,2)	—	—	—	—

6. 結言

本研究では、CAE 解析、振動試験、ハンマリング試験を用いて、箱型溶接構造体の振動特性を調べ、各手法の特徴や関係性について考察し、以下の成果を得た。

- ① 箱型構造体に対する振動試験により、側面の 1 次、2 次固有周波数と変形モードを特定した。
- ② 箱型構造体の天面に対するハンマリング試験により、固有周波数と変形モードを特定した。
- ③ 箱型溶接構造体を対象とした CAE モーダル解析を実施し、固有周波数と固有値モードを特定した。
- ④ CAE モーダル解析を実施した結果、CAE は全ての部材の結果が混在するため、箱型構造を構成する各面の固有値モードで整理する手法を提案した。
- ⑤ 箱型構造体に対する CAE 周波数応答解析により、任意点の周波数応答や、特定の周波数における応力、変形、加速度を取得できることを確認した。
- ⑥ 溶接未溶着部や側面が天板の固有周波数に与える影響を調べた結果、溶接未溶着部や側面の存在は天面端部の変形自由度を緩める作用があり、完全固定寄りの結果から、単純支持寄りの結果にシフトしたと推察した。
- ⑦ 溶接未溶着部を再現した箱構造体モデルで CAE モーダル解析することで、振動試験やハンマリング試験との整合性が高まることを確認した。

来年度以降は、トポロジー最適化技術の活用や、溶接部の疲労耐久性の評価に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 日本機械学会編. “連続体の振動”. 機械工学便覧 α2 機械力学. 2014. 第 12 章