

九州連携 CAE 研究会における解析事例の検証 (第 3 報)

—シートの丸め加工, および周波数応答解析に関する調査—

清水慎吾*・橋口智和*

*機械・金属担当

Verification of the CAE example in CAE study group of Kyushu(3rd Report)

—Research of roll a sheet and frequency response of structure—

Shingo SHIMIZU*・Tomokazu HASHIGUCHI*

*Machinery and Metallurgy Section

要 旨

CAE 解析の各事例における解析ノウハウの蓄積を目的とし, 前年度に引続き, 「九州連携 CAE 研究会」の下, 共通解析課題に取り組んだ. 今年度は「シートの丸め加工」と「構造物の周波数応答」を共通課題として解析を行った. 「シートの丸め加工」においては, 荷重を付加する端線部の剛性が結果の誤差に大きく影響することがわかった. 「構造物の周波数応答」においては, 構造物に一定の加速度を与えた場合の応力と変位の周波数応答について解析を行い, 各解析ソフト間の差異および周波数応答解析時の留意点がわかった.

1. はじめに

CAE とは「Computer aided engineering」の略称であり, コンピュータ上で構造物に対する荷重や熱といった諸現象の影響をシミュレーションする技術やそのツールを指す. 近年のものづくりにおいて, CAE 解析はコスト削減などの目的から, 製品設計や品質管理に欠かせない技術として確立されている. 県内企業への技術支援においても, CAE 解析に関するニーズは高まっている. そこで九州・沖縄及び周辺の各県公設試では, 九州地方知事会の下「九州連携 CAE 研究会」として CAE に関する知見・ノウハウデータベースの蓄積, および企業支援へのフィードバックを目的とし活動を行っている. 研究会ではこれまでに構造・伝熱・流体・固有値等の様々な解析課題について各公設試の有する CAE 解析ソフトによる解析を実施し, その結果の比較検討を行ってきた. 本年度は共通課題「シートの丸め加工」ならびに「構造物の周波数応答」に関する解析を行い, 各課題におけるソフト間の結果の差異や, 解析において留意すべき点についての調査を行った.

2. シートの丸め加工

大変形を生じる非線形解析においては, 一般的に線形解析に比べ解の発散等の問題が生じやすい. 今回はシートの丸め加工時の変形に対して, 各県の CAE システムで解析を行い, その結果を比較検討した.

2.1 解析条件

解析モデルを Fig.1 に示す. シート形状は, 厚さ 12.7mm ×幅 254mm×長さ 2540mm であり, 材料特性は弾性係数を 82.74MPa, ポアソン比を 0, 質量密度を 1.1072g/cm³ の材料とした.

このシートの端線を完全固定し, もう片方の端線に, 任意の曲げモーメントをかけた際の図 1 に示す評価点の変形量を非線形解析により算出する. なお, この任意の曲げモーメントは, シートが丸まって端線同士が同じ位置となる曲げモーメントの理論値とした.

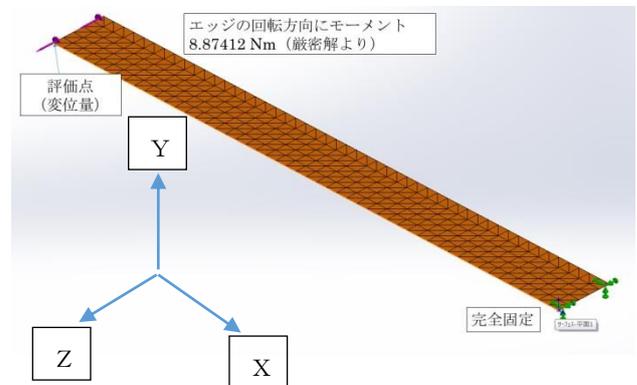


Fig.1 シートの丸め加工解析モデル

曲げモーメントの理論値 M_0 は, 式 (1) であらわされる.

$$M_0 = -\frac{\theta EI}{x} \quad (1)$$

ここでEはヤング率, Iは断面2次モーメント, xはモデル長さ, θ はシートのたわみ角である. 今回の解析モデル(Fig. 1)では, 断面2次モーメントIが43357.44017mm⁴, ヤング率Eが82.74MPa, 長さxが2540mmである. ここで, 両端同士が同じ位置となるには, たわみ角 θ が 2π [rad]となる時なので, 式(1)より求める曲げモーメント M_0 は次の様になる.

$$M_0 = \frac{2\pi \times 82.74 \times 43357}{2540} = 8874.1200 \quad [\text{N} \cdot \text{mm}]$$

今回の解析について, 各公設試で使用したCAEシステムと解析条件をTable 1に示す.

2.2 解析結果

各公設試の解析結果と理論解との誤差をFig. 2に示す. 理論解との誤差は1mm以下となっているが, LS-DYNAを用いた解析では解が発散してしまう結果となった.

Table 1 各県の解析ソフトと条件

機関	解析ソフト	時間ステップ数	要素	要素サイズ[mm]
福岡	SolidWorks Simulation 2015	自動ステップ (最小 10, 最大 1e8)	三角形 2次	50
長崎	SolidWorks Simulation 2015	自動ステップ (最小 10, 最大 1e8)	三角形 2次	32.12
長崎	SolidWorks Simulation 2015	自動ステップ (最小 10, 最大 1e8)	三角形 2次	32.12
長崎	SolidWorks Simulation 2015	自動ステップ (最小 10, 最大 1e8)	三角形 1次	32.12
長崎	SolidWorks Simulation 2015	自動ステップ (最小 10, 最大 1e8)	三角形 1次	32.12
鹿児島	SolidWorks Simulation 2009	自動ステップ (最小 10, 最大 1e8)	三角形 2次	32.13
佐賀	MSC Marc2010	100	四角形 1次	21.2
山口	MSC.Marc 2003	360	四角形 1次	63.5×50.8
熊本	ANSYS Multiphysics R15.0	自動ステップ (最小 100, 最大 1000)	四角形 1次	20
大分	ANSYS Ver 11.0	自動ステップ (最少 10, 最大 1e8)	四角形 1次	25.4
島根	ANSYS Multiphysics R16.2	自動ステップ (最小 10, 最大 1000)	四角形 2次	50.8
鳥取	ANSYS Mechanical R16.2	自動ステップ (最小 100, 最大 10000)	四角形 1次	50
沖縄	LS-DYNA Ls971 (陽解法)	5988	四角形 1次	50

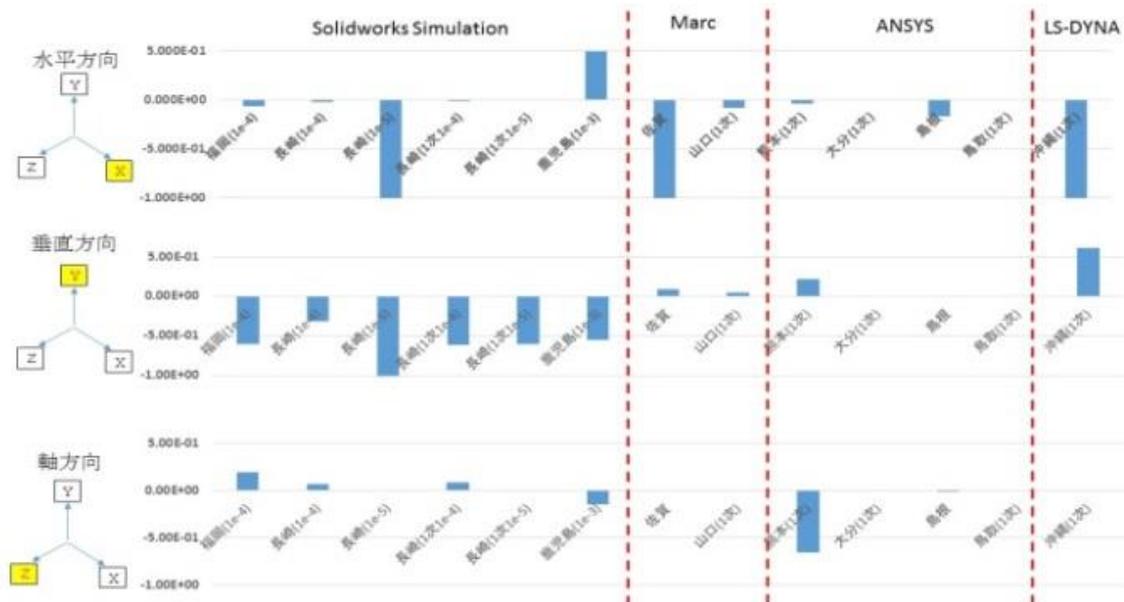


Fig. 2 各県の解析結果と理論解との誤差

2.3 考察

Fig. 2 に示す解析結果と理論解との誤差が大きくなる原因を考察する。解析条件は時間ステップ数 360, 要素サイズ 50mmであれば誤差が 1mm 以下となっており, 問題ないと考えられる。

ここで, 長崎県で実施した解析結果において相当ひずみを比較した結果を Fig. 3 に示す。図中の数字は収束許容誤差 (解析時に, 次の計算ステップに進むか判定するパラメータ) である。これらの結果から, 曲げモーメントを付加した端線においてひずみが不均一であることが分かる。理論解を算出する際にこのことは仮定されていないため, 曲げモーメントを作用させる解析条件の設定に原因があることが考えられる。

そこで, ANSYS を用いて端線を剛体としたモデルで再解析を行ったところ, 理論解との誤差が小さくなり解析精度を向上できることが確認できた。

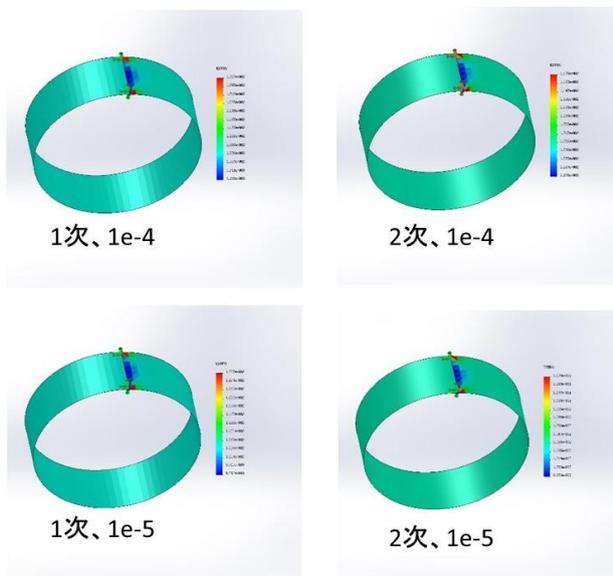


Fig. 3 端線部のひずみ解析結果

3. 構造物の周波数応答

東日本大震災以降, 国内の建築物・製品の耐震性について注目が大きくなり, これまで耐震性能に関する評価を行ってこなかった製品について耐震性評価を要求されたり, 従来基準以上の耐震性を求められたりするケースがある。特に原子力発電所の事故の影響か, 電力関係の業界でその傾向が強く, 今後その要望は増していくことが予想される。大分県でも近年 CAE を用いた耐震性評価に関する技術支援が増加傾向にある。しかしながら耐震性を評価するためには, 単純に構造物の共振時固有値とその際の変形形状を算出する「モーダル解析」に留まらず, 実際に所定の周波数域で荷重を与えた場合の応力・変位の値を求める「周波数

応答解析」を用いる必要が有る。これまで CAE 研究会では共通課題としてモーダル解析を取り扱ったが, 周波数応答解析については実施していなかった。そこで今回は実際の相談事例をデフォルメした構造物モデルを用いて周波数応答解析を行い, その結果を比較検討した

3.1 解析条件

Fig. 4 に解析モデルを示す。解析モデルは 1100×1100 mm の板材 (厚さ 5mm) 2 枚を, 50×50mm の棒材 4 本で高さ 500, 1000mm に固定した架台状で, 下の板中央に 200mm 立法の荷物を載せた形状とした。また板と棒材の接合部には半径 2mm の R を設け, 棒材下部の 4 面は完全固定とした。解析結果の評価ポイントは上板および下板の裏面中心 (ポイント①, ポイント②) と, 上板・下板と棒材との接合点 (ポイント③, ポイント④) の計 4 点とした。なお材料物性値については, Table 2 に示すとおり架台と荷物ともにヤング率 71GPa, ポアソン比 0.33, 密度 2.77g/cm³ とした。

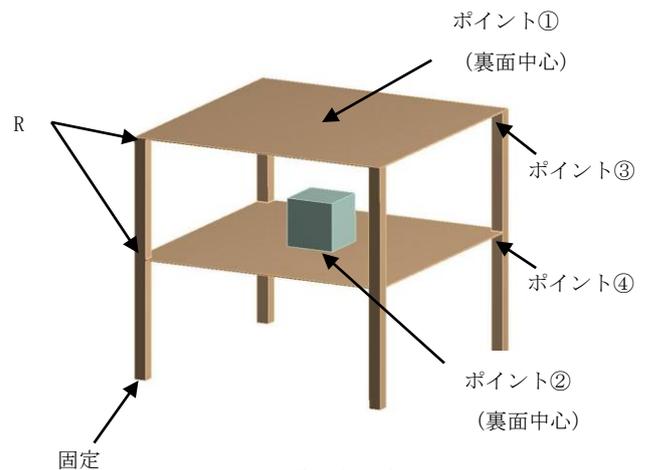


Fig. 4 周波数応答解析モデル

Table 2 周波数応答解析の材料物性値

ヤング率【GPa】	71
ポアソン比	0.33
密度【g/cm ³ 】	2.77

上記モデルに対しモーダル解析を行い, 0~30Hz の範囲に存在する固有値とそのモード形状を求めた。また求めた固有値の周波数で, Z 方向 (上下方向) に 1470.99mm/sec² の加速度を与えた場合の周波数応答解析を行い, 各評価点における相当応力・変位量の値を求めた。なお減衰比については一定減衰比 0.01 とした。Table 3 に今回の解析に用いた各県の解析ソフトの一覧を示す。

Table 3 各県の解析ソフト

機関	解析ソフト
福岡	SolidWorks Simulation 2016
佐賀	SolidWorks Simulation 2016
長崎	SolidWorks Simulation 2015
熊本	ANSYS Ver 15
大分	ANSYS Ver 16
鹿児島	SolidWorks Simulation 2015
沖縄	Ideas MS8
山口	NX-7.5
島根	ANSYS Ver 16

3.2 モーダル解析結果

Fig. 5 に大分県のモーダル解析結果のモード形状を示す。今回のモデルでは0~30Hzの範囲に8つのピークが見られ、その際の変形の様子は下記のとおりであった。

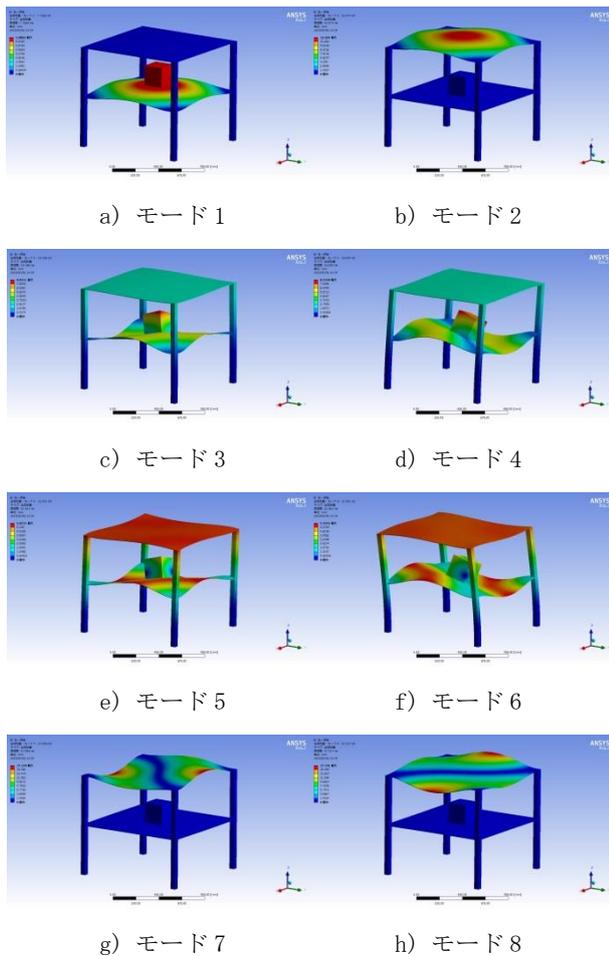


Fig. 5 モード形状 (大分県)

モード 1) 下板が上方に変形。
 モード 2) 上板が上方に変形。

モード 3) 下板がねじれ、全体が多少傾く。

モード 4) モード 3 とは異なる方向にねじれ、傾く。

モード 5) 上板が少し、下板が大きくねじれ全体が傾く。

モード 6) モード 5 と異なる方向に下板がねじれる。

モード 7) 上板が大きくねじれる。

モード 8) モード 7 と異なる方向に下板がねじれる。

Fig. 6 に各県のモーダル解析結果を示す。全ての県で0~30Hz 範囲におけるモードの数は8つであった。また各モードの周波数の推移は、沖縄県のみ若干小さな値となった。さらに一部のモードでの板の変形形状について、県によって反転した形状となっている場合があった。Fig. 7 にその一例を示す。

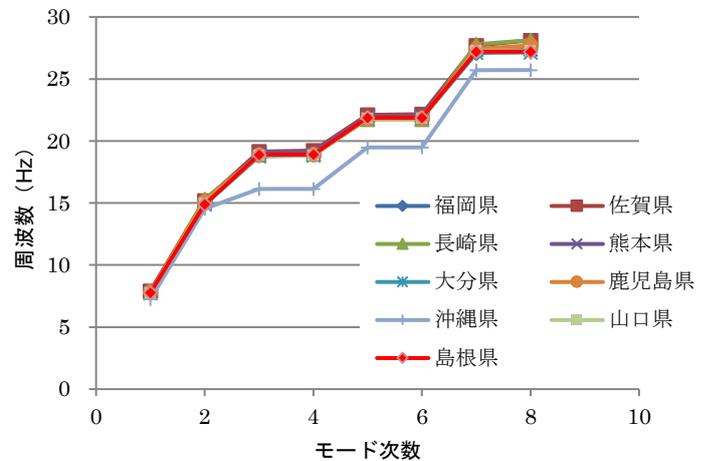


Fig. 6 各県のモーダル解析結果

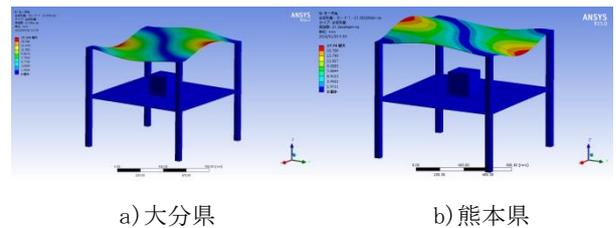


Fig. 7 同モード間における異なる変形の例

3.3 周波数応答解析結果

周波数応答解析の結果について、相当応力・変位量の値が大きい評価ポイント・モードの結果を以下に示す。相当応力についてはポイント③および④（上板および下板の、棒材との接合部）、変位量についてはポイント①および②（上板および下板それぞれの裏面中心点）での結果を抜粋した。

Fig. 8 に評価ポイント③のモード 2(上板が上方に変形)における相当応力の値を示す。佐賀県、島根県の値が比較的大きく、沖縄県の値が著しく小さな結果となった。また Fig. 9 に評価ポイント④のモード 1 (下板が上方に変形)

における相当応力の値を示す。Fig. 8 とほぼ同じ傾向の結果となった。

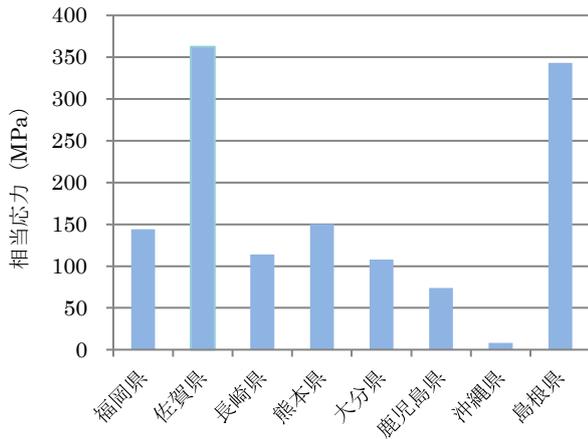


Fig. 8 評価ポイント③の相当応力(モード2)

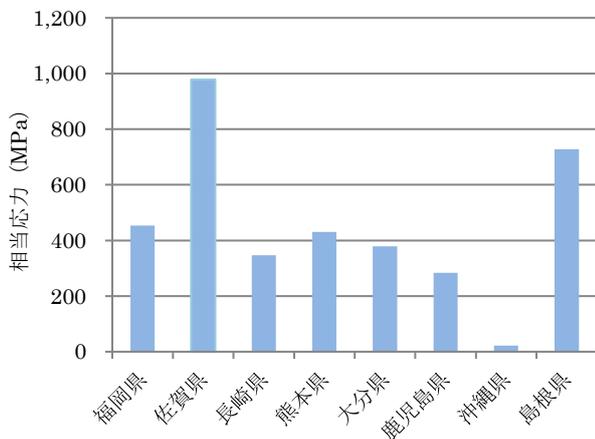


Fig. 9 評価ポイント④の相当応力(モード1)

Fig. 10に評価ポイント①のモード2(上板が上方に変形)における変位量の値を示す。ほぼ全ての県の結果が12mm前後に収まっているのに対し、沖縄県のみ1mm以下の変位量となった。また Fig. 11に評価ポイント②のモード1(下板が上方に変形)における変位量の値を示す。ほぼ全ての県の結果が33mm前後に収まっているのに対し、沖縄県のみ9mm程度の変位量となった。

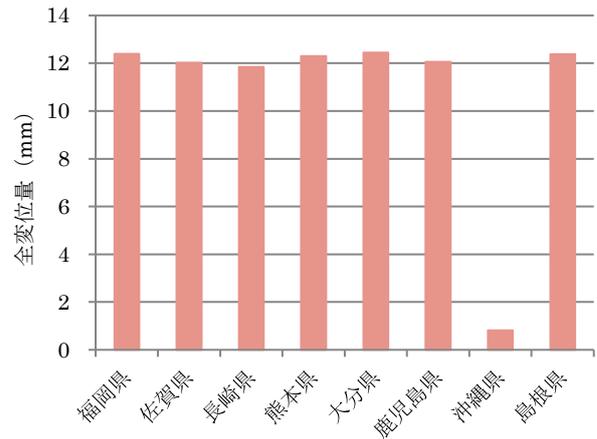


Fig. 10 評価ポイント①の変位量(モード2)

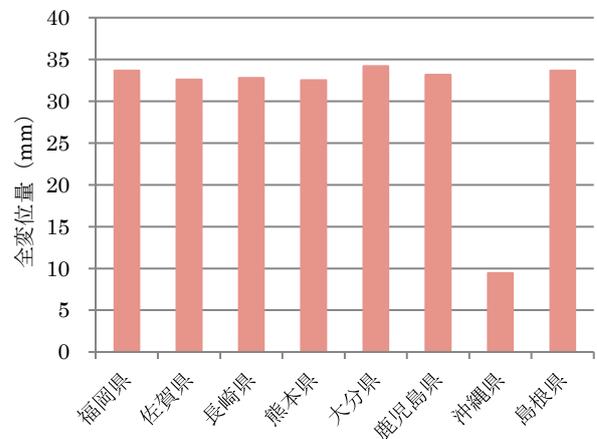


Fig. 11 評価ポイント②の変位量(モード1)

3.4 考察

モーダル解析の結果について、周波数0~30Hzの範囲で発生するモードの数および固有値の全体的な傾向は、各県でおよそ近い結果となったが、モード形状の変形形状では一部の県の結果で反転した形のものがあつた。これは今回の解析モデルが水平方向の縦軸・横軸において完全に対称であるために、メッシュの非対称性等の影響により位相がずれてしまったためと思われる。

周波数応答解析の結果について、相当応力の値については各県でばらつきが見られた。今回相当応力を評価したポイントは応力集中の生じる接合点であるので、メッシュサイズが不十分といった影響で値が変動する可能性があるためと思われる。しかし変位量については沖縄県をのぞいてほぼ同じ結果が得られた。一般に構造解析では変位量から応力値を導き出すため、変位量に近い値で有れば相当応力の値もメッシュサイズ等の厳密な合わせ込みを行えば近い値が得られると思われる。上板の変位量と下板の変位量の差については、下板に荷物を仮定した形状のモデルを

追加しているために、その質点により下板の振幅が大きくなっていると考えられる。

沖縄県の結果については、モーダル解析での固有値は若干低く、また周波数応答解析での変位量の値は大きく異なっている。この原因として以下の点が影響していると考えられる。

- ・今回沖縄県では解析マシンの負担軽減のため、板部材についてはシェルメッシュ（断面2次モーメント値のみを有する、厚み0の二次元要素）を用いている。
- ・他県は棒材下面の全面を完全に固定しているが、沖縄県では棒材下面の角4点のみを固定している。

なお周波数応答解析において、相当応力・変位量などの値は周波数のみならずその位相角によって大きく異なる。しかし解析ソフトによっては自動的に最大の値となる位相角を選択するものもあれば、特に指定しない限り位相角0度での結果を示すもの（ANSYS含む）もある。今回の解析においても公設試によって位相角設定の要・不要が存在した。もし位相角の指定が必要なソフトで指定を忘れた場合、比較的単純な形状のモデルやモード形状であれば、本来想定される応力・変位の分布との違いに気づきやすいが、実際の構造物や製品においては複雑な形状であるため気づけない可能性がある。耐震性評価を行う場合には、必ず使用する解析ソフトがどちらの種類に属するか確認が必要である。

4. まとめ

九州CAE研究会における共通課題、「シートの丸め加工」、
「構造物の周波数応答」の解析を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) シートの丸め加工において、各県の解析結果と理論値の差は1mm以内であった。
- 2) シートの丸め加工において、理論解との誤差を小さくするには、曲げモーメントを作用させる端部を剛体として解析する必要がある。
- 3) 構造物の周波数応答解析において、各県のモーダル解析結果の発生モードは同じのものであったが、値が全体的に低く算出された県や、形状が位相差により反転しているものがあつた。
- 4) 構造物の周波数応答解析結果において、変位量の解析結果は1県を除いて近い値であつた。
- 5) 周波数応答解析においては、解析ソフトによっては最大振幅時の位相を指定する必要がある。

参考文献

- (1) モード解析入門（コロナ社）：長松 昭男 著