

| | |
|-------------------|-------------|
| 島根原子力発電所第2号機 審査資料 | |
| 資料番号 | NS2-添 5-038 |
| 提出年月日 | 2023年2月9日 |

VI-5-38 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ S i m c e n t e r N a s t r a n

2023年2月

中国電力株式会社

目 次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 1.1 使用状況一覧 | 2 |
| 2. 解析コードの概要 | 3 |
| 2.1 Simcenter Nastran Ver. 1859.0018 | 3 |
| 3. 解析手法 | 4 |
| 3.1 一般事項 | 4 |
| 3.2 解析コードの特徴 | 4 |
| 3.3 解析手法 | 4 |
| 3.3.1 固有値解析 | 4 |
| 3.3.2 静的解析 | 5 |
| 3.4 解析フローチャート | 7 |
| 3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation) | 8 |
| 3.5.1 検証 | 8 |
| 3.5.2 妥当性確認 | 15 |
| 3.5.3 評価結果 | 15 |

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）Simcenter Nastranについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

| 使用添付書類 | | バージョン |
|------------|--------------------|----------------|
| VI-2-6-5-2 | 出力領域計装の耐震性についての計算書 | Ver. 1859.0018 |

2. 解析コードの概要

2.1 Simcenter Nastran Ver. 1859. 0018

| | |
|---|--|
| コード名 | Simcenter Nastran |
| 項目 | |
| 使用目的 | 3次元有限要素法による固有値解析及び静的解析 |
| 開発機関 | Siemens PLM Software |
| 開発時期 | 1971年（一般商用リリース） |
| 使用したバージョン | Ver. 1859. 0018 |
| コードの概要 | <p>本解析コードは、航空・宇宙関係の機体強度解析を目的として開発された有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。</p> <p>適用モデル（主にはり要素、シェル要素及びソリッド要素）に対して、静的解析（線形及び非線形）、動的解析（過度応答解析及び周波数応答解析）、固有値解析、伝熱解析（温度分布解析）、熱応力解析、線形座屈解析等の機能を有している。</p> <p>数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野の構造解析に使用されている。</p> |
| 検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation) | <p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について、本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い、解析解が理論解とおおむね一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果によって解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 |

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、米国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) により初期開発され、その後 MSC. Software 社が商用コードとして開発し、現在 Siemens PLM Software が販売している有限要素法 (FEM) による構造解析汎用計算機コードである。

3.2 解析コードの特徴

- (1) 多くの要素が用意されており、様々な種類の機器及び構造物の解析を行うことができる。
- (2) 多自由度を有する大規模問題を効率良く解析することができる。
- (3) 入力データを簡略化できるため、大規模問題を取り扱い易い。
- (4) モデルの確認及び解析結果の確認を図化したデータにより行うことができる。
- (5) 解析における座標系及び拘束条件は、取り扱う問題に応じて選択できる。

3.3 解析手法

3.3.1 固有値解析

構造体の動的な挙動は、時間 t 、質量 M 、減衰 C の要素を考慮した、式(3.1)で示す運動方程式で表される。

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{\delta\} + [C] \frac{d}{dt} \{\delta\} + [K] \{\delta\} = \{F\} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

[M] : 全体質量マトリックス

[C] : 全体減衰マトリックス

[K] : 全体剛性マトリックス

{ δ } : 全体節点変位ベクトル

{F} : 全体荷重ベクトル

固有値解析では式(3.1)に対し、減衰無し $[C]=0$ 、荷重無し $\{F\}=0$ の自由振動状態を想定する。これを式に表すと、式(3.2)となる。

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{\delta\} + [K] \{\delta\} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

式(3.2)の解 $\{\delta\}$ は単純な調和振動となることが予測できるので、 $\{\delta\}$ を式(3.3)のように置き換える。

$$\{\delta\} = \{\phi\} e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

{ ϕ } : 全体変位ベクトル

i : 虚数

ω : 角速度

式(3.3)を時間 t で1階微分, 2階微分を行うと, 式(3.4)及び式(3.5)となる。

$$\frac{d}{dt}\{\delta\} = i\omega\{\phi\}e^{i\omega t} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$\frac{d^2}{dt^2}\{\delta\} = -\omega^2\{\phi\}e^{i\omega t} \dots\dots\dots (3.5)$$

式(3.3)及び式(3.5)を式(3.2)に代入すると, 式(3.6)となる。

$$-\omega^2[M]\{\phi\}e^{i\omega t} + [K]\{\phi\}e^{i\omega t} = 0 \dots\dots\dots (3.6)$$

式(3.6)の両辺を $e^{i\omega t}$ で除して整理すると, 式(3.7)のとおりとなる。

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \dots\dots\dots (3.7)$$

式(3.7)は数学的に一般固有値問題となる。この式を満たす ω^2 と $\{\phi\}$ を求めることが固有値解析となる。ここで ω^2 は固有値, $\{\phi\}$ は固有ベクトルと呼ばれ, 自由度の数だけ存在する。 $[K]$ 及び $[M]$ が $n \times n$ のマトリックスであった場合, 固有値及び固有ベクトルの数は n 個となる。 ω は角速度なので, 振動数 f に変換するには式(3.8)を用いる。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \dots\dots\dots (3.8)$$

3.3.2 静的解析

要素内の変位を仮定し, 節点変位を使って式(3.9)に示すとおり要素内任意点の変位を表現する。

$$\{U\} = [N]\{\delta^e\} \dots\dots\dots (3.9)$$

$\{U\}$: 要素内任意点の変位ベクトル

$[N]$: 形状関数マトリックス

$\{\delta^e\}$: 節点変位ベクトル

上記の変位を微分して, 要素内任意点のひずみを節点変位ベクトルで表すと, 式(3.10)のとおりとなる。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta^e\} \dots\dots\dots (3.10)$$

$\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみベクトル

$[B]$: ひずみ-変位マトリックス

材料物性から求められる応力-ひずみの関係式から式(3.11)により応力が求められる。

式(3.11)にひずみの式(3.10)を代入すると, 式(3.12)となるため, 応力は要素節点変位から計算される。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta^e\} = [S]\{\delta^e\} \dots\dots\dots (3.12)$$

$\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力ベクトル

$[D]$: 材料応力-ひずみマトリックス

$[B]$: ひずみ-変位マトリックス

[S] : 応力マトリックス

物体が力を受けた時の釣り合いを表す仮想仕事の原理は、式(3.13)により表される。

$$\iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dv - \iiint_V \{\delta U\}^T \{\bar{G}\} dv - \iint_{S_0} \{\delta U\}^T \{\bar{T}\} ds = 0 \cdots \cdots (3.13)$$

$\{\delta \varepsilon\}$: 仮想ひずみベクトル

$\{\delta U\}$: 仮想変位ベクトル

$\{\bar{G}\}$: \bar{X} , \bar{Y} の行ベクトル

\bar{X} , \bar{Y} : X, Y 方向の物体力

$\{\bar{T}\}$: 表面 S_0 での表面力ベクトル

式(3.13)の第1項は内部の変形による内部仕事、第2項及び第3項は外力による外部仕事であり、各々全体積 V 又は表面積 S_0 について積分した仕事釣り合うことを表している。

ひずみ-変位関係式(3.10)及び応力-ひずみ関係式(3.11)を仮想仕事の式(3.13)に代入し、要素剛性マトリックスの式(3.14)を導く。

$$[k^e] = \int [B]^T [D] [B] dv \cdots \cdots (3.14)$$

$[k^e]$: 要素剛性マトリックス

静的な構造全体の剛性方程式は、要素剛性方程式を全要素について重ね合わせた式(3.15)で与えられる。

$$[K] \{\delta\} = \{F\} \cdots \cdots (3.15)$$

全体剛性マトリックスは、要素剛性マトリックスをその節点に対応するマトリックスの位置に足し合わせることによって計算される。要素数を n_e とし、形式的に表現して式(3.16)及び式(3.17)となる。

$$[K] = \sum_{i=1}^{n_e} [k^e] \cdots \cdots (3.16)$$

$$\{F\} = \sum_{i=1}^{n_e} [F^e] \cdots \cdots (3.17)$$

$[F^e]$: 要素荷重マトリックス

式(3.15)に拘束条件を適用して連立方程式を解けば、節点変位 $\{\delta\}$ は式(3.18)のように求まる。ここでは形式的に $[K]^{-1}$ と表すが、連立方程式を解くことを意味しており、逆行列を計算する必要はない。

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{F\} \cdots \cdots (3.18)$$

全体節点変位ベクトル $\{\delta\}$ から要素の節点変位 $\{\delta^e\}$ を抽出して式(3.12)に代入すると、要素応力が計算される。

3.4 解析フローチャート

本コードの解析フローチャートを各解析別に、図 3-1 及び図 3-2 に示す。

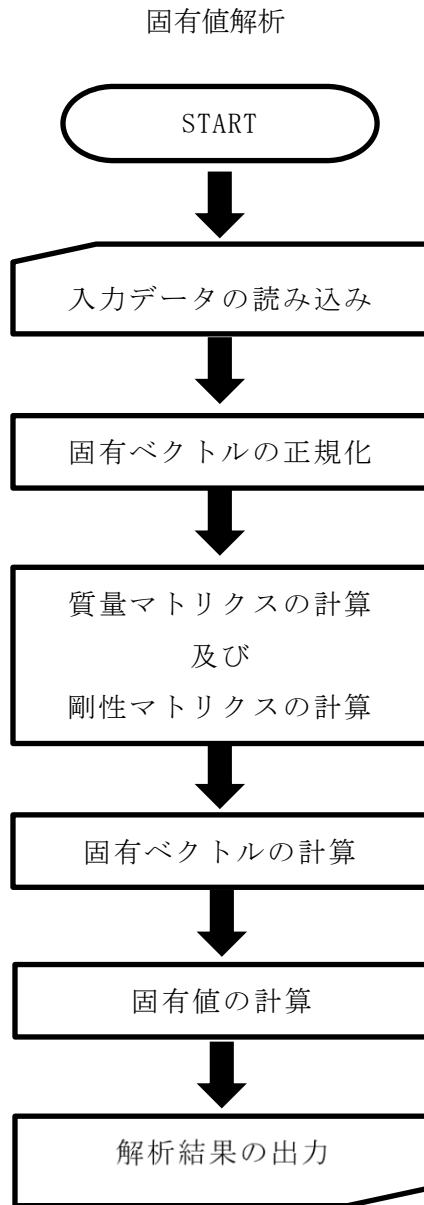


図 3-1 フローチャート（固有値解析）

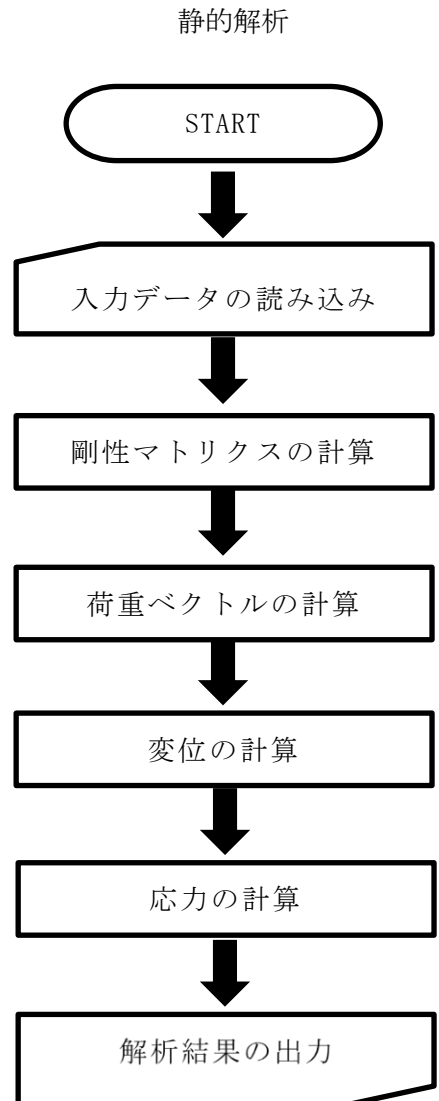


図 3-2 フローチャート（静的解析）

3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

3.5.1 検証

(1) 両端固定はりの固有値解析

両端固定はりの固有値解析を行い、解析結果を理論解と比較する。はりの解析用物性値と寸法を表3-1及び図3-3に示す。また、はりの断面形状を図3-4に示す。

表 3-1 両端固定はりの物性値と断面特性・寸法

| 縦弾性係数 E (MPa) | ポアソン比 ν | 密度 ρ (t/mm ³) | 断面積 A (mm ²) | 断面二次 モーメント I (mm ⁴) | 長さ l (mm) |
|------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|----------------|
| 2×10^5 | 0.3 | 7.9×10^{-9} | 60 | 180 | 1000 |

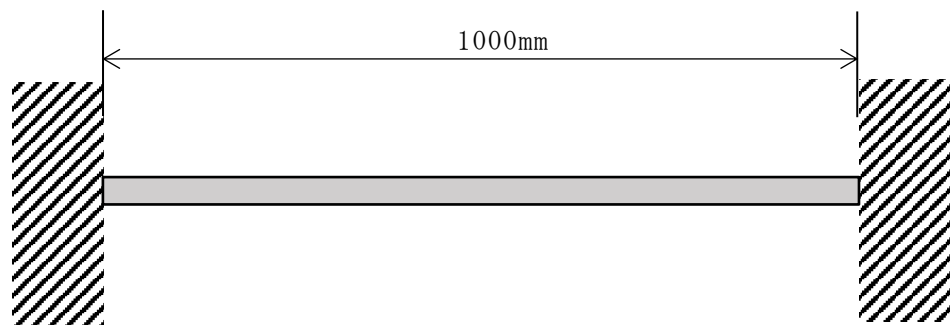


図 3-3 両端固定はりの寸法

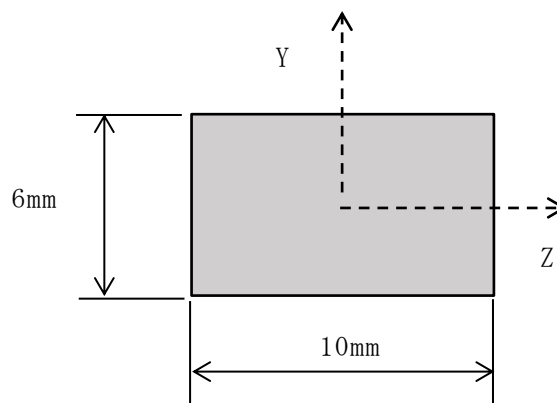


図 3-4 両端固定はりの断面形状

両端固定はりの横振動数の理論解は、式(3.19)により求める。

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi \cdot \ell^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \dots\dots\dots (3.19)$$

n : モード次数, n = 1, 2, 3

A : 断面積

I : 断面二次モーメント

E : 縦弾性係数

λ_n : 振動次数パラメータ

ρ : 密度 (単位体積当たりの質量)

ℓ : 長さ

表3-2に振動次数パラメータ λ_n の値を示す。

表 3-2 λ_n の値

| 支持条件 | λ_1 (1次) | λ_2 (2次) | λ_3 (3次) |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 支持-支持 | π | 2π | 3π |
| 固定-自由 | 1.875 | 4.694 | 7.855 |
| 固定-支持 | 3.927 | 7.069 | 10.210 |
| 自由-自由 | 4.730 | 7.853 | 10.996 |
| 固定-固定 | 4.730 | 7.853 | 10.996 |

出典：機械工学便覧

両端固定はりの1次横振動数の理論解は、式(3.20)のように求まる。

$$f_1 = \frac{\lambda_n^2}{2\pi \cdot \ell^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}}$$

$$= \frac{4.730^2}{2\pi \cdot 1000^2} \sqrt{\frac{2 \times 10^5 \times 180}{7.9 \times 10^{-9} \times 60}} = 31.0 \text{ (Hz)} \dots\dots\dots (3.20)$$

表3-3に固有振動数の理論解と解析結果の比較を示す。両端固定はりの解析モデルを図3-5に示す。解析モデルには、はり要素を使用し、長さ方向に40要素に分割した。図3-6に固有値解析結果を示す。表3-3に示すとおり、解析結果と理論解は一致しており、本解析コードの妥当性が確認された。

表 3-3 固有振動数の解析結果と理論解の比較 (両端固定はり)

| 次数 | 固有振動数 (Hz) | |
|----|------------|------|
| | 理論解 | 解析結果 |
| 1次 | 31.0 | 31.0 |

節点 : 41
要素 : 40

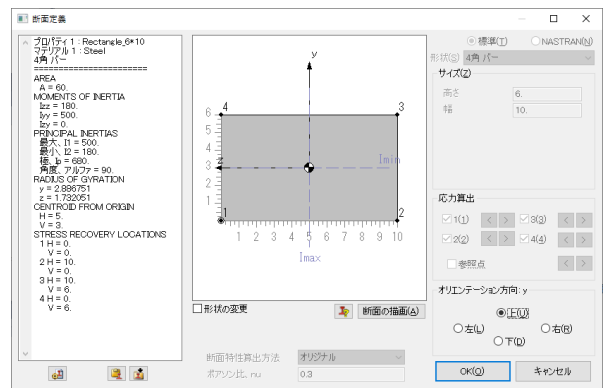
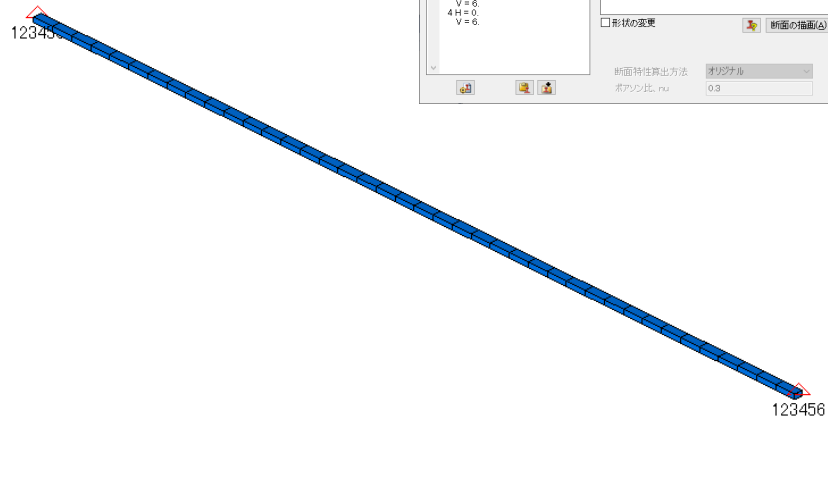
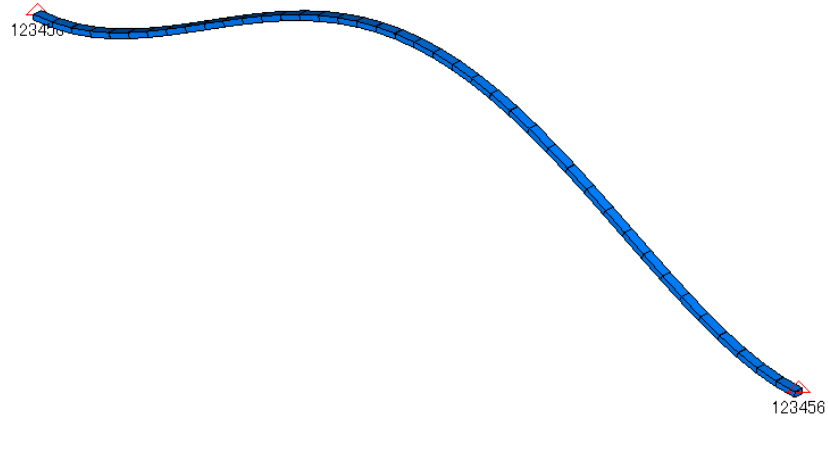


図 3-5 両端固定はりの解析モデル

1 次固有振動数 (f_1) = 31.0 (Hz)



アウトプットセット: Mode 1, 31.02511 Hz
変形(72.94): Total Translation

図 3-6 両端固定はりの固有値解析結果

(2) 片持ちはりの自由端への集中荷重解析

片持ちはりの自由端への集中荷重Fによる静的解析を行い、たわみと曲げ応力について理論解と比較する。はりの計算用物性値と断面特性及び寸法を、表3-4及び図3-7に示す。また、はりの断面形状を図3-8に示す。荷重の種類と値を表3-5に示す。

表 3-4 片持ちはりの物性値と断面特性・寸法

| 縦弾性係数 E (MPa) | ポアソン比 ν | 密度 ρ (t/mm ³) | 断面積 A (mm ²) | 断面二次 モーメント I (mm ⁴) | 断面係数 Z (mm ³) | はりの長さ l (mm) |
|------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 2×10^5 | 0.3 | 7.9×10^{-9} | 480 | 16000 | 1600 | 800 |

表 3-5 荷重

| |
|---------------|
| 集中荷重 F (N) |
| 100 |

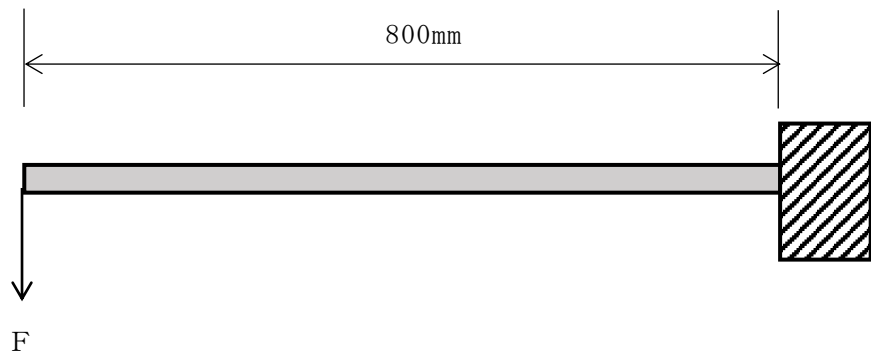


図 3-7 片持ちはりの寸法

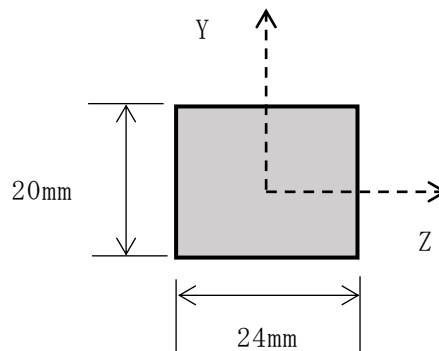


図 3-8 片持ちはりの断面形状

片持ちはりのたわみ δ の理論解は，式(3.21)により求める。

$$\delta = \frac{F \cdot \ell^3}{3E \cdot I} \dots\dots\dots (3.21)$$

- F : 荷重
- ℓ : 長さ
- E : 縦弾性係数
- I : 断面二次モーメント

本解析モデルのたわみの理論解は，式(3.22)のとおり求まる。

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{F \cdot \ell^3}{3E \cdot I} \\ &= \frac{100 \cdot 800^3}{3 \cdot 2.0 \times 10^5 \cdot 16000} = 5.33 \text{ (mm)} \dots\dots\dots (3.22) \end{aligned}$$

片持ちはりの曲げ応力 σ_M の理論解は，式(3.23)及び式(3.24)により求める。

$$M = F \cdot \ell \dots\dots\dots (3.23)$$

M : 曲げモーメント

$$\sigma_M = \frac{M}{Z} \dots\dots\dots (3.24)$$

- σ_M : 曲げ応力
- Z : 断面係数

本解析モデルの固定端の曲げ応力の理論解は，式(3.25)及び式(3.26)のとおり求まる。

$$\begin{aligned} M &= F \cdot \ell \\ &= 100 \cdot 800 = 80000 \text{ (N} \cdot \text{mm)} \dots\dots\dots (3.25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_M &= \frac{M}{Z} \\ &= \frac{80000}{1600} = 50 \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (3.26) \end{aligned}$$

理論解と解析結果の比較について，たわみの比較を表3-6に，曲げ応力の比較を表3-7に示す。片持ちはりの解析モデルを図3-9に示す。解析モデルには，はり要素を使用し，長さ方向に40要素に分割した。図3-10及び図3-11に解析結果を示す。表3-6及び表3-7に示すとおり，解析結果と理論解は **おおむね** 一致しており，本解析コードの妥当性が確認された。

表 3-6 たわみの解析結果と理論解の比較 (片持ちはり)

| 自由端からの 軸方向距離 (mm) | たわみ δ (mm) | |
|----------------------|-------------------|------|
| | 理論解 | 解析結果 |
| 0 | 5.33 | 5.34 |

表 3-7 曲げ応力の解析結果と理論解の比較 (片持ちはり)

| 自由端からの 軸方向距離 (mm) | 応力 σ_M (MPa) | |
|----------------------|---------------------|------|
| | 理論解 | 解析結果 |
| 800 | 50.0 | 50.0 |

節点 : 41
要素 : 40

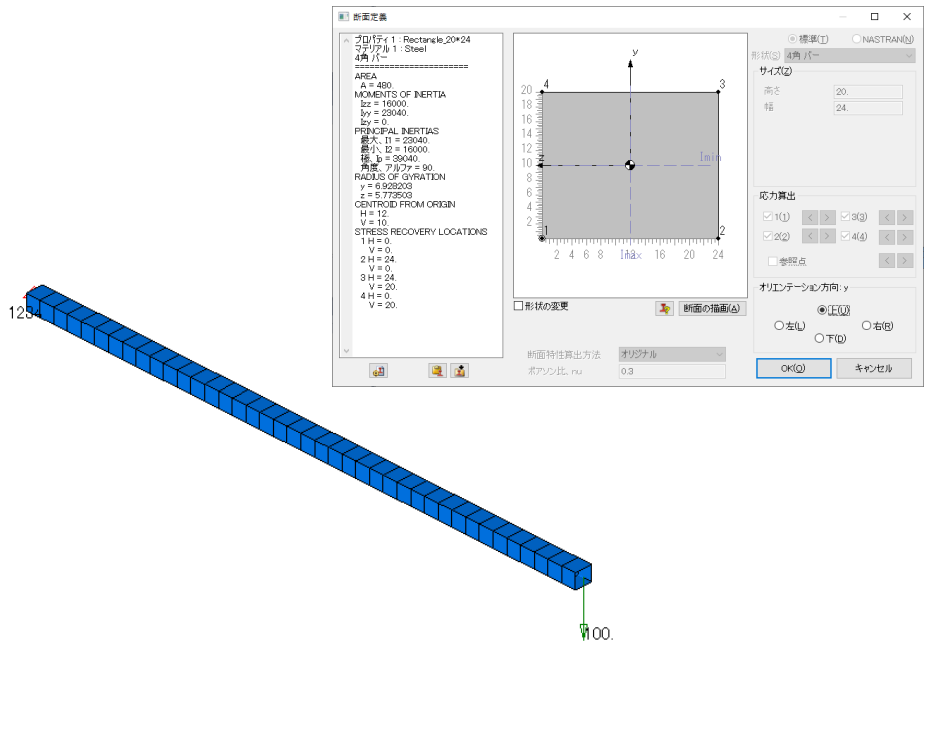


図 3-9 片持ちはりの解析モデル

最大たわみ (Z 方向) = -5.34 (mm)



図 3-10 片持ちはりの解析結果 (たわみ)

最大曲げ応力 = 50 (MPa)

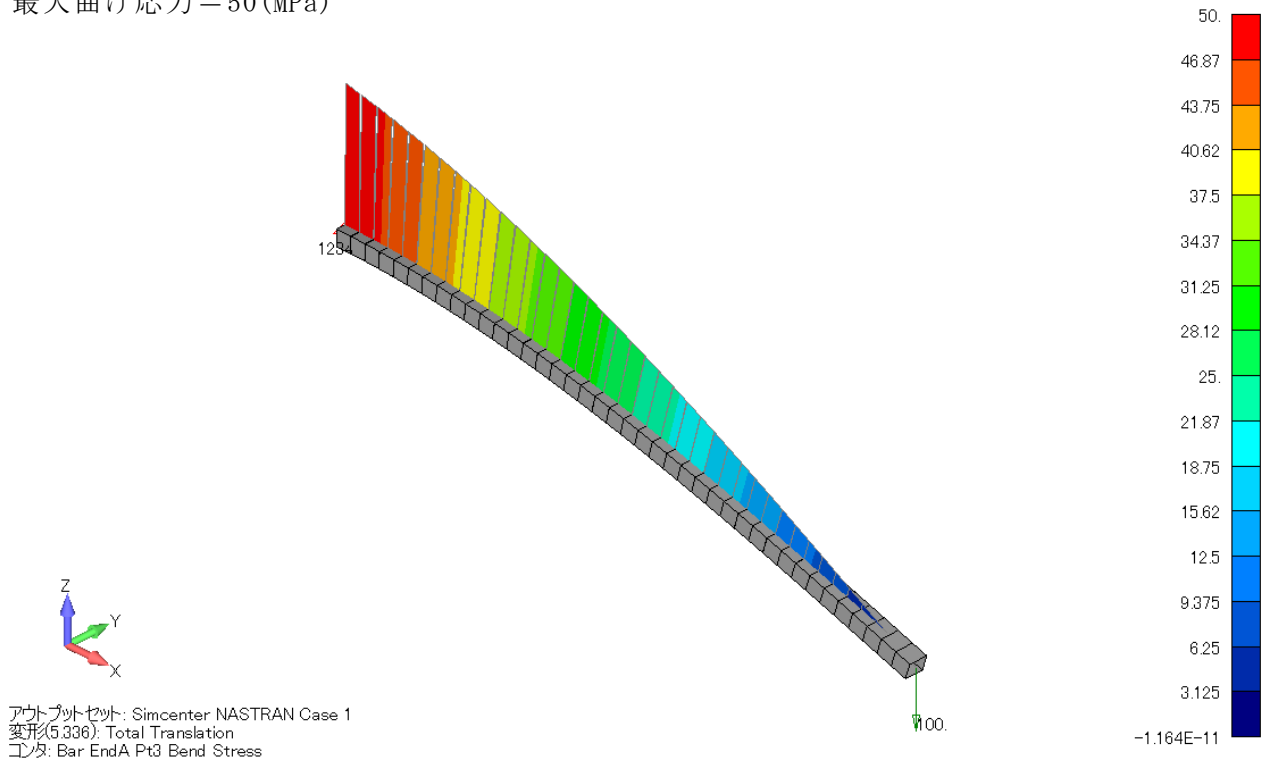


図 3-11 片持ちはりの解析結果 (曲げ応力)

3.5.2 妥当性確認

本解析コードは、航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木等の様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。また、検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから、検証結果によって解析機能の妥当性も確認できる。なお、今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.5.3 評価結果

検証及び妥当性確認の内容から、本解析コードを使用状況一覧に示す使用添付書類の解析に用いることは妥当である。