

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-22-0081_改0
提出年月日	2021年2月25日

VI-5-74 計算機プログラム（解析コード）の概要
・FACS

2021年2月

東北電力株式会社

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
3. 解析コード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.....	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 (Verification)	7
3.5.2 妥当性確認 (Validation)	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）FACS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-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	1.0.1

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	FACS
使用目的	設計用床応答曲線作成
開発機関	辰星技研株式会社
開発時期	2019 年
使用したバージョン	1.0.1
コードの概要	<p>FACS (以下「本解析コード」という。) は、加速度時刻歴から床応答曲線を作成するプログラムであり、建物・構築物の床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成することを目的とする。</p> <p>一定の固有周期及び減衰定数を有する 1 質点系の与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算し、減衰定数が同一の系で計算された複数の床応答スペクトルの包絡値を求め、また床応答スペクトルの拡幅を行う。</p> <p>本解析コードは、設計用床応答曲線を作成するために開発したハウスコードである。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <p>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"> ・別解析コード「VIANA」により作成した設計用床応答曲線と本解析コードで作成した設計用床応答曲線を比較し、おおむね一致してい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、動作環境を満足する計算機にインストールして用い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"> ・本工事計画で使用する解析機能は、理論モデルをそのままコード化したものであり、妥当性は確認されている。 ・±10%拡幅、時刻歴波の時間刻み及び固有周期計算間隔は J E A G 4 6 0 1 -1987 に従っており、妥当性は確認されている。

3. 解析コードの解析手法について

3.1 一般事項

本書は、建物・構築物の地震応答解析から算出される加速度時刻歴から床応答スペクトルを作成する解析コードである FACS の説明書である。

本解析コードは、一定の固有周期及び減衰定数を有する 1 質点系の与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算する。また、減衰定数が同一の系で計算された複数の床応答スペクトルの包絡値を求め、拡張した床応答曲線の作成を行う。

3.2 解析コードの特徴

FACS における 1 自由度系を用いた床応答スペクトルの作成は、線形加速度法を用いることにより行う。主な特徴を以下に示す。

- ・加速度時刻歴から周期及び減衰定数に応じた床応答スペクトルを作成する。
- ・複数の床応答スペクトルを包絡させた床応答スペクトルに対して拡張した設計用床応答曲線を作成する。

3.3 解析手法

加速度時刻歴を入力とする 1 自由度系における応答について、減衰定数をパラメータとして以下のとおり算出する。

各質点における相対変位を x 、固有円振動数を ω 、減衰定数を h 、地動の加速度時刻歴を \ddot{y}_t としたとき、1 質点系の運動方程式は時刻 t において以下のように表される。

$$\ddot{x}_t + 2h \cdot \omega \cdot \dot{x}_t + \omega^2 \cdot x_t = -\ddot{y}_t \quad (3.1)$$

時刻刻み Δt 後の各質点における相対変位 x を x_{n+1} とすると、時刻 t_{n+1} において成立する運動方程式は以下となる。

$$\ddot{x}_{n+1} + 2h \cdot \omega \cdot \dot{x}_{n+1} + \omega^2 \cdot x_{n+1} = -\ddot{y}_{n+1} \quad (3.2)$$

ここで、時間 Δt の間で加速度が線形に変化するものとする、以下のように表される。

$$\ddot{x}_n = \frac{\ddot{x}_{n+1} - \ddot{x}_n}{\Delta t} \quad (3.3)$$

時刻 t_{n+1} における加速度 \ddot{x}_{n+1} 、速度 \dot{x}_{n+1} 及び変位 x_{n+1} は次のようになる。

$$\ddot{x}_{n+1} = \ddot{x}_n + \frac{\ddot{x}_{n+1} - \ddot{x}_n}{\Delta t} \Delta t \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{n+1} &= \dot{x}_n + \Delta t \cdot \ddot{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \cdot \dddot{x}_n \\
 &= \dot{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t \cdot \ddot{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t \cdot \ddot{x}_{n+1}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
 x_{n+1} &= x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \cdot \ddot{x}_n + \frac{1}{6} \Delta t^3 \cdot \dddot{x}_n \\
 &= x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n + \frac{1}{3} \Delta t^2 \cdot \ddot{x}_n + \frac{1}{6} \Delta t^2 \cdot \ddot{x}_{n+1}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

時刻 t_{n+1} において成立する運動方程式(3.2)に(3.5), (3.6)を代入すると, (3.7)が得られる。

$$\begin{aligned}
 &\left(1 + \frac{2h \cdot \omega \cdot \Delta t}{2} + \frac{\omega^2 \cdot \Delta t^2}{6}\right) \ddot{x}_{n+1} \\
 &= -\left\{ \ddot{y}_{n+1} + 2h \cdot \omega \left(\dot{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t \cdot \ddot{x}_n\right) + \omega^2 \left(x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n + \frac{1}{3} \Delta t^2 \cdot \ddot{x}_n\right) \right\}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

(3.7)において式を簡略化するため,

$$R = 1 + \frac{2h \cdot \omega \cdot \Delta t}{2} + \frac{\omega^2 \cdot \Delta t^2}{6} \tag{3.8}$$

$$E_n = \dot{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t \cdot \ddot{x}_n \tag{3.9}$$

$$F_n = x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n + \frac{1}{3} \Delta t^2 \cdot \ddot{x}_n \tag{3.10}$$

とおくと, (3.7)から(3.11)が得られる。

$$\ddot{x}_{n+1} = -\frac{1}{R} (\ddot{y}_{n+1} + 2h \cdot \omega \cdot E_n + \omega^2 \cdot F_n) \tag{3.11}$$

(3.8)を(3.5), (3.6)に代入すると, 時刻 t_n での加速度 \ddot{x}_n , 速度 \dot{x}_n 及び変位 x_n から1つ先の時刻 t_{n+1} での加速度 \ddot{x}_{n+1} , 速度 \dot{x}_{n+1} 及び変位 x_{n+1} を求めることができる。

ここで, 1つの減衰定数 h , 1つの計算固有周期点に対して, (3.5), (3.6), (3.11)により入力地震動 \ddot{y}_n の全継続時間にわたって応答加速度 \ddot{x}_n を算出し, $\ddot{x}_n + \ddot{y}_n$ の絶対値の最大値を求め, これを1つの減衰定数 h , 1つの計算固有周期点での加速度応答スペクトル算出値とする。

計算固有周期の範囲で同様に最大値を求め, これら最大値で床応答スペクトルを作成する。

なお, 初期値($t=0$)での応答加速度 \ddot{x}_0 , 応答速度 \dot{x}_0 及び応答変位 x_0 は以下のように表される。

$$x_{t=0} = 0$$

$$\dot{x}_{t=0} = -\ddot{y}_{t=0} \cdot \Delta t$$

$$(\ddot{x} + \ddot{y})_{t=0} = 2h \cdot \omega \cdot \ddot{y}_{t=0} \cdot \Delta t$$

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。

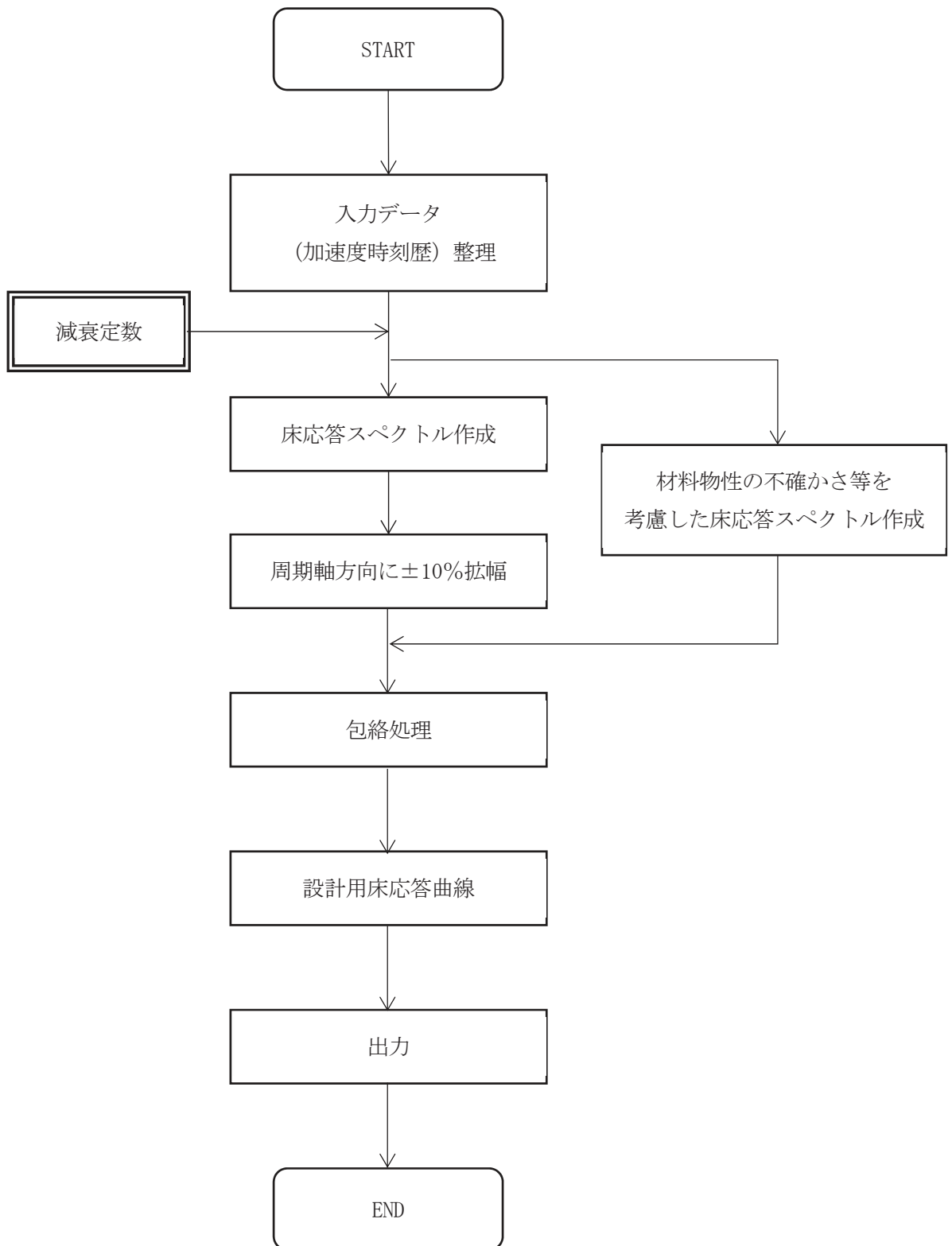


図 3-1 解析フローチャート

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

3.5.1 検証 (Verification)

(1) 検証の概要

別解析コード「VIANA」にて作成した設計用床応答曲線（検証用データ）と本解析コードで作成した設計用床応答曲線の応答加速度（震度）を比較することで、本プログラムの検証を行った。

表 3-1 検証における比較項目

検証対象	比較項目
設計用床応答曲線	応答加速度（震度）

(2) 検証条件

女川原子力発電所第 2 号機原子炉建屋の地震応答解析から得られた基準地震動 S_s に対する加速度時刻歴として、NS 方向モデルの O.P. 33.2m の質点 (1, 8, 13, 20, 25) 及び O.P. 15.0m の質点 (3, 10, 15, 22, 27) の S_s-D1 に対する応答を用いた。また、設計用床応答曲線を作成するための減衰定数は、機器・配管系の耐震計算に適用されるもののうち、0.5%、1.0% 及び 5.0% とした。図 3-2 に原子炉建屋の地震応答解析モデル (NS 方向) を示す。

$E_c = 1.99 \times 10^4$	N/mm ²
7.94×10^3	N/mm ² (燃料取替床上部)
2.52×10^4	N/mm ² (追設耐震壁)
$G_c = 8.53 \times 10^3$	N/mm ²
3.41×10^3	N/mm ² (燃料取替床上部)
1.05×10^4	N/mm ² (追設耐震壁)
$E_s = 2.05 \times 10^5$	N/mm ² (追設ブレース)
$G_s = 7.90 \times 10^4$	N/mm ² (追設ブレース)

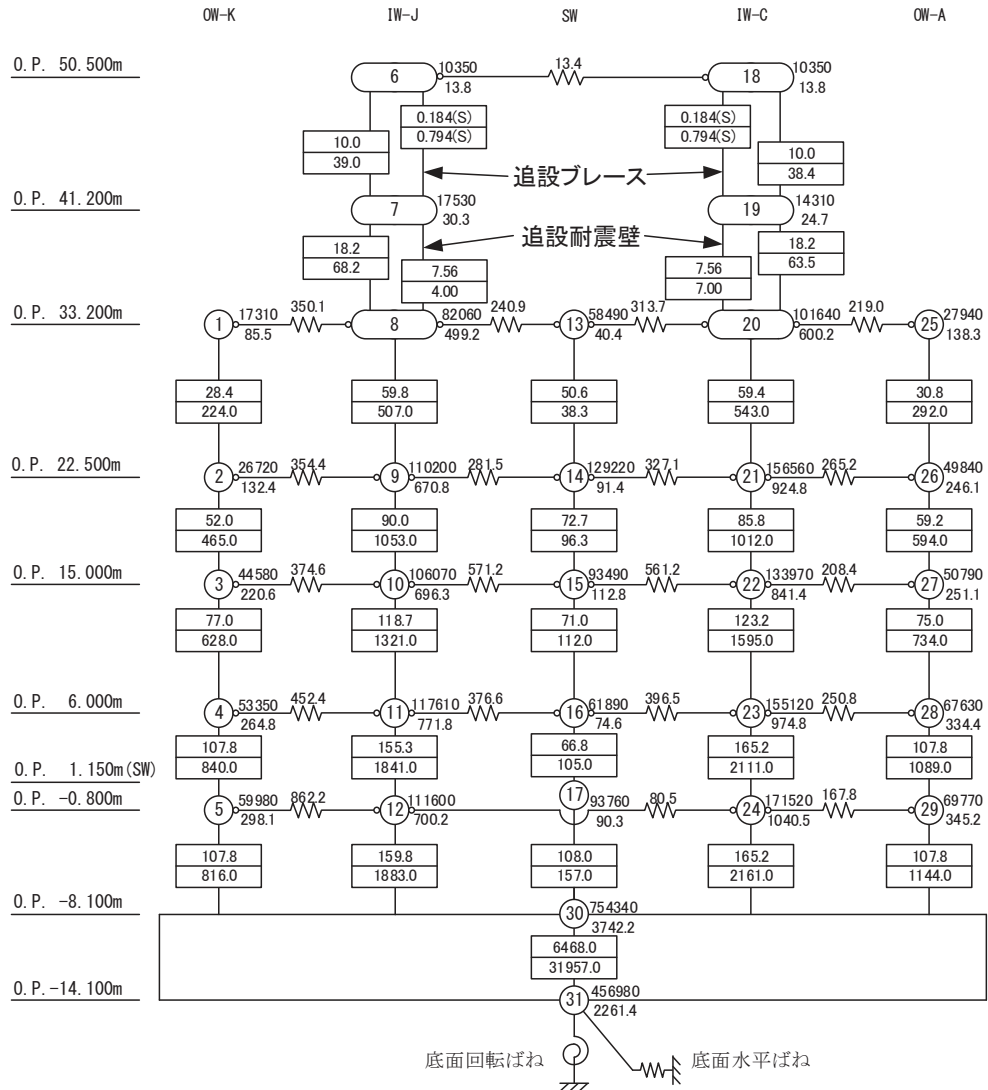
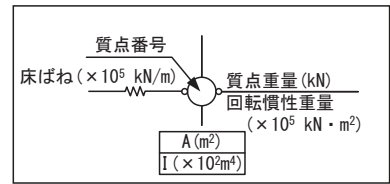


図 3-2 原子炉建屋地震応答解析モデル (NS 方向)

(3) 解析結果の比較

各検証条件で作成した設計用床応答曲線について、検証用データと本解析コードで作成したデータの比較結果を図 3-3～図 3-8 に示す。

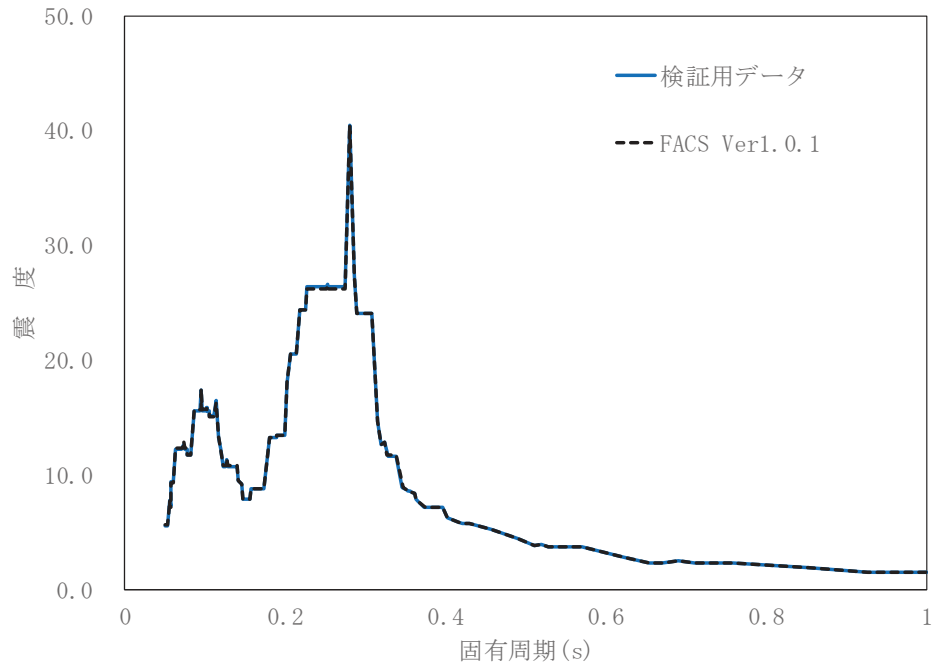


図 3-3 検証用データと本解析コードの比較結果 (0.P. 33.2m 減衰 0.5%)

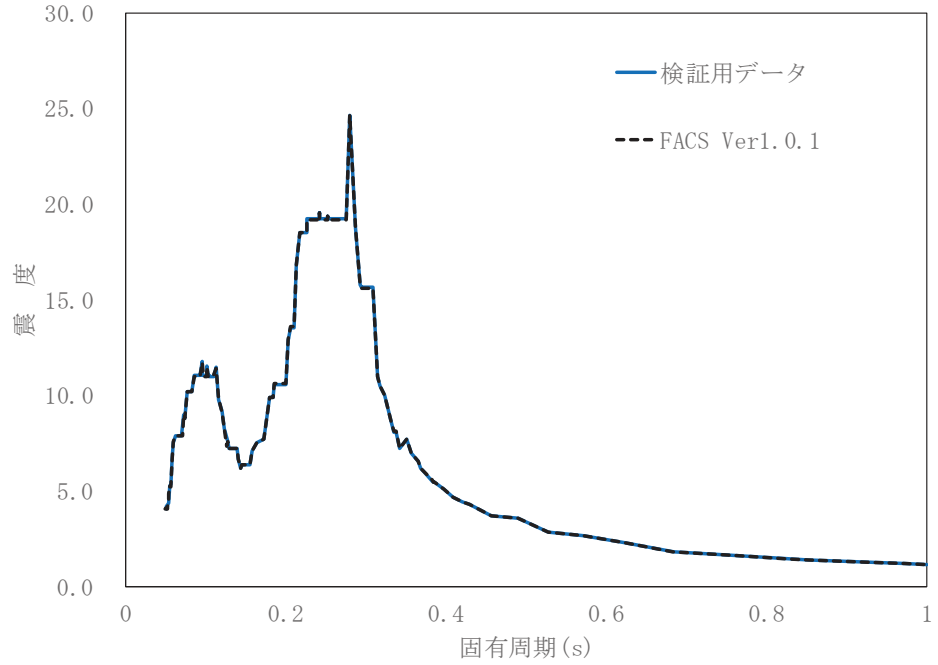


図 3-4 検証用データと本解析コードの比較結果 (0.P. 33.2m 減衰 1.0%)

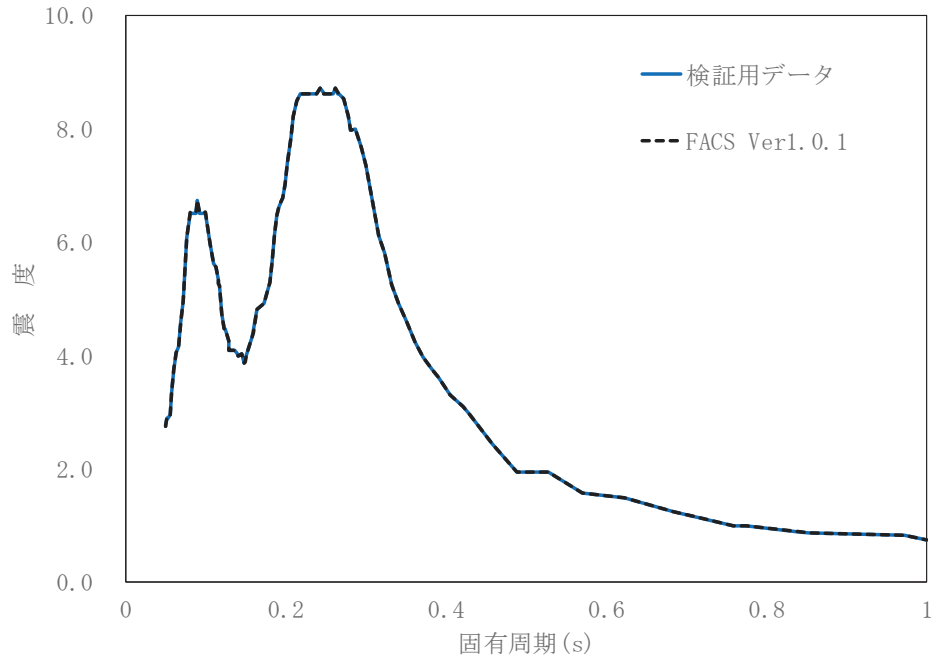


図 3-5 検証用データと本解析コードの比較結果 (0.P. 33.2m 減衰 5.0%)

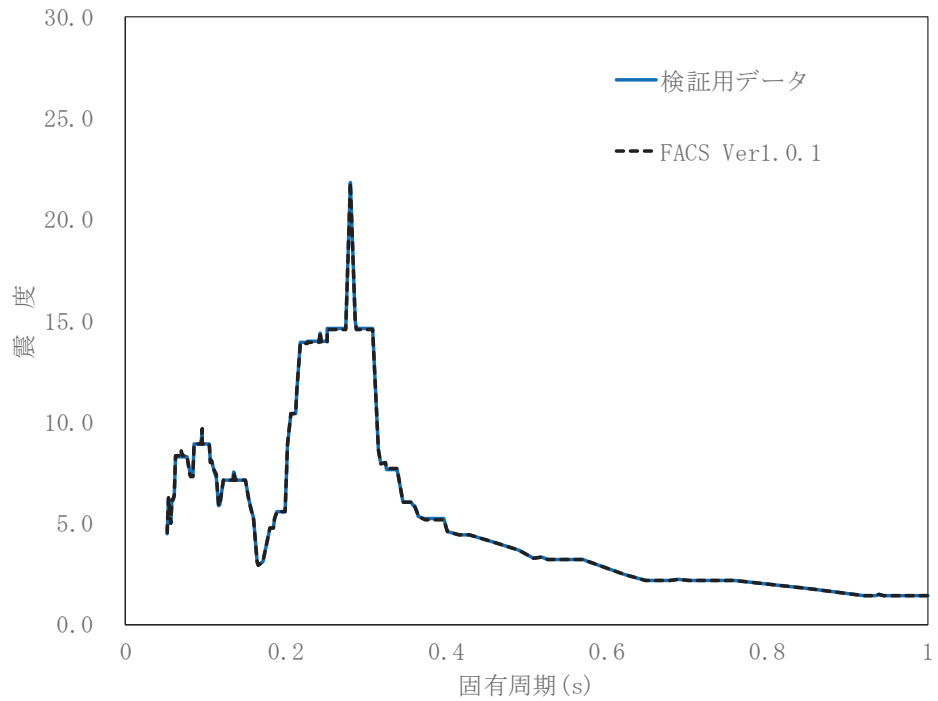


図 3-6 検証用データと本解析コードの比較結果 (0.P. 15.0m 減衰 0.5%)

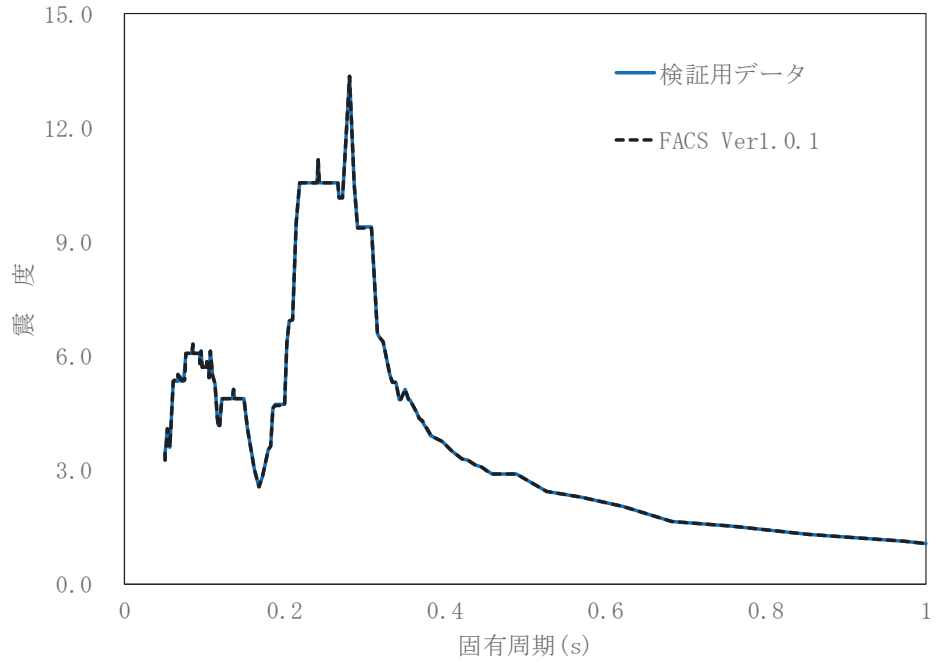


図 3-7 検証用データと本解析コードの比較結果 (O.P. 15.0m 減衰 1.0%)

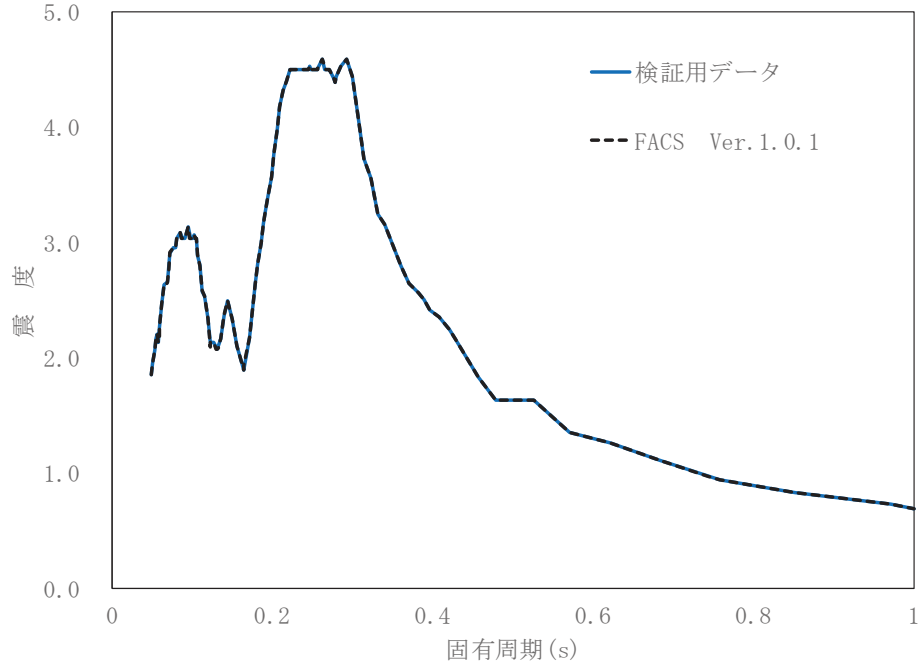


図 3-8 検証用データと本解析コードの比較結果 (O.P. 15.0m 減衰 5.0%)

(4) 検証結果

前項に示す設計用床応答曲線（応答加速度（震度））の比較結果のとおり，両者は一致しており，本解析コードを用いて得られた計算結果の妥当性を確認した。

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。

- ・ 今回の工事計画で使用する機能は床応答スペクトルの作成機能，拡幅機能及び包絡機能であるため，同一の入力条件に対する 1 自由度系の最大応答加速度を固有周期ごとに算定し，別解析コード「VIANA」と本解析コードの結果を比較することで妥当性を確認している。
- ・ 設計用床応答曲線を作成する際，入力とする時刻歴データの時間刻み幅，データの形式は，上述の妥当性を確認している範囲内での使用である。
- ・ ±10%拡幅，時刻歴波の時間刻み及び固有周期計算間隔は J E A G-4 6 0 1-1987 に従っており，妥当性は確認されている。

3.5.3 評価結果

3.5.1 及び 3.5.2 より，本解析コードを，使用目的に示す設計用床応答曲線の作成に用いることは妥当である。