

(23) 埋込み構造物と地盤との相互作用に関する解析的研究

武藤 清^{*1} 村田 豊弥^{*2} 高橋 元一^{*2}
○源 栄正人^{*2} 釜田 正毅^{*2} 天野 晶彦^{*3}

§ 1 目 的

原子炉建屋のようにマッシブな大規模構造物の場合には、地盤と構造物の相互作用が地震時挙動に及ぼす影響を無視できない。この相互作用問題に関する解析的研究はこれまでも数多くなされている。しかし構造物が埋込まれた場合についてみると、埋込み部の複雑さや地盤の3次元半無限性などのために、まだ解析的な困難さが残されている。

本論文では、半無限弾性地盤に埋込まれた構造物の地震応答に及ぼす埋込み効果を解析的に究明するための一方法を提案し、剛に埋込まれた原子炉建屋の場合の地震応答解析結果を示す。

§ 2 解析方法

2.1 解析法の概要

本論文で示す地震応答解析は、図-1に示すようないわゆるサブストラクチャーアプローチ¹⁾に基づいている。

筆者らはこのアプローチにおける Impedance 問題と Scattering 問題に関する解析に対して、3次元半無限弾性体のグリーン関数を用い、境界要素法²⁾³⁾(境界積分方程式を FEM 的な離散

化により近似的に代数方程式に変換する手法)を適用した解析方法を開発した⁴⁾。これらの2つの問題の解と構造物のモデルを連続することにより、任意形状の埋込み部を有する構造物の地震応答解析を行うことができるようにした。

2.2 Impedance 問題と Scattering 問題の解析式

(a) 境界積分方程式

これらの2つの問題に対する境界 S における積分方程式は次式で表わされる。

$$c_i u_i^* + \int_S u_{ik} q_k^* dS - \int_S q_k u_{ik}^* dS = f \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{cases} f = 0 & (\text{Impedance 問題}) \\ f = 2c_i u_i^* & (\text{Scattering 問題})^{5)} \end{cases}$$

ここに、 u_k^* 、 q_k^* は半無限弾性体の変位基本解および表面力基本解(本論文では、これらの基本解の略算解として動的 Kelvin 解の鏡像ソース重合解を用いた⁶⁾)、 c_i はなめらかな境界では 0.5 となる。また、 u_i^* は自由地盤の変位を表わし、入射する波群タイプにより異なる。本論文で対象とする鉛直入射する S 波の場合は下式与えられる。(ただし V_s : せん断波速度)

$$u_i^* = 2e^{i\omega t} \cos(\xi z) \quad (\xi = \omega/V_s) \quad \dots\dots\dots (2)$$

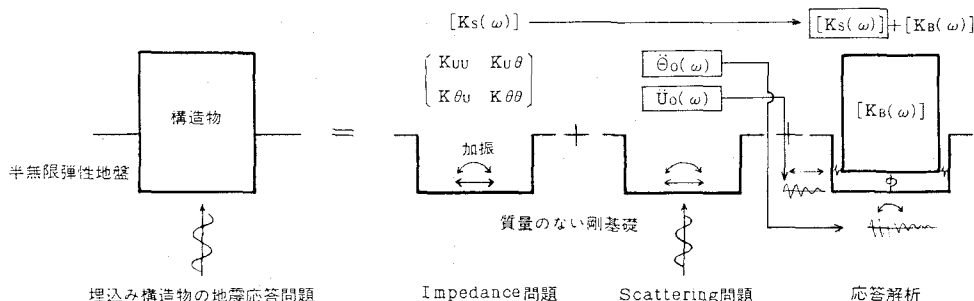


図1 サブストラクチャーアプローチによる地震応答解析(剛基礎の場合)

*1 日本学士院会員 東大名誉教授 工博 *2 鹿島建設 武藤研究室 *3 鹿島建設 電算センター

(b) 境界要素による積分方程式の離散化

境界 S を微小要素 (境界要素) で分割して, FEM の手法で (1) 式を離散化すると次式のような代数方程式が得られる。

$$[C] \{U\} + [H] \{U\} - [G] \{Q\} = \{F\} \quad \dots (3)$$

$$\begin{cases} \{F\} = \{O\} & (\text{Impedance 問題}) \\ \{F\} = 2[C] \{U_f\} & (\text{Scattering 問題}) \end{cases}$$

なお, 筆者らは, 境界要素として, 三角形の一定要素を用いた。

(c) 境界における力と変位の関係

表面力ベクトル $\{Q\}$ の各成分に対応する要素の面積 A_e をかけると置換集中力ベクトル $\{P\}$ が得られ, 変位ベクトル $\{U\}$ との関係は次式で与えられる。

$$\{P\} = \begin{cases} [A][G]^{-1}[\tilde{H}]\{U\} & (\text{Impedance 問題}) \\ [K]\{U\} - 2[A][G]^{-1}[C]\{U_f\} & \dots (4) \\ & (\text{Scattering 問題}) \end{cases}$$

ここに, $[\tilde{H}] = [C] + [H]$, $[K]$ はインピーダンスマトリックスである。

(d) 剛基礎の場合の解析式

変換マトリックス $[T]$ を用いて, (4) 式より次式が得られる。

$$\{\bar{P}\} = \begin{cases} [T]^T [K] [T] \{\bar{U}\} = [\bar{K}] \{\bar{U}\} & (\text{Impedance 問題}) \dots (5) \\ [\bar{K}] \{\bar{U}\} - 2[T]^T [A][G]^{-1}[C]\{U_f\} & (\text{Scattering 問題}) \end{cases}$$

ここに, $\{U\} = [T] \{\bar{U}\}$, $\{\bar{P}\} = [T]^T \{P\}$, $[\bar{K}]$ は剛基礎のインピーダンスマトリックスである。なお, 変換マトリックスの一要素 (節点) に対応する部分 $[T_e]$ は次式で表現される。

$$[T_e] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot & z & -y \\ \cdot & 1 & \cdot & -z & \cdot & x \\ \cdot & \cdot & 1 & y & -x & \cdot \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

質量のない剛基礎への入射問題では (5) 式において, $\{\bar{P}\} = \{O\}$ として解く。

2.3 剛基礎を有する構造物の地震応答解析式

Scattering 問題の解析で得られる質量のない剛基礎への水平および回転入力地震動 ($\ddot{U}_o(\omega)$, $\ddot{\Theta}_o(\omega)$) を用いた構造物の周波数領域における運動方程式は次式で表わされる。

$$([K(\omega)] - \omega^2 [M]) \{U\} = -[M] (\{I_u\} \ddot{U}_o(\omega) + \{I_\theta\} \ddot{\Theta}_o(\omega)) \quad \dots (7)$$

ここに, $[K(\omega)]$, $[M]$ はそれぞれ, 剛性マトリックスおよび質量マトリックスでその成分は次式に示すような形で表わされる。

$$[K(\omega)] = \begin{bmatrix} K_{uu}^{11} & K_{u\theta}^{11} & K_{uu}^{12} & K_{u\theta}^{12} \\ K_{\theta u}^{11} & K_{\theta\theta}^{11} & K_{\theta u}^{12} & K_{\theta\theta}^{12} \\ \text{Sym} & & K_{uu}^{22} & K_{u\theta}^{22} \\ & & K_{\theta u}^{22} & K_{\theta\theta}^{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O & O \\ O & \begin{matrix} s & s \\ k_{uu} & k_{u\theta} \\ k_{\theta u} & k_{\theta\theta} \end{matrix} \end{bmatrix}$$

建屋部分 地盤のインピーダンス

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & & O \\ & J_1 & \\ O & & m_2 \\ & & & j_2 \end{bmatrix}$$

添字:
1: 基礎以外の自由度
2: 基礎の自由度
u: 水平自由度
θ: 回転自由度

また, $\{I_u\}$, $\{I_\theta\}$ はそれぞれ, 水平入力および回転入力に対する荷重ベクトルを表わす。

ところで, 剛基礎への入力波 $\ddot{U}_o(\omega)$, $\ddot{\Theta}_o(\omega)$ と自由地表面の地動 $\ddot{Y}_o(\omega)$ との関係は次式で示される。

$$\begin{aligned} \ddot{U}_o(\omega) &= H_u(\omega) \ddot{Y}_o(\omega) \\ \ddot{\Theta}_o(\omega) &= H_\theta(\omega) \ddot{Y}_o(\omega) \end{aligned} \quad \dots (8)$$

ここに, $H_u(\omega)$, $H_\theta(\omega)$ は水平および回転入力に対する伝達関数である。

(8) 式を (7) 式に適用することにより, 自由地表面に対する相対変位応答倍率 $\{\Phi_{RD}(\omega)\}$, および絶対加速度応答倍率 $\{\Phi_{AA}(\omega)\}$ は次式のような形で得られる。

$$\begin{aligned} \{\Phi_{RD}(\omega)\} &= ([K(\omega)] - \omega^2 [M])^{-1} \\ &\quad \{-[M] (\{I_u\} H_u(\omega) + \{I_\theta\} H_\theta(\omega))\} \\ \{\Phi_{AA}(\omega)\} &= -\omega^2 \{\Phi_{RD}(\omega)\} + \{I_u\} H_u(\omega) \\ &\quad + \{I_\theta\} H_\theta(\omega) \end{aligned} \quad \dots (9)$$

時刻歴の応答波形は周波数領域で求まる応答量をフーリエ逆変換することにより得られる。

§ 3 解析対象および解析ケース

3.1 解析対象構造物

解析の対象とした構造物は図-2に示すようなBWR型(MARK-II)の仮想建屋で下層は $80 \times 80 \text{ m}$ 、上層は $50 \times 50 \text{ m}$ の正方形平面を有し、主なる耐震要素は内壁、外壁、シールド壁である。建屋部分の振動モデルは、これらの耐震要素を1本の曲げせん断棒に置換し、その重量、剛性は全解析ケースで同一とした。ただし、埋込み部分の剛性は剛基礎仮定条件に対応させて剛とした。

3.2 解析ケース

解析ケースは埋込み深さの違いにより、図-3に示すような3ケース(ケース1;埋込みなし、ケース2;GL-1 3.5 mまで埋込み、ケース3;GL-2 6.5 mまで埋込み)を考慮し地震応答量に及ぼす埋込み効果について検討した。

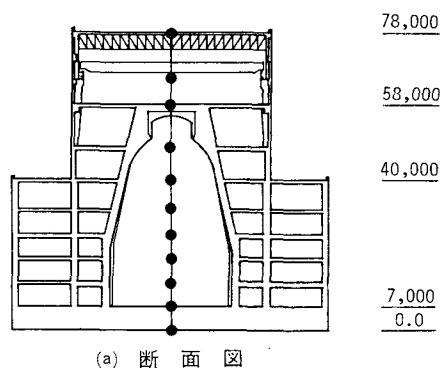
また、各解析ケースに対応する Impedance 問題および Scattering 問題の解析に用いた境界要素モデルは図-3にその展開図を示してあるように、ケース1では72要素、ケース2では120要素、ケース3では168要素のモデルを用いた。

3.3 解析条件

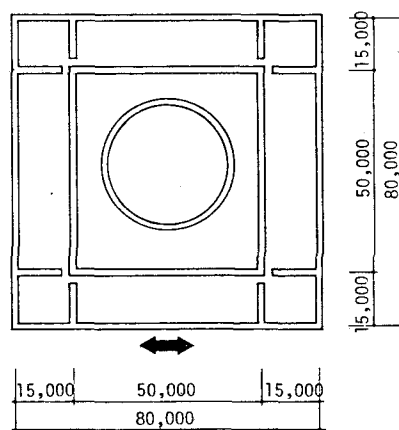
地盤条件は、せん断波速度が 500 m/sec 、ポアソン比0.4、密度 2.0 t/m^3 で均質様な半無限弾性地盤を対象とした。

入力波は自由地表面位置における想定地震動としてエルセントロ波(1940年NS成分)を最大加速度 100 gal として用いた。

また、建屋部分の減衰は5%の複素減衰、地盤部分については§2の解析方法で示したインピーダンス解析より求まる複素ばねをそのまま用いた周波数応答解析により応答計算を行った。

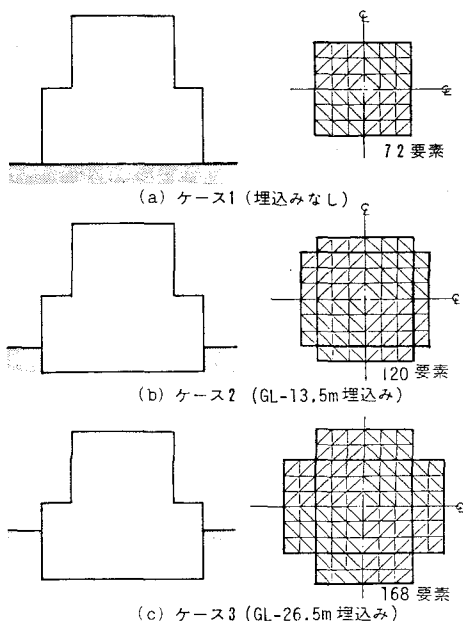


(a) 断面図



(b) 平面図

図2 解析対象建屋



(c) ケース3 (GL-26.5m埋込み)

図3 解析ケースおよび境界要素モデル

§ 4 解析結果

4.1 インピーダンス特性と建物地盤連成系の動的特性

図-4は、ケース1～ケース3の剛基礎のインピーダンスマトリックスの逆マトリックスであるコンプライアンスマトリックスの各成分 (a) 水平コンプライアンス, (b) 回転コンプライアンス, (c) 水平回転連成コンプライアンス) を示した図で、基礎底面の中心位置において単位力で加振したときの影響数 (水平変位と回転角) を意味している。

この図より、水平および回転コンプライアンスは埋込み深さの増大と共に減少すること、および実数部に対する虚数部の比は同じ振動数では埋込み深さが大きいほど大きくなっていて減衰効果が大きくなることが分かる。

一方、連成コンプライアンスは埋込み深さが大きい方が大きな値となっていて、埋込み基礎では連成頂の影響が大きいことを示している。

図-5は上記のインピーダンスと上部構造を連結したモデルの動的特性を把握するために、オペレイティングフロア位置 (質点3) で正弦波強制加振したときの加振力1 ton 当たりに対する加振点位置の変位共振曲線を3ケースについて計算して示したものである。

この図より、埋込みが深くなるにつれて一次振動数が高振動数側に移動するとともにピーク値も減少していることから、埋込みによる拘束効果および減衰効果があることが分かる。

4.2 剛基礎への入力地震動

図-6および図-7は剛基礎への入力地震動 (水平および回転入力) の自由地表面に対する伝達関数およびタイムヒストリーを示したものである (基礎底面中心位置で規定)。

水平入力ではケース1 (地表面基礎) では当然想定地震動と同じ最大加速度100 gal であるが

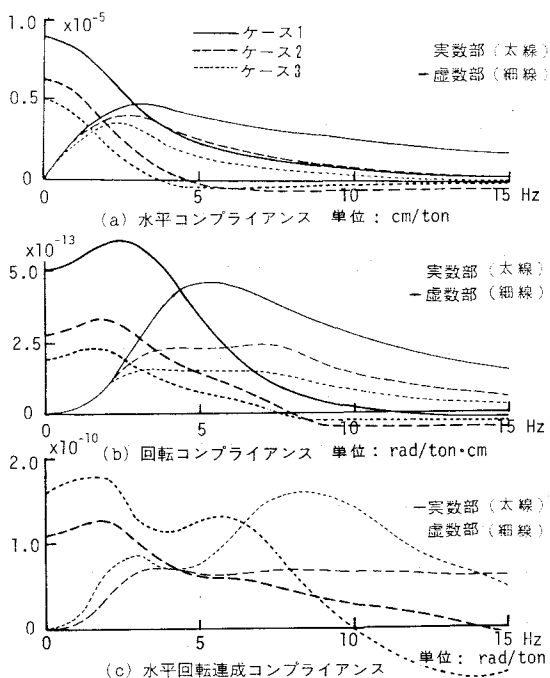


図4 各ケースにおける剛基礎のコンプライアンス

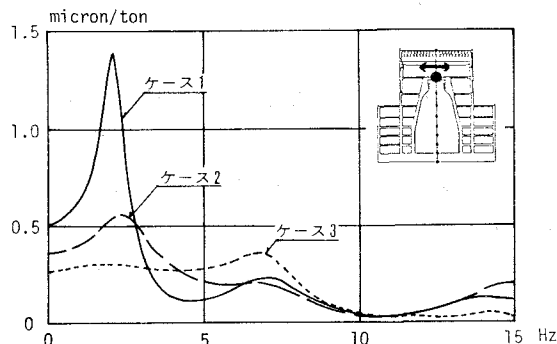


図5 建屋加振時の変位共振曲線 (加振位置)

ケース2では最大加速度92 gal, ケース3では同81 gal と最大加速度が減少しているとともに短周期成分がカットされる傾向をタイムヒストリーにおいても把握できる。

一方、回転入力についてみると、伝達関数からも分かるように短周期成分が大きい波であることが分かる。量的には、想定地震動100 gal に対してケース2では $3.9 \times 10^{-3} \text{ rad/sec}^2$ (側面の上下動にすると15.6 gal に相当), ケース3では $6.3 \times 10^{-3} \text{ rad/sec}^2$ (同, 25.2 gal) となっている。

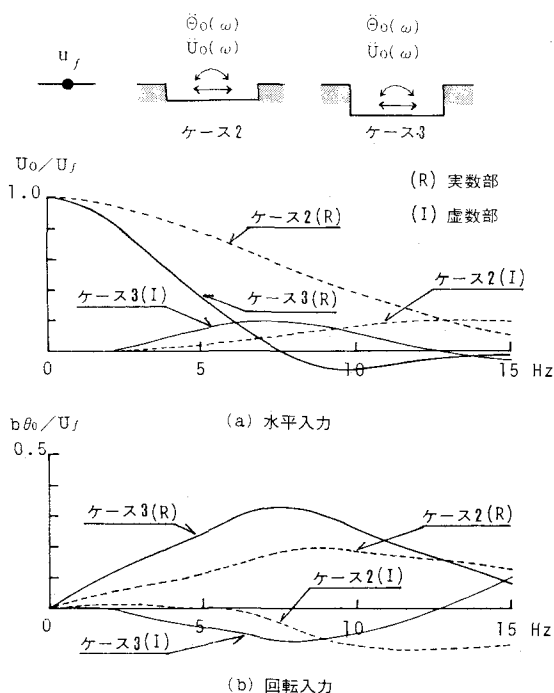


図6 剛基礎への入力地震動の自由地表面に対する伝達関数

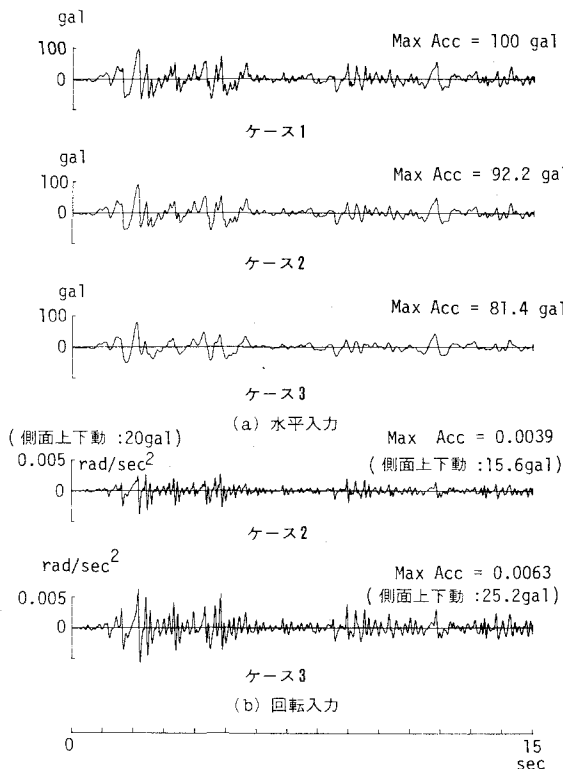


図7 剛基礎への入力地震動 (タイムヒストリー)

4.3 構造物の地震応答量

b) 自由地表面に対する加速度応答倍率

図-8は自由地表面に対する加速度応答倍率をオペレイティングフロア位置(a)とベースマット上端位置(b)について示したものである。

この図より建屋の1次振動数付近では、建屋上部下部ともに埋込みによって応答倍率が減少するが、5 Hzを越える振動数領域(7 Hz付近)では、建屋上部は、回転入力が原因で、埋込みによる応答倍率の低減が必ずしも期待できないことが示唆される。

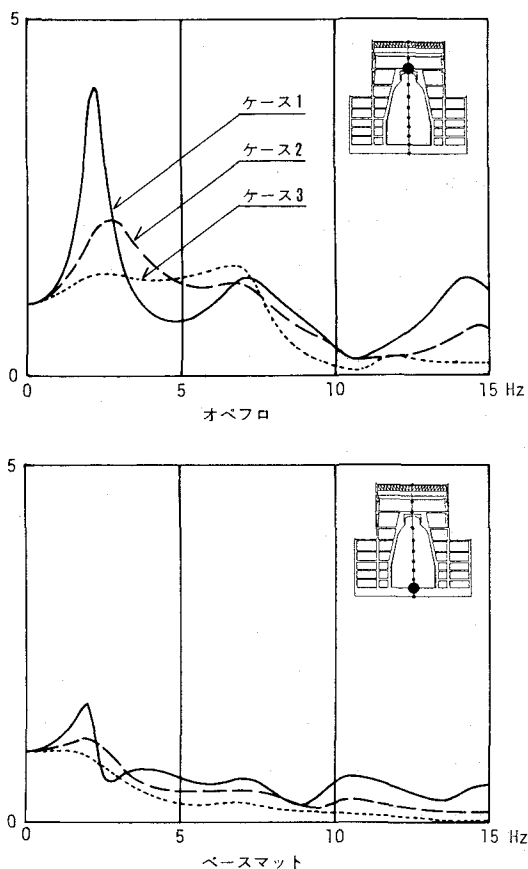


図8 建屋の主要点における自由地表面に対する加速度応答倍率 (埋込み深さの影響)

(b) 最大地震応答量

図-9は想定地震動100 galに対する仮想原子炉建屋各部の最大地震応答量を、(a)最大応答加速度、(b)最大応答せん断力について示したものである。また、表-1および表-2にはそれぞれ、建屋の主な位置における最大応答加速度値と最大応答せん断力係数を示すとともに、埋込み効果を量的に把握するために、ケース1(埋込みなし)に対するケース2およびケース3の最大応答値の比を示した。

これらの図表より以下のことが分かる。

- (i) 最大応答量は埋込み深さの増大とともに減少し、ケース3ではケース1の7割程度の低減となっている。
- (ii) 埋込みの深いケース3の場合でも回転動入力による最大応答値への影響は高振動数成分であるためにあまりみられない。
- (c) 建屋の主要点の床応答波形およびその加速度応答スペクトル

図-10および図-11にオペレイティングフロア位置(a)とベースマット上端(b)位置における床応答波形およびその加速度応答スペクトル(5%)を各解析ケースについて示した。

図-10をみると埋込みの深いケース3ではケース1にくらべ、オペフロでは短周期成分が見立つ波形になっているのに対し、ベースマットでは逆に短周期成分がカットされた波形となっていることが分かる。

また、図-11でこれらの波形のスペクトル特性を見てみると、オペフロ位置では、埋込みなしの場合にみられる明瞭なピークが埋込みの深いケース3ではほとんどないこと、0.15秒～0.3秒程度の周期領域では埋込みによるスペクトル値の低減は必ずしも見られないことが分かる。

§ 5 まとめ

半無限弾性地盤に埋込まれた原子炉建屋のようなマッシブな大規模構造物の地震応答量に及ぼす埋込み効果を究明するための解析法として3次元半無限弾性体のグリーン関数を用いて表現される境界積分方程式をFEM的な離散化手法を用いて代数方程式に変換して解く手法(境界要素法)を用いた地震応答解析法を示した。

この手法により、せん断波速度が500 m/secの地盤に埋込まれた仮想原子炉建屋の地震応答量に及ぼす埋込み効果を剛基礎仮定条件のもとにおいて検討した。

その結果、建屋の最大地震応答量は埋込み深さの増大とともに減少するが、建屋上部における高振動数成分を問題とする場合には必ずしも埋込みによる応答の低減は期待できないことが示唆された。

今後は、剛基礎ばかりでなく柔軟性を考慮した基礎を有する場合における埋込み効果についても検討する必要があるだろう。

参 考 文 献

- 1) Lysmer, J. Tabatabaie-Raissi, M., Tajirian, F., Vahdani, S. Ostadan, F., "SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction," Report No. UCB/GT/B1-02, Geotechnical Engineering, Dept. of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley, April 1981
- 2) Brebbia C.A., "The Boundary Element Method for Engineering", Pentech Press, London, 1978 (邦訳 境界要素法入門, 神谷他訳 培風館)
- 3) Brebbia, C.A., and Chnang, P., "Application of the Boundary Element Method for Solving Elastodynamic Problems," Soil Dynamics & Earthquake Engineering Conference, Southampton, 1982
- 4) 村田豊彰, 高橋元一, 源栄正人, 釜田正毅, "境界要素法による任意形状地盤構造物系の弾性解析(その1～その4)", 日本建築学会大会梗概集, 1982年10月
- 5) 川瀬博, 中井正一, "境界要素法による不整形地盤上の構造物の動的解析", 第28回構造工学シンポジウム, 1982年2月
- 6) 松岡理, 八幡夏恵子, "三次元均質等方弾性体動問題の基本解とその応用(その1)～(その3)", 日本建築学会論文報告集, 昭和55年2月, 7月, 12月

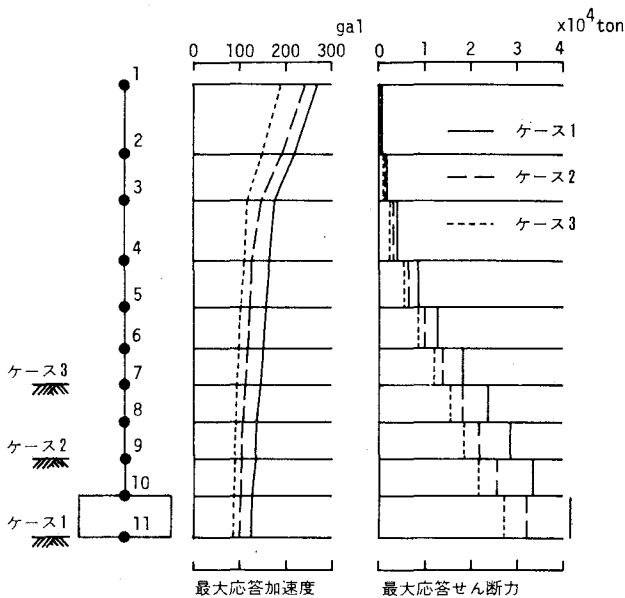


図9 想定地震動100galに対する最大応答量

表1 建屋の主な位置における
最大加速度応答値

		ケース1	ケース2	ケース3
屋階 NO.1	値	267 gal	240 gal	190 gal
	比	1.0	0.90	0.71
オベフロ NO.3	値	176	147	118
	比	1.0	0.84	0.67
ベースマット NO.10	値	127	102	87
	比	1.0	0.80	0.69

表2 建屋の主な位置における
最大応答せん断力係数

		ケース1	ケース2	ケース3
オベフロ	値	0.24	0.21	0.17
	比	1.0	0.88	0.71
ベースマット	値	0.15	0.12	0.10
	比	1.0	0.77	0.65

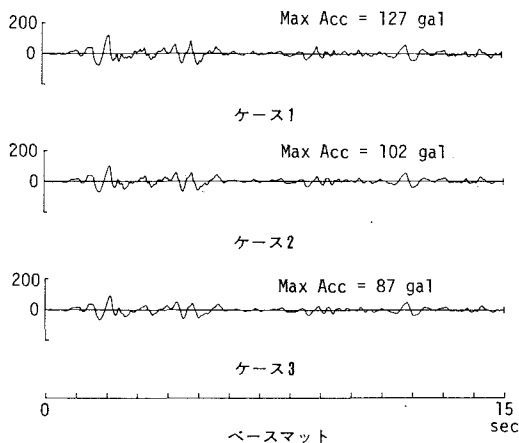
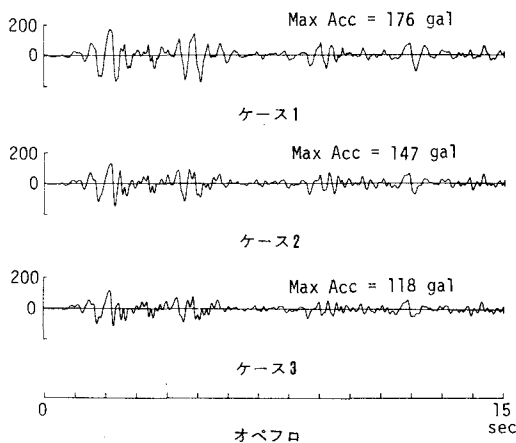


図10 建屋の主要点における床応答波形（埋込み深さの影響）

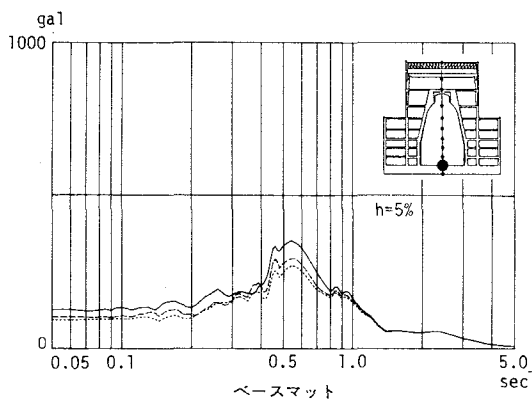
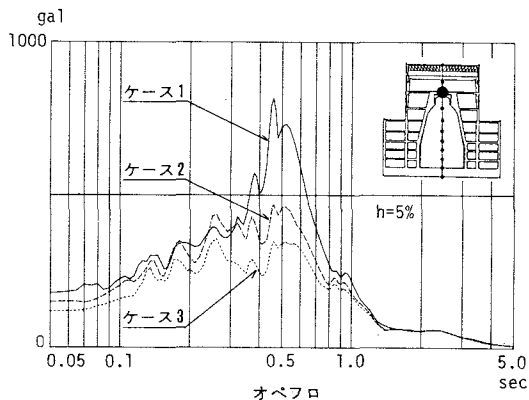


図11 建屋主要点における加速度応答スペクトル（埋込み深さの影響）

ANALYTICAL STUDY ON THE SOIL-STRUCTURE INTERACTION
OF THE EMBEDDED STRUCTURE

K. Muto*1, T. Murata*2, M. Takahashi*2
M. Motosaka*2, M. Kamata*2, A. Amano*3

Purpose

In general the soil-structure interaction has considerable influence on the earthquake response of massive and large structures such as nuclear reactor building. While considerable effort to this problem has been made in the past, analytical difficulties still remain in case of the embedded structure, primarily due to the complex configuration of actual structures when embedded and the three-dimensional semi-infinite nature of the soil medium.

This paper describes an analytical method for the embedment effect which influence on the earthquake response of the embedded structures and analytical results of the earthquake response of the nuclear reactor building with rigid embedded foundation.

Analytical Method

The earthquake response analysis described in this paper is based on a sub-structure approach where the analysis is divided into impedance problem and scattering problem and the authors developed an analytical method as such for these two problems that the boundary integral equations involving Green's function of three-dimensional elastic half-space are transformed into algebraic equations by the discretizing method similar to FEM to obtain the solutions by approximation.

By combining the structure model and the impedance functions obtained from impedance analysis and by the input of the motions obtained from the scattering analysis to the coupled model, the earthquake response analysis of arbitrary shaped embedded structures were made possible.

Analytical Results

In this paper, it was investigated the embedment effect which influence on the earthquake response of the vertical BWR type reactor building embedded into the elastic half-space of which shear velocity is 500 m/sec.

As the results, it was found that quantity of the earthquake response of the structure decrease with the increment of the embedment depth, but it was suggested that the reduction of the response due to embedment is not always expected in such cases that the response characteristics in high frequency range of the upper part of the building are objected.

-
- *1 Professor Emeritus of University of Tokyo, Member of Japan Academy,
Director of Muto Institute of Structural Mechanics, Tokyo, Japan
 - *2 Research Engineer, Muto Institute of Kajima Corporation
 - *3 Kajima Corporation Information Processing Center