

成層地盤中に埋込まれた複数基礎の動的相互作用解析

三 田 彰
(大崎研究室)
吉 田 一 博
(大崎研究室)
井 上 弘 行
(原子力本部)

§ 1. はじめに

原子力発電所プラント等では、配置計画上の理由から大型構造物が隣接して建てられることが多い。また、個々の構造物は地中にある程度埋込まれているのが普通である。そうした構造物同士が、ごく近接して建設されると個々の構造物が地盤と連成する効果ばかりでなく、隣接する構造物同士の応答が間の地盤を介してお互いの構造物の応答に影響を及ぼすといったことが生じてくる。

埋込みのある構造物と地盤との相互作用効果についてのこれまでの解析的な研究例としては、次のようなものが挙げられる。まず、二次元の面外振動問題として取り扱ったものとして、Luco and Contesser¹⁾ が半円筒形の二つの基礎について、Wong²⁾、Wong and Trifunac³⁾ が同じく二つおよびそれ以上の基礎について、Murakami and Luco⁴⁾ が無限に続く基礎列について解析を行なっている。同じ二次元面外振動問題で、矩形の断面形状を持つ二つの基礎についての解析は川瀬、中井⁵⁾、Mita and Luco⁶⁾ などが挙げられる。二次元平面ひずみ問題として取り扱った例としては Lysmer *et al.*⁷⁾、Liang⁸⁾ が有限要素法を用いて、Nakai and Fukuwa⁹⁾ が境界積分方程式法を用いて検討したものがある。三次元の二つの埋込み基礎についての解析としては市川¹⁰⁾、Lin *et al.*¹¹⁾ の有限要素法と薄層要素法を結合した解析手法によるもの、Yoshida and Kawase¹²⁾ の境界要素法によるものが挙げられる。

こうした複数基礎の動的相互作用効果の基本的な特性

は、基礎に加わる力と生ずる変位との関係を示すインピーダンス関数と、基礎に入力する地震力の特性を示す有効入力動を求めることによって明らかにすることができる。本研究では、新たに開発した境界積分方程式法と有限要素法を結合した解析手法の定式化について述べ、次に3層からなる成層地盤中に埋込まれた単独基礎、二つの基礎および三つの基礎の場合について解析を行なってこれらの諸量を求め、複数基礎の相互作用効果についての検討を行なう。

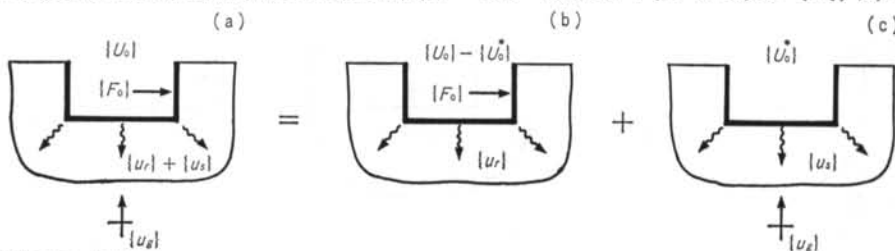
ここで用いる解析手法は、基本的には間接境界積分方程式法に基づくものであるが、通常の間接境界積分方程式法では半無限地盤中の変位および応力のグリーン関数を必要とするのに対し、本手法は有限要素法を用いることによって応力のグリーン関数を必要としない。また、インピーダンス関数と有効入力動が同じ原理に基づいて求められることも特徴といえる。

§ 2. 本解析手法の定式化

図一に示すように、外力 $\{F_0\}$ および地震入力 $\{u_g\}$ が無質量の基礎に作用するとき、基礎の応答は次式のように書くことができる。

$$\{F_0\} = [K][\{U_0\} - \{U_0^*\}] \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $\{F_0\}$ は基礎に加わる一般化力を示し、 $\{U_0\}$ は基礎の一般化変位応答、 $[K]$ は力と変位の関係を示すインピーダンスマトリクスである。 $\{U_0^*\}$ は、外力が無い



図一 1 逸散問題と散乱問題

場合の基礎の地震入力に対する応答(有効入力動)を示す。したがって、基礎の応答はインピーダンスマトリクス $[K]$ と有効入力動 $\{U_0^*\}$ が求まれば決定できることになる。さらに、 $[K]$ と $\{U_0^*\}$ が既知であれば基礎の質量や上部構造物がある場合でも、サブストラクチャー法を用いて容易にその応答を求めることができる。なお、上式では円振動数 ω での定常応答を示す時間項 $e^{i\omega t}$ は省略されている。以下の定式化においても、簡単のために $e^{i\omega t}$ を省略する。地震入力はインピーダンスマトリクスを介して求まる等価な外力

$$\{F_0^*\} = [K]\{U_0^*\} \quad \dots\dots(2)$$

すなわち、ドライビングフォースで評価することもできる。この力は地震入力がある場合に基礎を静止させておくのに必要な力を意味する。動的相互作用問題のうち、特にインピーダンスマトリクスを求める問題(図-1(b))を逸散問題、有効入力動 $\{U_0^*\}$ あるいはドライビングフォース $\{F_0^*\}$ を求める問題(図-1(c))を散乱問題と呼ぶことにする。図-1中の $\{u_r\}$ は逸散波を、 $\{u_s\}$ は散乱波を意味する。以下に、本研究で用いた解析手法の定式化について述べる。

2.1 単独基礎の場合

図-2に示すようなシステムを考える。 S_e は基礎と地盤の境界となる面、 S_s はその内部の仮想境界面である。また、 S_0 は地表面、 S_∞ は無限遠の境界を示す。 S_e の外側の地盤領域を V_{II} 、内側の地盤領域を V_I とすれば、図-2(a)のシステムは同図(b)、(c)のように分割することができる。

半無限地盤中の S_s に分布力 $\{f(\mathbf{y})\}$ が存在すると、地盤中の任意点における変位は下の式で表わされる。

$$\{u(\mathbf{x})\} = \int_{S_s} [G(\mathbf{x}; \mathbf{y})] \{f(\mathbf{y})\} dS(\mathbf{y}) \quad \dots\dots(3)$$

上式において、 3×1 のベクトル $\{u(\mathbf{x})\}$ は \mathbf{x} における変位の3成分、 3×3 のマトリクス $[G(\mathbf{x}; \mathbf{y})]$ は $\mathbf{y} \in S_s$ における点加振力によって生ずる \mathbf{x} での変位を与えるグリーン関数である。 3×1 のベクトル $\{f(\mathbf{y})\}$ は $\mathbf{y} \in S_s$ に分布する物体力を表わす。同様に、 $\mathbf{x} \in S_e$ における 3×1 の表面

力ベクトル $\{T^v(\mathbf{x})\}$ は下式で表わされる。

$$\{T^v(\mathbf{x})\} = \int_{S_e} [H(\mathbf{x}; \mathbf{y})] \{f(\mathbf{y})\} dS(\mathbf{y}) \quad \dots\dots(4)$$

3×3 のマトリクス $[H(\mathbf{x}; \mathbf{y})]$ は $\mathbf{y} \in S_e$ における点加振力によって生ずる $\mathbf{x} \in S_e$ における表面力を与える応力のグリーン関数である。基礎が剛体の場合には、基礎表面の点 $\mathbf{x} \in S_e$ における変位ベクトル $\{u(\mathbf{x})\}$ を次のように書くことができる。

$$\{u(\mathbf{x})\} = [a(\mathbf{x})] \{U_0\} \quad \dots\dots(5)$$

上式で、 $\{U_0\} = (\Delta_{0x}, \Delta_{0y}, \Delta_{0z}, a\theta_{0x}, a\theta_{0y}, a\theta_{0z})^T$ は基準点 $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ で定義される6成分の剛体変位を表わす一般化変位ベクトルである。 3×6 の剛体モードマトリクス $[a(\mathbf{x})]$ は単位の剛体変位を規定するもので、

$$[a(\mathbf{x})] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (x-z_0)/a & -(y-y_0)/a \\ 0 & 1 & 0 & -(x-z_0)/a & 0 & (x-x_0)/a \\ 0 & 0 & 1 & (y-y_0)/a & -(x-x_0)/a & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

と書ける。式(5)で与えられる変位分布を境界条件として式(3)を解けば、物体力 $\{f(\mathbf{y})\}$ は次の形に書くことができる。

$$\{f(\mathbf{y})\} = [A(\mathbf{y})] \{U_0\}, \quad \mathbf{y} \in S_s \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 $[A(\mathbf{y})]$ は 3×6 のマトリクスで、単位の剛体変位を生じさせるのに必要な物体力 $\{f(\mathbf{y})\}$ の S_s 上での分布である。つまり、 $[A(\mathbf{y})]$ は次式を解くことによって求められる。

$$\int_{S_s} [G(\mathbf{x}; \mathbf{y})] [A(\mathbf{y})] dS(\mathbf{y}) = [a(\mathbf{x})], \quad \mathbf{x} \in S_e \quad \dots\dots(8)$$

$[A(\mathbf{y})]$ が求まると、入射場 $\{u_\theta(\mathbf{y})\} = (u_{\theta x}(\mathbf{y}), u_{\theta y}(\mathbf{y}), u_{\theta z}(\mathbf{y}))^T$ がある場合に基礎を静止させておくのに必要な力、すなわちドライビングフォース $\{F_0^*\} = (F_{0x}^*, F_{0y}^*, F_{0z}^*, M_{0x}^*/a, M_{0y}^*/a, M_{0z}^*/a)^T$ は下式から求められる(Luco and Wong¹³⁾。

$$\{F_0^*\} = \int_{S_s} [A(\mathbf{y})]^T \{u_\theta(\mathbf{y})\} dS(\mathbf{y}) \quad \dots\dots(9)$$

6×6 のインピーダンスマトリクス $[K]$ は、通常の間接境界積分方程式では式(4)から基礎に対する反力を算出することによって求めるが、ここでは式(9)をインピーダン

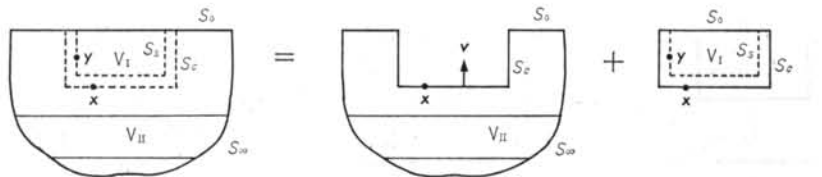


図-2 (a) 切欠きの無い半無限成層地盤 (b) 切欠かれた半無限成層地盤 (c) 切欠かれた内部地盤領域

マトリクスを求める際にも応用し、異なる方法で求める。すなわち、半無限成層地盤中の S_0 上で、式(5)で表わされるような剛体モードを満足するような入射波場があるとすると、基礎を固定するのに必要な力 $\{F_0^i\}$ は次式で与えられる。

$$\{F_0^i\} = \int_{S_0} [A(\mathbf{y})]^T [\beta(\mathbf{y})] \{U_0\} dS(\mathbf{y}) \quad \dots\dots(10)$$

ここで、 $\{\beta(\mathbf{y})\}$ は S_0 において $[\alpha(\mathbf{x})]$ の剛体モードを満足させるように切欠きの無い地盤が振動するとき、 S_0 上に生ずる変位場を表わす。 $\{\beta(\mathbf{y})\}$ は、 S_0 および S_c 上での境界条件が規定されるため、 V_1 領域のみを使って求めることができる。 $\{F_0^i\}$ は、基礎を単位の振幅で振動させるのに必要な力 $\{F_0\} = (F_{0z}, F_{0y}, F_{0x}, M_{0z}/a, M_{0y}/a, M_{0x}/a)^T$ と内部領域 V_1 による慣性効果によって生ずる力と方向が反対で絶対値の等しいものとなる。したがって、

$$\begin{aligned} \{F_0^i\} &= \{F_0\} \\ &+ \int_{S_c} \int_{S_0} [\alpha(\mathbf{x})]^T [\gamma(\mathbf{x}; \mathbf{z})] [\alpha(\mathbf{z})] \{U_0\} dS(\mathbf{x}) dS(\mathbf{z}) \quad \dots\dots(11) \end{aligned}$$

なる関係がある。上式で、 3×3 のマトリクス $[\gamma(\mathbf{x}; \mathbf{z})]$ は図-2の(c)に示す内部領域の $z \in S_0$ において表面が単位の振幅で振動し、他の部分が静止しているとき $x \in S_c$ に加えるべき力を表わす。したがって、基礎の一般化変位 $\{U_0\}$ と一般化力 $\{F_0\}$ は次のように関係付けられる。

$$\begin{aligned} \{F_0\} &= \int_{S_0} [A(\mathbf{y})]^T [\beta(\mathbf{y})] \{U_0\} dS(\mathbf{y}) \\ &- \int_{S_c} \int_{S_0} [\alpha(\mathbf{x})]^T [\gamma(\mathbf{x}; \mathbf{z})] [\alpha(\mathbf{z})] \{U_0\} dS(\mathbf{x}) dS(\mathbf{z}) \quad \dots\dots(12) \end{aligned}$$

以上より、インピーダンスマトリクス $[K]$ は次式で求められる。

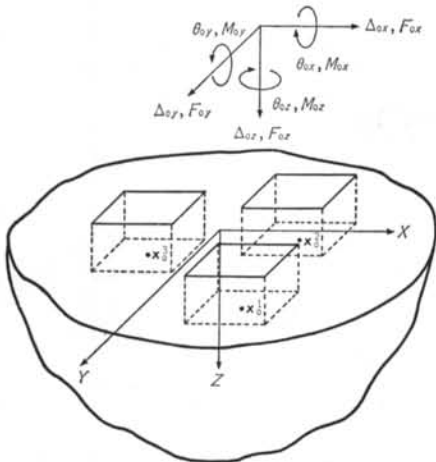


図-3 座標系と剛体変位成分の定義

$$\begin{aligned} [K] &= \int_{S_0} [A(\mathbf{y})]^T [\beta(\mathbf{y})] dS(\mathbf{y}) \\ &- \int_{S_c} \int_{S_0} [\alpha(\mathbf{x})]^T [\gamma(\mathbf{x}; \mathbf{z})] [\alpha(\mathbf{z})] dS(\mathbf{x}) dS(\mathbf{z}) \quad \dots\dots(13) \end{aligned}$$

式(11)~(13)中の $[\beta(\mathbf{y})]$ および $[\gamma(\mathbf{x}; \mathbf{z})]$ は、図-2(c)に示される内部領域 V_1 の境界 S_c 上で剛体モードの振動を変位境界条件として、 S_0 上で応力がゼロの境界条件下で解けば求まるものである。本研究では、この $[\beta(\mathbf{y})]$ および $[\gamma(\mathbf{x}; \mathbf{z})]$ を求めるのに有限要素法を用いている。有効入力動は、式(9)と式(13)から求めるドライビングフォースとインピーダンスマトリクスを式(2)に代入して求めることができる。

2.2 複数基礎の場合

上に示した定式化は単独基礎の場合であるが、 N 個の基礎が存在する場合には一般化力 $\{F_0\}$ および一般変位 $\{U_0\}$ を次のように書き換える必要がある。

$$\{F_0\} = (\{F_0^1\}^T, \{F_0^2\}^T, \dots, \{F_0^N\}^T)^T \quad \dots\dots(14)$$

$$\{U_0\} = (\{U_0^1\}^T, \{U_0^2\}^T, \dots, \{U_0^N\}^T)^T \quad \dots\dots(15)$$

$6N \times 1$ のベクトル $\{F_0\}$ および $\{U_0\}$ の部分ベクトル $\{F_0^p\}$ および $\{U_0^p\}$ は、それぞれ次式で与えられる。

$$\{F_0^p\} = (F_{0z}^p, F_{0y}^p, F_{0x}^p, M_{0z}^p/a, M_{0y}^p/a, M_{0x}^p/a)^T \quad (16)$$

$$\{U_0^p\} = (d_{0z}^p, d_{0y}^p, d_{0x}^p, a\theta_{0z}^p, a\theta_{0y}^p, a\theta_{0x}^p)^T \quad \dots\dots(17)$$

これらの部分ベクトルは、 p 番目の基礎に関する一般化力と一般化変位を意味する。 $6N \times 6N$ のインピーダンスマトリクスは 6×6 の部分マトリクス $[K^{pq}]$ から構成され、その部分マトリクスは下式で求められる。

$$\begin{aligned} [K^{pq}] &= \int_{S_0^p} [A^{pq}(\mathbf{y})]^T [\beta^p(\mathbf{y})] dS(\mathbf{y}) \\ &- \delta_{pq} \int_{S_c^p} \int_{S_0^q} [\alpha^p(\mathbf{x})]^T [\gamma^{pq}(\mathbf{x}; \mathbf{z})] [\alpha^q(\mathbf{z})] dS(\mathbf{x}) dS(\mathbf{z}) \quad \dots\dots(18) \end{aligned}$$

上式において δ_{pq} はクロネッカーのデルタ関数であり、 $p=q$ のときには1、その他の場合には0となる関数である。また、 p 番目の基礎の剛体振動を定義する 3×6 の部分マトリクス $[\alpha^p]$ は次式で定義される。

$$\begin{aligned} [\alpha^p(\mathbf{x})] &= \\ &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (z-z_0^p)/a & -(y-y_0^p)/a \\ 0 & 1 & 0 & -(z-z_0^p)/a & 0 & (x-x_0^p)/a \\ 0 & 0 & 1 & (y-y_0^p)/a & -(x-x_0^p)/a & 0 \end{bmatrix} \quad (19) \end{aligned}$$

上式において、 $\mathbf{x}_0^p = (x_0^p, y_0^p, z_0^p)^T$ は p 番目の基礎に対する基準点である。以上の変更を行なえば、複数基礎の場合にも式(9)および式(13)から $6N \times 6N$ のインピーダンスマトリクス $[K]$ 、および $6N \times 1$ のドライビングフォースベクトル $\{F_0^*\} = (\{F_0^{1*}\}^T, \{F_0^{2*}\}^T, \dots, \{F_0^{N*}\}^T)^T$ を求めることができる。 6×1 の部分ベクトル $\{F_0^{p*}\}^T$ は、

$$\{F_0^*\} = \sum_{p=1}^N \int_{S_p} [A^{pq}(\mathbf{y})]^T \{u_0^p(\mathbf{y})\} dS(\mathbf{y}) \quad \dots \text{②0}$$

で求められる。式①9および式②0中の $[A^{pq}]$ は次の式を解くことによって求められる。

$$\sum_{q=1}^N \int_{S_q} [G^{pq}(\mathbf{x}; \mathbf{y})] [A^{qr}(\mathbf{y})] dS(\mathbf{y}) = \delta_{pr} [\alpha^r(\mathbf{x})], \quad \mathbf{x} \in S_r \quad \dots \text{②1}$$

なお、本解析に用いた半無限成層地盤のグリーン関数は Luco and Apsel¹⁴⁾ によって開発された手法によって求めている。

§ 3. 解析結果

3.1 既往の研究との比較

ここで用いた解析手法の精度の確認のために、単独および二つの基礎についてインピーダンス関数を求め、本手法とは異なる解析手法を用いた既往の研究結果との比較を行なった。解析の対象となった単独基礎モデルと二

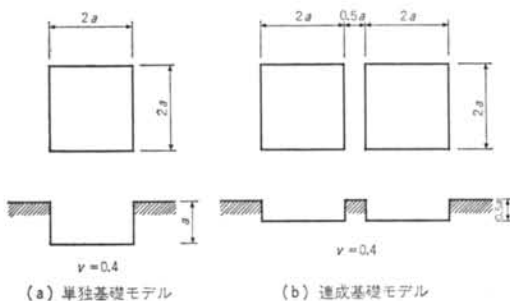
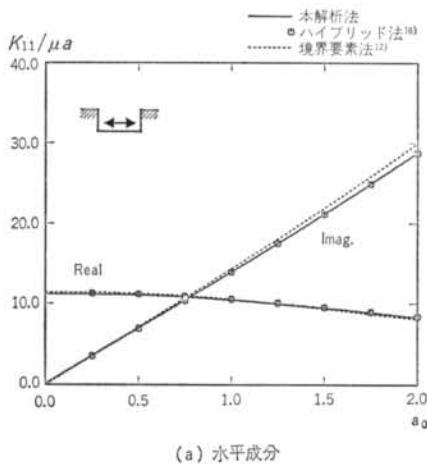


図-4 既往の研究との比較に用いた解析モデル



(a) 水平成分

つの連成基礎モデルを図-4に示す。地盤は減衰の無い一様半無限弾性体で、そのポアソン比は0.4である。

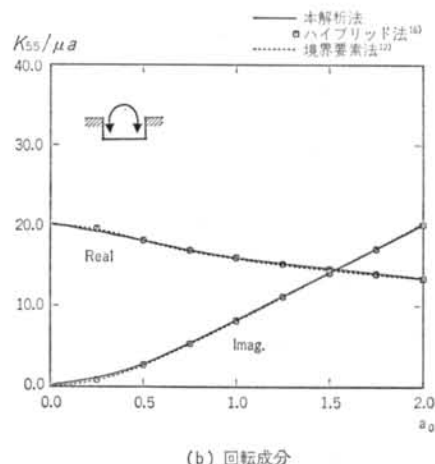
まず、単独基礎の場合について、半無限地盤のグリーン関数と有限要素法を利用したハイブリッド法¹⁵⁾¹⁶⁾による Mita and Luco¹⁶⁾ の解析値、および境界要素法による Yoshida and Kawase¹²⁾ の解析値と比較したものを図-5に示す。本手法で解析したものは、ハイブリッド法、境界要素法どちらの結果とも良く一致していることが分かる。インピーダンス関数は基礎底面中心で評価し、地盤のせん断剛性 μ および基礎半幅 a で無次元化して示した。また、振動数は地盤のせん断波速度 V_s と基礎半幅 a を使って定義される

$$a_0 = \frac{\omega}{V_s} a \quad \dots \text{②2}$$

なる無次元振動数を使用した。さらに、同一の基礎二つが近接して存在する場合についても、Yoshida and Kawase¹²⁾ の解析値と比較して図-6に示す。この場合にも、両者は非常に良く一致することが分かる。図-5および図-6において、インピーダンス関数 $K_{ij}^{pq}(i, j=1, 2, \dots, 6, p, q=1, 2, \dots, N)$ は q 番目の基礎を j 方向に単位の振動をさせ、他のすべての基礎を静止させるときに p 番目の基礎に必要な i 方向の力を示す。ただし、図-5では基礎番号を示す pq は省略した。

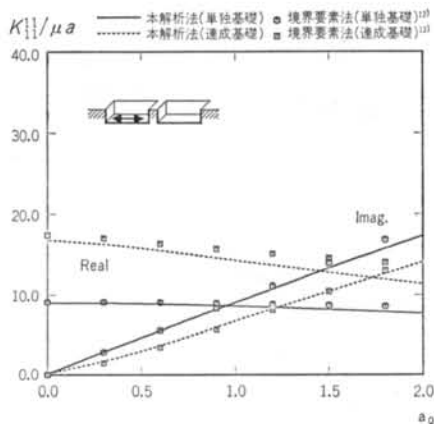
3.2 成層地盤中の埋込み基礎の連成振動

次に、本解析法の応用として埋込まれた三つの剛基礎の連成振動問題を考える。地盤は、図-7に示すように3層からなる成層地盤とし、基礎の半幅の1/2だけ埋込まれた正方形の剛基礎(基礎I)が単独に存在する場合と、基礎の半幅の1/2だけ離れて同一の剛基礎(基礎

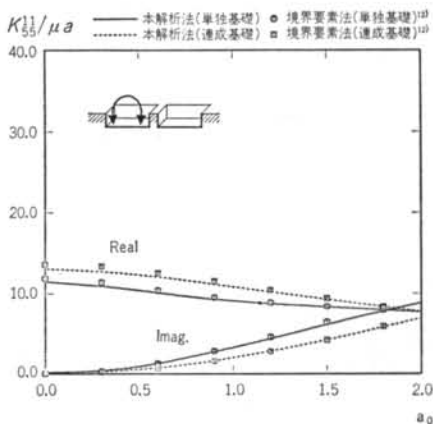


(b) 回転成分

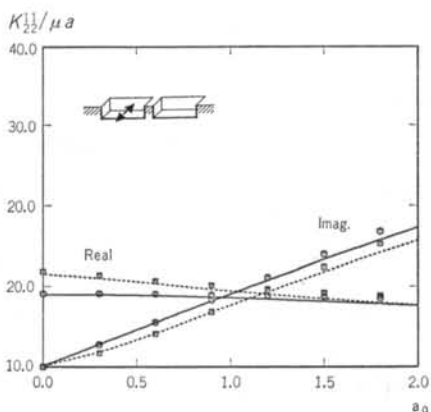
図-5 単独基礎のインピーダンス関数



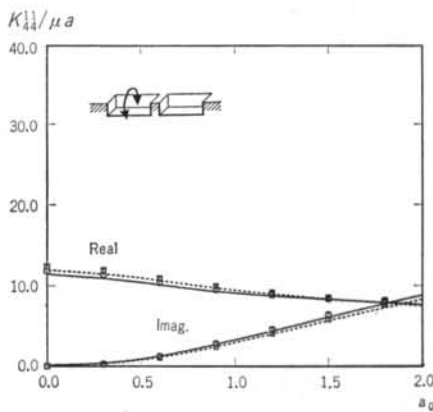
(a) 水平成分 (x方向)



(c) 回転成分 (y軸回り)



(b) 水平成分 (y方向)

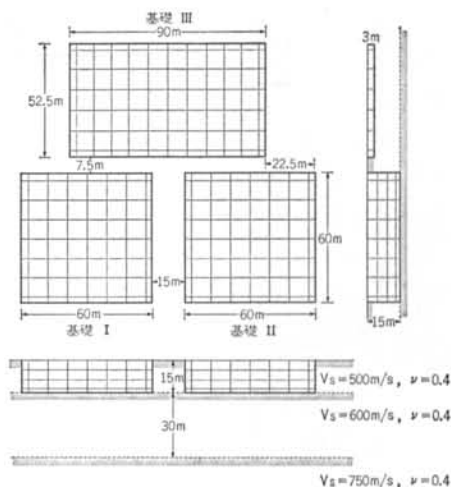


(d) 回転成分 (x軸回り)

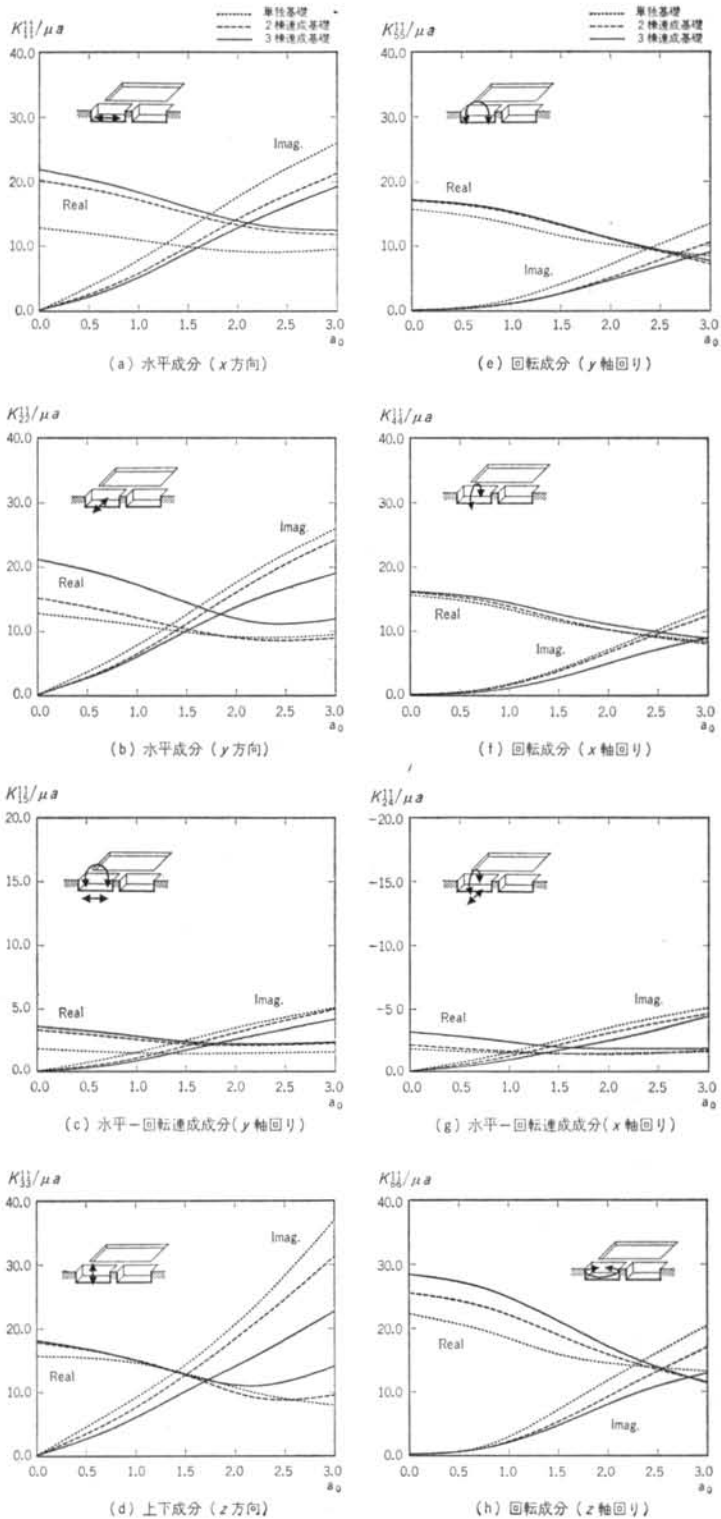
図一六 二つの基礎の連成インピーダンス関数

II)が存在する場合、さらに埋込みはやや浅いが大きめの長方形剛基礎(基礎III)が二つの基礎と平行に基礎の半幅の1/4だけ離れて存在する場合の三つを考える。ここでは基礎Iに着目し、他の基礎の存在が基礎Iのインピーダンス関数および有効入力動に与える影響を検討するものとする。なお、地盤のポアソン比 ν は3層とも0.4である。

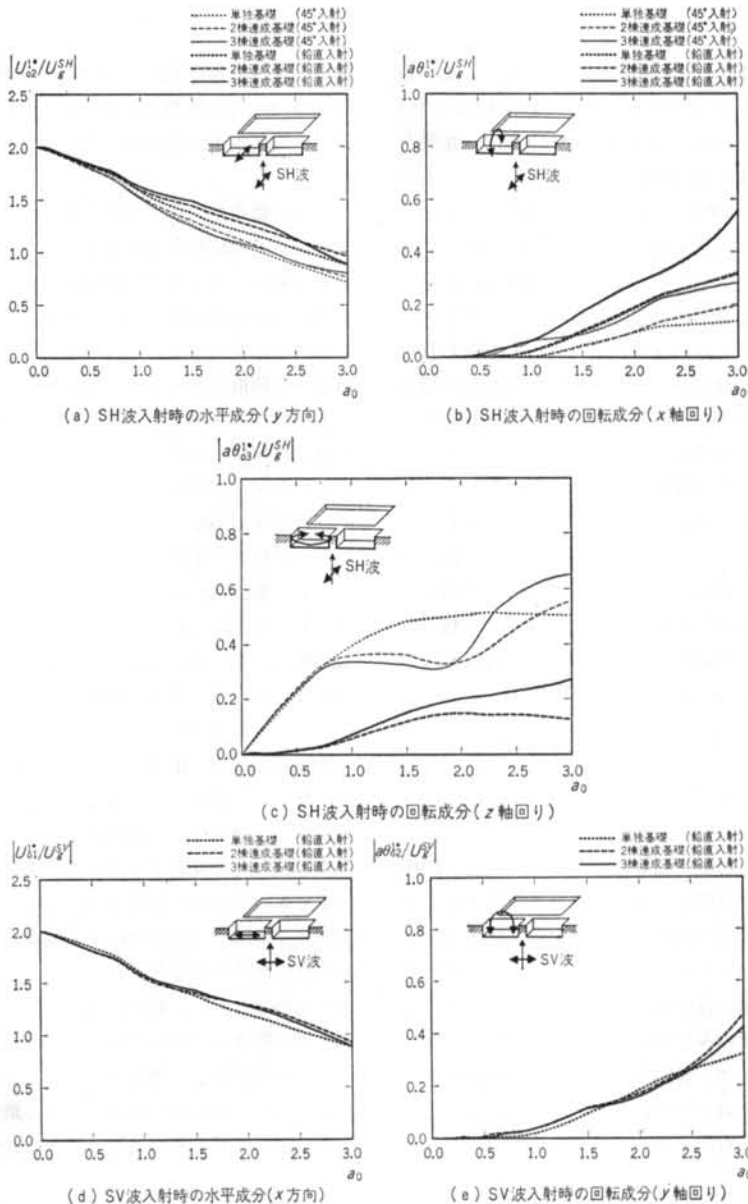
図一八に、基礎Iの底面中心で評価したインピーダンス関数を示した。図中のインピーダンス関数は、最表層の地盤のせん断剛性 μ と正方形剛基礎の半幅 $a(=30\text{ m})$ の積 μa で無次元化されており、無次元振動数も最表層のせん断波速度($V_s=500\text{ m/s}$)によるものを採用した。単独基礎と二つの基礎との比較では、基礎間の地盤が主にせん断変形をする成分である K_{22}^{II} や K_{33}^{II} よりも、軸変形をおこす成分である K_{11}^{II} の方がより隣接基礎の影響を受け、ばねに相当する実部が大きくなる事が分か



図一七 3層からなる成層地盤中に埋込まれた地盤-基礎のモデル



図一八 3棟連成基礎のインピーダンス関数



図一 9 3棟連成基礎に対する有効入力動

る。一方、減衰に相当するインピーダンスの虚部は、隣接基礎の存在によって地盤に逸散する波動エネルギーの一部がね返り小さくなる。その影響の度合は、実部に比べると一般に小さいが、成分による差異は実部と同じ傾向にある。また、水平成分と回転成分との比較では、隣接基礎の存在の影響は一般に水平成分に大きく表われるが、二つの基礎の面内の成分では、割合からいけば水平と回転の連成成分に最も顕著に表われていることが分かる。次に、三つの剛基礎の場合のインピーダンスについても二つの基礎の場合と同様な傾向にある。すなわち、基礎間の地盤がせん断変形をする成分である K_{33}^{11} と K_{33}^{11}

のインピーダンスの実部は、第3の基礎が存在する影響をほとんど受けないことが分かる。しかしながら、上下成分である K_{33}^{11} の虚部には第3の基礎の影響が表われている。これは、インピーダンスの上下成分の虚部には Rayleigh 波によるものが多くを占めるが、隣接基礎の存在により地表面が拘束され Rayleigh 波が生じ難くなったためと考えられる。このことは、上下成分の虚部に、基礎IIよりも投影面積の大きい基礎IIIの存在の方が影響を大きく及ぼしていることと調和的でもある。

図一 9 に、インピーダンス関数とともに動的相互作用の基本的な特性を示す有効入力動を示した。ここでは、

入射波として鉛直下方からのSH波とSV波、および最下層における入射角が 45° であるSH波を考えた。図の横軸は同じく最表層のせん断波速度による無次元振動を示し、縦軸は基礎Iの底面中心の並進振幅 U_{0i}^{*k} ($i=1, 2, 3$)あるいは回転振幅 θ_{0i}^{*k} ($i=1, 2, 3$)と基礎の半幅 a との積を自由地表面での入射振幅 U_0^j ($j=SH, SV$)に対する比で無次元化して示した。これらの図より、並進成分についてはSH波、SV波入射ともにインピーダンスとは異なり、単独基礎と複数基礎の差はほとんど表われないことが分かる。これは、インピーダンス関数は隣接基礎を固定して各成分を求めるため隣接基礎の影響を強く受けるが、有効入力動はこういった拘束がないことによる。一方、隣接基礎の存在によりSH波が鉛直下方入射の場合に、単独基礎では生じないねじれ成分が生じることも図-9より明らかである。また、SH波が鉛直下方から入射する場合と斜めに入射する場合の有効入力動を比較すると、並進成分と回転成分(x 軸回り)は斜め入射の方がやや小さい結果を与えるが、ねじれ成分は逆に大きくなっていることが分かる。

§ 4. まとめ

複数の埋込み基礎の動的相互作用解析のために、間接境界積分方程式法と有限要素法を結合した解析手法を新たに定式化した。通常の間接境界積分方程式法では、半無限地盤中の変位および応力のグリーン関数を必要とするのに対し、本手法は有限要素法を用いることによって変位のグリーン関数のみを利用し、応力のグリーン関数を必要としない。また、動的相互作用の二つの問題、逸散問題と散乱問題を同じ原理に基づいて解き、インピーダンス関数と有効入力動を求める手法でもある。既往の

解析手法(境界要素法、ハイブリッド法)との単独および二つの連成基礎のインピーダンス関数についての比較結果から、本手法が十分妥当な精度を持つことが確認された。

複数基礎の動的連成効果の検討のために、相互作用解析の基本的な特性を示すインピーダンス関数と有効入力動を3層からなる成層地盤中に埋込まれた単独、二つおよび三つの連成基礎について求めた。その結果、近接する基礎が存在する場合には単独基礎の場合に比し、以下のような特徴のあることが分かった。

(1)インピーダンス関数、有効入力動ともに単独基礎の場合には存在しなかった成分が生じてくる。たとえば、インピーダンス関数では単独の矩形基礎では水平と回転のみの連成しかないのに対し、他の多くの成分も連成するようになる。また、有効入力動でも鉛直にせん断波が入力する場合に、単独基礎の場合には無かったねじれ成分が生ずるといったことが挙げられる。

(2)地震波が鉛直に入射する場合、有効入力動はねじれの成分を除いて、基礎が複数近接して存在することによってさほど影響されない。

(3)地盤のばねに相当するインピーダンス関数の実部は、近接の基礎が存在することによって顕著に増大する。実部の増加は、基礎間の地盤がせん断変形する方向よりも軸方向に変形するモードの方により著しい。

(4)地盤の逸散減衰効果を表わすインピーダンス関数の虚部は、実部とは逆に近接する基礎によって逸散波が反射されるため小さくなる。

以上のことから、他の構造物が近接していると、単独構造物の場合に比較して構造物—地盤連成系の固有振動数は高めに移動し、逸散減衰効果もやや小さくなることと相まって、構造物の地震に対する最大応答加速度は増大する可能性があることを示唆している。

<参考文献>

- 1) J.E.Luco & L.Contesse: "Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction" Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 63, No. 4 (1973) pp. 1289~1903
- 2) H.L.Wong: "Dynamic Soil-Structure Interaction" Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Report, EERL-75-01 (May 1975)
- 3) H.L.Wong & M.D.Trifunac: "Two Dimensional, Antiplane, Building-Soil-Building Interaction for Two or More Buildings and for Incident SH-Waves" Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 65, No. 6 (1975) pp. 1863~1885
- 4) H.Murakami & J.E.Luco: "Seismic Response of a Periodic Array of Structures" J. of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM5 (1977) pp. 965~977
- 5) 川瀬博, 中井正一: "境界要素法を用いた基礎-地盤系の動的相互作用の解析—SH波タイプの場合—" 日本建築学会大会学

術講演梗概集 (1981年) pp.689~690

- 6) A. Mita & J.E.Luco: "Response of Embedded Foundations: a Hybrid Approach" Proc. of 3rd ASCE EM Specialty Conference on Dynamic Response of Structures, Los Angeles (March 1986) pp.708~715
- 7) J.T.Lysmer, T.Udaka, H.B.Seed & R.Hwang: "A Computer Program for Complex Response Analysis of Soil-Structure Interaction" Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Report, EERC 74-4 (1974)
- 8) V.C.Liang: "Dynamic Response of Structures in Layered Soils" Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Report, No. 1274-10 (1974)
- 9) S.Nakai & N.Fukuwa: "Boundary Element Analysis of Approximate Three-Dimensional Soil-Structure Interaction" 第6回日本地震工学シンポジウム論文集 (1982年) pp.1633~1640
- 10) 市川隆之, 中井正一, 広谷勉: "切欠き型サブストラクチャー法による埋込み構造物の棟間相互作用解析" 第7回日本地震工学シンポジウム論文集 (1986年) pp.1015~1020
- 11) H.-T.Lin, J.M.Roesset & J.L.Tassoulas: "Dynamic Interaction between Adjacent Foundations" Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.15 (1987) pp.323~343
- 12) K.Yoshida & H.Kawase: "Dynamic Interaction Analysis of Rigid Embedded Foundations by Boundary Element Method" Shimizu Technical Research Bulletin, No.7 (1988) pp.33~47
- 13) J.E.Luco & H.L.Wong: "Seismic Response of Foundations Embedded in a Layered Half-Space" Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.15 (1987) pp.233~247
- 14) J.E.Luco & R.J.Apsel: "On the Green's Functions for a Layered Half-Space: Part I" Bulletin of Seismological Society of America, Vol.73 (1983) pp.909~929
- 15) A.Mita: "Dynamic Response of Embedded Foundations; A Hybrid Approach" Ph. D. Dissertation, Univ. of California, San Diego (1986)
- 16) A.Mita & J.E.Luco: "Dynamic Response of Embedded Foundations; A Hybrid Approach" Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, Vol.63 (1987) pp.233~259
- 17) A.Mita & J.E.Luco: "Impedance Functions and Input Motions for Embedded Square Foundations" J. of Geotechnical Engineering, ASCE (1989年4月号掲載予定)

