

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-387 改7
提出年月日	平成30年8月28日

### V-5-3 計算機プログラム（解析コード）の概要・SAP-IV

## 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	SAP-IV CNDYN Ver. 4.1	3
2.2	SAP-IV Ver. 1.00	4
2.3	SAP-IV (統合版) Ver. 8.0 rev.3	5
3.	SAP-IV Ver. 1.00の解析手法について	6
3.1	一般事項	6
3.2	解析コードの特徴	6
3.3	解析手法	6
3.4	解析フローチャート	8
3.5	検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	9
4.	SAP-IV (統合版) Ver. 8.0 rev.3の解析手法について	12
4.1	一般事項	12
4.2	解析コードの特徴	12
4.3	解析手法	12
4.4	解析フローチャート	14
4.5	検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	15

: 今回ご説明する範囲

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）SAP-IV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
V-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-5-4-1-1	残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-6-3-2-1	水圧制御ユニットの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-6-5-1	起動領域計装の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-11-2-1	燃料取替機の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-11-2-4	チャンネル着脱機の耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-11-2-8	制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書	CNDYN Ver. 4.1
V-2-8-3-3-1	緊急時対策所換気系ダクトの耐震性についての計算書	Ver. 1.00
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	(統合版)Ver. 8.0 rev3
V-2-別添2-2	溢水源としない耐震B, Cクラス機器の耐震性についての計算書	(統合版)Ver. 8.0 rev3

## 2. 解析コードの概要

### 2.1 SAP-IV CNDYN Ver. 4.1

項目 \ コード名	SAP-IV
使用目的	3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析 3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析
開発機関	[REDACTED]
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） [REDACTED]
使用したバージョン	CNDYN Ver. 4.1
コードの概要	<p>SAP-IV CNDYN Ver. 4.1（以下、「本解析コード」という。）は、カリフォルニア大学が開発したSAP-IVをベースに、[REDACTED]である。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器の固有値計算並びに自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。</p> <p>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>両持ちはりの単純支持円筒モデルについて、本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し、本解析コードによる解析結果が妥当であることを確認している。</li> <li>平板のモデルについて、シェルモデルによる固有値解析及び応力解析を行い、本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し、解析結果が妥当であることを確認している。</li> <li>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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>本解析コードのマニュアルにより、今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析並びに3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析に、本解析コードが適用できることを確認している。</li> <li>今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素及び解析については、既工事計画において使用された実績がある。</li> <li>今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは、既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。</li> </ul>

2.2 SAP-IV Ver. 1.00

項目	コード名 SAP-IV
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	[Redacted]
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） [Redacted]
使用したバージョン	Ver. 1.00
コードの概要	<p>SAP-IV Ver. 1.00（以下、「本解析コード」という。）は、カリフォルニア大学が開発したSAP-IVをベースに、[Redacted]である。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器の固有値計算並びに自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。</p> <p>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・入力されたデータはインプットデータとして解析結果とともに出力され、入力データと一致することを確認している。</li> <li>・片持ちばりの自重による固定端モーメント及び自由端たわみ、固有振動数を本解析コードの静的解析結果及び固有値解析結果と理論解を比較して検討し、本解析コードによる解析結果が妥当であることを確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学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。</li> <li>・原子力産業界において、工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして、用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。</li> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。</li> </ul>

2.3 SAP-IV（統合版）Ver. 8.0 rev.3

項目 \ コード名	SAP-IV
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社ソフトウェアセンター
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 15px; vertical-align: middle;"></span> 年（株式会社ソフトウェアセンター）
使用したバージョン	（統合版）Ver. 8.0 rev3
コードの概要	<p>SAP-IV（統合版）Ver. 8.0 Rev. 3（以下、「本解析コード」という。）は、カリフォルニア大学が開発したSAP-IVをベースに、プリポストプログラムの追加を目的としてソフトウェアセンターがカスタマイズした計算機プログラムである。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器の固有値計算並びに自重、運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。</p> <p>本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学等の分野において、多くの実績を有している。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・入力されたデータはインプットデータとして解析結果とともに出力され、入力データと一致することを確認している。</li> <li>・両端単純支持ばりの自重による中央部のモーメント及びたわみ、固有振動数を本解析コードの静的解析結果及び固有値解析結果と理論解を比較して検討し、本解析コードによる解析結果が妥当であることを確認している。</li> <li>・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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学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。</li> <li>・原子力産業界において、工認申請範囲外の管及び支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。</li> <li>・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして、用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。</li> <li>・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。</li> </ul>

### 3. SAP-IV Ver. 1.00 の解析手法について

#### 3.1 一般事項

本書は、米国カリフォルニア大学において開発された SAP-IV をベースとして、  
された汎用解  
 析コード SAP-IV Ver. 1.00（以下、「SAP-IV」という。）の説明書である。

本解析コードは、有限要素法を用いて任意形状の 3 次元モデルの静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器・配管系の自重、運転時荷重及び地震力による応力計算に用いる。

#### 3.2 解析コードの特徴

SAP-IV は、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行う 3 次元構造解析用の計算機プログラムである。

主な特徴を下記に示す。

- ・ 2 次元及び 3 次元有限要素プログラムである。
- ・ モデル要素として九種類の要素を扱うことができる。
- ・ 静的解析後に、同じモデルを使い、解析条件及び荷重条件を変更し動的解析を行うことができる。

#### 3.3 解析手法

##### 3.3.1 静的解析

要素の平衡方程式を組み立て、構造物全体に対して次の平衡方程式を作り、これを解く。

$$K u = R$$

ここで、

K : 剛性マトリックス

u : 変位ベクトル

R : 荷重ベクトル

計算された節点の変位から、要素の変形及び要素の応力を求める。



### 3.3.2 動的解析

#### (1) 固有値解析

次の固有値方程式を解いて，固有振動数と振動モードを求める。

$$K \phi = \omega^2 M \phi$$

ここで，

K：剛性マトリックス

$\phi$ ：固有ベクトル

$\omega$ ：固有振動数

M：質量マトリックス

上記方程式の解法として，剛性マトリックスと質量マトリックスが小さい場合にはデターミナント法を用い，剛性マトリックスと質量マトリックスが大きい場合はサブスペース反復法が用いられる。

#### (2) 動的応答解析

動的応答解析においては，次の方程式を用いる。

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = R(t)$$

ここで，

M：質量マトリックス

$\ddot{u}$ ：加速度ベクトル

$\dot{u}$ ：速度ベクトル

u：変位ベクトル

C：減衰マトリックス

K：剛性マトリックス

R(t)：時刻歴の外荷重ベクトル

上記方程式を用いて，モーダル解析法による時刻歴応答解析，直接積分法による時刻歴応答解析ができる。

### 3.4 解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 3-1 に示す。

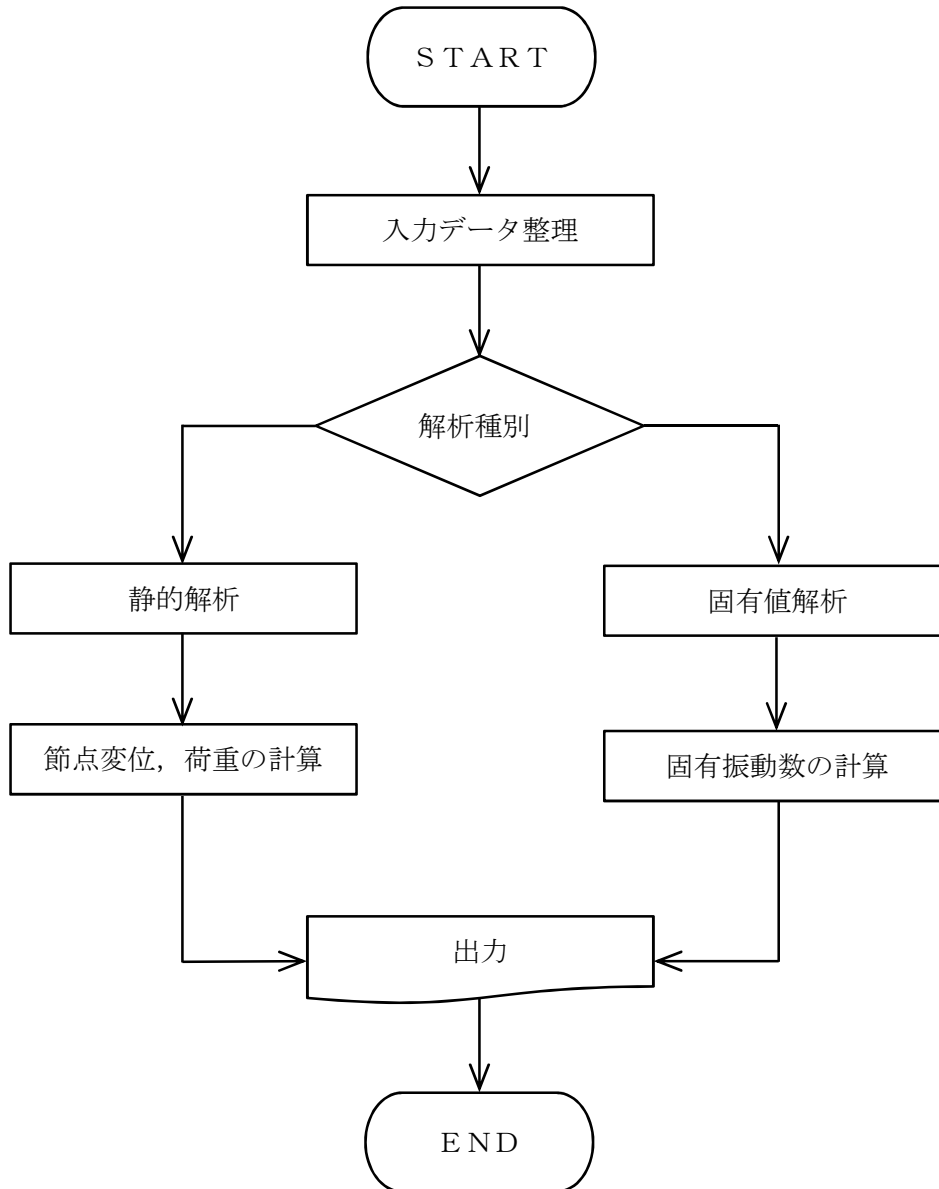


図3-1 解析フローチャート

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

#### 3.5.1 検証 (Verification)

今回の解析に用いた解析コード SAP-IVの検証として、SAP-IVによる解析結果と理論式より算定する理論解との比較検証を行う。

##### (1) 解析ケース

表 3-1 に示す 2 ケースについて解析を行い、理論解と比較する。

表 3-1 検証ケース

ケース	解析種別	内容	要素	条件
1	静的解析	片持ちばりの自重による 固定端モーメント及び 自由端たわみ	はり要素	角形鋼管，一様密度
2	固有値解析	片持ちばりの固有振動数		

##### (2) 解析条件

使用状況一覧における支持構造物の代表的な部材を使用した解析モデルを使用する。

図 3-2 に解析条件を，図 3-3 に解析モデルを示す。

t : 板厚

長さ	L		(mm)
断面形状	—		(mm)
断面積	A		(mm <sup>2</sup> )
有効せん断 断面積	A <sub>s</sub>		(mm <sup>2</sup> )
断面二次 モーメント	I		(mm <sup>4</sup> )
縦弾性係数	E		(N/mm <sup>2</sup> )
横弾性係数	G		(N/mm <sup>2</sup> )
質量密度	$\rho$		(ton/mm <sup>3</sup> )
ポアソン比	$\nu$		(-)
重力加速度	g	9.80665	(m/s <sup>2</sup> )

図3-2 解析条件

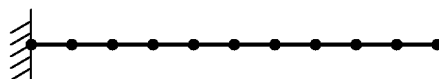


図3-3 解析モデル (使用要素：はり要素)

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較（ケース1）

表 3-2 に解析結果と理論解との比較結果を示す。表 3-2 に示すとおり，解析結果と理論解はよく一致しており，解析コード SAP-IV が検証されていることを確認した。

表 3-2 解析結果と理論解の比較

比較項目	理論解*	解析結果	誤差
$M_{max}$ (固定端モーメント)			
$\delta_{max}$ (自由端たわみ)			
$\sigma$ (発生応力)			

注記\*：理論解は下記の式で計算する。

$$M_{max} = \frac{w \cdot L^2}{2}, \quad w = \rho \cdot A \cdot g \cdot 1000 \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$$\delta_{max} = \delta + \delta'$$

$\delta$ ：曲げ応力によるたわみ

$$\delta = \frac{w \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I} \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$\delta'$ ：せん断応力によるたわみ

$$\frac{d\delta'}{dx} = k \frac{Q}{A \cdot G}$$

ここで， $Q$ ：せん断力

$k$ ：形状係数

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (\text{出典：設計・建設規格})$$

## b. 解析結果と理論解との比較 (ケース2)

表 3-3 に解析結果と理論解の固有振動数の比較結果を示す。表 3-3 に示すとおり、解析結果を理論解はよく一致しており、解析コード SAP-IV が検証されていることを確認した。

表 3-3 解析結果と理論解の比較

(単位 : Hz)

次数	理論解*	解析結果	誤差

注記\* : 理論解は下記の式で計算する。(出典 : 機械工学便覧)

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{A \cdot \rho}}$$

## 3.5.2 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。

- ・ 本解析コードは、機械工学、土木工学、航空工学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。
- ・ 原子力産業界において、工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードが使用された実績があることを確認している。
- ・ 今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして、用途、適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。
- ・ 開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する 3次元有限要素法 (はり要素) による固有値解析、応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

## 3.5.3 評価結果

3.5.1 及び 3.5.2 より、本解析コードを使用目的に示す固有値解析及び応力解析に用いることは妥当である。

#### 4. SAP-IV（統合版）Ver. 8.0 rev. 3 の解析手法について

##### 4.1 一般事項

本書は、米国カリフォルニア大学において開発された SAP-IV をベースに、プリポストプログラムの追加を目的として、  年から株式会社ソフトウェアセンターによりカスタマイズされた汎用解析コード SAP-IV（統合版）Ver. 8.0 rev. 3（以下「SAP-IV」という）の説明書である。

本解析コードは、有限要素法を用いて任意形状の 3 次元モデルの静的解析及び動的解析を行うもので、主として、機器・配管系の自重、運転時荷重及び地震力による応力計算に用いる。

##### 4.2 解析コードの特徴

SAP-IV は、有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行う 3 次元構造解析用のプログラムである。

主な特徴を下記に示す。

- ・ 2 次元及び 3 次元有限要素プログラムである。
- ・ モデル要素として九種類の要素を扱うことができる。
- ・ 静的解析後に、同じモデルを使い、解析条件及び荷重条件を変更し動的解析を行うことができる。

##### 4.3 解析手法

###### 4.3.1 静的解析

要素の平衡方程式を組み立て、構造物全体に対して次の平衡方程式を作り、これを解く。

$$K u = R$$

ここで、

K : 剛性マトリックス

u : 変位ベクトル

R : 荷重ベクトル

計算された節点の変位から、要素の変形及び要素の応力を求める。

## 4.3.2 動的解析

## (1) 固有値解析

次の固有値方程式を解いて、固有振動数と振動モードを求める。

$$K \phi = \omega^2 M \phi$$

ここで、

K：剛性マトリックス

$\phi$ ：固有ベクトル

$\omega$ ：固有振動数

M：質量マトリックス

上記方程式の解法として、剛性マトリックスと質量マトリックスが小さい場合にはデターミナント法を用い、剛性マトリックスと質量マトリックスが大きい場合はサブスペース反復法が用いられる。

## (2) 動的応答解析

動的応答解析においては、次の方程式を用いる。

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = R(t)$$

ここで、

M：質量マトリックス

$\ddot{u}$ ：加速度ベクトル

$\dot{u}$ ：速度ベクトル

u：変位ベクトル

C：減衰マトリックス

K：剛性マトリックス

R(t)：時刻歴の外荷重ベクトル

上記方程式を用いて、モーダル解析法による時刻歴応答解析、直接積分法による時刻歴応答解析ができる。

#### 4.4 解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 4-1 に示す。

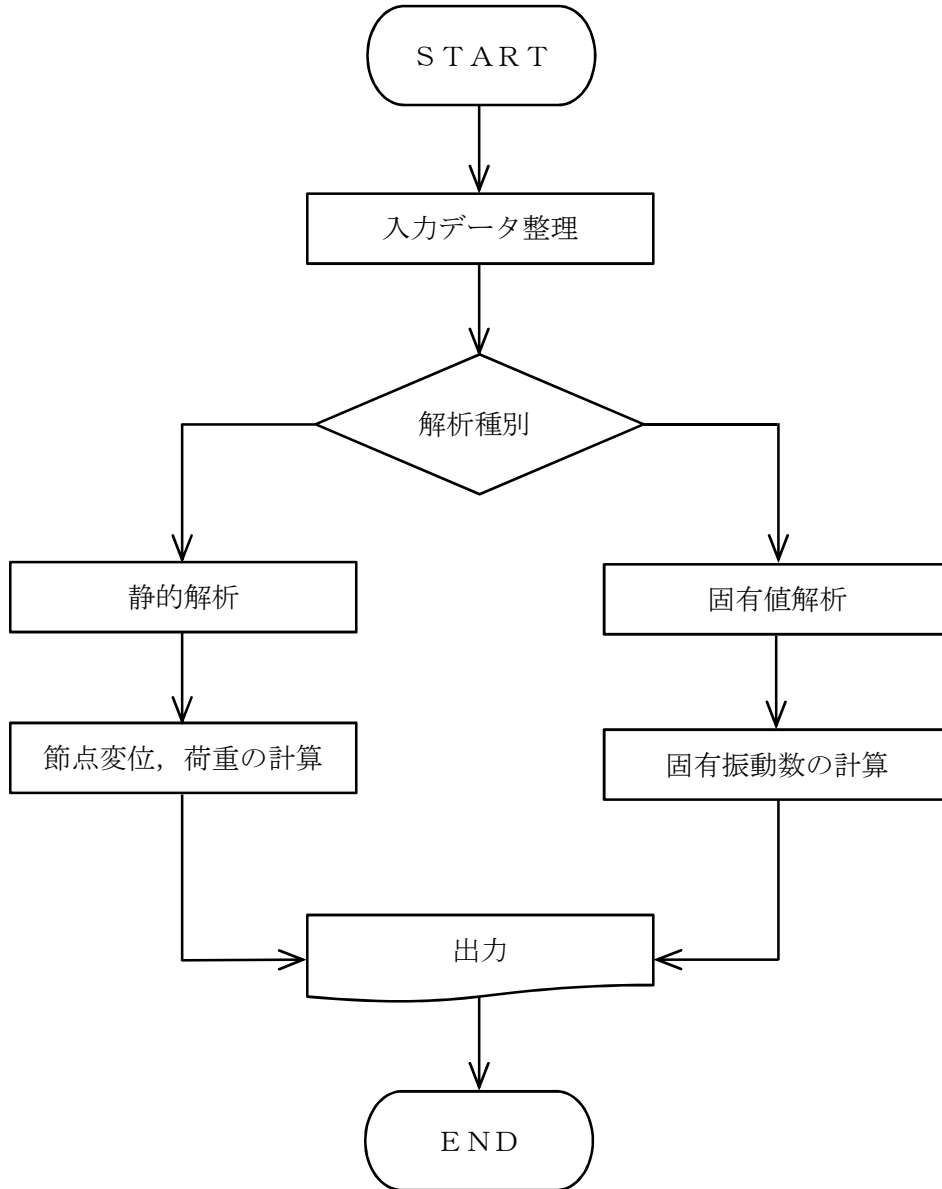


図4-1 解析フローチャート



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

4.5.1 検証 (Verification)

今回の解析に用いた解析コード SAP-IVの検証として、SAP-IVによる解析結果と理論式より算定する理論解との比較検証を行う。

(1) 解析ケース

表 4-1 に示す 2 ケースについて解析を行い、理論解と比較する。

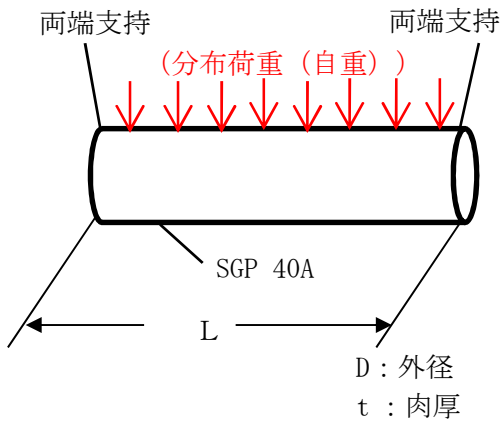
表 4-1 検証ケース

ケース	解析種別	内容	要素	条件
1	静的解析	両端単純支持ばりの自重による中央部のモーメント及びたわみ	はり要素	鋼管，一様密度
2	固有値解析	両端単純支持ばりの固有振動数		

(2) 解析条件

使用状況一覧における管の代表的な部材を使用した解析モデルを使用する。

図 4-2 に解析条件を、図 4-3 に解析モデルを示す。



長さ	L	5000	(mm)
断面形状	-	D=48.6 t=3.5	(mm)
断面二次モーメント	I	$1.268426 \times 10^5$	(mm <sup>4</sup> )
縦弾性係数	E	$2.03 \times 10^5$	(N/mm <sup>2</sup> )
重力加速度	<b>g</b>	9.80665	(m/s <sup>2</sup> )
<b>分布荷重</b>	w	0.03815	(N/mm)
<b>ポアソン比</b>	<b>ν</b>	<b>0.3</b>	(-)
<b>横弾性係数</b>	<b>G</b>	<b>78077</b>	(N/mm <sup>2</sup> )

図4-2 解析条件



図4-3 解析モデル (使用要素：はり要素)

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較 (ケース1)

表 4-2 に解析結果と理論解との比較結果を示す。表 4-2 に示すとおり，解析結果と理論解はよく一致しており，解析コード SAP-IV が検証されていることが確認された。

表 4-2 解析結果と理論解の比較

比較項目	理論解*	解析結果	誤差
$M_{max}$ (中央曲げモーメント)	$1.1922 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$	$1.1922 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$	0.00 %
$\delta_{max}$ (中央たわみ)	12.063 mm	12.064 mm	0.01 %

注記 \* : 理論解は下記の式で計算する。

$$M_{max} = \frac{w \cdot L^2}{8} \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$$\delta_{max} = \delta + \delta'$$

$\delta$  : 曲げ応力によるたわみ

$$\delta = \frac{5w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$\delta'$  : せん断応力によるたわみ

$$\begin{aligned} \delta' &= \frac{1}{\kappa \cdot A \cdot G} \int_0^{\frac{L}{2}} Q dx && (\text{出典：機械工学便覧}) \\ &= \frac{w \cdot L^2}{4 \cdot A \cdot G} \end{aligned}$$

ここで， $Q$  : せん断力

$\kappa$  : 形状係数 (=0.5) (出典：構造力学公式集)

b. 解析結果と理論解との比較（ケース2）

表 4-3 に解析結果と理論解の固有振動数の比較結果を示す。表 3-3 に示すとおり、解析結果を理論解はよく一致しており、解析コード SAP-IV が検証されていることが確認された。

表 4-3 解析結果と理論解の比較

(単位：Hz)

次数	理論解*	解析結果	誤差
1次	5.112	5.111	-0.02 %

注記 \*：理論解は下記の式で計算する。(出典：機械工学便覧)

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{w_1}}, \quad w_1 = w \cdot 1000 / g$$

ここに,  $\lambda = \pi$

#### 4.5.2 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。

- ・本解析コードは、機械工学，土木工学，航空工学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。
- ・原子力産業界において，工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。
- ・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。
- ・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

#### 4.5.3 評価結果

4.5.1 及び 4.5.2 より，本解析コードを使用目的に示す固有値解析及び応力解析に用いることは妥当である。