

東海第二発電所	工事計画審査資料
資料番号	工認-752 改1
提出年月日	平成30年8月29日

V-5-17 計算機プログラム（解析コード）の概要・KSHAKE

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.	KSHAKE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

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）KSHAKE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-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver.2
V-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	Ver.2
V-2-2-18	格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書	Ver.2
V-2-11-2-11	タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver.2
V-2-11-2-12	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver.2

2. 解析コードの概要

項目	コード名 KSHAKE
使用目的	入力地震動の策定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver. 2
コードの概要	KSHAKEは、米国カリフォルニア大学から発表されたSHAKEを基本に開発したプログラムで、一次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数及び時刻歴応答波形を計算するプログラムである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>KSHAKE は、原子炉建屋, 緊急時対策所建屋, 格納容器圧力逃がし装置格納槽, タービン建屋及びサービス建屋の地震応答解析における入力地震動の策定において、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する地盤の応答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通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ KSHAKEを用いて評価した弾性地盤の増幅特性が理論解と一致することを確認している。 ・ 既工事計画において実績のある別コード (microSHAKE) による解析結果と一致す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通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検証の内容のとおり、地盤の応答解析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。 ・ 原子炉建屋, 緊急時対策所建屋, 格納容器圧力逃がし装置格納槽, タービン建屋及びサービス建屋の地震応答解析における入力地震動の策定にKSHAKE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. KSHAKEの解析手法について

3.1 一般事項

KSHAKEは、米国カリフォルニア大学バークレイ校でSchnabelとLysmerらにより開発されたSHAKEを基本に開発したプログラムである。KSHAKEは、水平方向に半無限に広がりのある、均質、粘弾性のいくつかの層からなる土層でのせん断波の縦方向伝播に対する応答計算を行う。

3.2 解析コードの特徴

KSHAKEの主な特徴を以下に示す。

- ・ 次元重複反射理論に基づき、多層地盤の地震応答解析を行う。
- ・ 地盤の非線形性は、ひずみ依存特性として等価線形法により考慮する。
- ・ 鉛直動については、S波速度 V_s をP波速度 V_p として定義することで対応できる。

3.3 解析手法

図3.3-1に示す線形粘弾性体を通るせん断波の伝播は、水平変位 $u=u(x, t)$ による以下の式で表される。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \cdot \partial t} \quad (3.3-1)$$

ここで、

- ρ : 単位体積質量
- G : せん断弾性係数
- η : 粘性係数

振動数 ω に対し、調和振動は次のように表せる。

$$u(x, t) = U(x) \cdot e^{i\omega t} \quad (3.3-2)$$

(3.3-2)式は、振動数 ω の調和振動に対する波動方程式の解として与えられる。

$$u(x, t) = E \cdot e^{i(kx + \omega t)} + F \cdot e^{-i(kx + \omega t)} \quad (3.3-3)$$

ここで、右辺第1項は上昇波、第2項は下降波を示している。また、 k は複素波数と呼ばれ、下式を満足するものである。

$$k^2 = \frac{\rho \omega^2}{G + i \omega \eta} = \frac{\rho \omega^2}{G^*} \quad (3.3-4)$$

ここで、任意の m 層と $(m+1)$ 層の変位とせん断応力の連続性を考え、さらに自由面では $\tau = 0$ の境界条件を導入して、次のような関係が得られる。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \quad (3.3-5)$$

$$F_m = f_m(\omega) F_1 \quad (3.3-6)$$

伝達関数 e_m 及び f_m は、 $E_1=F_1=1$ に対する倍率であり、 $E_1=F_1=1$ を上式に代入することで求まる。

他の伝達関数は、 e_m 及び f_m から得られる。 n 層及び m 層表面での変位を関係付ける伝達関数 $A_{n,m}$ を次のように定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (3.3-7)$$

これらの式より、伝達関数 $A(\omega)$ は、系のいかなる2つの層の間においても定めることができる。

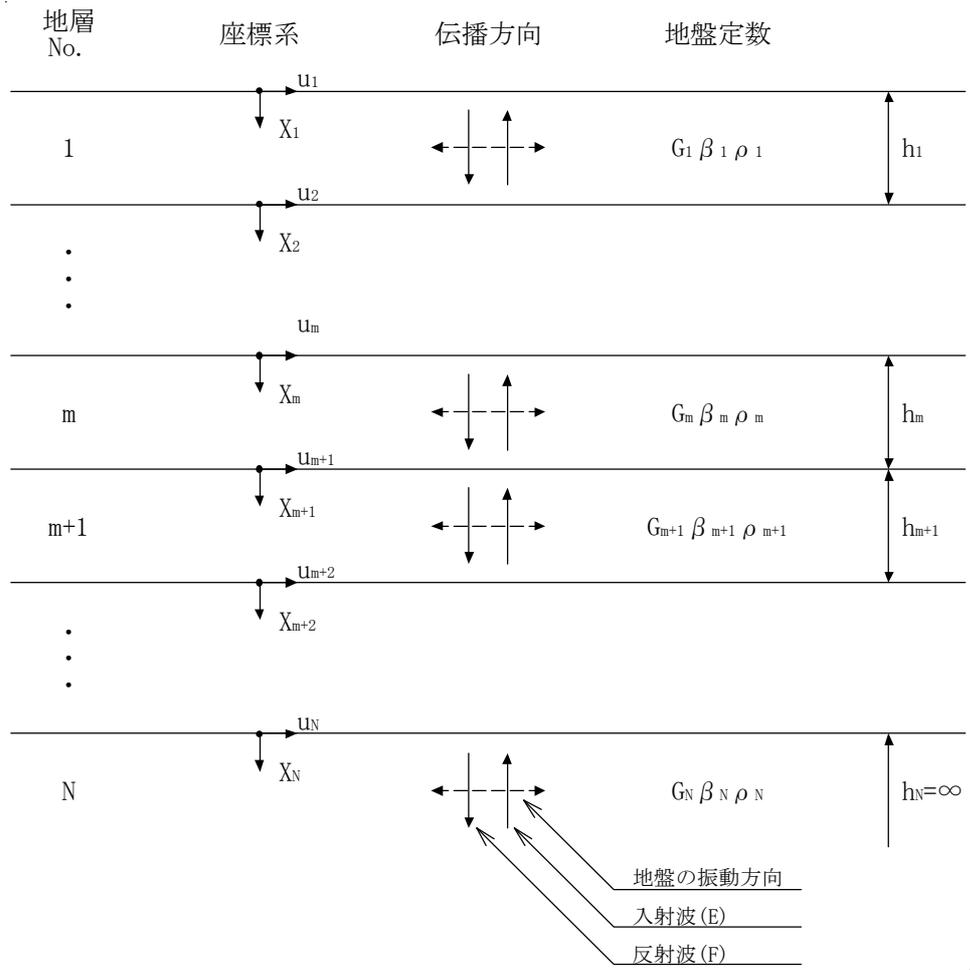


図3. 3-1 1次元地盤モデル

3.4 解析フローチャート

解析フローチャートを図3.4-1に示す。

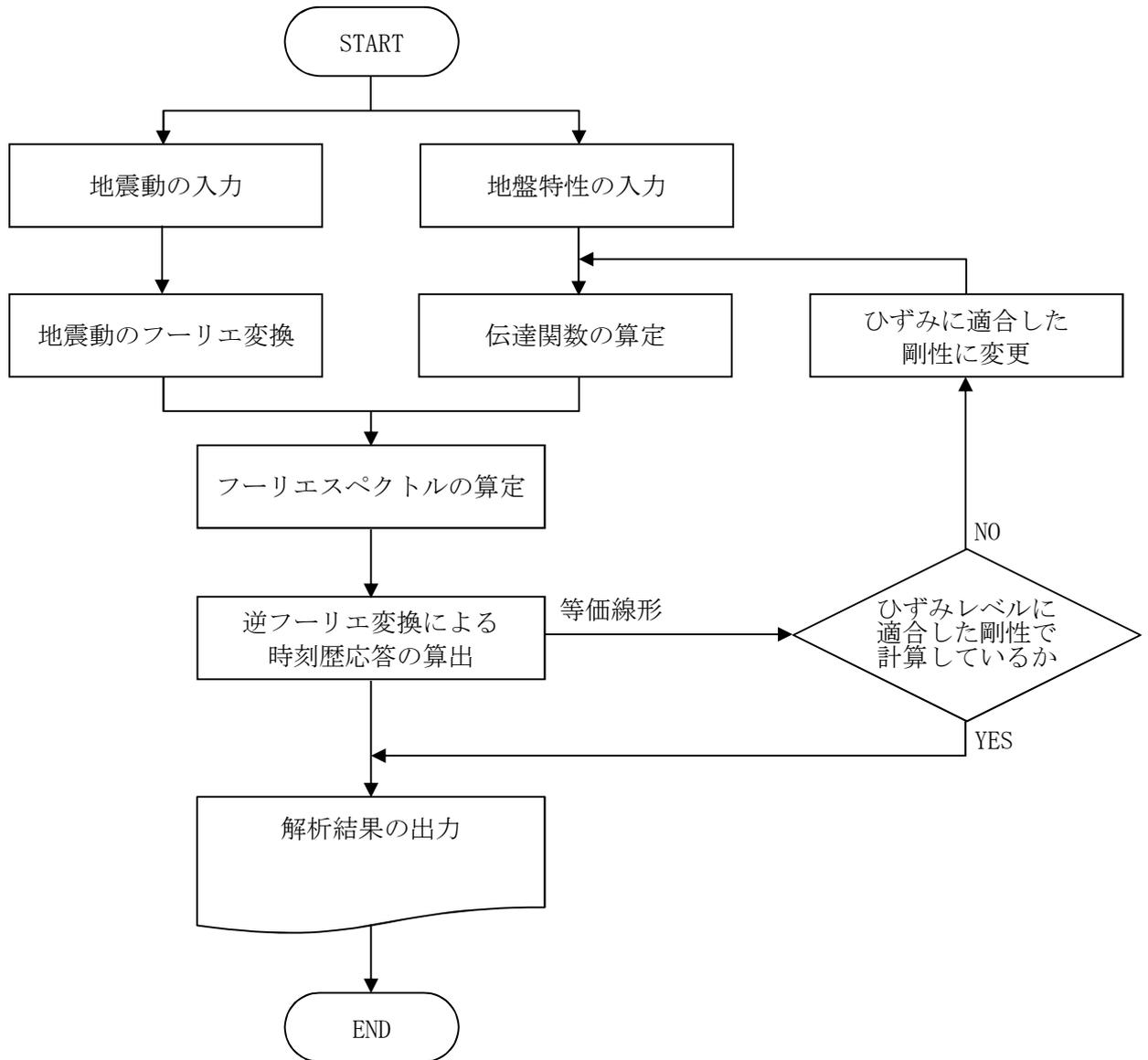


図3.4-1 解析フローチャート

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

a. 理論解との比較による検証

2層地盤モデルについて、一次元重複反射理論に基づく伝達関数の理論解との比較を行う。比較は第2層上面のはぎとり波 ($2E_2$) に対する地表面波 (E_1+F_1) の伝達関数とし、理論解は以下の式で表される。

$$\frac{e_1(\omega)+f_1(\omega)}{2e_2(\omega)} = \frac{1}{\cosh(ikh)+\alpha \sinh(ikh)} \quad (3.5-1)$$

ただし、

$$k = \sqrt{\frac{\rho_1}{G_1^*}} \omega$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\rho_1 G_1^*}{\rho_2 G_2^*}}$$

$$G_1^* = \rho_1 V_{S1}^2 (1 - 2\beta_1^2 + 2i\beta_1 \sqrt{1 - \beta_1^2})$$

$$G_2^* = \rho_2 V_{S2}^2 (1 - 2\beta_2^2 + 2i\beta_2 \sqrt{1 - \beta_2^2})$$

ここで、

- ρ_1, ρ_2 : 第1層, 第2層の単位体積質量
- V_{S1}, V_{S2} : 第1層, 第2層のせん断波速度
- h : 第1層の層厚
- β_1, β_2 : 第1層, 第2層の減衰定数

検討地盤モデルを図3.5-1に、伝達関数の比較結果を図3.5-2に示す。

図より、KSHAKEの結果は理論解と一致しており、KSHAKEが伝達関数を正しく評価していることが確認できる。

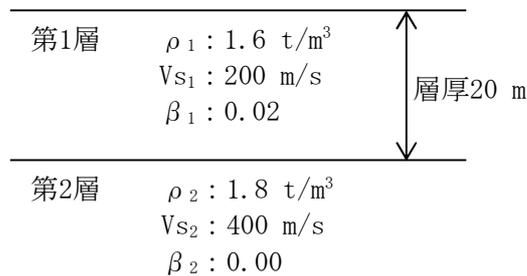


図3.5-1 検討地盤モデル

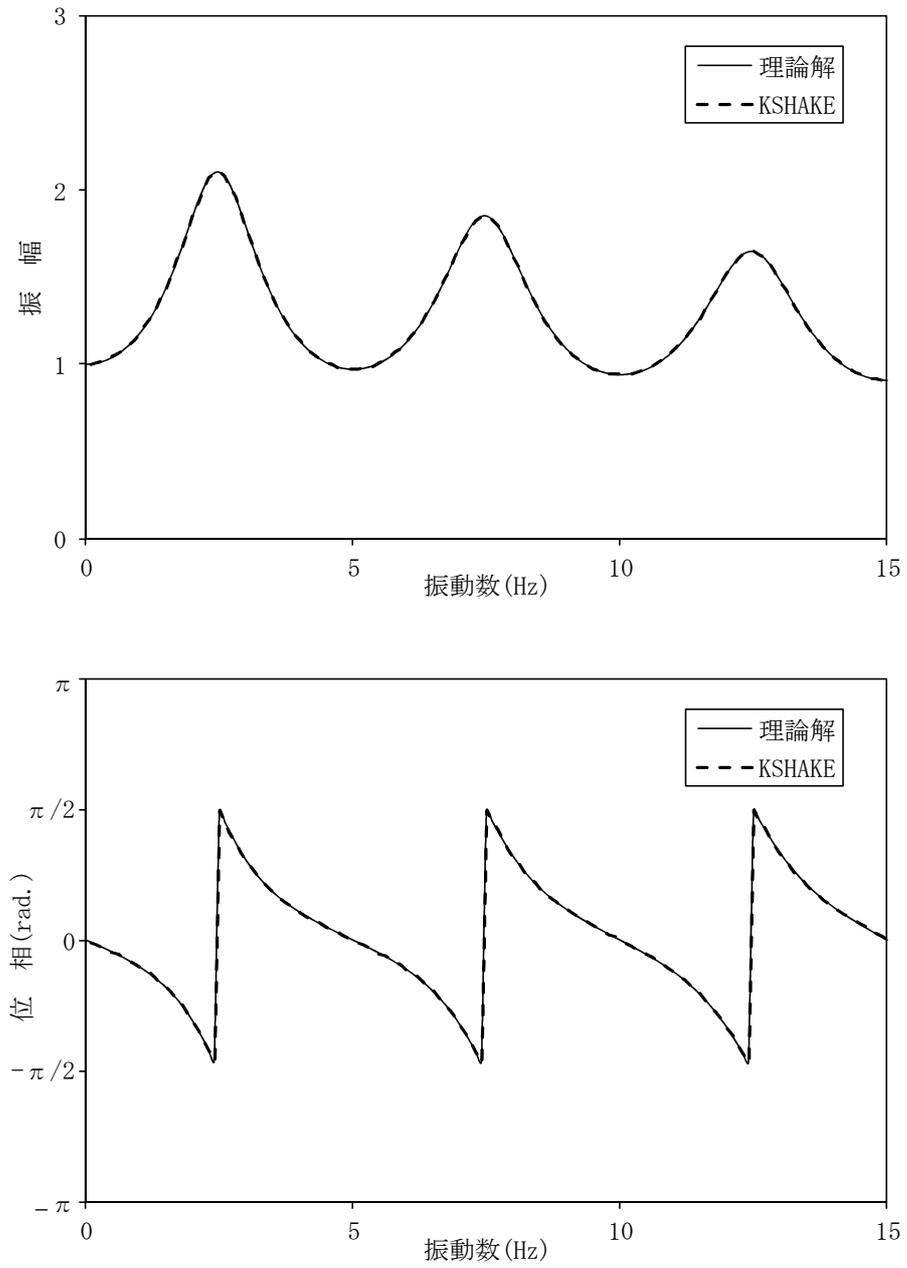


図3.5-2 理論解との伝達関数の比較

b. 他コードとの比較による検証

最下層を半無限体とした3層地盤モデルについて、市販されている1次元地盤の等価線形解析コード「microSHAKE/3D ver. 2.3.0.327」（株式会社地震工学研究所）との比較を行う。なお、「microSHAKE ver. 3.1.0」は、川内原子力発電所第1号機の工事計画で実績があり、比較には異なるバージョンを使用するが、バージョンの差異により今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。

検討地盤モデルを表3.5-1に、ひずみ依存特性を図3.5-3に、検討に用いる入力地震動(2E波)を図3.5-4に、解析結果の比較を図3.5-5に示す。

図より、KSHAKEの結果はmicroSHAKEによる結果と一致していることが確認できる。

表3.5-1 検討地盤モデル

標高 (m)	区 分	層厚 (m)	単位体積 質 量 (t/m ³)	せん断波 速 度 (m/s)	減衰定数
0.0	第1層	2.0	1.6	200	0.02
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
-20.0	第2層	5.0	1.8	400	0.02
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
-70.0	基 盤	—	2.0	700	0.00

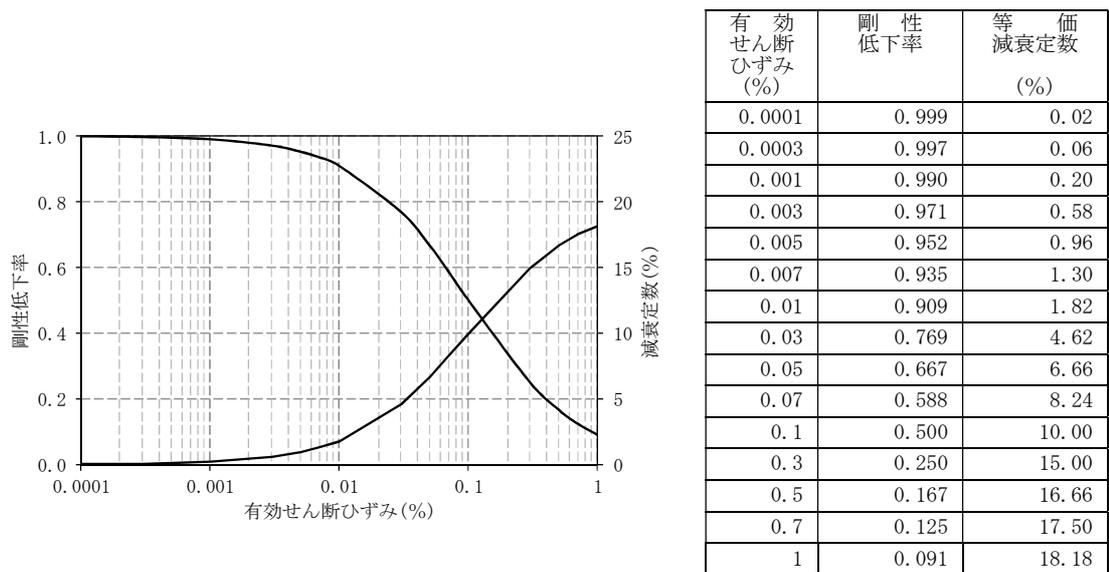


図3.5-3 (1/2) ひずみ依存特性 (第1層)

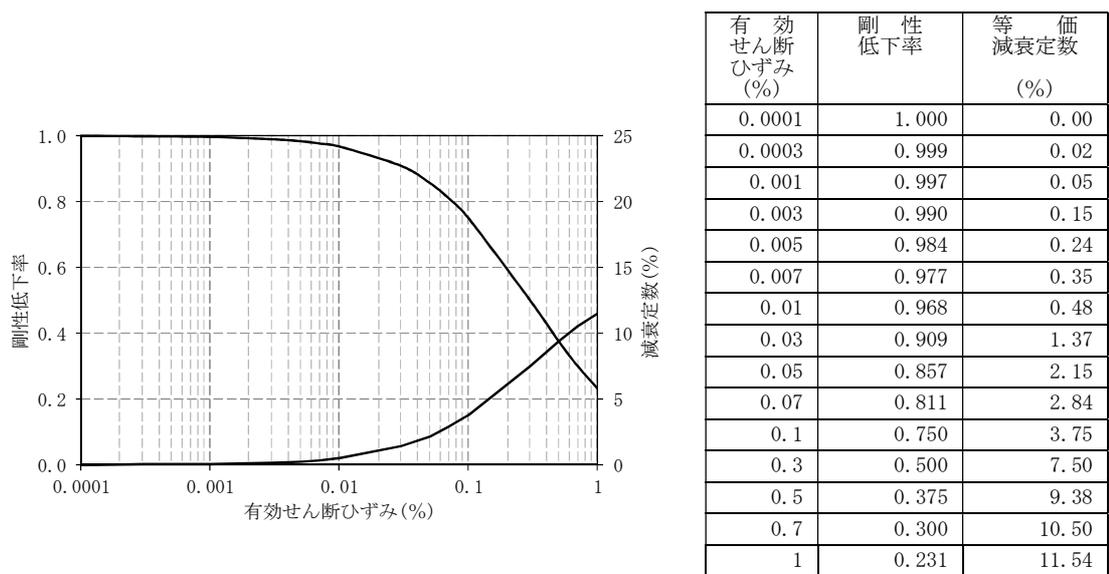


図3.5-3 (2/2) ひずみ依存特性 (第2層)

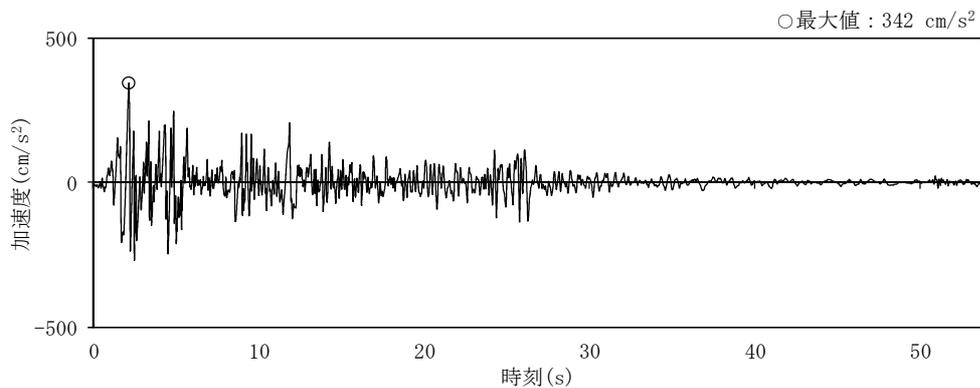
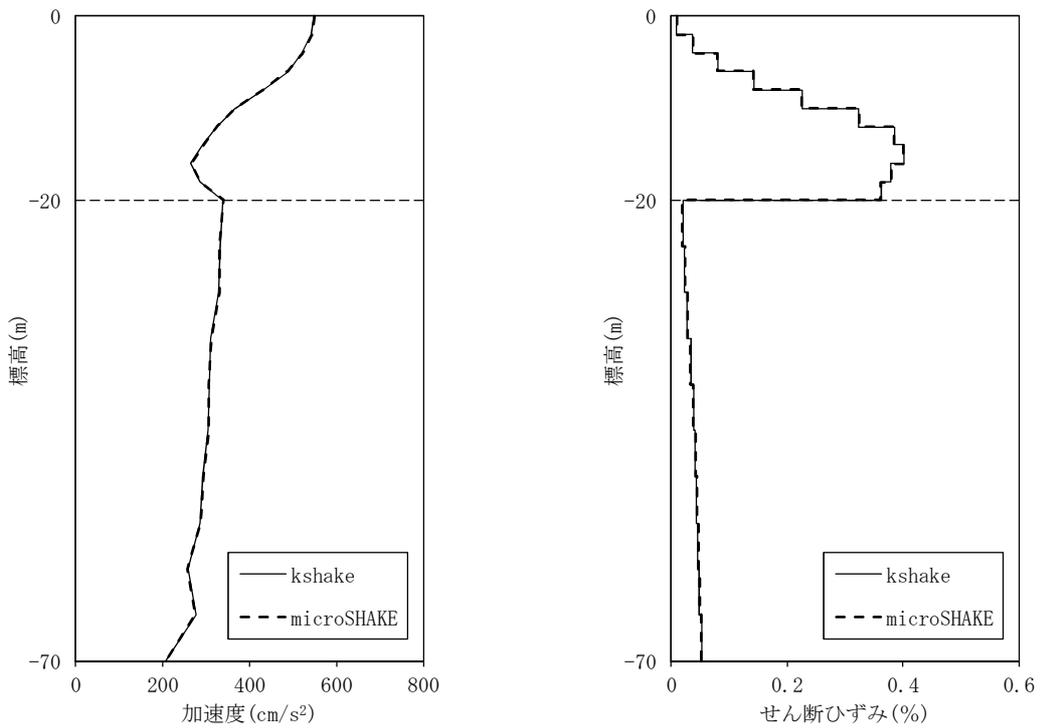


図3.5-4 入力地震動(2E波)



(a) 加速度 (b) 有効せん断ひずみ

図3.5-5 (1/2) 解析結果の比較 (最大応答分布)

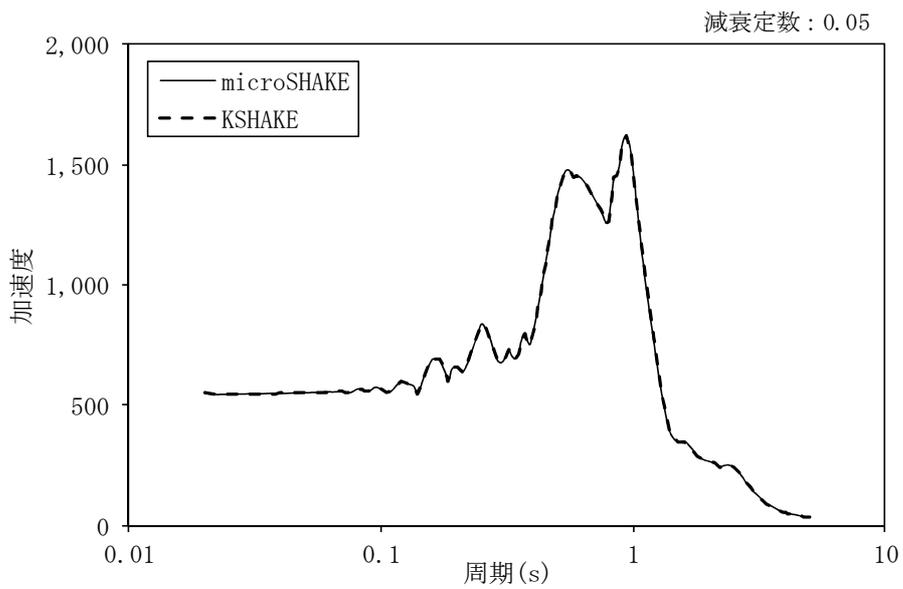


図3.5-5 (2/2) 解析結果の比較 (地表面加速度応答スペクトル)

c. 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の地震応答解析における入力地震動の策定にKSHAKEを使用することは、次のとおり、本解析の適用範囲に対して検証されており、妥当である。

- ・ 検証の内容のとおり、地盤の応答解析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使用することは妥当である。
- ・ 評価地盤を水平成層と仮定していることから、一次元重複反射理論の適用範囲である。