

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-672 R0
提出年月日	平成30年6月28日

V-5-40 計算機プログラム（解析コード）の概要・FRAME（面内）

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
3. FRAME（面内）の解析手法について	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	5
3.4 解析フローチャート	8
3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation）	9

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）FRAME（面内）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-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver. 5.0.4
V-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 5.0.4

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	FRAME (面内)
使用目的	2次元骨組構造解析 (断面力算出)
開発機関	株式会社 フォーラムエイト
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver. 5.0.4
コードの概要	<p>FRAME (面内)は株式会社フォーラムエイトによって開発された平面骨組構造解析の汎用市販コードである。</p> <p>本解析コードは、微小変位理論による変位法を用いて、2次元平面骨組モデルの断面力・変位・反力を算出するための構造解析プログラムである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>FRAME (面内) は汎用市販コードであり、常設低圧代替注水系ポンプ室及び代替淡水貯槽の断面力算出に使用している。</p> <p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今回の公認申請で使用する機能の検証として、材料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て静的解析を実施した解析解と、構造力学公式集に記載の理論式による理論解とを比較し、解析解と理論解が概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)】</p> <p>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、国内の建築・土木分野において使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。 ・本解析コードの理論は、一般的に認知されているものであり、今回の工認申請で使用する2次元骨組モデルによる断面力算定での適用は妥当である。

3. FRAME（面内）の解析手法について

3.1 一般事項

本解析コードは、微小変位理論による変位法を用いて、元平面骨組モデルの断面力・変位・反力を算出するための構造解析プログラムである。今回は、代替淡水貯槽のRC部材に対する断面力算出に使用している。

3.2 解析コードの特徴

平面内で構成された骨組みモデルに対して、同一平面上でモデルの変形を表現できるような荷重（面内荷重）が載荷された場合の解析（面内解析）を行う。

本解析コードの解析部は微小変位理論に基づいて、格点変位を未知量とする多次元連立方程式を解くことによって所要の変位・断面力・反力を算出する。この連立方程式は、構造データから決定される剛性マトリックスと荷重データから決定される荷重ベクトルから構成される。

3.3 解析手法

本解析コードは微小変位理論（力の釣合いを考える上では変形の影響は無視でき、力は変形前の形状に対して釣合っていると考える。）に基づいた変位法による平面骨組みの構造解析コードである。解析の理論概要について以下に示す。

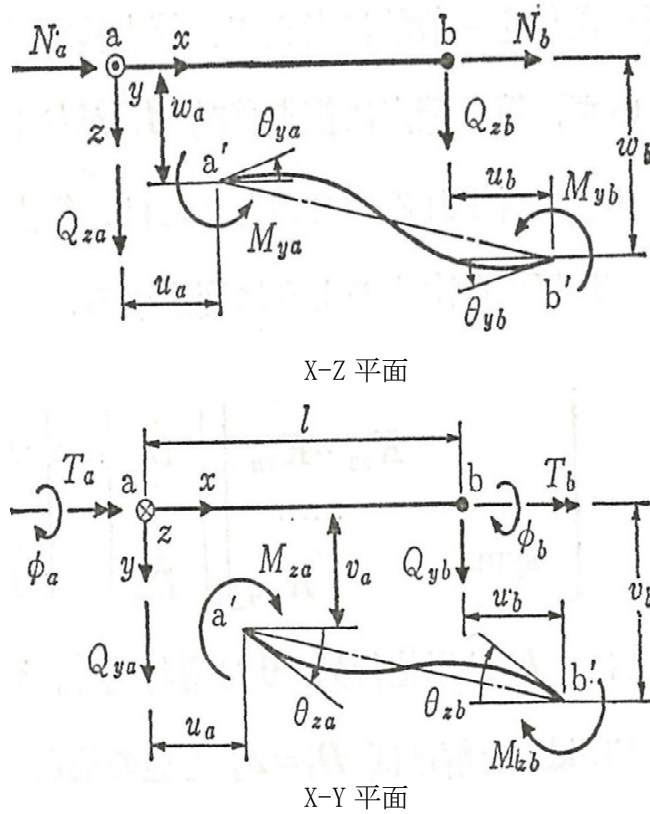


図 3-1 理論概要モデル¹⁾

部材の一端 a を原点とし、X 軸は部材中心軸に、y、z 軸は断面主軸にそれぞれ一致する右手直交直線座標系 (x, y, z) を部材座標に選ぶ。部材の両端 a、b の座標軸方向の並進変位 u、v、w と座標軸に関して右ねじまわりの回転角 ϕ 、 θ_y 、 θ_z を、a 端と b 端についてそれぞれ六次の列ベクトルで表わす。

$$\left. \begin{aligned} d_a &= (u_a, v_a, w_a, \phi_a, \theta_{ya}, \theta_{za})^T \\ d_b &= (u_b, v_b, w_b, \phi_b, \theta_{yb}, \theta_{zb})^T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 ϕ はねじり角であり、微小変位理論では $\theta_y = -dw/dx$ 、 $\theta_z = dv/dx$ である。T は転置記号である。

式(1)の変位の方向の部材端力を次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} f_a &= (N_a, Q_{ya}, Q_{za}, T_a, M_{ya}, M_{za})^T \\ d_b &= (N_b, Q_{yb}, Q_{zb}, T_b, M_{yb}, M_{zb})^T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 N は軸力、 T はねじりモーメント、 Q と M は y, z 軸に関するせん断力と曲げモーメントである。部材の剛性方程式は次の行列式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} \\ k_{ba} & k_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_a \\ d_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_a \\ f_b \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} f_a^0 \\ f_b^0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、係数行列は部材の剛性行列であり、 f_a^0, f_b^0 は中間荷重による a, b 端の等価節点力ベクトルである。

構造系全体に共通な 1 つの基準座標として、適当な位置に原点をもつ右手直交直線座標系 (X, Y, Z) を定める。 (x, y, z) 座標を (X, Y, Z) 座標に変換する座標変換行列 T を用いて、式(3)を次式のように変換する。

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_a \\ D_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_a^0 \\ F_b^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $T^{-1} = T^T$ を考慮して

$$K_{aa} = T k_{aa} T^T, \quad K_{ab} = T k_{ab} T^T = k_{ba}^T, \quad K_{bb} = T k_{bb} T^T \quad (5)$$

$$D_a = T d_a, \quad D_b = T d_b, \quad F_a = T f_a, \quad F_b = T f_b, \quad F_a^0 = T f_a^0, \quad F_b^0 = T f_b^0 \quad (6)$$

節点 i の節点変位を D_i 、節点荷重 (又は反力) を P_i とする。各節点において変位の適合条件と力の釣合い条件から部材端変位 D_a, D_b と部材端力 F_a, F_b を消去すると、式(4)を全部材について組立てた次式の構造全体の剛性方程式が得られる。

$$K_L D = P - F^0 \quad \text{または} \quad \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ \text{sym.} & & & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} F_1^0 \\ F_2^0 \\ \vdots \\ F_n^0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここに、 F_i^0 は節点 i に集まる部材の中間荷重項 F_a^0 又は F_b^0 の和である。各小行列とベクトルの次数は節点の自由度 (平面骨組は 3, 立体骨組では 6) に等しい。なお、 n は節点の総数である。

式(7)の係数行列 K_L は構造全体の剛性行列であり、その小行列 K_{ij} は次のようにして求められる。

対角小行列 K_{ij} は、節点 i に集まる部材の i に結合された部材端側の剛性行列 K_{aa} 又は K_{bb} の和になる。上三角行列部分の $K_{ij} (i < j)$ は、節点 i と j をつなぐ部材の剛性行列 K_{ab} に等しい。ただし、部材の a 端 (原点) 側の節点番号が b 端側の節点番号より小さくなるように部材座標の原点を定めたものとする。もし、 i, j をつなぐ部材がなければ $K_{ij} = 0$ である。

式(7)に対して境界条件を考えて節点移動がある場合は以下となる。

第2節点に節点移動 Δ_2 が与えられていたものとする $D_2 = \Delta_2$ で、 P_2 には節点移動に必要な未知の強制力 Q_2 が含まれる。このときには、節点2に関する剛性方程式は式(7)と独立になるので、式(7)を次式のように変形する。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & 0 & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ & E & 0 & \cdots & 0 \\ & & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \text{sym.} & & & & \vdots \\ & & & & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ 0 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} F_1^0 \\ 0 \\ F_3^0 \\ \vdots \\ F_n^0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} K_{12} \\ -E \\ K_{32} \\ \vdots \\ K_{n2} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここに、 E は単位行列、 0 は零行列で、剛性行列の2行目と2列目の小行列は対角小行列以外すべて 0 とする。式(8)を解けば $D_2 = \Delta_2$ と他の節点変位が求められる。この解を次式に代入して Q_2 が得られる。

$$Q_2 = \sum_{i=1}^n K_{2i} D_i - P_2 + F_2^0 \quad (9)$$

節点2の反力 R_2 は式(9)で $Q_2 = R_2$ として求められる。部材端力に関しては式(6)によって D_i を d_a 又は d_b に変換し、これらを式(3)に代入することで部材端力 f_a 、 f_b を求める。

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

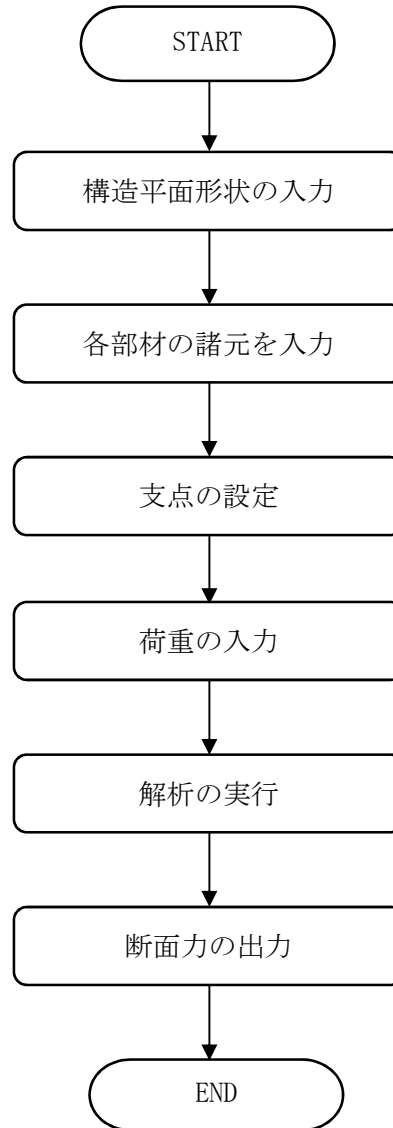


図3-2 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

本解析コードを今回の解析に用いるに当たり、検証として理論値との比較を実施した。その詳細な内容については下記のとおりである。

a. 理論解との比較

単純はりを対象に構造力学公式集¹⁾に基づいて断面力、たわみを算出し、FRAME(面内)の解析結果との比較を行い検証した。

(a) 単純はりの概要

10mの間隔に設置された支点上に、H型鋼材 (H-300×300×10×15) が設置された単純はりを仮定する。荷重は鉛直方向に10kN/mの等分布荷重が載荷された状態を想定する。

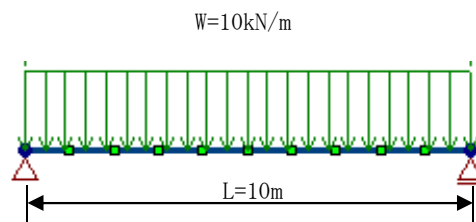


図3-3 理論解との検証に用いる単純はり

(b) H型鋼材 (H-300×300×10×15) の断面諸元

断面積 : $A=0.01184 \text{ m}^2$

断面二次モーメント : $I=0.000202 \text{ m}^4$

ヤング係数 : $E=2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$

(c) 構造力学公式集に基づく断面力及びたわみの算出

下式に構造力学公式集¹⁾に基づいた、断面力とたわみの最大値の算出結果を示す。

【最大曲げモーメント】

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{10[\text{kN/m}] \times (10[\text{m}])^2}{8} = 125.0[\text{kN} \cdot \text{m}]$$

【最大せん断力】

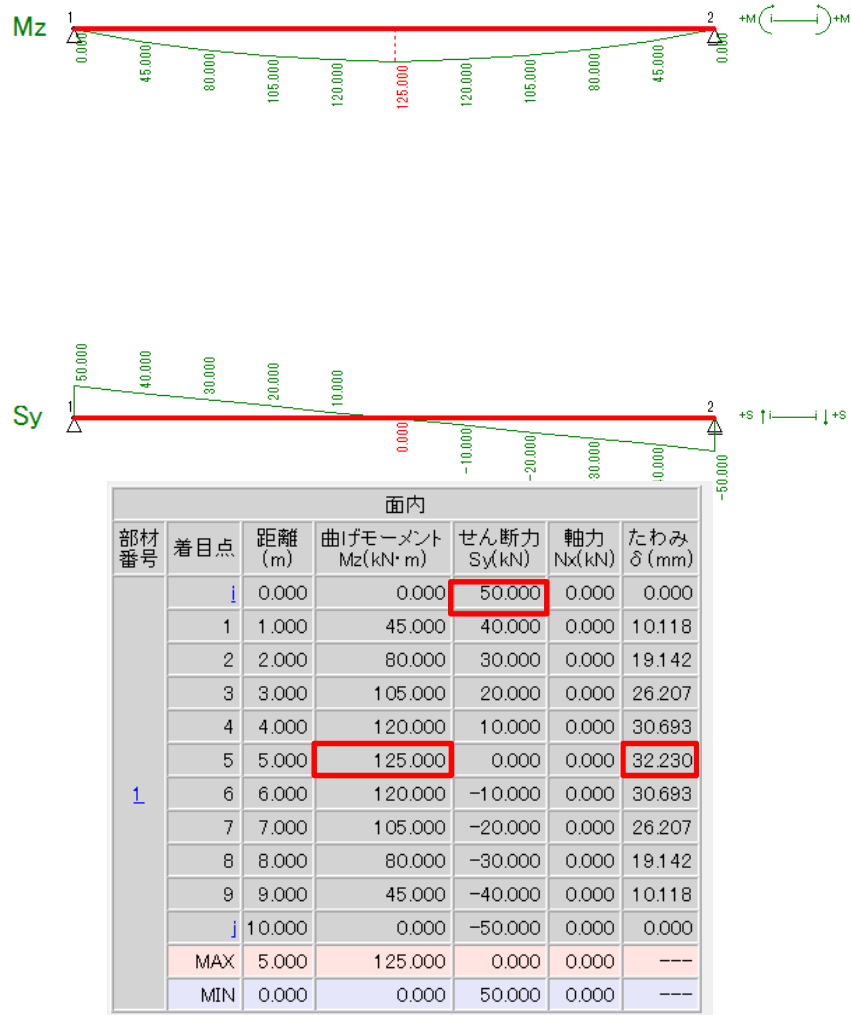
$$S = \frac{wL}{2} = \frac{10[\text{kN/m}] \times 10[\text{m}]}{2} = 50.0[\text{kN}]$$

【最大たわみ】

$$\delta = \frac{5wL^4}{384EI} = \frac{5 \times 10[\text{kN/m}] \times (10[\text{m}])^4}{384 \times 2.0 \times 10^8[\text{kN/m}^2] \times 2.02 \times 10^{-4}[\text{m}^4]} = 3.223 \times 10^{-2}[\text{m}] = 32.23[\text{mm}]$$

(d) FRAME(面内)による解析結果

FRAME(面内)による解析結果について図3-4に示す。



 最大値

図3-4 解析結果の断面力

b. 比較結果

構造力学公式集¹⁾による断面力・たわみの算出結果と解析結果を比較したものを下表に示す。
下表のとおり、解析結果は構造力学公式集¹⁾による計算結果と一致した。

表3-1 比較結果

	構造力学公式集 ¹⁾	FRAME (面内)
最大曲げモーメント	125.0 kN・m	125.0 kN・m
最大せん断力	50.0 kN	50.0 kN
最大たわみ	32.2 mm	32.2 mm

以上より、本解析コードの解析結果は、曲げモーメント、せん断力、たわみにおいて構造力学公式集¹⁾による計算結果と一致していることから、本解析コードを構造物の耐震性の計算に適用することは妥当である。

参考文献

- 1) 構造力学公式集，土木学会，1986.