

# せん断土槽を用いた模型地盤の振動実験 (その1)

——中型せん断土槽と模型乾燥砂地盤の基本的振動特性  
および動的な地盤定数について——

松 田 隆 後 藤 洋 三

## Shaking Table Tests of Model Ground in Shearing Stack Container (Part 1)

——Experimental Results on Basic Vibration Characteristics of the Container and Model Ground Made of Dry Sand in Addition to Quantitative Analysis on Dynamic Properties of Soils——

Takashi Matsuda Yozo Goto

### Abstract

A shearing stack container capable of moving in a body with model ground is produced for the purpose of closely representing real seismic waves in shaking table tests for soil structures and foundations. This paper describes experimental results concerning basic vibration characteristics of model ground made of dry sand, and furthermore, relationships between shear modulus  $G$ , damping  $h$ , and shear strain  $\gamma$  that are estimated from data of sinusoidal vibration tests by means of the BACK ANALYSIS method.

As a result, the model ground represents a shearing vibration mode without constraint of the container, and resonant frequency and amplification decrease with amplitude of input acceleration. And the results of earthquake response analysis which are performed using  $G$ - $\gamma$  and  $h$ - $\gamma$  relations estimated by means of the BACK ANALYSIS method mostly coincide with experimental results of seismic wave input tests.

### 概 要

土構造物や構造物基礎に関する振動台実験で、実際の地震時挙動をできるだけ正確に再現させることを目的に模型地盤と一体になって変形するせん断土槽を作製した。この報告は、せん断土槽内に形成された模型砂地盤の基本的な振動特性を把握するために行なった実験の概要を述べるとともに、正弦波加振実験のデータから逆解析手法を用いて求めたせん断剛性 $G$ 、減衰定数 $h$ とせん断ひずみ $\gamma$ の関係をまとめたものである。

実験の結果、模型地盤は土槽に拘束されずにせん断振動モードを示すこと、入力加速度の増加に伴い共振振動数と最大応答倍率は低下すること、などが分かった。また、逆解析手法により算定した $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を用いた地震応答解析結果は、地震波入力時の実験値と良好な一致を見た。

#### 1. はじめに

地盤、土構造物や基礎構造物の耐震性を振動台実験により検証する場合、振動台上の模型地盤に関して考慮すべき事項として下記のことあげられる。

(1) 無限に広がる実地盤を限られたスペースの模型地盤で表現できること。

(2) 模型地盤の土質定数、特に動的性質を正確に把握できること。

(1)に関しては、模型地盤に及ぼす土槽側壁の影響が重要な問題点となり、その影響を軽減する土槽の設計が必要である。

(2)は模型地盤と実地盤との対応、すなわち相似則の考慮と振動実験自体の定量的な分析上で重要となる。しかし、実地盤材料を用いた模型地盤は極めて低い拘束圧下にあり、この応力状態での室内要素試験は技術的に困難であるため、試験可能な範囲での関係を外挿する方法が多くとられている。この場合、実際の模型地盤の土質定

数を正確に与えている保障はない。

そこで本研究では、(1)模型地盤と一体になってせん断変形する側壁を有する土槽(以下せん断土槽と称す)で模型地盤を保持し、(2)模型地盤全体の共振実験を物性試験とみなし、その時の加速度応答値からここで提案する逆解析手法を用いせん断剛性 $G$ 、減衰定数 $h$ とせん断ひずみ $\gamma$ との関係を直接求めることとした。

この報告は、まず中型せん断土槽および土槽内の乾燥砂地盤の基本的な振動特性の把握を目的に行なった振動台実験の概要を述べる。次に、逆解析手法を用い $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 関係を算定し、Hardin-Drnevichモデル(以下H-Dモデルと称す)を規定する各パラメーターをその算定値から推定する。そして、推定された $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線を等価線形化法で考慮した地震応答解析値を地震波入力時の実験値と比較した結果を述べる。

## 2. 中型せん断土槽

図-1に中型せん断土槽(内寸法 $L=250\text{cm}$ 、 $B=150\text{cm}$ 、 $H=202\text{cm}$ )の全体図を示す。この土槽の最大の特徴である側壁のせん断変形機構は軽量角パイプ製の矩形枠がボールベアリングを介し加振方向にスライドする構造による。

土の入らない状態の中型せん断土槽(頂部B1,中間部B7)の共振曲線を図-2に、共振時の振動モードを図-3に示す。図-3の点線は断面が一定の均質な片持ばりのせん断振動理論モードであり、実験で得られた振動モードはほぼこの理論モードに一致する。一次共振振動数 $f_1=2.2\text{Hz}$ と側壁の質量から算定した側壁自体のせん断剛性は $7\text{t/m}^2$ で、土のせん断剛性に比し非常に小さい。これらのことから、中型せん断土槽は理想的なせん断変形をし、内部土の変形を拘束しないものと思われる。

## 3. 実験概要

### 3.1. 模型地盤

試料砂は気乾状態の木更津産の山砂である。模型地盤

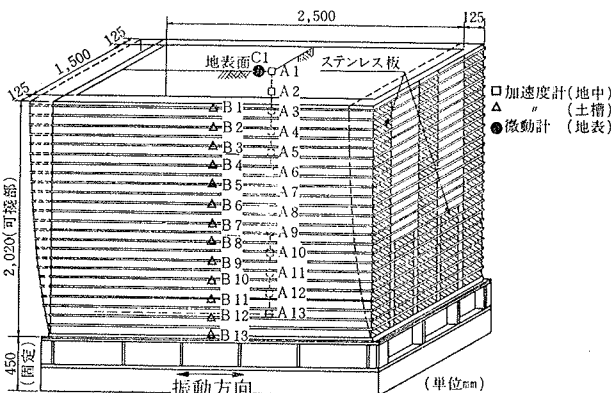


図-1 中型せん断土槽と計器配置

は、約30cm層ごとに試料砂を空中落下させ、沈下が無くなるまで振動台で充分な締め固めを行ない作製した(表-1)。模型地盤地表部の常時微動の加速度フーリエスペクトルを図-4に示す。卓越振動数 $f_0=13.1\text{Hz}$ から算定される平均的なせん断剛性は $1800\text{t/m}^2$ である。

### 3.2. 実験方法

正弦波を入力した共振実験は、入力加速度を一定とするB実験と、地表部の応答加速度を一定とするT実験の二通りである。B実験からは各入力加速度レベルにおける地盤の伝達関数が得られる。T実験は地盤のひずみ振幅一定状態における応答特性を把握するため、変位を制御すべきであるが、ここでは高振動数域での振動台制御特性を考慮して上述の方法とした。設定加速度レベルは表-2に示す通りである。

地震波入力実験に用いた波形は時間軸を1/5に圧縮したEl Centro波である。入力レベルは最大入力加速度を

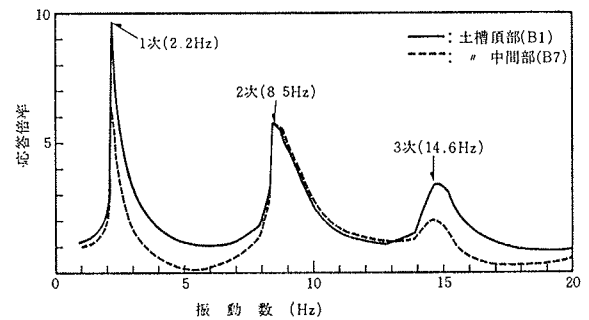


図-2 空の土槽の共振曲線

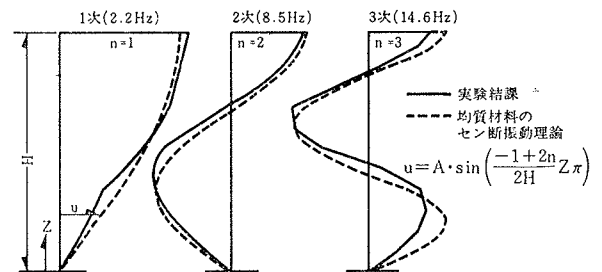


図-3 空の土槽の振動モード

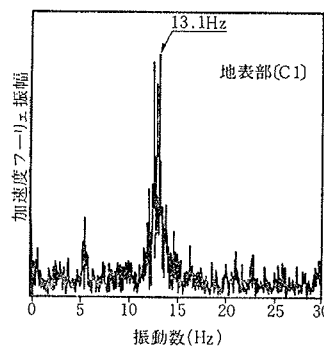


図-4 常時微動の加速度フーリエスペクトル

平均粒径 $D_{50}$	0.35mm
10%粒径 $D_{10}$	0.16mm
60%粒径 $D_{60}$	0.44mm
均等係数 $U_c$	2.75
最小間隙比 $e_{min}$	0.615
最大間隙比 $e_{max}$	1.011
単位体積重量 $\gamma$	$1.6\text{ t/m}^3$
相対密度 $D_r$	91%
せん断剛性 $G_0$	$1800\text{ t/m}^2$

\* 砂層全体の平均的な値

表-1 試料砂と模型地盤の物理定数

85~516 gal の範囲で変化させた。

測定は小型の加速度計を用い、地盤中央部 (A1~13) と土槽側壁 (B1~13) の深さ方向を12に等分する位置に配置した (図-1)。

### 3.3. 実験結果

地表部の共振曲線を図-5に、共振振動数と最大応答倍率を表-2に示す。設定加速度の増大に伴い共振振動数、最大応答倍率は共に低下する。特に、設定加速度と最大応答倍率とは図-6に示す通り、両対数軸ではほぼ直線的な関係を呈す。B実験とT実験の共振曲線形状の相違は次のように説明できる。共振点以下の振動数領域の振動数が上昇する過程において、B実験ではせん断ひずみ  $\gamma$  の増大に伴いせん断剛性  $G$  は低下 (軟化型剛性系) するのに対し、T実験では  $\gamma$  は徐々に減少し  $G$  が増大 (硬化型剛性系) する傾向<sup>3)</sup> による。図-7に共振点付近 (T-30, 11.9 Hz) の振動モードを示す。この振動モードは図中の深さ方向のせん断剛性の変化を考慮した理論解にほぼ一致することが分かる。

地震波入力実験での振動台波形の加速度フーリエスペクトルは、図-8に示すように7.3Hzにピークが存在する。図-9に地表部の伝達関数 (応答波スペクトル/入力波スペクトル) を示す。やはり、入力加速度レベルの

増大に伴いピーク振動数とピーク値は低下することが分かる。

各深度位置における土槽側壁の加速度 (B) と土中加速度 (A) とは一致しており、土槽の変形は内部地盤の変形に追随しているものと思われる。

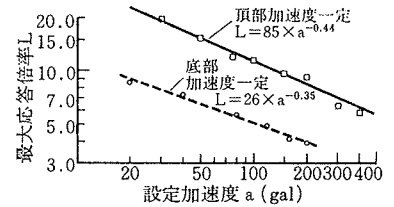


図-6 設定加速度と最大応答倍率の関係

試験	設定加速度 (gal)	共振振動数 (Hz)	最大応答倍率	
T 地表部	30	12.4	19.40	
	50	11.7	15.34	
	75	10.9	11.94	
	100	10.5	11.29	
	150	9.9	9.56	
	200	9.5	9.13	
T 実験	300	8.5	7.27	
	400	7.7	5.66	
	B 底部	20	11.2	8.53
		40	9.3	7.30
		80	7.9	5.58
		120	6.9	4.79
160		6.2	4.14	
200		5.4	3.89	

表-2 共振振動数と最大応答倍率

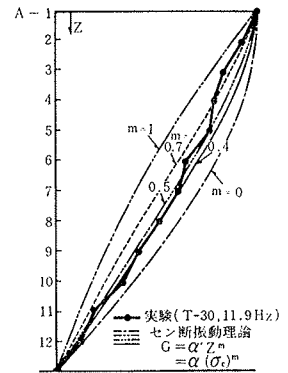


図-7 地盤の振動モード

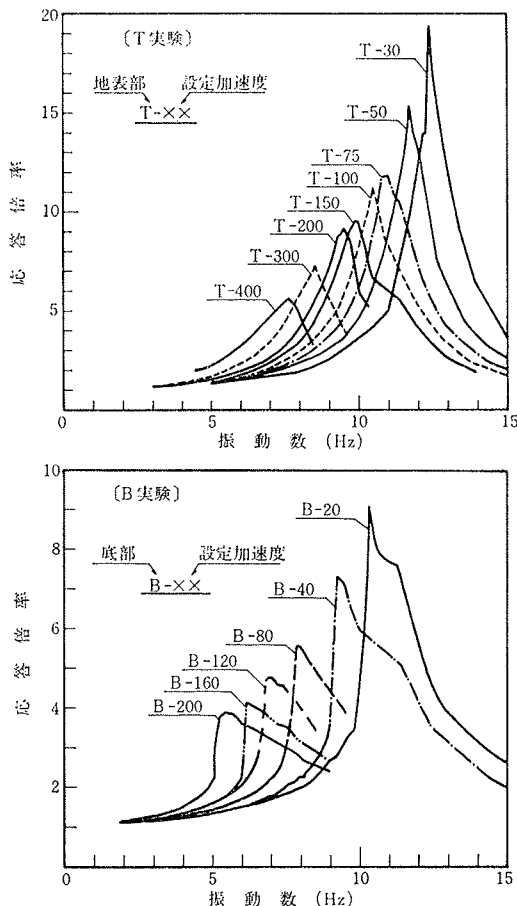


図-5 地表部 (A-1) の共振曲線

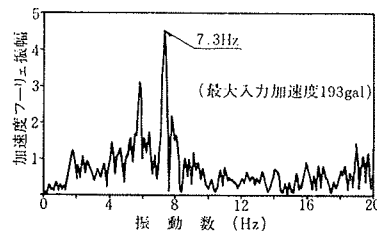


図-8 入力地震波フーリエスペクトル (加速度)

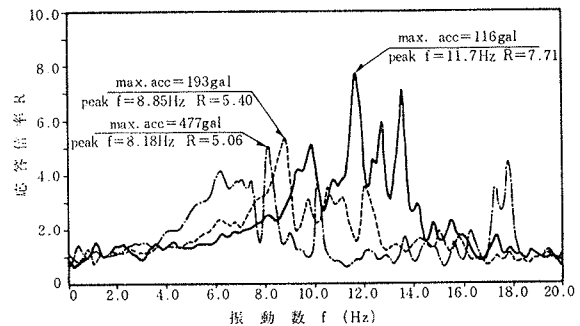


図-9 伝達関数 (地震波入力実験)

### 4. G~γ, h~γ 関係の検討

ここでは、①共振実験結果を用い逆解析手法により個々の  $G \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$  関係を求め、②H-Dモデルを規定するパラメーターを①の算定値を基に推定し、③推定されたH-Dモデルの妥当性を等価線形化法による地震応答

解析値と地震波入力実験結果とで比較検討する。

4.1. 逆解析手法

模型地盤がせん断変形のみで振動していると仮定し、加速度計の設置位置に対応させた6質点でモデル化する(図-10)。このモデルの運動方程式は、複素加速度 $\dot{Y}$ を既知とし、単位平面積当りの複素バネ $K$ を未知量とすると次式で与えられる。

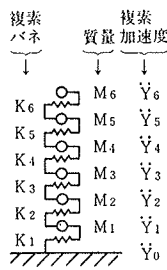


図-10 質点モデル

$$\{K\} = -[D]^{-1}\{M \cdot \dot{Y}\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

$$\{K\}^T = \{K_6, K_5, \dots, K_1\}$$

$$\{M \cdot \dot{Y}\}^T = \{M_6 \cdot \dot{Y}_6, M_5 \cdot \dot{Y}_5, \dots, M_1 \cdot \dot{Y}_1\}$$

$$[D] = \begin{pmatrix} Y_6 - Y_5, & 0, & 0, & \dots, & 0 \\ Y_5 - Y_6, & Y_5 - Y_4, & 0, & & 0 \\ 0, & Y_4 - Y_5, & Y_4 - Y_3, & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0, & 0, & \dots, & Y_1 - Y_0 \end{pmatrix}$$

$$Y_j = -\frac{1}{\omega^2} \ddot{Y}_j \quad (\omega: \text{角振動数})$$

j層の層圧を $H_j$ としたとき、複素バネ $K_j$ とせん断剛性 $G_j$ と減衰定数 $h_j$ は式(2)から、せん断ひずみ $\gamma_j$ は式(3)から得られる。

$$K_j \cdot H_j = G_j = G_j(1 - 2 \cdot h_j^2 + 2 \cdot h_j \sqrt{1 - h_j^2}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\gamma_j = |Y_j - Y_{j-1}| / H_j \quad \dots\dots\dots(3)$$

T実験の共振点前のデータを用い、上記の過程に従って求めた $G \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ 関係を図-11にプロットする。せん断剛性 $G$ はひずみ $\gamma$ の増大に伴い低下し、同ひずみレベルでは拘束圧(土被り)に比例している。 $h \sim \gamma$ 関係は $G \sim \gamma$ 関係に比べバラついてはいるが、既応の研究<sup>1), 2)</sup>で言われている $h$ が $\gamma$ と共に増大する傾向はうかがえる。

4.2. H-Dモデルパラメーターの推定

H-Dモデルの骨格曲線〔式(4)〕および減衰定数〔式

(5)〕で規定されるパラメーターは、初期せん断剛性 $G_0$ 、最大減衰定数 $h_{max}$ 、規準ひずみ $\gamma_{rG}$ ,  $\gamma_{rh}$ の四つである。

$$G = \frac{G_0}{1 + \gamma / \gamma_{rG}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$h = \frac{h_{max}}{1 + \gamma_{rh} / \gamma} \quad \dots\dots\dots(5)$$

初期せん断剛性 $G_0$ の深さ方向の分布は、図-7の振動モードと国生ら<sup>1)</sup>の研究を参考に、拘束圧 $\sigma_c$ の0.5乗に比例すると仮定し次式で表わす。

$$G_0 = \alpha \cdot (\sigma_c)^{0.5} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、係数 $\alpha$ は式(6)の剛性を有するせん断振動系の一次固有振動数が常時微動の卓越振動数13.1Hzに一致するように決定する。その結果、 $\alpha$ は1,300t/m<sup>2</sup>となった。

$G$ にかかわる規準ひずみ $\gamma_{rG}$ は、式(4)の曲線が図-11に示す逆解析値からの分散を最小となるように決める。図-12に $\gamma_{rG}$ と $\sigma_c$ の関係をプロットする。図中の対数軸上での回帰直線の傾き0.34は、国生らの言う0.5(破線で表示<sup>1)</sup>)に比べ若干小さい値となった。

減衰定数は、代表的な $h_{max}$ と $\gamma_{rh}$ を組合せた式(5)を用いた重複反射理論解析(SHAKE)の結果と共振実験結果とを合致させる方法で推定した。その結果、 $h_{max} = 0.25$ ,  $\gamma_{rh} = 1.5 \gamma_{rG}$ の組合せが最適となった。

以上の結果から推定されるH-D曲線〔式(7), (8)〕を図-11に示す。 $G \sim \gamma$ 曲線と逆解析値とは $2 \sim 5 \times 10^{-4}$ の

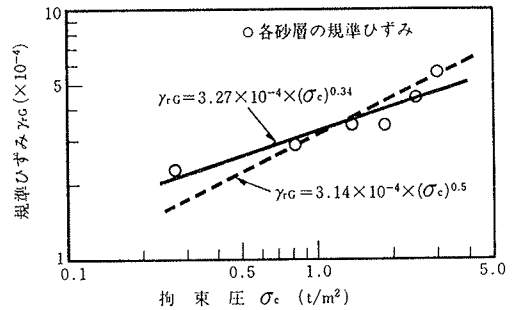


図-12 規準ひずみと拘束圧の関係

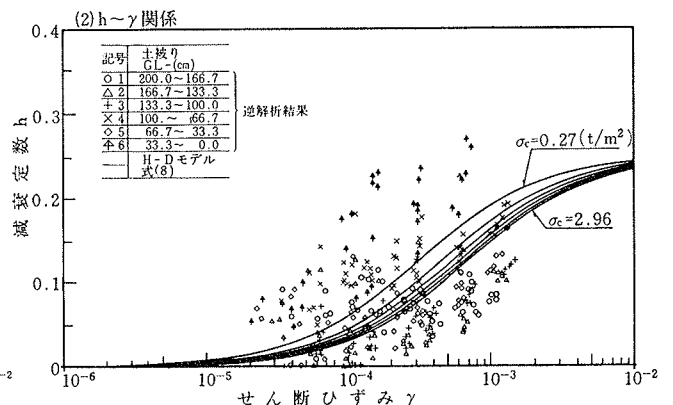
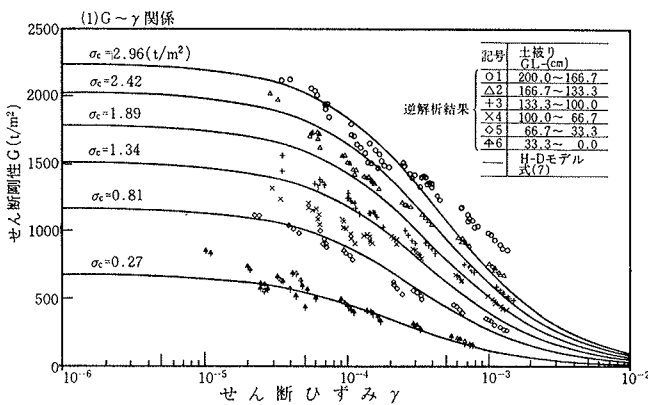


図-11 逆解析結果とH-Dモデル曲線

ひずみ領域での一致が認められる。h~r曲線はバラついている逆解析値のほぼ中間を通っているかと思われる。

$$G = \frac{1300 \times \sigma_c^{0.5}}{1 + \gamma / (3.27 \times 10^{-4} \times \sigma_c^{0.5})} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$h = \frac{0.25}{1 + (4.91 \times 10^{-4} \times \sigma_c^{0.5}) / \gamma} \quad \dots\dots\dots(8)$$

4.3. 地震応答解析

推定されたH-D曲線を用いた地震応答解析結果と地震波入力実験の結果を比較し、その妥当性を検討する。地震応答解析は、式(7)、(8)に基づく非線形性を等価線形化法で考慮したSHAKEを用い、模型地盤2.02mを12層に等分したモデルで行なった。

図-13に伝達関数(最大入力加速度193gal)を、図-14に速度応答スペクトル(同193gal)を、図-15に最大応答加速度分布(同316gal)を、それぞれ解析値と実験値を比較して示した。解析値の $e_{ft}$ は実効ひずみ率(実効ひずみ/最大ひずみ)を表わすもので、入力レベルの増大に伴い解析値に与える $e_{ft}$ の影響は増すものである。伝達関数のピーク振動数および応答スペクトルのピーク値は $e_{ft}=0.7$ とした場合が、実験結果と良く一致している。

このように、解析手法の問題として最適な実効ひずみ

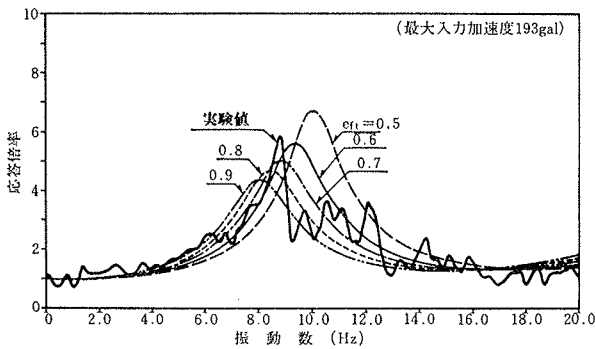


図-13 伝達関数

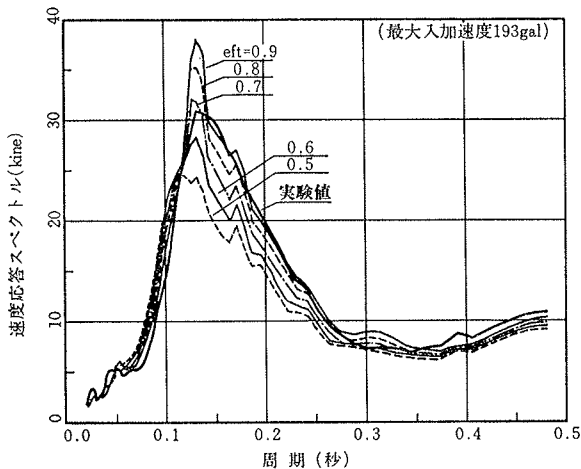


図-14 速度応答スペクトル

率を選択しなければならぬが、推定されたH-Dモデル曲線を導入した地震応答解析は、地震波入力時の実験結果を良好にシミュレートし得ることが分かる。

しかし、ここで示した地震応答解析はH-D曲線と逆解析値が比較的一致している $10^{-4} \sim 10^{-3}$ のひずみ領域での結果であり、さらに大きなひずみ領域においては、逆解析結果により近づけるべきモデル曲線の設定が必要と思われる。

5. 結論

中型せん断土槽および土槽内の模型乾燥砂地盤の振動台実験を実施した結果、次のことが分かった。

- (1) 土槽はほぼ理想的なせん断変形を呈し、側壁のせん断剛性は内部土のせん断剛性に対し無視し得る。
- (2) 入力加速度レベルの増大に伴い、共振振動数と最大応答倍率は低下する。
- (3) 地盤の振動モードは深さ方向のせん断剛性の変化を考慮したせん断振動解に一致する。
- (4) 模型地盤のように極めて小さい拘束圧下においても、その拘束圧の影響やひずみに依存したせん断剛性や減衰定数が得られる。
- (5) 推定されたH-D曲線を用いた等価線形化解析は、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ のひずみ領域での振動台実験結果を良好にシミュレートできる。

参考文献

- 1) 国生剛治: 土の動的変形特性と地盤の非線形震動応答, 電力中央研究所報告, No. 301, (1982), pp. 176~206
- 2) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, (1976), pp. 136~206
- 3) 片山恒雄他: 新体系土木工学10, 構造物の振動解析, 技報堂出版, (1979), pp. 155~165

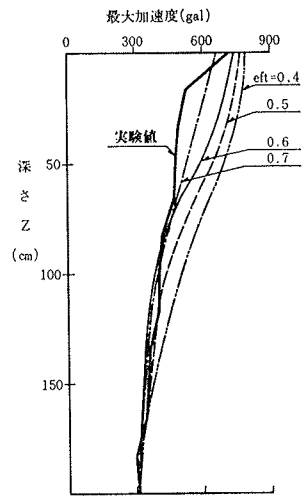


図-15 最大加速度分布