

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 5-054
提出年月日	2023年2月9日

VI-5-54 計算機プログラム（解析コード）の概要
・ V A

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 VA Ver.2	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
3.4 解析フローチャート	6
3.5 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	7
3.5.1 検証	7
3.5.2 妥当性確認	12
3.5.3 評価結果	12

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）VA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-別添2-2	溢水源としないB, Cクラス機器の耐震性についての計算書	Ver. 2

2. 解析コードの概要

2.1 VA Ver. 2

項目 \ コード名	VA
使用目的	振動アドミッタンス理論に基づく地盤ばね（実部，虚部）の算定
開発機関	大成建設株式会社
開発時期	1991年
使用したバージョン	Ver. 2
コードの概要	VAは，振動アドミッタンス理論により，基礎の水平，鉛直及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>VA（以下「本解析コード」という。）は，非常用ろ過水タンクの地震応答解析及び3次元静的線形FEM解析における水平，鉛直及び回転に対する基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。</p> <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"> ・本解析コードを用いて評価した地盤ばねが薄層法及びDGC（ダイナミック・グラウンド・コンプライアンス）（以下「DGC」という。）で算出した結果と おおむね 一致していることを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 <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"> ・検証の内容のとおり，水平，鉛直及び回転に対する地盤ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・非常用ろ過水タンクの地震応答解析における地盤ばねの算定に本解析コードを使用することは，本解析の適用範囲に対して検証されており，妥当である。

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、振動アドミッタンス理論に基づき、基礎の水平、鉛直及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。本解析コードは、非常用ろ過水タンクの地震応答解析及び3次元静的線形 FEM 解析における水平、鉛直及び回転に対する基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードの主な特徴を以下に示す。

- ・振動アドミッタンス理論に基づき、底面地盤ばねを振動数領域で算定できる。
- ・点加振解を用いているため、高振動数領域に対しても適用可能である。
- ・任意の正方形要素を組み合わせて表現することができるため、任意の基礎形状にも対応可能である。

3.3 解析手法

多治見の振動アドミッタンス理論においては、半無限弾性体上の基礎マット面に、鉛直、水平、回転の動的な力 $Pe^{i\omega t}$ を加えたとき、それに対応する変位 W との関係を以下の式で表せる。

$$W = \frac{Pe^{i\omega t}}{K_f} \{g_1(\omega) - ig_2(\omega)\} \quad (3.1)$$

ここで、 K_f ：静的地盤ばね剛性

この $g_1(\omega) - ig_2(\omega)$ を多治見は振動アドミッタンスと名付けている。これより地盤ばねは振動アドミッタンスの逆数を用いて以下の式で表される。

$$K(\omega) = K_f \cdot \frac{1}{g_1(\omega) - ig_2(\omega)} \quad (3.2)$$

ここで、 $K(\omega)$ ：動的抵抗係数

(3.2) 式を変形すると、地盤ばねは複素剛性の形にすることができ、実数部を剛性成分、虚数部を減衰成分として、以下の式で表される。

$$K(\omega) = K_R(\omega) + iK_I(\omega) \quad (3.3)$$

振動アドミッタンスでは点加振解が必要である。多治見は、妹沢の解として知られている三次元波動方程式の解を用い、境界条件を満たす鉛直及び水平の点加振解を求めている。図 3-1 に示すとおり、 x 方向の点加振 $P_x e^{i\omega t}$ が作用するときの地表面の任意点 (r, θ) における x 方向変位 u_x 及び y 方向変位 u_y は次式で与えられる。

$$u_x = \frac{P_x \cdot e^{i\omega t}}{4\pi G} \frac{1}{r} \{ (2-\nu)(f_{H1} + i \cdot f_{H2}) + \nu \cos 2\theta (g_{H1} + i \cdot g_{H2}) \} \quad (3.4)$$

$$u_y = \frac{P_x \cdot e^{i\omega t}}{4\pi G} \frac{1}{r} \nu \sin 2\theta (g_{H1} + i \cdot g_{H2}) \quad (3.5)$$

同様に、z 方向の点加振 $P_z e^{i\omega t}$ が作用するときの z 方向変位 u_z は次式のように示される。

$$u_z = \frac{P_z \cdot e^{i\omega t}}{2\pi G} \frac{1-\nu}{r} (f_{V1} + i \cdot f_{V2}) \quad (3.6)$$

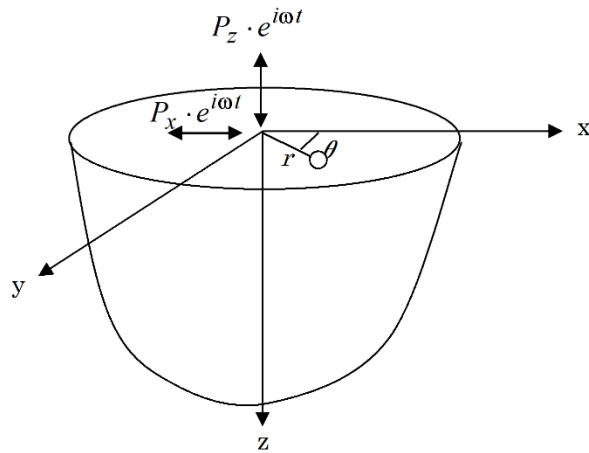


図 3-1 座標系

振動アドミッタンス理論では、図 3-2 に示すように基礎を小領域に分割し、小領域に点加振した場合の変位から、基礎全体の力-変位関係を基礎の条件、基礎下の地反力分布を一様分布（水平ばね及び鉛直ばね）、三角形分布（回転ばね）とする、又は、基礎を剛体と仮定し、変位分布を一様分布（水平ばね及び鉛直ばね）、三角形分布（回転ばね）とする条件のもとで求めるものである。

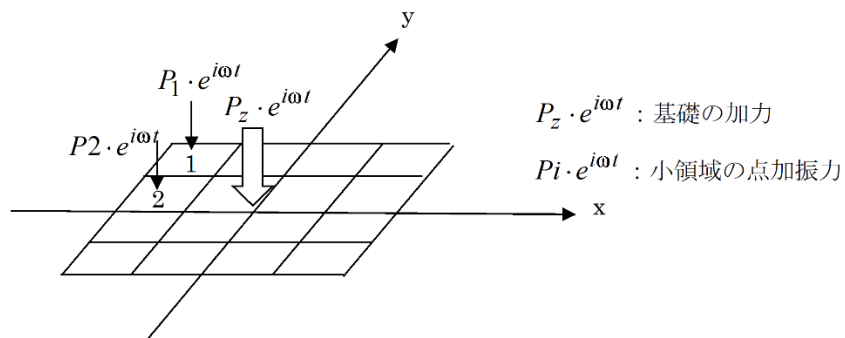


図 3-2 基礎の分割

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-3 に示す。

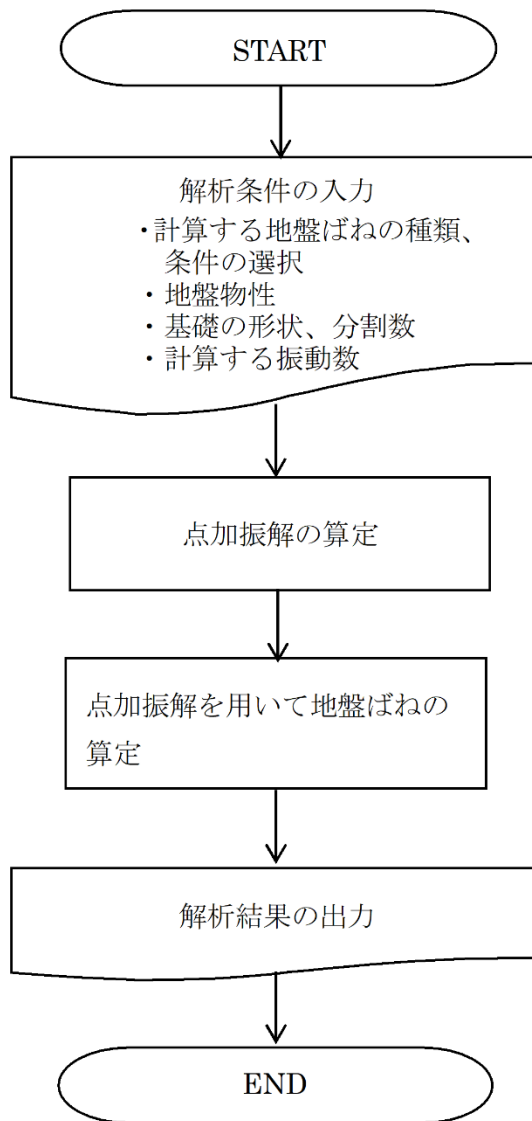


図 3-3 解析フローチャート

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

3.5.1 検証

本解析コードの検証は、薄層法及び DGC で計算された結果と比較により行う。解析モデルは 40m×40m の基礎とする。図 3-4 に振動アドミタンス用に 12×12 にメッシュ分割したモデル図及び地盤条件を示す。

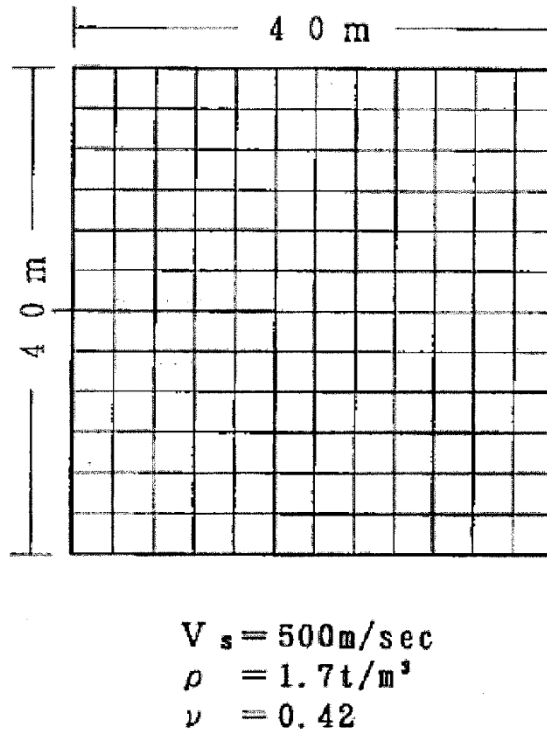


図 3-4 振動アドミタンス用モデル及び地盤条件

(a) 薄層法との比較

薄層法は、水平方向には半無限状態を表現できるが、地盤下方に対しては有限要素でモデル化されるため、基礎幅の約 2 倍にあたる $4\text{m} \times 21 = 84\text{m}$ の薄層地盤を設け、その下に粘性境界を付けることで半無限状態を表現する。図 3-5 に薄層法用の解析モデルを示す。

薄層法による結果と本解析コードによる結果を比較したものを表 3-1 に示す。両者は **おおむね** 一致していることが確認できる。

なお、境界条件は剛体変位仮定である。

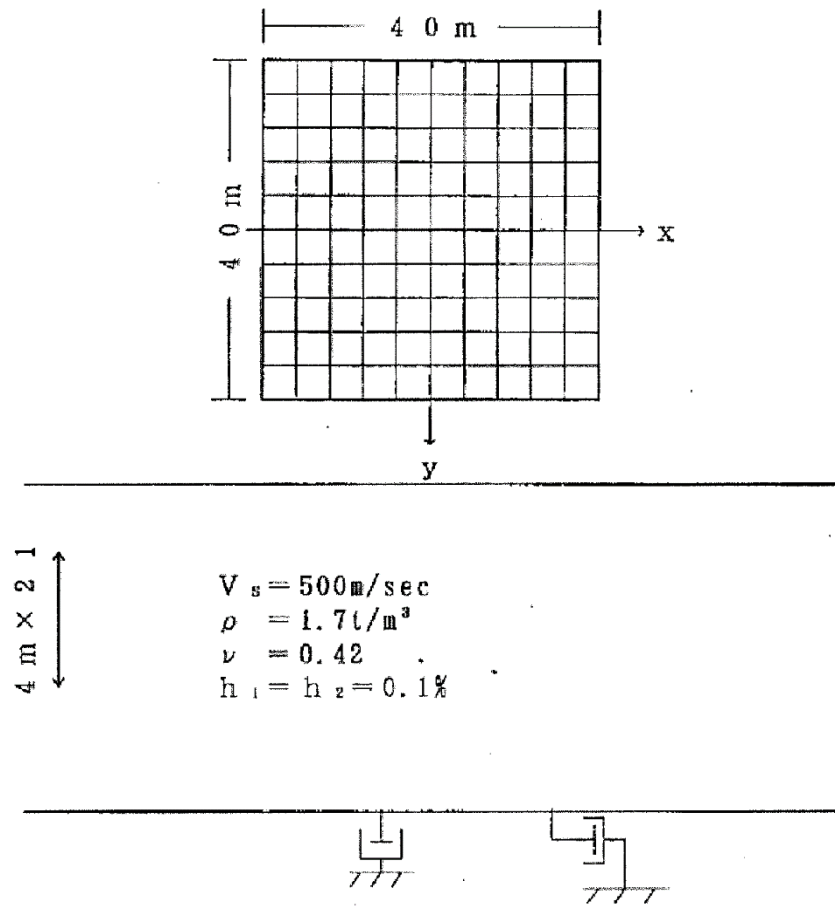


図 3-5 薄層法用の解析モデル

表 3-1 薄層法との比較 (単位系 : tf/m)

(1) 水平ばね

振動数 (Hz)	本プログラム		薄層法	
	実部	虚部	実部	虚部
0.0	5.28×10^6	0.0	—	—
1.0	5.26×10^6	9.04×10^5	5.28×10^6	9.46×10^5
2.0	5.21×10^6	1.83×10^6	5.10×10^6	1.63×10^6
3.0	5.15×10^6	2.77×10^6	4.99×10^6	2.58×10^6
4.0	5.08×10^6	3.76×10^6	4.94×10^6	3.47×10^6
5.0	5.03×10^6	4.77×10^6	4.82×10^6	4.40×10^6
6.0	5.02×10^6	5.79×10^6	4.80×10^6	5.45×10^6
7.0	5.05×10^6	6.79×10^6	4.93×10^6	6.31×10^6
8.0	5.09×10^6	7.76×10^6	4.79×10^6	7.08×10^6
9.0	5.14×10^6	8.68×10^6	4.67×10^6	8.17×10^6
10.0	5.17×10^6	9.55×10^6	4.90×10^6	9.13×10^6

(2) 回転ばね

振動数 (Hz)	本プログラム		薄層法	
	実部	虚部	実部	虚部
0.0	2.78×10^9	0.0	—	—
1.0	2.71×10^9	1.59×10^7	2.34×10^9	5.01×10^7
2.0	2.54×10^9	1.11×10^8	2.24×10^9	8.43×10^7
3.0	2.35×10^9	2.96×10^8	2.06×10^9	1.91×10^8
4.0	2.17×10^9	5.41×10^8	1.89×10^9	3.98×10^8
5.0	2.01×10^9	8.21×10^8	1.77×10^9	6.24×10^8
6.0	1.86×10^9	1.12×10^9	1.66×10^9	8.43×10^8
7.0	1.73×10^9	1.43×10^9	1.55×10^9	1.07×10^9
8.0	1.60×10^9	1.75×10^9	1.43×10^9	1.31×10^9
9.0	1.49×10^9	2.08×10^9	1.32×10^9	1.55×10^9
10.0	1.38×10^9	2.40×10^9	1.21×10^9	1.80×10^9

(3) 鉛直ばね

振動数 (Hz)	本プログラム		薄層法	
	実部	虚部	実部	虚部
0.0	7.18×10^6	0.0	—	—
1.0	7.09×10^6	1.72×10^6	7.45×10^6	2.41×10^6
2.0	6.82×10^6	3.49×10^6	7.23×10^6	2.85×10^6
3.0	6.39×10^6	5.34×10^6	6.16×10^6	4.20×10^6
4.0	5.82×10^6	7.30×10^6	5.36×10^6	6.35×10^6
5.0	5.17×10^6	9.38×10^6	5.04×10^6	8.43×10^6
6.0	4.48×10^6	1.16×10^7	4.63×10^6	1.02×10^7
7.0	3.80×10^6	1.39×10^7	3.87×10^6	1.20×10^7
8.0	3.13×10^6	1.62×10^7	2.95×10^6	1.40×10^7
9.0	2.46×10^6	1.86×10^7	2.14×10^6	1.63×10^7
10.0	1.76×10^6	2.10×10^7	1.38×10^6	1.86×10^7

(b) DGC との比較

DGC は、基礎の代表変位を鉛直及び水平ばねの場合は相加平均変位、回転ばねについては荷重重み付平均変位とした場合の理論解である。よって、この場合、本解析コードでは、境界条件としては、応力一定仮定として評価する。同じ地盤条件でも境界条件が異なるため、表 3-1 の値とは異なっている。

表 3-2 には DGC の結果と本解析コードによる結果を比較したものを示す。両者は **おおむね** 一致していることが確認できる。

表 3-2 DGC との比較 (単位系 : tf/m)

(1) 水平ばね

振動数 (Hz)	本プログラム		DGC	
	実部	虚部	実部	虚部
0.0	5.05×10^6	0.0	4.66×10^6	0.0
1.0	5.03×10^6	8.28×10^6	4.64×10^6	7.11×10^5
2.0	4.96×10^6	1.67×10^6	4.60×10^6	1.42×10^6
3.0	4.85×10^6	2.53×10^6	4.51×10^6	2.14×10^6
4.0	4.70×10^6	3.42×10^6	4.40×10^6	2.87×10^6
5.0	4.51×10^6	4.35×10^6	4.25×10^6	3.64×10^6
6.0	4.31×10^6	5.34×10^6	4.07×10^6	4.44×10^6
7.0	4.11×10^6	6.39×10^6	3.88×10^6	5.28×10^6
8.0	3.94×10^6	7.51×10^6	3.69×10^6	6.17×10^6
9.0	3.85×10^6	8.68×10^6	3.50×10^6	7.14×10^6
10.0	3.86×10^6	9.84×10^6	3.35×10^6	8.15×10^6

(2) 回転ばね

振動数 (Hz)	本プログラム		DGC	
	実部	虚部	実部	虚部
0.0	2.65×10^9	0.0	2.13×10^9	0.0
1.0	2.59×10^9	1.43×10^7	2.09×10^9	1.38×10^7
2.0	2.42×10^9	1.02×10^8	1.97×10^9	7.20×10^7
3.0	2.23×10^9	2.71×10^8	1.83×10^9	1.87×10^8
4.0	2.04×10^9	4.96×10^8	1.68×10^9	3.45×10^8
5.0	1.85×10^9	7.51×10^8	1.54×10^9	5.29×10^8
6.0	1.67×10^9	1.02×10^9	1.39×10^9	7.28×10^8
7.0	1.47×10^9	1.31×10^9	1.24×10^9	9.34×10^8
8.0	1.26×10^9	1.61×10^9	1.08×10^9	1.15×10^9
9.0	1.03×10^9	1.93×10^9	9.04×10^8	1.38×10^9
10.0	7.68×10^8	2.29×10^9	7.07×10^8	1.63×10^9

(3) 鉛直ばね

振動数 (Hz)	本プログラム		DGC	
	実部	虚部	実部	虚部
0.0	6.88×10^6	0.0	6.32×10^6	0.0
1.0	6.78×10^6	1.58×10^6	6.21×10^6	1.37×10^6
2.0	6.48×10^6	3.17×10^6	6.01×10^6	2.70×10^6
3.0	5.95×10^6	4.80×10^6	5.60×10^6	4.09×10^6
4.0	5.20×10^6	6.48×10^6	5.03×10^6	5.51×10^6
5.0	4.19×10^6	8.26×10^6	4.26×10^6	7.01×10^6
6.0	2.90×10^6	1.02×10^7	3.28×10^6	8.61×10^6
7.0	1.29×10^6	1.24×10^7	2.07×10^6	1.04×10^7
8.0	-6.08×10^5	1.50×10^7	6.35×10^5	1.24×10^7
9.0	-2.70×10^6	1.82×10^7	-9.73×10^5	1.49×10^7
10.0	-4.60×10^6	2.24×10^7	-2.64×10^6	1.79×10^7

3.5.2 妥当性確認

本解析コードの検証は、水平、鉛直及び回転に対する地盤ばねに対してなされており、本解析の適用範囲と合致している。したがって、検証結果より、本解析コードを今回の解析に使用することは妥当である。

3.5.3 評価結果

水平、鉛直及び回転に対する地盤ばねに対する本解析コードの解析結果が、薄層法及びDGCの理論解とおおむね一致していることを確認した。

上記、検証は、本解析の適用範囲に対して実施されたものであることから、本解析コードを今回の解析に使用することは妥当である。