実地震記録に基づく基礎入力動評価

EVALUATION OF FOUNDATION INPUT MOTIONS BASED ON OBSERVED SEISMIC WAVES

栗本 修*, 井口道雄**
Osamu KURIMOTO and Michio IGUCHI

Most of experimental studies on soil-structure interaction have been focused on the evaluation of impedance functions that represents the relationship between the dynamic response of rigid foundation and external forces. However, it is important to obtain the foundation input motions as well as the impedance functions in order to evaluate properly the seismic response of soil-structure system. This paper presents an approximate but practical method to evaluate the foundation input motions based on sparsely observed earthquake ground motions. The characteristics of the foundation input motions are also discussed. The comparison between the results obtained by the proposed method and the numerically calculated results shows good coincidence in lower frequencies. The method can be applied to practical purpose to evaluate observationally the foundation input motions for structures before construction.

Keywords : *dynamic soil-structure interaction, embedded foundation, foundation input motion, earthquake observation, axisymmetric finite element method*

動的相互作用, 埋め込み基礎, 基礎入力動, 地震観測, 軸対称有限要素法

1.はじめに

地盤と構造物の動的相互作用問題において基本となる物理量はインピーダンス関数と基礎入力動である。インピーダンス関数および基礎入力動の評価に関して、解析的研究が先行して発展したが、近年、実験精度も向上し解析理論の検証に耐えうる実証的な研究^{1)~3)}も多くなってきた。その多くは起振機を構造物上に設置し強制外力を与える振動実験であり、その結果得られる構造物の応答性状にはおのずから「慣性の相互作用」の特性のみが含まれている。したがって、適切な試験方法を選択すれば比較的容易にインピーダンス関数を実験から抽出することができる。

一方、動的相互作用問題のもう一つの特性である「入力の相互作用」すなわち基礎入力動を評価することは強制振動試験では不可能である。これに対し、地盤-構造

物連成系に外部からの入力である地震波が入射したときの系の応答を観測し、その観測結果から基礎入力動を評価する研究^{4),5)}も行なわれている。しかし、そこで得られる地震応答結果には「慣性の相互作用」と「入力の相互作用」が混在しており、両者を分離して評価するためには、インピーダンス関数を別途評価しておくこと、加えて構造物の慣性力を正確に把握する必要がある。このため、計測点数などの観測システムが大がかりになる。

本研究では、まず、インピーダンス関数は実験または解析によってあらかじめ求められていて既知量であることを前提とし、観測値としては地震時の地盤の変位応答のみから基礎入力動を求める近似評価法を提案し、次に、構造物のない状態で採取された地盤の地震観測記録を用いて、その地盤に構造物を建設した場合に想定される基礎入力動を近似評価法にしたがって求めた。本提案

* 憊大林組技術研究所 工修
** 東京理科大学理工学部 工博

Technical Research Institute, Obayashi Corporation, M. Eng.
Faculty of Science and Engineering, Science University of Tokyo,
Dr. Eng.

手法の特徴は、必要とする地震観測の情報としては地盤の変位のみであり、構造物を含めた地震観測に比べ比較的小さな観測網で基礎入力動を評価することができる点にある。

2. 地盤応答を用いた基礎入力動の評価方法

図-1に示すような埋め込み基礎に対する基礎入力動はLuco⁸⁾による表現を書き直して、次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} \{U^*\} &= [K]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T [Z] \{u^f(\bar{X})\} dS \\ &\quad - [K]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau_n^f(\bar{X})\} dS, \bar{X} \in S \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、

$$\{U^*\} = \{\Delta_x^*, \Delta_y^*, \Delta_z^*, \Phi_x^*, \Phi_y^*, \Phi_z^*\}^T \quad (2-1)$$

$$[A(\bar{X})] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot & z_s & -y_s \\ \cdot & 1 & \cdot & -z_s & \cdot & x_s \\ \cdot & \cdot & 1 & y_s & -x_s & \cdot \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$\{u^f(\bar{X})\} = \begin{Bmatrix} u_x^f(\bar{X}) \\ u_y^f(\bar{X}) \\ u_z^f(\bar{X}) \end{Bmatrix}, \bar{X} \in S \quad (2-3)$$

$$\{\tau_n^f(\bar{X})\} = \begin{Bmatrix} \tau_{nx}^f(\bar{X}) \\ \tau_{ny}^f(\bar{X}) \\ \tau_{nz}^f(\bar{X}) \end{Bmatrix}, \bar{X} \in S \quad (2-4)$$

である。 S は基礎と地盤の接触面を表わし、 $\bar{X}(x_s, y_s, z_s)$ は基礎と地盤との仮想境界面の座標を表わす。また、 $[K]$ は基礎の底面中心に集約されたインピーダンス関数、 $[Z]$ は基礎と地盤の接触面における動的剛性マトリクスであり、次の関係にある。

$$[K] = \int_S [A(\bar{X})]^T [Z] [A(\bar{X})] dS \quad (2-5)$$

また、 u_x^f, u_y^f, u_z^f 、および $\tau_{nx}^f, \tau_{ny}^f, \tau_{nz}^f$ は自由地盤内の境界面上での変位および応力の成分を表す。なお、 τ_n^f は境界面の外部領域に対し、外向きに応力を定義する。

これに対し、筆者の一人⁹⁾はインピーダンス関数が別途求められていることを前提に、(1)式の右辺第一項について基礎位置に相当する自由地盤の変位に平均化操作を施し、基礎入力動の近似評価式として(3)式を導いた。

$$\begin{aligned} \{U^*\} &\approx [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} dS \\ &\quad - [K]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau_n^f(\bar{X})\} dS, \bar{X} \in S \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、

$$[H] = \int_S [A(\bar{X})]^T [A(\bar{X})] dS \quad (4)$$

上式を用いれば、インピーダンス関数を既知として、自由地盤の変位および、応力の情報をもとに基礎入力動を求めることができる。しかしながら、実際の地震観測において地盤中の応力を精度良く計測することは困難である。そこで、以下では、(3)式を変形し、観測値として

図-1 座標軸および仮想境界面

は自由地盤の変位のみによる基礎入力動の評価式を導出する。

まず、(3)式の右辺第2項の積分を次のようにおく。

$$\{T^f\} = \int_S [A(\bar{X})]^T \{\tau_n^f(\bar{X})\} dS, \bar{X} \in S \quad (5)$$

(5)式において

$$\{T^f\} = \{F_x^f, F_y^f, F_z^f, M_x^f, M_y^f, M_z^f\}^T$$

と成分表示すれば、 F_x^f, F_y^f, F_z^f は地震動入射によって自由地盤内に生じる応力の座標軸方向の合力、 M_x^f, M_y^f, M_z^f は各座標軸に関する合モーメントを表している。(2-2)、(2-4)式を(5)式に代入して、合力および合モーメントの表現式に分離すれば次のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} F_x^f(\bar{X}) \\ F_y^f(\bar{X}) \\ F_z^f(\bar{X}) \end{Bmatrix} &= \int_S \begin{Bmatrix} \tau_{nx}^f(\bar{X}) \\ \tau_{ny}^f(\bar{X}) \\ \tau_{nz}^f(\bar{X}) \end{Bmatrix} dS, \bar{X} \in S \quad (6) \\ \begin{Bmatrix} M_x^f(\bar{X}) \\ M_y^f(\bar{X}) \\ M_z^f(\bar{X}) \end{Bmatrix} &= \int_S \begin{bmatrix} \cdot & -z_s & y_s \\ z_s & \cdot & -x_s \\ -y_s & x_s & \cdot \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tau_{nx}^f(\bar{X}) \\ \tau_{ny}^f(\bar{X}) \\ \tau_{nz}^f(\bar{X}) \end{Bmatrix} dS, \bar{X} \in S \end{aligned} \quad (7)$$

$F_x^f, F_y^f, F_z^f, M_x^f, M_y^f, M_z^f$ は地盤内の仮想境界の外側領域に作用する応力の合力、合モーメントを表わすことに留意すれば、運動量および角運動量の平衡法則^{10),11)}より、(6)、(7)式は次のように書ける。

$$\begin{Bmatrix} F_x^f \\ F_y^f \\ F_z^f \end{Bmatrix} = - \int_V \rho \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x^f(X) \\ \ddot{u}_y^f(X) \\ \ddot{u}_z^f(X) \end{Bmatrix} dV, X \in V \quad (8)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x^f \\ M_y^f \\ M_z^f \end{Bmatrix} = - \int_V \rho \begin{bmatrix} \cdot & -z & y \\ z & \cdot & -x \\ -y & x & \cdot \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x^f(X) \\ \ddot{u}_y^f(X) \\ \ddot{u}_z^f(X) \end{Bmatrix} dV, X \in V \quad (9)$$

ここで、 $\ddot{u}_x^f, \ddot{u}_y^f, \ddot{u}_z^f$ は自由地盤内での加速度成分、 V は仮想境界面で囲まれた領域、 x, y, z は領域 V 内の座標、 ρ は質量をそれぞれ表わす。

時間に関して調和振動を仮定すれば、(8)、(9)式は次の

ように書き直すことができる。

$$\begin{Bmatrix} F_x^f \\ F_y^f \\ F_z^f \end{Bmatrix} = \omega^2 \int_V \rho(X) \begin{Bmatrix} u_x^f(X) \\ u_y^f(X) \\ u_z^f(X) \end{Bmatrix} dV, X \in V \dots\dots\dots(10)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x^f \\ M_y^f \\ M_z^f \end{Bmatrix} = \omega^2 \int_V \rho(X) \begin{bmatrix} \cdot & -z & y \\ z & \cdot & -x \\ -y & x & \cdot \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x^f(X) \\ u_y^f(X) \\ u_z^f(X) \end{Bmatrix} dV, X \in V \dots\dots\dots(11)$$

(10), (11)式を(5)式に代入すれば,

$$\{T^f\} = \omega^2 \int_V \rho(X) [A(X)]^T \{u^f(X)\} dV, X \in V \dots\dots\dots(12)$$

したがって, (3)式は次式となる。

$$\begin{aligned} \{U^*\} &= [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} dS \\ &\quad - \omega^2 [K]^{-1} \int_V \rho(X) [A(X)]^T \{u^f(X)\} dV, \bar{X} \in S, X \in V \end{aligned} \dots\dots\dots(13)$$

図-3 観測地点の加速度波形 (単位:gal)

(13)式はインピーダンス関数を別途求めておけば, 自由地盤内の変位のみの情報を利用して基礎入力動を算定することができ, (3)式に比べより実用的といえる。

(すべてx(NS),y(EW),z(UD)の3成分を記録)

図-2 地震観測位置

3. 地盤系の地震観測

3.1 地震観測の概要^{12),13)}

図-2に示すように、 x (NS), y (EW), z (UD)の3成分の地震動を地盤内の三角格子上の6点およびG.L.-13mの深い位置に設置された地震計により観測している。地震計が埋設されている地盤はローム(せん断波速度90~125m/sec), 砂岩(せん断波速度220~280m/sec)および角礫岩(せん断波速度290~1200m/sec.)よりなる成層地盤を

掘削し、山砂で埋め戻された(せん断波速度が130m/secになるように埋め戻しの施工管理されている)地盤である。

本研究で使用した各観測点における観測地震の波形を図-3に示す。この地震のマグニチュードはM6.5, 震源深さは90km, 震央距離は54kmである。また、地表面での最大加速度は水平 x 方向で約75gal, 水平 y 方向で約50gal, 上下方向で約30galである。

図-4には地表面の観測点でのフーリエスペクトルを示す。各スペクトルにはバンド幅0.1HzのParzen Windowをかけてある。主要動が卓越する方向と思われる水平 x 方向成分では平面的な位置の異なる3点のスペクトル形状がほぼそろっているが、水平 y 方向成分ではK112点が他の2点と振幅が山となる5~7Hzの範囲でかなり異なっている。上下方向成分についても3点の応答がそろっており、S波が鉛直入射したと考えられる。

3.2 地盤応答のシミュレーション解析

まず、観測地点における地盤の地震時応答性状を把握するため、S波の鉛直入射を仮定し、軸対称FEMを用いて地盤応答のシミュレーション解析を行なった。

(1) 解析モデルおよび解析地盤定数

観測地点および周辺の地表面の状況を考慮して、解析モデルを図-5のように設定した。その際、掘削、埋め戻しの平面形状は矩形であるが軸対称FEMでは面積等価な円形に置換して解析した。

観測地点で行ったボーリング調査により地質とその地層構成はほぼ成層であることがわかっている。埋め戻し前後の弾性波探査とボーリング孔を利用して行ったPS検層結果をもとに表-1~表-2に示す地盤定数を解析に用いた。表中の番号は図-5に示す要素、地層に対応している。なお、掘削の際に地盤を乱したおそれがあることと根伐り底での弾性波探査結果から、表-1に示すように⑧のS波速度と密度の値は⑤より小さく設定した。

(2) 伝達関数

図-6に観測記録と解析結果の比較を示す。観測記録においては、G.L.-13mの位置の記録(K000)を基準とした観測点K212の伝達関数を示し、解析においては観測点に対応する節点応答から伝達関数を求めた。ボーリング調査結果に基づいて、根伐り底の⑧を除いて、他をそのままモデル化したCASE-Aによる解析結果はおおむね観測との対応が良いが、6.5Hz付近のピーク振幅がやや小さい。埋め戻し土のせん断波速度と密度から6.5Hzのピークは埋め戻し土の1次共振振動数と推測される。周辺地盤の最上層は風化した表土であることを考慮して、密度を小さめに変更したCASE-Bでは周波数特性はあまり変化しないがピーク振幅はより観測結果に近いものとなった。これは周辺地盤がその質量により、埋め戻し部分の震動を拘束しているためと考えられる。

図-4 観測地震のフーリエスペクトル

表-1 地盤定数(CASE-A)

番号	密度 γ (tf/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	ポアソン比 ν	減衰定数 $h(\%)$	層厚 H (m)
①	1.7	90	0.350	5	1.0
②	1.7	125	0.395	5	1.5
③	1.8	220	0.352	5	1.5
④	1.9	280	0.206	5	1.0
⑤	1.9	280	0.206	5	3.1
⑥	1.9	440	0.328	3	4.7
⑦	2.1	1080	0.412	3	23.4
⑧	1.8	180	0.355	5	0.6
⑪	1.7	110	0.3	5	1.0
⑫	1.7	120	0.3	5	1.0
⑬	1.7	130	0.3	5	1.0
⑭	1.8	140	0.3	5	1.0
⑮	1.8	150	0.3	5	1.0

表-2 地盤定数(CASE-B)

番号	密度 γ (tf/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	ポアソン比 ν	減衰定数 $h(\%)$	層厚 H (m)
①	1.3	90	0.350	5	1.0

(他の地盤定数は表-1に同じ)

4. 地震観測記録を用いた基礎入力動の検討

4.1 地盤内の変位分布の表現

(13)式を用いて基礎入力動を算定する場合、自由地盤の仮想領域 V および仮想境界 S 上での地震動の変位分布を求める必要がある。

本研究で対象としている地盤では数点での観測記録があるので、それらを代表点として地盤内部の変位分布を表現する。

図-2に示したように、地盤内の三角格子上の6点において地震動の x, y, z の3方向の変位成分を観測している。まず、図中の○印で示す仮想点における変位が次のように表わされると仮定する。

$$\begin{cases} u_{221}^f = C_1 u_{211}^f + C_2 u_{111}^f + C_3 u_{121}^f \\ u_{222}^f = C_1 u_{212}^f + C_2 u_{112}^f + C_3 u_{122}^f \end{cases} \quad \dots\dots\dots (14)$$

(14)式における係数 C_i ($i=1\sim 3$)は同一深さにおける3観測点 $K111, K211, K121$ から $K221$ 、観測点 $K112, K212, K122$ から $K222$ の変位をそれぞれ推定するための係数であり、次のような場合が想定できる。

$$\textcircled{1} C_1 = C_2 = C_3 = 1/3$$

3観測点の平均値が仮想点を加えた4点の平均値に等しいとした場合。

図-5 軸対称FEMの解析モデル

(a) x方向水平成分

(b) y方向水平成分

図-6 地盤の伝達関数の比較

② $C_1=C_3=1$, $C_2=-1$

対角位置にある2点の平均値が互いに等しいとした場合。これはまた、3観測点での変位から構成される平面上に仮想点での変位がのるとした場合に相当する。

③ $C_1=C_3=1/2$, $C_2=0$

仮想点K221に隣接する2点(K211,K121)の平均値が仮想点の変位に等しいとした場合。

もし、各観測点での地盤条件が同じで、地震動が鉛直入射するものとすれば上記のいずれも同一の結果を与える。本論では②の場合について結果を示したが、①、③の場合についても別途、検討を行ない基礎入力動の特性はほとんど変わらないことを確認してある。

上記の仮想点を含めた地盤内の格子点上の8点から、地盤内の点 (x,y,z) の地震動による変位を次式で表現する。

$$\{u^f(x,y,z)\} = \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \{u_{ijk}^f\} \Lambda_{ijk}(x,y,z) \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $\Lambda_{ijk}(x,y,z)$ は内挿関数で、 x,y,z それぞれの関数の積の形で表わすことにする。すなわち、

$$\Lambda_{ijk}(x,y,z) = \phi_{xi}(x) \cdot \phi_{yj}(y) \cdot \phi_{zk}(z) \dots\dots\dots (16)$$

また、 $\phi_{xi}(x) \cdot \phi_{yj}(y) \cdot \phi_{zk}(z)$ は

$$\begin{cases} \phi_{x1}(x) = \frac{x-x_2}{x_1-x_2}, \phi_{x2}(x) = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \\ \phi_{y1}(y) = \frac{y-y_2}{y_1-y_2}, \phi_{y2}(y) = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} \\ \phi_{z1}(z) = \frac{z-z_2}{z_1-z_2}, \phi_{z2}(z) = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \end{cases} \dots\dots\dots (17)$$

のように与えられる。ここで、 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ はそれぞれ観測点の座標を表わし、たとえば、観測点K212の座標は (x_2, y_1, z_2) というように観測点を表わす数値をその点の座標と対応させている。

(15)式を(13)式に代入すれば、観測記録を用いて基礎入力動を求めることができる。

4.2 基礎入力動の検討

本節では、観測地点に図-7に示すような無質量剛基礎を想定し、その基礎入力動を求める。基礎形状は一辺が8mの正方形で、埋め込み深さは埋め戻し土の厚さと同じ5mとした。

(1) インピーダンス関数

2章で述べた地盤応答の観測記録を用いて基礎入力動を算定するにはインピーダンス関数が既知であることを前提としている。観測地点においては、地震観測以外の加振試験等を行っていないので実験的にインピーダンス関数を求めることができない。そこで、本研究では軸対称FEMを用いてインピーダンス関数を求め、これを利用することとした。

インピーダンス解析のモデルは図-8に示すように、3章で行った地盤の伝達関数のシミュレーション解析に用

いたモデルに埋め込み基礎を想定し、地盤の代わりに無質量剛基礎を付加してある。解析ケースは表-1、表-2の地盤定数に対するCASE-AおよびCASE-Bである。図-9にインピーダンス関数の水平成分、回転成分および水平-回転連成成分を示す。

インピーダンス関数について、CASE-A、CASE-Bの両解析ケースの差異は小さく、水平、回転およびその連成成分のいずれも20Hzにいたるまでほぼ同等の振動数特性を示している。インピーダンス解析では基礎のごく近傍の地盤の影響が大きいため、一部周辺地盤の密度が異なるだけの両解析ケースでは当然の結果といえる。

図-7 想定した基礎と周辺地盤の関係

図-8 インピーダンス解析モデル

(2)基礎入力動

観測記録から基礎入力動を求める際に必要となるインピーダンス関数は、CASE-Aの地盤定数について軸対称FEMを用いて計算した結果を利用した。

図-9に観測記録から算定された基礎入力動を軸対称FEMによる解析結果と比較して示す。ただし、観測記録による結果は(15)式により推定される図-7に○印で示す点での地盤応答を用いて基準化してある。軸対称FEMではインピーダンス解析と同一のモデルを用いて無質量剛基礎の地震時応答を求め、先に行なった地盤のみの地震

図-9 軸対称FEMによるインピーダンス関数

時応答を用いて基準化してある。

まず、観測記録より得られた基礎入力動について検討する。x方向に関しては、水平成分では10Hzあたりまで振幅が減少し、その後増加している。回転成分では、振動数の増加とともに振幅が大きくなる傾向が明瞭に現われている。これらは埋め込み基礎の入力動として現われる特性であり、既往の研究結果^{14),15)}とも整合する。水平y方向に関してもx方向とほぼ同様の傾向が読み取れる。これは、xおよびy方向の成分波形が、同一種類で同一方向からの入射地震波によるものであることを暗示している。

次に、軸対称FEMによる解析結果と比較してみると、観測値に比べ解析の方が、水平成分の振幅の落ちる振動数が低くなっていることや観測値で谷となる10Hzで解析値が盛り上がるなど若干、傾向が異なっている。この差異は軸対称FEM解析では地盤掘削形状を円形とし、さらに基礎は円筒形を想定することとなり観測結果の想定と異なること、観測値に基づく基礎入力動の結果にも以下に述べるような精度上の問題があることが理由と考えられる。すなわち、本論文で用いた地震観測網では観測点が少ないため、(15)~(17)式に示すように地盤内の変位分布を1次関数で近似せざるを得なかった。したがって、高次モードの地盤震動による基礎入力動への寄与分を無視することになっており、特に、高振動数域ではその影響が大きく現われたものと思われる。

しかしながら、解析による振幅の絶対値、振動数に対する変化の傾向は水平、回転成分とも、おおむね観測記録より求めた特性に対応している。

5.まとめ

本論文では、インピーダンス関数については実験または解析によってあらかじめ求められていて既知量であることを前提とし、構造物に対する基礎入力動を観測値としては地盤の変位観測記録のみを用いて評価する近似手法を提案した。また、実地震記録から埋め込み基礎の入力動を算定し、従来、解析的に指摘されていた有効入力動の特性を確認した。

さらに、本研究の特徴は次のようにまとめることができる。剛基礎の入力動を実証的に求める方法としては、インピーダンス関数を既知として、地盤-構造物連成系の地震時に観測された基礎の変位および基礎を含む上部構造物の慣性力をもとに評価する方法がある。この方法は地震観測から現存する構造物に対する基礎入力動を評価することができるという利点を持つが、地盤と構造物の系全体の大規模な地震観測が必要となる。これに対し、本提案手法はインピーダンス関数を既知とする前提条件は同様であるが、構造物を含まない自由地盤系のみ

図-10 基礎入力動の比較

の小規模な観測結果をもとに基礎入力動を推定できる。また、建設予定地において地震計を地盤中に設置し、得られた観測記録から構造物への入力動を建物の建設前に推定でき、実設計面への応用も可能と考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、(株)大林組技術研究所・角田智彦博士には多くの面から支援していただいた。ここに、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 井口道雄他, "大型模型による原子炉建屋と地盤の動的相互作用試験 (その19)基礎単独試験結果の検討(共振・位相曲線, 動的地盤ばね)", pp.261 - 262, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987
- 2) 大塚康弘他, "原子炉建屋の埋込み震動効果試験・実地盤上試験 (その3)共振・位相曲線と動的地盤ばね(A1,A2,A3試験)", pp.1069 - 1070, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1989
- 3) 宮本裕司他, "原子炉建屋の埋込み震動効果試験・実地盤上試験 (その8)共振・位相曲線と動的地盤ばね(B1,B2,B3試験)", pp.1385 - 1386, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990
- 4) 犬飼幸幸他, "原子炉建屋の埋込み震動効果試験・実地盤上試験 (その11)共振・位相曲線と動的地盤ばね(D1,D2試験)", pp.1391 - 1392, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990
- 5) 藤森健史他, "原子炉建屋の埋込み震動効果試験・実地盤上試験 (その14)共振・位相曲線と動的地盤ばね(C1,C2,C3試験)", pp.1493 - 1494, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1992
- 6) 福岡篤信他, "杭支持高層建物の地震時挙動 - (その2) 相互作用効果の検討と建物応答解析 -", pp.561 - 562, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1994
- 7) 藤森健史他, "地震時土圧波形による建築構造物への入力地震動評価法に関する検討", pp.627 - 628, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1994
- 8) Luco, J., E., "On the Relation between Radiation and Scattering Problems for Foundations Embedded in an Elastic Half-space", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 5, pp.97 - 101, 1986
- 9) Iguchi, M., "An Approximate Analysis of Input Motions for Rigid Embedded Foundations", Trans. of A. I. J., No. 315, pp. 61 - 75, 1982
- 10) Mal, A. K. and Singh, S., J., "Deformation of Elastic Solid", Prentice Hall, p.99, 1991
- 11) 大橋義夫他訳, "固体の力学/理論", pp.60 - 62, 培風館
- 12) Fujimori, T. et al., "Seismic Responses of Embedded Structures (Embedment Effect Tests on Soil-structure Interaction)", Proc. 12th SMIRT, Vol. K1, pp.55 - 60, 1993
- 13) Kurimoto, O. et al., "Input Motions for Rigid Foundations to Observed Seismic Waves", Proc. 13th SMIRT (Submitted)
- 14) Wong, H., L. and Luco, J., E., "Dynamic Response of Rectangular Foundations to Obliquely Incident Seismic Waves", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 6, pp.3 - 16, 1978
- 15) Luco, J., E. and Wong, H., L., "Seismic Response of Foundations Embedded in a Layered Half-space", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 15, pp.233 - 247, 1987

(1994年10月7日原稿受理, 1995年4月25日採用決定)