

# 岩盤上の模型基礎の振動試験とそのシミュレーション解析

此 上 典 文      安 井      讓  
栗 本      修      角 田 智 彦  
武 田 寿 一

## Vibration Tests of Concrete Block on a Rock Ground Surface and Simulation Analyses

Norifumi Konoue      Yuzuru Yasui  
Osamu Kurimoto      Tomohiko Tsunoda  
Toshikazu Takeda

### Abstract

This report gives the results of forced vibration tests on a model foundation consisting of a reinforced concrete block (12 m×12 m×9 m) on a ground surface of rock and describes the simulation analyses of the test results. The Thin Layer Element Method was used in the simulation analyses in consideration of the stratified ground condition which was caused by surface loosening in blasting for excavation. The test results were also compared with the half-space theory for the sake of reference. It was confirmed from these analyses that the response and phase curves obtained by vibration tests or the stiffness and damping coefficients calculated through their amplitudes and phases were strongly influenced by the stratified condition. Furthermore, the earth pressure distributions under the block and the vibrational characteristics of the ground around the block obtained by the analyses had good correlations with the test results.

### 概 要

岩盤上に製作されたRC造模型基礎(12m×12m×9m)の強制振動試験とその結果について示した。試験地盤は、地表面付近にゆるみ層を有する三層の弾性波速度構造であることが確認されたため、地盤の成層性が考慮できる点加振薄層法を用いて試験結果のシミュレーション解析を行なった。また、比較のため、半無限弾性体理論による解析結果も示した。

この結果、試験結果の共振曲線と位相曲線およびこれらから逆算した地盤ばねと減衰定数などは、地盤の成層性の影響が強く表れていることが確認された。次に、基礎底面に配置した応力計の測定結果から、土圧分布(直応力)の全体的な傾向が一樣(三角形)分布に近いこと、この土圧分布から算出した地盤ばねと減衰定数も解析値とほぼ対応していること、さらに基礎周辺地盤の振動挙動も解析によってほぼ説明できることなどを示した。

### 1. まえがき

原子炉建屋は、その公共性と安全性確保のため堅固な地盤に支持させて建設される。一方、原子炉建屋と地盤との相互作用の効果を考慮することの重要性は古くから強調されており、その効果は、地盤が軟弱なほど顕著であるとされている。支持地盤が堅固な岩の場合であっても、支持地盤を弾性体と仮定し、波動理論を適用して求めた相互作用の効果が実際に期待できるかどうかについての基礎的な振動試験がいくつか実施されてきており、

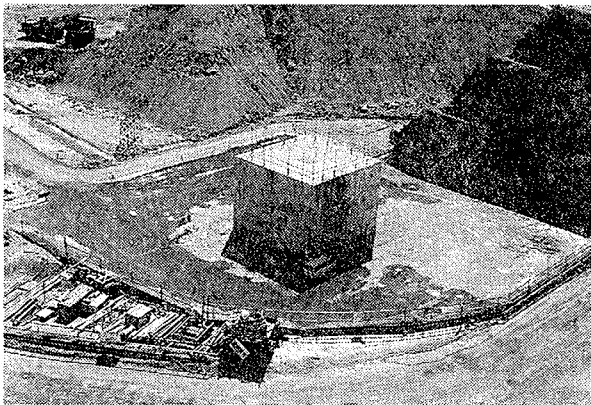
上記の弾性波動理論の妥当性が実証されつつある。

この報告は、これらの実証データを補強追加すべく実施された岩盤上の模型基礎の振動試験とそのシミュレーション解析結果について述べたものである。特に、シミュレーション解析では、模型基礎の振動特性、模型基礎底面の土圧分布、地盤ばねと減衰定数あるいは周辺地盤の振動性状などの各種のデータを一つの解析手法(点加振薄層要素法)による結果と比較照応して試験結果の信頼性を確認するとともに、解析手法の妥当性を多面的に検討することに努めた。

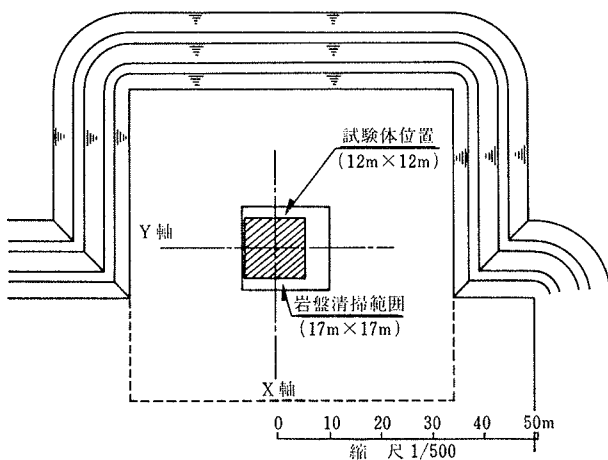
## 2. 試験の概要

### 2.1. 試験地盤

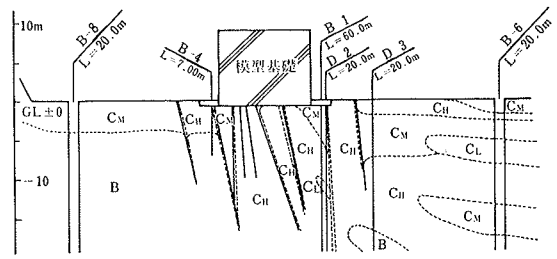
模型基礎試験体は、図一1に示すように三方が地山で囲まれた約60m角の不整形地盤上のほぼ中央部に設置されている。これは、岩盤掘削工事進捗状況あるいは地山も含めたこの付近での地盤の常時微動測定結果や地表面地質目視調査結果などを考慮して、当該位置がこの振動試験に最適な位置であると判断されたためである。写真一1に模型基礎の全景を示す。試験体設置付近の地盤はB~C<sub>H</sub>級の堅硬粗粒な花崗岩から成っており、試験体直下ではC<sub>H</sub>級岩盤が約65%占めている。図一2は、推定地質断面図である。次に、地表面上における屈折法による弾性波試験および複数のボーリング孔を用いてのPS検層の結果、この試験地盤の弾性波速度構造は図一3に示すような分布となっていると推測された。同図によると、地盤表面には発破掘削時に生じたと思われる横波速度で0.5 km/secおよび1.0 km/secのゆるみ層が4m程度の厚さで存在しているが、それ以深では花崗岩としての一般的な速度値であるS波速度1.8 km/sec、P波



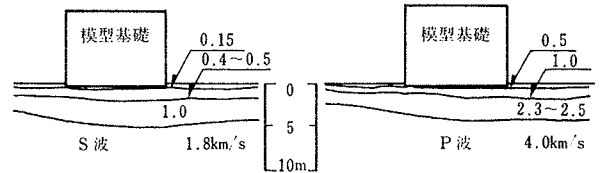
写真一1 模型基礎の全景



図一1 模型基礎設置位置図



図一2 試験地盤推定地質断面図



図一3 試験地盤弾性波速度構造

速度4.0 km/secを示しており、実機炉心予定位置での値と良く対応している。模型基礎試験体は、表土層を除去し、さらに岩盤清掃によって小石、浮石などを完全に取去った後、図一3に示すS波速度0.5 km/secの速度層部分に設置した。

### 2.2. 模型基礎

模型基礎は、底面が12m×12mで高さが9m総重量約3,100tの鉄筋コンクリート造ブロックであり、清掃された岩盤面にレベルコンクリートを平均厚さ50cm打設し、この面上に設置している。なお、模型基礎の4側面には、コンクリートのひび割れ防止のために断熱材を張付し、振動試験終了時まで存置した。

### 2.3. 加振方法

振動試験は、模型基礎上端に設置した起振機による水平2方向(図一1に示すXおよびY軸方向)および上下方向各々についての偏心モーメント一定の加振であるが、採取した試験データはすべて加振力が1tに標準化されたものが得られるような計測システムとしている。加振振動数範囲は、水平方向については5 Hz~50 Hz、上下方向では5 Hz~60 Hzとした。なお、起振機は、国鉄・鉄道技術研究所の小型起振機(EX-80DL, 最大加振力5t)を借用した。

### 2.4. 測定位置

振動測定位置は、図一4、図一5に示すように①模型基礎の変位、②模型基礎底面の地反力、③模型基礎周辺地盤の変位、がそれぞれ把握できるような測定位置とした。変位の測定については、固有振動数が0.5 Hzの動コイル型換振器(サーボ型加速度計も一部併用)を、また地反力の測定には、最大容量5 kg/cm<sup>2</sup>の応力計を基礎底面全体にわたって均等に25個配置した。なお、参考のため、地盤内(実際にはレベルコンクリート内)の測

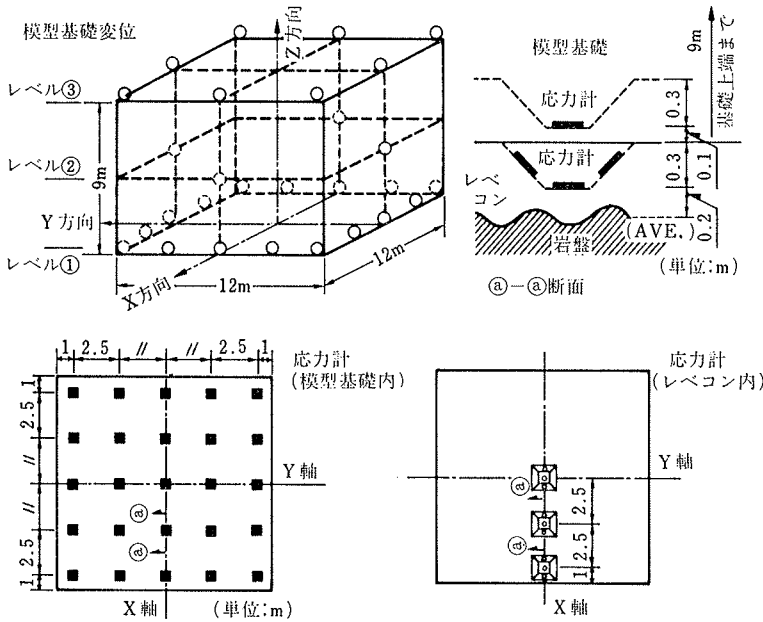


図-4 振動測定位置(1) (基礎の変位, 地反力)

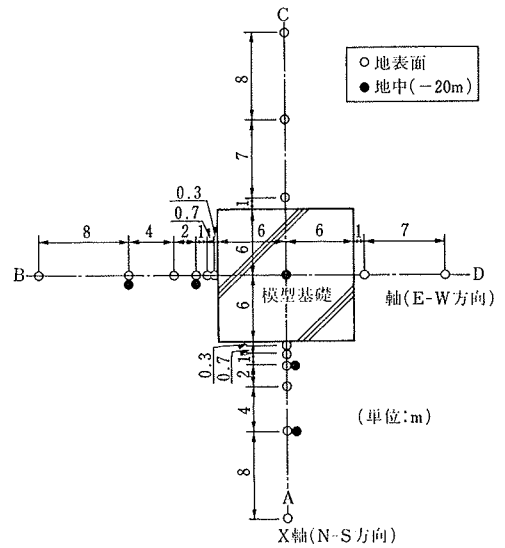


図-5 振動測定位置(2) (基礎周辺地盤)

諸元		加振方向		X 方向		Y 方向	
		大 小	大 小	大 小	大 小	大 小	大 小
RC造 ブロック	大 小	12m x 12m x 9.5m					
	密 度	2.4					
地 盤	層 厚 Δ(m) および 弾性波速度 Vs(m/sec) Vp(m/sec)	層 号	層 厚	Vs	Vp	Vs	Vp
		第1層	1.12	500	950	500	830
		第2層	3.1	1,100	2,300	1,100	2,300
		第3層	~	1,800	4,000	1,800	4,000
	第4層	~	1,800	4,000	1,800	4,000	
	密 度 γ(t/m³)	第 1 層	2.5				
		第 2 層	2.5				
		第 3 層	2.5				
		第 4 層	2.5				
	ポアソン比 ν	第 1 層	0.308				
		第 2 層	0.352				
		第 3 層	0.373				
		第 4 層	0.373				
	(*) 内部減衰定数 he	第 1 層	0.03	0.10	0.05	0.10	
		第 2 層	0.02	0.02	0.02	0.02	
		第 3 層	0	0	0	0	
第 4 層		—					
境 界	側 面	理論的に考慮					
	底 面	粘性境界					
加 振	位 置	コンクリートブロック頂部(**)					
	加 振 力	1t 一定(P=1.e <sup>1wt</sup> )					

(\*) 10Hz時の減衰定数 (\*\*) 起振機の高さは無視

表-1 解析モデルの諸元

点にも応力計を埋設して, 主応力の測定を試みた。

### 3. 解析モデルと解析手法

試験地盤は, 図-3 に示したように上部にゆるみ層を有する3層の弾性波伝播速度構造を有している。そこで,

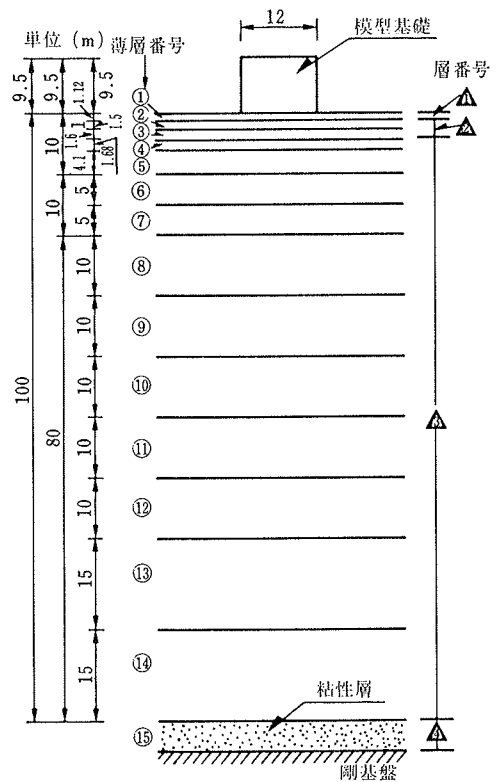


図-6 解析モデル

地盤の成層性が考慮できる点加振薄層要素法による解析を行なった。図-6に解析モデルを示す。地盤は, 横方向には連続体とし, 縦方向には14層の薄層からなるものとし, その基部には鉛直方向の半無限性を考慮するため粘性層を配置した。表-1には, 解析モデルの諸元の値を示す。同表のうち, ゆるみ層第1層の厚さ, 減衰および縦波伝播速度の値は, これらの値をパラメータとして解析を行ない, 最も試

験結果に適合したものを掲げてある。なお、模型基礎の高さはレベルコンクリートの平均厚さ 0.5 m を加えて 9.5 m として解析を行なった。

#### 4. 試験結果とそのシミュレーション解析

##### 4.1. 共振曲線と位相曲線

図一7, 8 に代表例として水平 X 方向および Y 方向加振時の基礎の共振曲線と位相曲線の試験結果を解析結果とともに示した。試験結果では, 15.75 Hz の 1 次固有振動数の他に, 25 Hz 付近にもピークが表れていたが, これは水平面内におけるねじれ振動が誘発されたものであるため, この影響を除いた基礎中心位置に換算したものを示している。解析結果は, 振幅, 位相とも試験結果と良く対応している。図一9 は上下方向加振の場合を示しているが, 両者に若干の差異が見受けられる。この場合の解析モデルは表一の X 方向加振モデルを用いており, 特に上下用モデルというものは考慮していないことによる差異と思われる。なお, 図一9 の 16 Hz 付近に見られるピーク

は, 水平方向の共振振動数の影響と考えられる。表一2 には試験結果の固有振動数と減衰定数を示した。

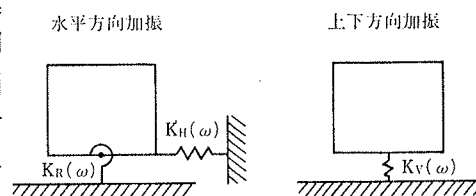
加振方向	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
水平 X 方向	15.5~15.8	7.6~8.2
水平 Y 方向	14.9~15.2	7.9~8.8
上下 Z 方向	30.0~32.5	14.7~19.4

表一2 固有振動数と減衰定数

##### 4.2. 地盤の動的ばねと減衰定数

地盤の動的ばねと減衰定数は, 模型基礎各位置での変位応答振幅と位相差を用いて以下に示す手法によって算

出した。模型基礎は剛体とし, 図一10に示すように水平方向加振の場合はス



図一10 動的地盤ばねの算定用モデル

ェイ・ロッキングモデルとし, 上下方向加振の場合は剛体の底面に上下地盤ばねが連結された 1 自由度モデルとする。このとき, これらのモデルについての運動方程式はそれぞれ次の様である。

$$\begin{bmatrix} m & m \cdot s \\ m \cdot s & I + m \cdot s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_H(\omega) \\ K_R(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_0 r \omega^2 \\ m_0 r \omega^2 l \end{bmatrix} \cdot e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$m \cdot \ddot{Z} + K_V(\omega) \cdot Z = m_0 r \omega^2 e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに, X,  $\theta$ , Z : 模型基礎底面での水平変位, 回転角および上下変位

m, I : 模型基礎の質量および重心回りの質量回転慣性

$m_0 r \omega^2$  : 起振力

s, l : 模型基礎の重心高さとか振点高さ

(1)式と(2)式中の X,  $\theta$ , Z は次式で表わされる。

$$x = X \cdot e^{i(\omega t + \phi_x)}$$

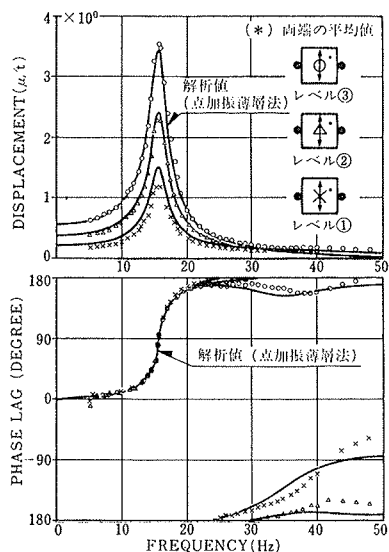
$$\theta = \theta \cdot e^{i(\omega t + \phi_\theta)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$z = Z \cdot e^{i(\omega t + \phi_z)}$$

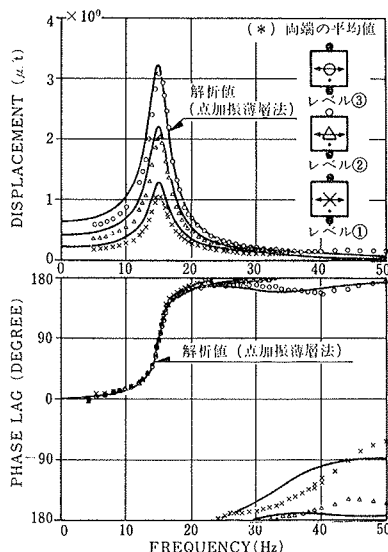
ここに, X,  $\theta$ , Z : 振幅

$\phi_x, \phi_\theta, \phi_z$  : 位相差

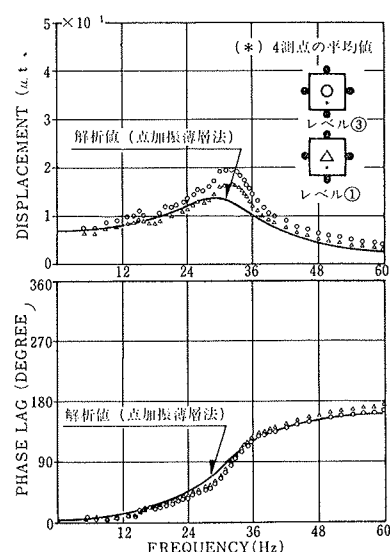
(3)式を(1)式, (2)式に代入し整理すると  $K_H(\omega), K_R(\omega)$  お



図一7 共振曲線と位相曲線 (X加振: 基礎水平変位)



図一8 共振曲線と位相曲線 (X加振: 基礎水平変位)



図一9 共振曲線と位相曲線 (Z加振: 基礎上下変位)

よび  $K_v(\omega)$  は次式のように表わされる。

$$K_H(\omega) = \frac{\omega^2}{X \cdot e^{i(\phi_x)}} \{m \cdot X \cdot e^{i(\phi_x)} + m \cdot s \cdot \theta e^{i(\phi_\theta)} + m_{0R}\}$$

$$K_R(\omega) = \frac{\omega^2}{\theta \cdot e^{i(\phi_\theta)}} \{m \cdot X \cdot e^{i(\phi_x)} + I \cdot \theta \cdot e^{i(\phi_\theta)} + m_{0R}l\}$$

$$K_v(\omega) = \frac{\omega^2}{Z \cdot e^{i(\phi_z)}} \{m \cdot Z \cdot e^{i(\phi_z)} + m_{0R}\} \dots\dots\dots(4)$$

(4)式から地盤の動的ばねを次式により算定した。

$$\begin{aligned} K_H(\omega) &= \text{Re}\{K_H(\omega)\} + i \cdot \text{Im}\{K_H(\omega)\} \\ K_R(\omega) &= \text{Re}\{K_R(\omega)\} + i \cdot \text{Im}\{K_R(\omega)\} \dots\dots\dots(5) \\ K_v(\omega) &= \text{Re}\{K_v(\omega)\} + i \cdot \text{Im}\{K_v(\omega)\} \end{aligned}$$

また、減衰定数については次式によって算定した。

$$\begin{aligned} h_H(\omega) &= \sqrt{\alpha_H^2 + 1} - \alpha_H \\ h_R(\omega) &= \sqrt{\alpha_R^2 + 1} - \alpha_R \dots\dots\dots(6) \\ h_v(\omega) &= \sqrt{\alpha_v^2 + 1} - \alpha_v \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} \alpha_H(\omega) &= \text{Re}\{K_H(\omega)\} / \text{Im}\{K_H(\omega)\} \\ \alpha_R(\omega) &= \text{Re}\{K_R(\omega)\} / \text{Im}\{K_R(\omega)\} \dots\dots\dots(7) \\ \alpha_v(\omega) &= \text{Re}\{K_v(\omega)\} / \text{Im}\{K_v(\omega)\} \end{aligned}$$

模型基礎の変位応答振幅と位相差から地盤の動的ばねおよび減衰定数を計算した結果の一例を図-11~13に示す。同図には、地盤の成層性を考慮した点加振薄層要素法による解析結果と、成層性を考慮しない半無限弾性体理論による解析結果も併せて示している。点加振薄層要素法の解析モデルにおける地盤の内部減衰は、粘性減衰型のものを用いている(表-1参照)。図-11~13に見られるように、地盤の成層性を考慮した点加振薄層要素法による解析結果は、試験結果と良く対応していること

がわかる。一方、半無限弾性体理論(変位一様分布と仮定)による解析は、定性的には試験結果とほぼ対応しており、また、ばねの実数部のみといった限られた項目に対しては定量的にも対応しているが、水平、回転の動的ばねの実数部と虚数部の何れもが試験結果と定量的にも対応するような等価横波速度は見いだせない。これは、ゆるみ層の存在による地盤の成層性の影響によるものと思われる。図-14~15には応力計の地反力データから算出した回転と上下の地盤ばねを示す。同図中、ある振動数時においては2個のデータがあるが、このうち少ない方のデータは後述する地反力モード測定試験時のデータから算出したものである。解析結果の虚数部については試験結果と比較的良好に整合しており、また、減衰定数についても、試験結果と、解析結果は比較的良好に対応している。

### 4.3. 地反力

図-16~17に水平X方向加振の場合の基礎底面の直応力およびせん断応力についての共振曲線と位相曲線を、試験結果および点加振薄層要素法による解析結果と併せて示す。何れも、解析結果は試験結果と良く対応している。図-18~19は、共振時の地反力分布であるが、細部については地盤の不均一性によると考えられるデータのばらつきがみられるものの、全体的には地反力分布は一樣(三角形)分布に近く、解析結果も定性的には試験結果と対応している。振動試験実施時点での、この模型基礎のコンクリートの弾性係数( $E_c = 2.7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ )に基づく応力計の出力感度特性を考慮(約1.3倍)すると、これらの解析結果と試験結果との差異も少なくなる傾向

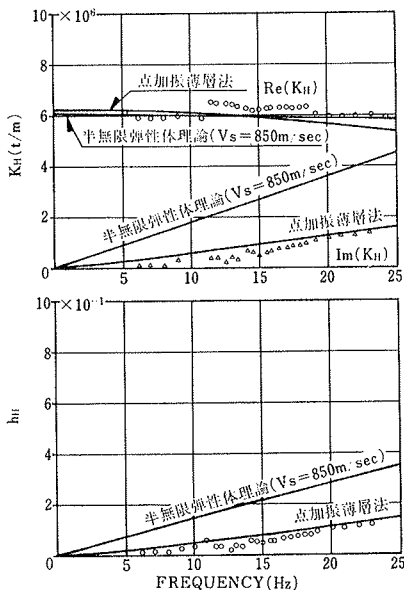


図-11 地盤の水平ばねと減衰定数 (X加振：水平成分)

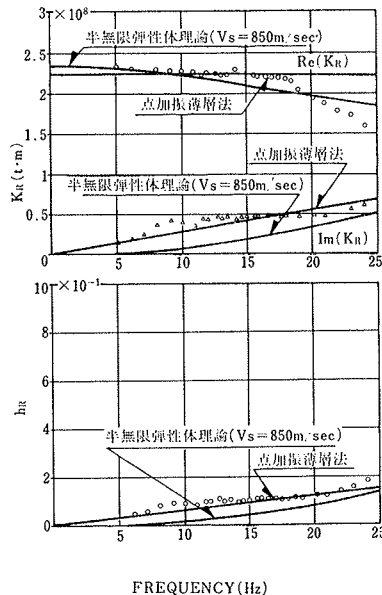


図-12 地盤の回転ばねと減衰定数 (X加振：回転成分)

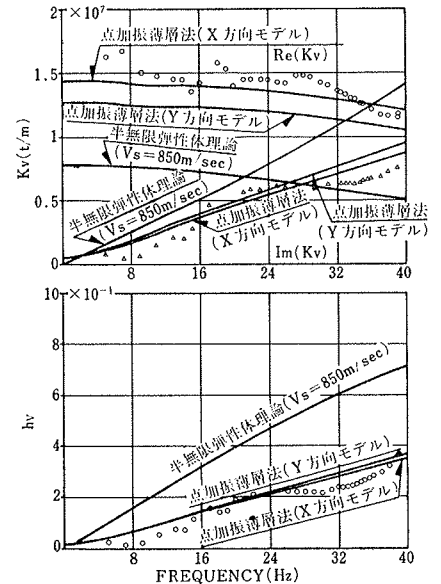


図-13 地盤の上下ばねと減衰定数 (Z加振：上下成分)

を示す。

4.4. 周辺地盤の振動挙動

図-20には周辺地盤の測点の共振曲線の例として、X方向加振時のものを示す。図-21~23には共振時にお

ける周辺地盤の振動モードを、図-24には基礎と地表面および地中の変位分布を、また図-25には地表面における振幅と距離との関係をそれぞれ試験結果と解析結果を併せて示す。基礎の極く近傍地盤で急激にその振動振幅が

減少することがわかる。従って、他の基礎あるいは地盤の不整が、対象とする基礎からある程度離れている場合には、基礎間相互作用あるいは地盤の不整形性が当該基礎の動特性(動的ばね)に与える影響は少ないと考えられる。

5. おわりに

岩盤上の模型基礎の振動試験とその結果の解析検討を行なった。この検討の結果、次の事柄が明らかになった。

- (1) 地盤ばねとその減衰定数は、地盤の成層性の影響を受ける。
  - (2) 地反力分布の全体的な形状は一樣分布であることが実験的に把握できた。
  - (3) 地反力から求めた地盤ばねの減衰定数は、変位から求めた減衰定数とほぼ対応する。
  - (4) 周辺地盤の振動特性も解析によりほぼ説明できる。
- 以上、同種の研究の一例として有用なデータが提供できるものとする。

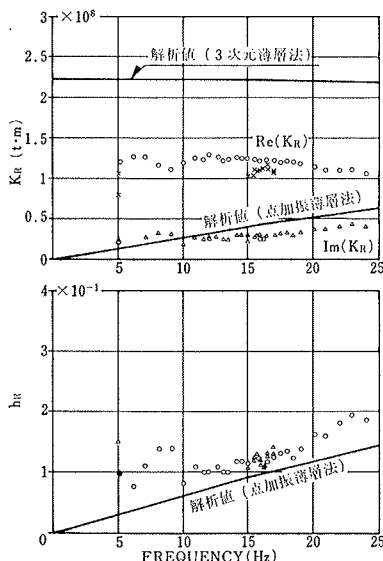


図-14 地盤の回転ばねと減衰定数 (地反力から算定: X加振)

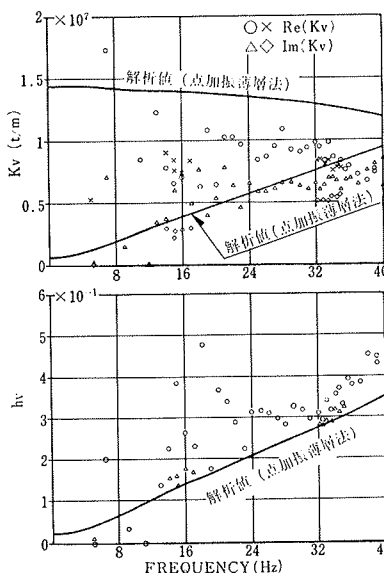


図-15 地盤の上下ばねと減衰定数 (地反力から算定: Z加振)

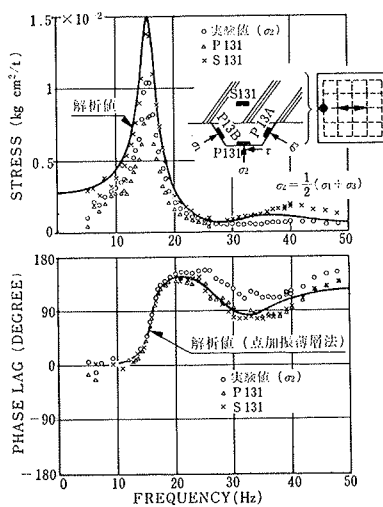


図-16 共振曲線と位相曲線 (X加振: 直応力)

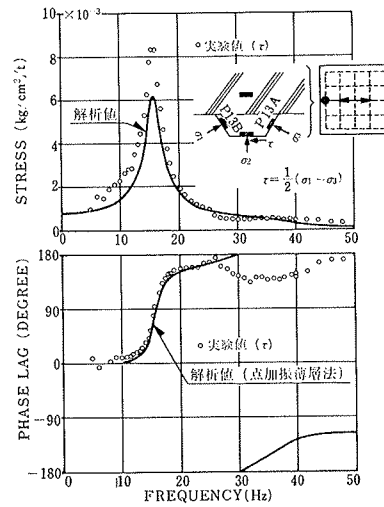


図-17 共振曲線と位相曲線 (X加振: せん断応力)

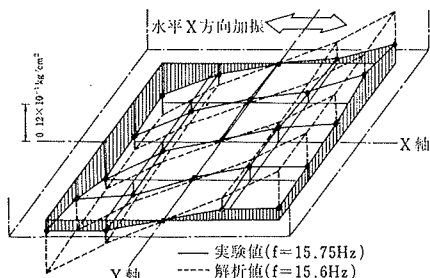


図-18 地反力分布 (X加振)

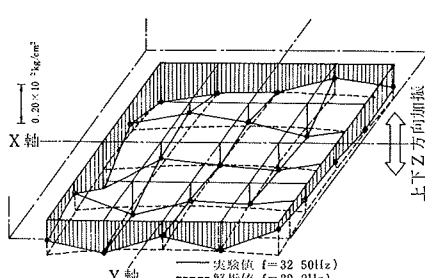


図-19 地反力分布 (Z加振)

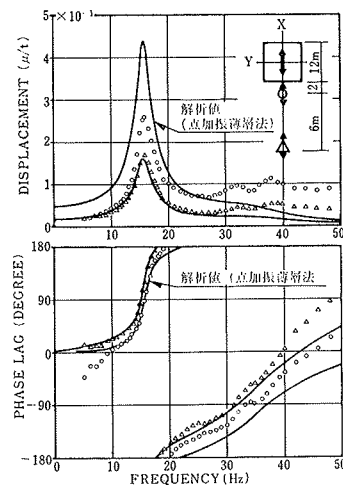


図-20 共振曲線と位相曲線 (X加振: 周辺地盤変位)

謝 辞

この研究の機会を提供して下さるとともに、終始にわたる御指導、御尽力を賜りました動力炉・核燃料開発事業団、ならびに貴重な助言を頂きました日本原子力発電株式会社の関係各位に対し心から感謝致します。

なお、本研究は前田・佐藤・福田建設共同企業体との共同研究である。関係各位の多大な御協力に対し謝意を表します。

参考文献

- 1) 瀬戸川 葆: やや硬質な地盤における正方形基礎の

Dynamical Ground Compliance—その2 成層構造の地盤モデルに基づく検討—, 日本建築学会論文報告集, 第320号, (昭和57.10), pp. 81~90

- 2) 太田, 他: 硬質岩盤上のコンクリートブロック振動実験とその解析(その1~4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1984), pp. 727~734
- 3) Tajimi H.: a Contribution to Theoretical Prediction of Dynamic Stiffness of Surface Foundations Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering. Vol. 5, (Sep. 1980), pp. 105~112

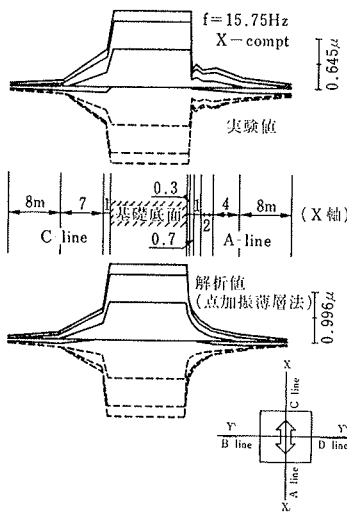


図-21 地盤振動モード (X加振: X成分)

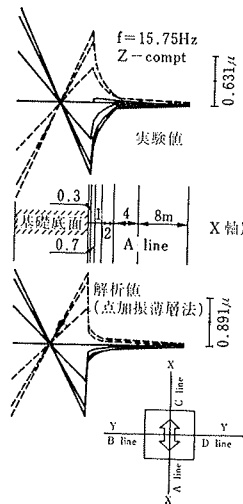


図-22 地盤振動モード (X加振: Z成分)

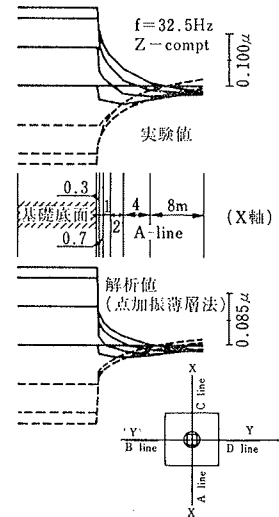


図-23 地盤振動モード (Z加振: Z成分)

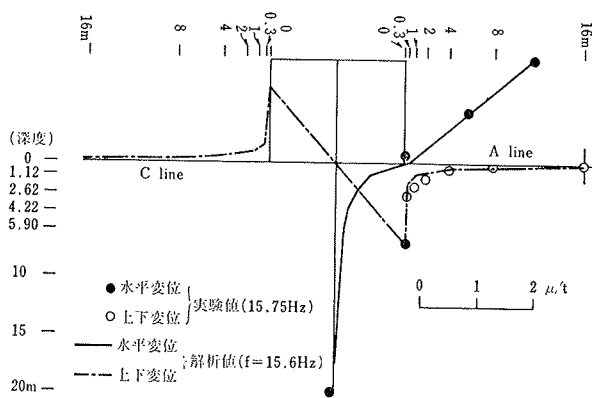


図-24 基礎と地盤の変位分布 (X加振)

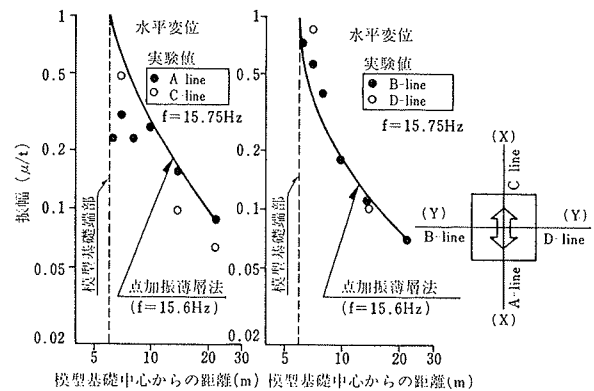


図-25 地盤の振幅と距離との関係 (X加振)