

剛体基礎側壁と地盤の間の境界非線形性が 入力損失効果に与える影響に関する研究

齊藤正人¹・渡邊啓行²

¹正会員 博(工) 埼玉大学助手 工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

E-mail: saity@post.saitama-u.ac.jp

²フェロー会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

深い根入れのある大型基礎の側壁近傍では、それに接する地盤との間で滑りや剥離といった境界非線形性が生じることが予想される。この境界非線形性は、基礎-地盤-上部構造物系の慣性応答とキネマティック応答の双方により影響を受けることから、無質量状態の基礎構造モデルを対象に、境界非線形性を考慮した解析から入力損失効果を評価することは望ましくない。本研究では、3次元弾性波動論に基づき展開した任意境界条件における剛体基礎-地盤-構造物系の理論解を利用した解析手法を提案し、慣性応答による境界部への影響を考慮した入力損失効果を評価することに成功した。これにより、境界非線形性による作用土圧とインピーダンスの変化特性の違いが、入力損失効果に大きく影響することが明らかとなった。

Key Words: effective seismic motion, input loss, slippage, separation, rocking impedance

1. はじめに

本研究は、橋梁・高架橋に用いるケーソン基礎等の大型基礎を対象に、入力損失効果について研究を行うものである。入力損失効果とは、キネマティックな相互作用であり、基礎の剛性や幾何学的形状による周辺地盤への拘束効果により、基礎へ入射される地震動が、自由地盤の地震動と比べて低減する効果であると一般に定義される。既往の研究では、根入れのある基礎を対象に入力損失効果の特性を解析的あるいは実証的に検討しており^{1)~10)}、著者らにおいても、より実際的な大型基礎の入力損失効果を評価するため、基礎側壁の曲げ柔性が入力損失効果に与える影響に関して理論的評価を行い、その特性を明らかにした¹¹⁾。さらに著者らを含む研究者により、表層地盤のひずみ依存性がこうした大型基礎の入力損失効果に与える影響について、模型振動実験による入力損失効果の直接計測を実施し、その特性を理論解に基づき解明するに至った¹²⁾。

ところで、土岐ら¹³⁾により報告されているように、基礎-地盤間にある閾値を越える境界応力が生じると、滑りや剥離といった境界非線形性が生じること

が予想される。境界部で滑りや剥離が生じれば、基礎と地盤との接触面積が減少することで、遠方地盤に逸散される運動エネルギーが減少し、構造物内にエネルギーが蓄積される可能性がある。また接触面積の減少は、構造物への入力エネルギーの減少へと繋がるのが推測される。土岐らは有限要素法に基づく解析的検討により、基礎と地盤の完全密着条件が、実際の動的応答値を過小評価する可能性を指摘している。その理由として、完全密着状態が構造物の応答を抑制しているためであると述べている。つまり、境界非線形性による基礎-地盤系の支持力低下が生じることとも考えられる。近年では、境界非線形性が系の応答特性に少なからず影響を与えると認識されていることから、特に湿潤砂や粘土等の自立性の高い地盤を研究対象とする場合には、境界非線形性を評価するためにジョイント要素等の接触要素^{14)~16)}が考慮されることが多い。

こうした既往の知見を鑑みれば、入力損失効果が境界非線形性の影響を受けることは明らかである。しかしこれまで境界非線形性が入力損失効果に与える影響について評価した研究は皆無と言っても過言ではない。確かに、定義どおりの無質量状態の基礎

$$u_r = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ -A_{mn} \left[\frac{x}{r} K_{m-1}(x) + \frac{m}{r} K_m(x) \right] + B_{mn} \frac{m}{r} K_m(y) \right\} \cos m\theta \right. \\ \left. + \frac{4}{n\pi} \frac{1}{\omega_g^2 \xi_n^2} u_g \omega^2 \cos \theta \right\} \sin \frac{n\pi}{2H} z e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$u_\theta = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ B_{mn} \left[\frac{y}{r} K_{m-1}(y) + \frac{m}{r} K_m(y) \right] - A_{mn} \frac{m}{r} K_m(x) \right\} \sin m\theta \right. \\ \left. - \frac{4}{n\pi} \frac{1}{\omega_g^2 \xi_n^2} u_g \omega^2 \sin \theta \right\} \sin \frac{n\pi}{2H} z e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$\sigma_r = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{r^2} \left\{ A_{mn} \left[\left\{ 2(m-1)\lambda^* + 2(2m-1)\mu^* \right\} x K_{m-1}(x) \right. \right. \\ \left. \left. + 2m(m+1)\mu^* K_m(x) + (\lambda^* + 2\mu^*) x^2 K_{m-2}(x) \right\} \right. \\ \left. - 2\mu^* B_{mn} \left[my K_{m-1}(y) + m(m+1) K_m(y) \right] \right\} \cos m\theta \sin \frac{n\pi}{2H} z e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$\tau_\theta = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\mu^*}{r^2} \left\{ A_{mn} \left[2mx K_{m-1}(x) + 2m(m+1) K_m(x) \right] \right. \\ \left. - B_{mn} \left[y^2 K_{m-2}(y) + 2my K_{m-1}(y) \right. \right. \\ \left. \left. + 2m(m+1) K_m(y) \right] \right\} \sin m\theta \sin \frac{n\pi}{2H} z e^{i\omega t} \quad (4)$$

ただし、

$$x = \frac{\omega_g \xi_n r}{\sqrt{1+i2h_g V_p}}, y = \frac{\omega_g \xi_n r}{\sqrt{1+i2h_g V_s}} \\ V_p^2 = \frac{\lambda+2\mu}{\rho}, V_s^2 = \frac{\mu}{\rho}, \omega_g = V_s \frac{\pi}{2H} \\ \xi_n = \sqrt{n^2(1+i2h_g) - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}$$

ここで、 A_{mn}, B_{mn} は境界条件により定まる積分係数、 n, m はそれぞれ z 方向と θ 方向のフーリエ級数次数、 u_g は地動入力振幅、 ω は角振動数、 ω_g は表層地盤の非減衰固有角振動数、 K_m は第 2 種変形 m 次ベッセル関数である。さらに λ^*, μ^* は $\lambda^* = \lambda + i\lambda'$ と $\mu^* = \mu + i\mu'$ で定義される複素 Lamé 定数であり、損失係数 $D_v = \lambda'/\lambda$ と $D_s = \mu'/\mu$ は地盤の体積膨張とせん断ひずみに関係付けられる。本研究では、両損失係数を等しいものと仮定し、地盤材料の減衰定数 h_g に対して 2 倍の大きさ有するものとする²³⁾。 ρ は地盤材料の密度であり、 V_p と V_s は P 波速度と S 波速度である。滑り・剥離状態は深度方向にも変化するため、境界部を図-1 に示すように深度方向に

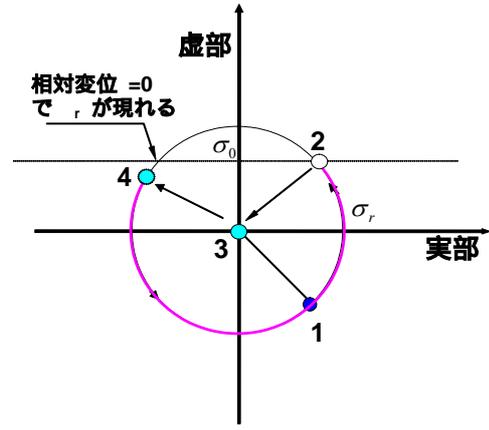


図-2 境界点で剥離が生じる場合のガウス平面上の特性

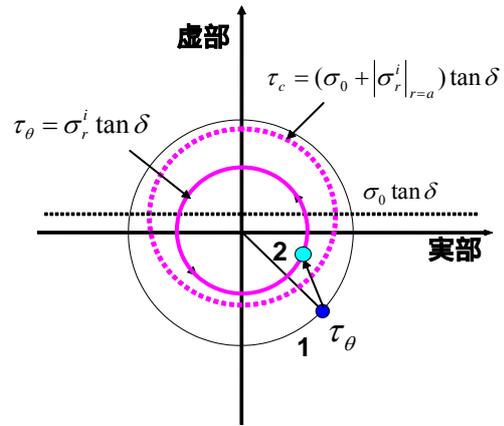


図-3 境界点で滑りが生じる場合のガウス平面上の特性

N 層に分割する。任意の境界層を i 層とした場合、積分係数 A_{mn}, B_{mn} は深度方向に変化することから、以下ではこれを A_{mn}^i, B_{mn}^i と表記する。

(3) 境界条件式

ここでは、任意高さにおける水平断面内での境界非線形状態について境界条件式を求める。基礎近傍地盤では、境界非線形性の影響により、ある点では密着し、ある点では滑りあるいは剥離が生じていると考えられる。そこで図-1 に示すように、基礎と地盤の境界面に境界点を設け、各境界点において境界条件を評価することにする。後述のように、積分係数はこの複雑な境界条件により、基礎変位項と地動入力項に関係付けられる。したがって、積分係数の数と境界条件式の数を一致させる必要がある。境界条件式は境界点 1 点において $2n$ 個存在し、深度方向に分割された 1 層当りの積分係数は $2mn$ 個あるため、基礎と地盤との境界部には 1 層当たり m 個の境界点を設ける必要がある。ただし、式(1)から(4)からわかるように、入力加振に直交する方向は対称応答であることから、0 から π までの m 個の境界点

を設定することになる。また本解析では、境界点を0から π まで等間隔で配置することにする。密着、剥離また滑りの境界条件は以下ようになる。

(a)密着条件

基礎と地盤が密着した点における境界条件は、その点で基礎と地盤の変位が等しいという式(5)(6)の条件式で表される。

$$u_r^i \Big|_{r=a} = U_r^i \quad (5)$$

$$u_\theta^i \Big|_{r=a} = U_\theta^i \quad (6)$$

ここで、基礎の r, θ 方向変位を U_r^i, U_θ^i 、地盤変位は i 層を示している。

(b)剥離・再接触条件

静止土圧力度以上の引張り応力が境界点で作用するとき、境界で剥離が生じたと判断する。式(1)から(4)で表される変位と応力は複素数であるため、ガウス平面上で非線形性を表現する必要がある。図-2 にガウス平面上での剥離を伴う応力特性を示す。 σ_r の Modulus は回転角速度 ω でガウス平面上を運動する(図-2 点 1)。実現象は、実部か虚部のいずれかの軸に投影された運動となる。本研究では、虚部を実現象と考えることにする。 σ_r の虚部の値が静止土圧力度 σ_0 を越えた瞬間(図-2 点 2)に剥離が生じ、その Modulus は原点に瞬時に収束する(図-2 点 3)。剥離の境界条件式は次式となる。

$$\sigma_r^i \Big|_{r=a} = 0 \quad (7)$$

$$\tau_\theta^i \Big|_{r=a} = 0 \quad (8)$$

再接触は基礎と地盤の相対変位がゼロ、もしくは負と判断された場合とし、そのときの境界条件式は式(5)(6)となる。そのとき σ_r の Modulus は、ガウス平面上に復元することになる(図-2 点 4)。

(c)滑り条件

境界に作用するせん断応力 τ_θ の Modulus は、 σ_r と同様に回転角速度 ω でガウス平面上を運動する(図-3)。このせん断応力 τ_θ が、これと直交する鉛直応力に摩擦正接 $\tan \delta$ を乗じた値以上になる場合(図-3 点 1)、これを滑りと判断する。ここで、波動理論の展開上、静止土圧力度項のような時間に依存し

ない項を取り扱うことは、これ以降の式展開を極端に複雑化することになる。そこで本解析では、滑りの判定を受けた後の境界条件式として、静止土圧力度項を無視することにする。滑りの判定式と境界条件式はそれぞれ次式となる。

<滑り判定式>

$$\left| \tau_\theta^i \Big|_{r=a} \right| \geq (\sigma_0^i + \left| \sigma_r^i \Big|_{r=a} \right|) \tan \delta \quad (9)$$

<境界条件式>

$$\tau_\theta^i \Big|_{r=a} = \sigma_r^i \Big|_{r=a} \tan \delta \quad (10)$$

ただし、 r 方向の境界条件は式(5)と同じ密着条件となる。ここで、滑りが生じたときのせん断応力 τ_θ の Modulus は、式(10)に示す円上を回転角速度 ω で回転することになる(図-3 点 2)。

これら境界条件を、後述の解析手法により各時刻で逐次評価することになる。各境界点の条件式を連立させることで次の関係式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} A_{0n}^i \\ B_{0n}^i \\ \vdots \\ A_{mn}^i \\ B_{mn}^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_{ln}^{ai} \\ \beta_{ln}^{bi} \\ \vdots \\ \beta_{mn}^{ai} \\ \beta_{mn}^{bi} \end{Bmatrix} \varphi_0 + \begin{Bmatrix} \gamma_{ln}^{ai} \\ \gamma_{ln}^{bi} \\ \vdots \\ \gamma_{mn}^{ai} \\ \gamma_{mn}^{bi} \end{Bmatrix} u_g \quad (11)$$

(4) 基礎と地盤の連成応答

基礎は基礎底面の中心軸を回転中心とするロッキング運動をすると仮定している。ロッキングに関する運動方程式は次式で表される。

$$I\ddot{\varphi} + K_r^* \varphi = -m_f \ddot{u}_{g,t} H_s + \sum_{i=1}^N M_i + M_s + V_s H \quad (12)$$

ここで、 φ は基礎の回転変位、 I は基礎の慣性モーメント、 m_f は基礎質量、 H_s は基礎の重心高さ、 M_i は基礎周面に作用する応力の基礎回転軸に関するモーメント、また M_s, V は基礎天端に作用する回転モーメントと水平力である。 K_r^* は次式で与えられる²⁰⁾。

$$K_r^* = K_r + i\omega C_r \quad (13)$$

ここで、

$$K_r = \frac{8a^3 \rho_b V_{sb}^2}{3(1-\nu_b)}, \quad C_r = \rho_b V_{pb} I_y$$

また, ρ_b , V_{sb} また ν_b は基盤層の密度, せん断弾性波速度, またポアソン比, I_y は基礎の断面 2 次モーメントである.

基礎周面応力によるモーメントは, 次式で表される.

$$\sum_{i=1}^N M_i = \sum_{i=1}^N p_i(z) z dz \quad (14)$$

ここで,

$$p_i(z) = \int_0^{2\pi} (\sigma_{r_i}^i \Big|_{r=a} \cos \theta - \tau_{r\theta}^i \Big|_{r=a} \sin \theta) a d\theta \quad (15)$$

フーリエ級数の直交系特性を利用すれば,

$$\sum_{i=1}^N M_i = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N (\Omega_{\beta n}^i \varphi_0 + \Omega_m^i u_g) e^{i\alpha z} \quad (16)$$

ここで,

$$\Omega_{\beta n}^i = \rho \pi a (\omega_g \xi_n)^2 I_z^i [\beta_{1n}^{ai} K_1(x_a) + \beta_{2n}^{ai} K_1(y_a)]$$

$$\Omega_m^i = \rho \pi a (\omega_g \xi_n)^2 I_z^i [\gamma_{1n}^{ai} K_1(x_a) + \gamma_{2n}^{ai} K_1(y_a)]$$

$$I_z^i = \int_{H_{i-1}}^{H_i} z \sin \frac{n\pi}{2H} z dz$$

ただし,

$$x_a = \frac{\omega_g \xi_n a}{\sqrt{1+i2h_g} V_p}, \quad y_a = \frac{\omega_g \xi_n a}{\sqrt{1+i2h_g} V_s}$$

式(16)を式(12)に代入して次式を得る.

$$\varphi = (G_{eff}^* u_g + G_I^* u_g + F_M^* M_s + F_s^* V_s) e^{i\alpha z} \quad (17)$$

ここで,

$$G_{eff}^* = \frac{\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_m^i}{K_r^* - \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\beta n}^i}$$

$$G_I^* = \frac{m\omega^2 H_s \left(K_r^* - \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\beta n}^i \right) + I\omega^2 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_m^i}{\left(K_r^* - I\omega^2 - \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\beta n}^i \right) \left(K_r^* - \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\beta n}^i \right)}$$

$$F_H^* = \frac{1}{K_r^* - I\omega^2 - \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\beta n}^i}$$

$$F_M^* = \frac{H}{K_r^* - I\omega^2 - \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\beta n}^i}$$

式(17)の右辺第 1 項は, 無質量基礎のキネマティックなロッキング応答を意味し, 右辺第 2 項は基礎質量による慣性応答である. また第 3 項, 第 4 項は, 各々, 基礎天端に作用する水平力とモーメントによる基礎のロッキング応答を表す.

自由地盤の基盤に対する基盤加振方向の相対変位 u_{suf} は, 式(1)(2)を r 方向に無限大の極限值を求めることにより表される.

$$u_{suf} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \frac{u_g}{\xi_n^2} \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2 \sin \frac{n\pi}{2H} z e^{i\alpha z} \quad (18)$$

(5) 基礎-地盤-上部構造物の連成応答

上部構造物は 1 次モードが他のモードと比較して卓越することを前提に, 1 自由度系モデルで評価する. 上部構造物重心位置での運動方程式は次式で表される.

$$m_s (\ddot{u}_{gt} + \ddot{\varphi} H + \ddot{\varphi} L + \ddot{u}_s) = -(k_s u_s + c_s \dot{u}_s) \quad (19)$$

ここで, m_s , c_s また k_s は上部構造物の質量, 減衰係数, そして剛性, L は上部構造物の基礎からの重心高さ, u_s は上部構造物の基礎からの相対変位である.

基礎天端に作用する水平力 V_s とモーメント M_s は次式で与えられる.

$$V_s = k_s u_s + c_s \dot{u}_s \quad (20)$$

$$M_s = V_s L \quad (21)$$

式(19)に式(17), (20)また(21)を代入すれば, 次式が誘導される.

$$u_s = \frac{1 + lG^*}{\zeta(\omega) - l(F_M^* L + F_s^*)(k_s + i\omega c_s)} u_{gr} \quad (22)$$

ここで、

$$\zeta(\omega) = -1 + i2h_s \left(\frac{\omega_s}{\omega} \right) + \left(\frac{\omega_s}{\omega} \right)^2$$

ここで、 h_s 、 ω_s は上部構造物の減衰定数と固有角振動数、また l は H と L の和である。

3. 境界非線形性を考慮した入力損失効果を評価するための解析手法

2節で誘導した理論解は、調和振動入力に対する任意の境界非線形条件下で成り立つ。ただし、境界条件が定まらない限り、系の応答を求めることはできない。そこで本研究では、各時間（ $N\Delta t$ ： N は時間ステップ、 Δt は時間刻み）における境界条件とそれに基づく応答値を、以下の手順に従って求めることにする。

- 前時間ステップ（ $N-1$ ）における境界条件を現時間ステップ（ N ）の初期境界条件と仮定する。ただし、前時間ステップが存在しない第0ステップ（ $N=0$ ）に限り、全境界点を完全密着条件に設定する。
- (a)で仮定した境界条件を用いて、理論解から現時間ステップ（ N ）の応答計算を行う。
- 境界点における応力と変位の応答値を求め、前節で述べた判定基準に従い、境界状態を確認する。
- (c)で求めた境界状態が、その解の前提となる境界条件と一致していれば、境界条件とその解は収斂していると判断される。よって現ステップ（ N ）の計算結果を出力し、次の時間ステップ（ $N+1$ ）に移る。
- (d)で境界条件と境界状態が一致していないと判定された場合には、この境界状態を境界条件に置換して、再度(c)の計算過程を行い、境界条件が収束するまで計算を行う。

以上の計算過程により、調和加振入力に対する基礎-地盤-上部構造物の時刻歴応答を得ることが出来る。本研究では、この境界非線形条件下での全体系応答から、入力損失効果を評価することになる。入力損失効果の評価指標として、有効入力動係数を用いる。有効入力動係数とは、基礎体のキネマティック応答振幅、つまり地盤の強制変位による無質量基礎の加

表-1 解析で用いたモデルの諸元

表層地盤		基礎構造物	
高さ (H)	20(m)	基礎半径 (a)	6.5(m)
密度 (ρ_s)	1.8 (t/m ³)	重心高さ (H_s)	10 (m)
せん断弾性波速度 (V_s)	240 (m/s)	質量 (m_f)	5.4×10^3 (t)
ポアソン比 (ν)	0.49	重心位置の回転慣性 (I)	7.8×10^5 (tm ²)
減衰比 (D)	0.20	上部構造物	
		質量 (m_s)	7.0×10^3 (t)
		剛性 (k_s)	1.2×10^6 (kN/m)
		減衰定数 (h_s)	0.10
		橋脚高さ (L)	10 (m)

速度応答振幅（有効入力動）を、自由地盤の地表面加速度応答振幅で除し、各振動数成分で評価した係数である。また根入れのある基礎は水平成分のみならず、回転成分のキネマティック応答が生じることからこれも同様に有効入力動と呼称し、それぞれ \ddot{u}_{CT} 、 $\ddot{\varphi}_{CT}$ とする。詳細については著者らによる論文¹¹⁾¹²⁾に記載されているが、以下に有効入力動係数の定義式(水平方向： η_{eff} 、回転方向： φ_{eff})を示す。

$$\eta_{eff}(\omega) = \frac{|\ddot{u}_{CT}(H, \omega)|}{|\ddot{u}_{surf}(H, \omega)|} \quad (23a)$$

$$\varphi_{eff}(\omega) = \frac{|\ddot{\varphi}_{CT}(\omega)H|}{|\ddot{u}_{surf}(H, \omega)|} \quad (23b)$$

ここで、 \ddot{u}_s は表層地盤の絶対加速度応答である。本研究では、原田ら²⁴⁾による大型基礎の研究に代表されるように、基礎天端位置において有効入力動を定義することにする。この有効入力動係数を求めるため、調和加振振動数 ω を固定して、時刻歴の有効入力動 \ddot{u}_{CT} 、 $\ddot{\varphi}_{CT}$ を求めた後、その振幅の最大値を式(23a)(23b)に代入する。有効入力動 \ddot{u}_{CT} 、 $\ddot{\varphi}_{CT}$ は、式(17)を用いて次式で表すことができる。

$$\ddot{u}_{CT} = -\omega^2(1.0 + G_{eff}^*) u_g e^{i\omega t} \quad (24a)$$

$$\ddot{\varphi}_{CT} = -\omega^2 G_{eff}^* u_g e^{i\omega t} \quad (24b)$$

したがって上述の解析法により、慣性応答による境界応力を考慮した状態でキネマティック応答特性を評価することが可能となる。

4. 境界非線形性の影響を受ける入力損失効果の動特性

本節では、上述した解析法を用いて有効入力動係数

を算定し、その特性について評価することにする。本解析では、加振振動数を 0.1Hz から 5.0Hz まで 0.1Hz 刻みに変化させて、それぞれの振動数に対する時刻歴定常加振解を求める。そして前節で説明した手法により入力損失効果を把握する。以下に詳しい検討内容を記す。

(1) 解析条件の設定

解析モデルの諸元を表-1 に示す。本解析では、深度方向のフーリエ級数次数を $n = 5$ 次項まで、また θ 方向のフーリエ級数次数を $m = 4$ 次項 ($m = 0$ を含む) まで採用する。境界点は 0 から π まで等分布させる。境界部における深度方向分割数を $N = 100$ で設定する。解析時間刻みは 1 波長について 200 個の解析ステップが得られるように随時設定する。任意高さの静止土圧力度 σ_0^i は次式で与える。

$$\sigma_0^i = (\sigma_s + \rho g z_i) K_0 \quad (25)$$

ここで、 σ_s はサーチャージによる土圧力度 (0.09MPa)、 g は重力加速度 (9.81m/s^2)、 K_0 は静止土圧係数 (0.5)、 z_i は i 層上面位置における高さである。また基礎と地盤間の摩擦正接は、 $\delta = 35^\circ$ を仮定する。境界条件の判定は、各境界層上面での応力、変位状態で評価するものとする。境界条件の判定は、各境界層上面での応力・変位状態で評価するものとする。境界を完全密着条件とした場合、基礎-地盤-構造物系の連成振動において、1 次卓越振動数 (1.75Hz) は上部構造物を主体とする振動モードであり、2 次卓越振動数 (3.10Hz) は表層地盤を主体とする振動モードである。

(2) 境界点の応答特性

基盤入力動の加速度振幅を 400Gal とし、境界非線形時に上部構造物が主体となる卓越振動数 (1.65Hz) を入力振動数としたときの境界点 (高さ $z = H$ で $\theta = \pi/4$) での時刻歴応答特性を図-4 に示す。応答波形から、この境界点では滑り 剥離 再接触を繰り返していることがわかる。この相対変位と応力の関係を図-5 に示す。剥離する前は相対変位が完全にゼロであり、一端剥離が生じると境界応力が開放されていることがわかる。また、滑りについては、式 (10) で定式した通り、 r 方向応力に応じて上限値が逐次変化していることがわかる。また、本手法では各時間ステップにおいて境界条件の収束を行っているため、既往のジョイント要素に見られるような物

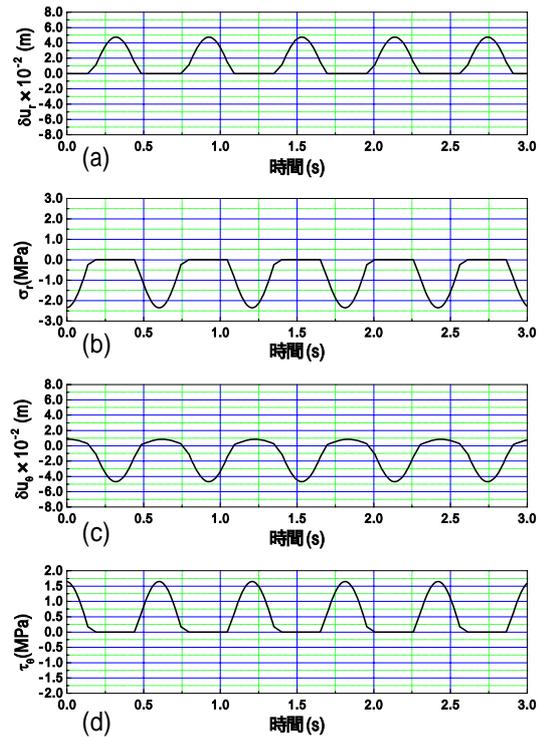


図-4 $\theta = \pi/4$ 位置における境界点の応答波形
(a)(b)は r 方向の基礎に対する地盤の相対変位 δu_r と応力 σ_r 、(c)(d)は θ 方向の相対変位 δu_θ と応力 τ_θ

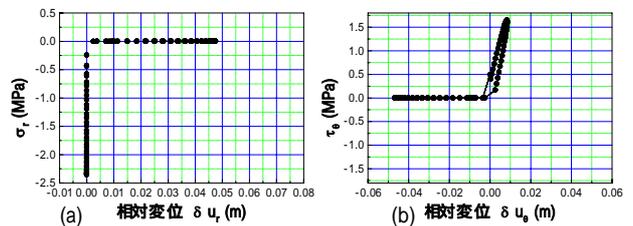


図-5 $\theta = \pi/4$ 位置における境界点の履歴波形
(a) : r 方向、(b) : θ 方向)

体間の貫入や剥離状態における応力の発生がなく、境界部の滑りや剥離の非線形性を適切に表現できることがわかる。

しかし、本手法による計算の経験から言えることは、全ての計算ステップにおいて矛盾がない境界条件に収束できるわけではない。本手法の収束性については、境界点の数、フーリエ級数次数 m 、 n の上限値の設定、時間刻み、加振振動数、基盤入力振幅などの様々な諸数値に影響される。収束しない状態は 2 種類あり、1 つは循環型非収束状態、もう一つは非循環型非収束状態である。前者は、ある境界点が剥離すると判断されたとき、そこに剥離の境界条件を与えると、接触が生じてしまい、そこに接触条件を入れると剥離を生じてしまうといった状況

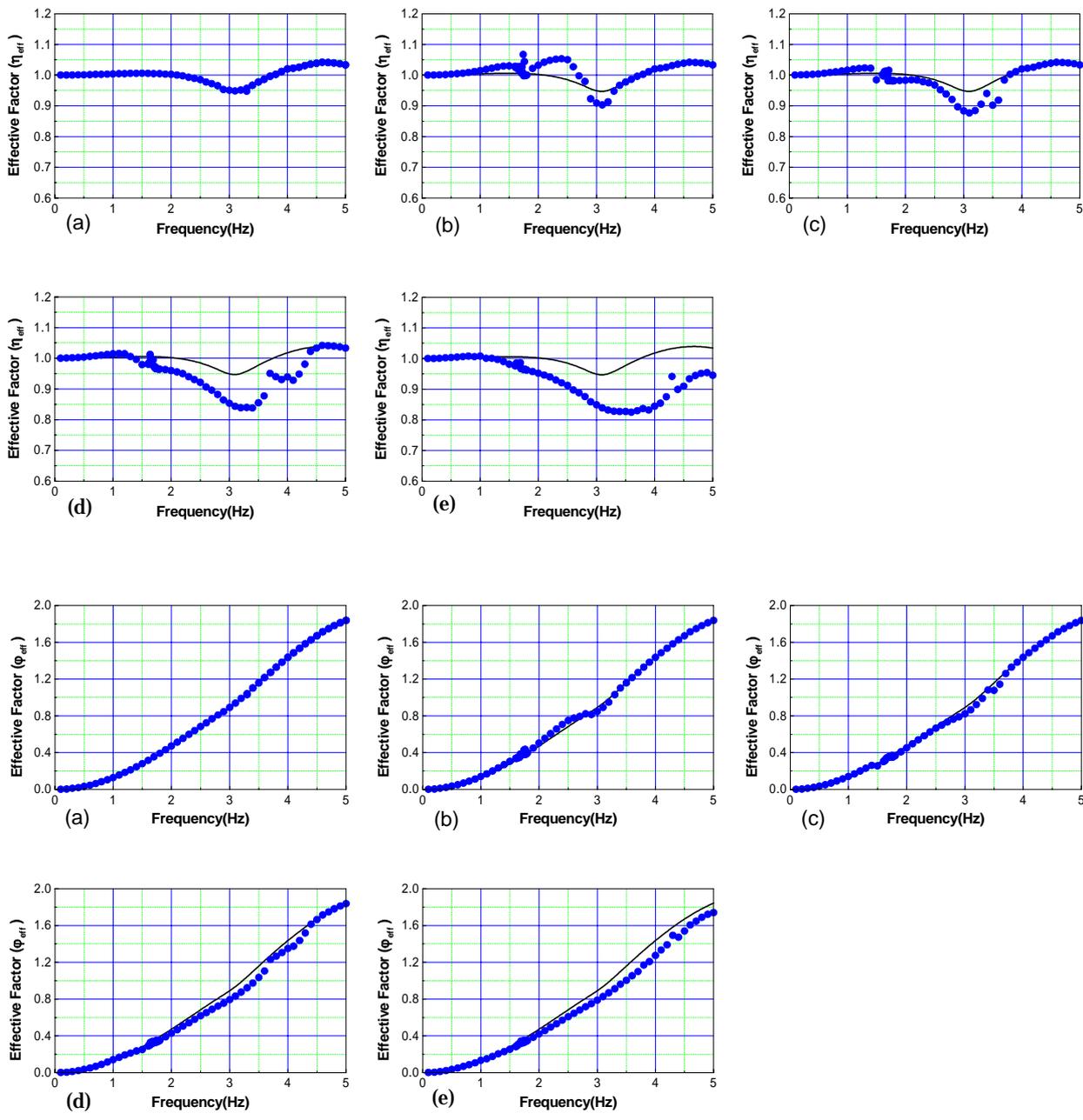


図-6 基盤入力加速度の変化に伴う有効入力動係数の変化特性
 ((a) : 1Gal , (b) : 50Gal , (c) : 100Gal , (d) : 200Gal , (e) : 400Gal ,
 上 2 段 : 水平方向 , 下 2 段 : 回転方向 , : 線形 , 提案手法)

である．これに対して後者は，毎回異なる非収束な境界条件が現れる状況である．収束性が悪い場合，境界点の数，フーリエ級数次数 m , n の上限値の設定，あるいは時間刻みを細かくしても，収束性は向上しない場合が多い．反対にそれらの値を粗くすることで，収束性が改良される場合もある．しかしいずれも，現段階ではその適切な対応策を見つけるに

は至っていない．そのため本研究においては，収束しない（本計算では，3節に示した計算ルーチンを20回実施し，収束解が得られない場合）と判断した時間ステップは，そのままスキップし，その次の時間ステップに前収束状態をそのまま移行して，そこから再度収束計算を行っている．ただしこの方法は，根本的な解決策にはなっていない．現在，この収束

問題について対応策を検討しているが、現時点では他に方法はない。よって、本論文に示す解析結果は、上述した計算法の前提に基づくものであることをご承知頂きたい。

(3) 有効入力動係数の応答特性

上述したように、有効入力動係数は式(23a)(23b)で定義され、式(24a)(24b)からキネマティック応答を算定し、その最大振幅を表層地盤の加速度応答の最大振幅で除して求めることができる。本解析では、境界非線形性の程度の違いが入力損失効果にどの様に影響を与えるかを確認するため、基盤入力動の加速度振幅を、1Gal, 50Gal, 100Gal, 200Gal, 400Galの5ケースについて解析を行った。図-6にその結果を示す。図中の実線は境界を完全密着条件として計算した値を示している。

まず、境界部に滑り・剥離の非線形性が生じない程度の入力振幅を与えて、このときの有効入力動係数が、完全密着条件として計算した値と一致することを確認する。本解析では入力レベル1Galのケースを本検証に用いる。本解析ケースでは、境界部に滑り・剥離の境界非線形性は一切生じていない。本解析から得られた有効入力動係数は、図-6に示すように境界部を完全密着条件とした線形解と一致していることが確認できる。

次に完全密着条件下における応答特性を確認する。水平方向の有効入力動係数 η_{eff} は、低振動数側で1.0、表層地盤の1次卓越振動数に移行するにしたがって0.95まで低下し、高振動数側で増幅する傾向が見られる。また、回転方向の有効入力動係数 φ_{eff} は、振動数が高くなるに伴い増加し、表層地盤の1次卓越振動数からその増加率が若干大きくなる傾向が現れている。こうした応答特性は、著者らによる研究¹¹⁾に示されているように、基礎径 a に対する基礎長 H の比(基礎長径比 H/a)に大きく影響を受けるものである。著者らの研究¹¹⁾によれば、基礎長径比 H/a が小さくなると、基礎のキネマティックなロッキング応答は減少し、零に収束することが明らかにされている。そのため、基礎長径比 H/a が小さくなると、回転方向の有効入力動係数 φ_{eff} は零に収束し、水平方向の有効入力動係数 η_{eff} は、基盤に対する表層地盤の伝達関数の逆数に一致するようになる。反対に、基礎長径比 H/a が大きくなると、剛体基礎のキネマティックなロッキング応答は、表層地盤の1次卓越振動数近傍にピークの一つを有する応答特性に収束することが明らかにされている。これにより、水平方向と回転方向の有効入力動係数は、表層地盤の1

次卓越振動数近傍にピークを有する値に収束する。図-6に示す境界線形時の特性は、そのような基礎長径比 H/a の変化に伴う有効入力動係数の一つの応答特性に対応する。基礎長径比 H/a が有効入力動係数に及ぼす影響についての詳細は、著者らの論文¹¹⁾に述べられているので参照されたい。

次に、入力レベル50Galのケースにおける有効入力動係数に着目する。上部構造物を主体とする連成系の1次卓越振動数近傍の1.65Hz(非線形性の影響により線形時に比べて0.1Hz程度、低振動数側にシフトしている)では、有効入力動係数がパルス状に増加しており、表層地盤を主体とする連成系の2次卓越振動数3.10Hzまでの振動数領域では、境界線形時と比べて5%程度の増幅が確認できる。また、2次卓越振動数近傍では、境界線形時よりも入力損失効果が増加している。そして、それよりも高い振動数領域では境界線形時と一致する特性が現れていることが確認できる。上述した特性は水平・回転の両方向に共通する特性である。

ところが、1次卓越振動数から2次卓越振動数の間に見られた有効入力動係数の増幅は、入力レベルの増加に伴い減少し、100Gal入力のケースでは境界線形時と同程度となり、境界非線形性が相対的に大きな400Gal入力のケースでは、境界線形時よりも低下する特性が現れている。また表層地盤を主体とする2次卓越振動数近傍では、入力レベルの増加に伴い有効入力動係数は減少し、400Galのケースにおいては、境界線形時と比較して、水平と回転の両方向でおよそ13%程度の減少が生じている。さらに高次振動数領域でも境界非線形性に伴う入力損失効果の増加が顕著に現れてくる。

以上のことから、入力レベルの違いによる非線形程度の違いが、入力損失効果を増加させる場合と減少させる場合があること、そしてその特性は振動数によって異なること、さらに、400Galのケースに見るように、境界非線形性が著しく生じることにより、入力損失効果が全振動数領域に亘り増加する傾向にあることが判明した。以下でその要因について考察する。

(4) 考察

境界非線形性の影響により入力損失効果が変化するとすれば、それは式(24a)(24b)を構成する G_{eff}^* の変化に他ならない。 G_{eff}^* は地動入力に対するキネマティック応答の増幅関数である。式(17)に見るように、 G_{eff}^* の分子は作用動土圧特性を表しており、また分母はインピーダンス特性を意味する。滑り・剥

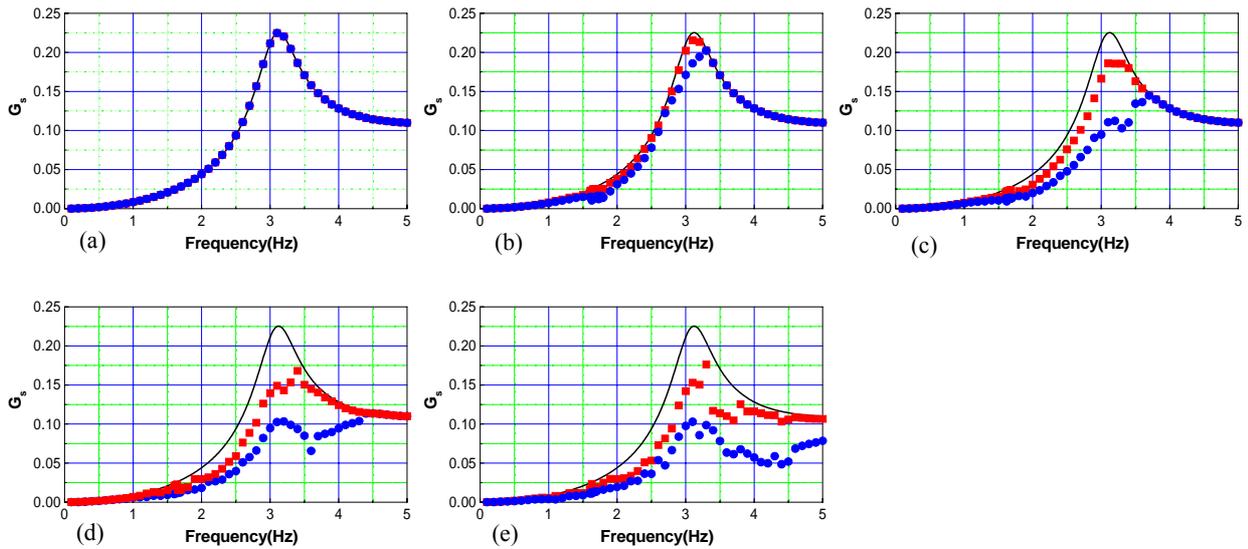


図-7 基盤入力加速度の変化に伴う無次元化作用動土圧項の変化特性

((a) : 1Gal , (b) : 50Gal , (c) : 100Gal , (d) : 200Gal , (e) : 400Gal , : 線形 , : 最大値 , : 最小値)

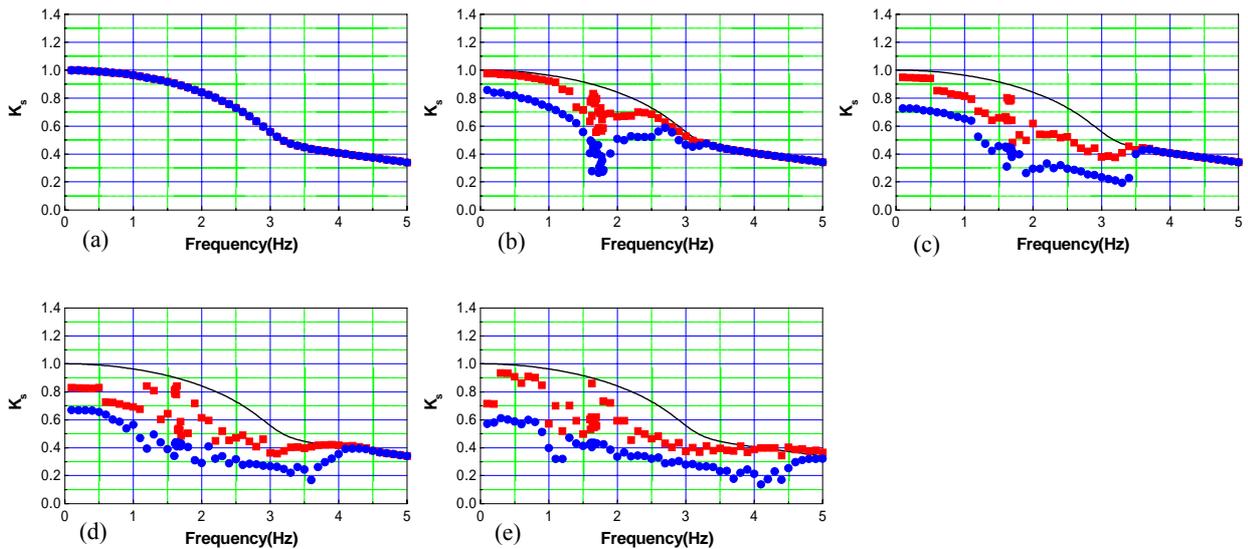


図-8 基盤入力加速度の変化に伴う無次元化剛性項の変化特性

((a) : 1Gal , (b) : 50Gal , (c) : 100Gal , (d) : 200Gal , (e) : 400Gal , : 線形 , : 最大値 , : 最小値)

離の境界非線形性により、これらの分子項と分母項の変化特性に違いが生じ、 G_{eff}^* と共に入力損失効果が変化すると考えられる。分子の作用動土圧項を静的インピーダンスの実部で無次元化した値 G_s を図-7 に示す。また G_s を式で表せば次式となる。

$$G_s = \left| \frac{\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\gamma n}^i}{\text{Re} \left(\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\beta n}^i \right)_{\omega=0}} \right| \quad (26)$$

ただし、無次元化作用土圧項 G_s (以下、単に作用土圧項と呼称) は時刻毎に境界条件が変化することから、その絶対値 (ガウス平面上の modulus, あるいは absolute value を意味する) は一定値を取らない。そこで図中には、作用土圧項 G_s の絶対値の最大と最小の振幅を同時に掲載した。また実線は完全密着条件のときの値である。また後ほど説明するインピーダンスについても同様である。

図-7 によれば，作用動土圧項 G_s は上部構造物を主体とする 1 次卓越振動数近傍 1.65Hz よりも，表層地盤を主体とする 2 次卓越振動数 3.10Hz において，非線形性の影響によりその絶対値が減少することがわかる．そして，入力レベルが 50Gal から 400Gal へと増加するに従いその傾向は顕著となり，2 次卓越振動数を中心とした広い振動数領域において減少する傾向が見られるようになる．つまり，前述した表層地盤を主体とする 2 次卓越振動数近傍から高次振動数領域における入力損失効果の増加は，この地動入力による作用動土圧項の減少が原因の一つであると考えられる．しかし，この作用動土圧項 G_s の特性からは，入力損失効果を増加させる傾向のみが顕著に現れており，50Gal 入力の場合に見られた入力損失効果の減少を説明できる特性は，図-7 からは見出せない．

そこで， G_{eff}^* の分母であるインピーダンスに着目する．ただし，分母第 1 項の K_r^* は基礎底面のロッキングインピーダンスであり，側壁境界の非線形性には影響されないため，以下では分母第 2 項のみを検討の対象にする．前述の作用動土圧項 G_s と同様に，インピーダンス項実部の剛性項を，静的インピーダンスの実部で無次元化した値 K_s （以下，剛性項と呼称）を図-8 に示す．また K_s を式で表せば次式となる．

$$K_s = \operatorname{Re} \left(\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_m^i \right) / \operatorname{Re} \left(\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{i=1}^N \Omega_{\beta n}^i \right)_{\omega=0} \quad (27)$$

図-8 から以下のことがわかる．50Gal 入力のケースでは，上部構造物を主体とする連成系の 1 次卓越振動数 1.65Hz を中心に，およそ 1.0Hz から 2.6Hz の範囲において，剛性項 K_s の低下が見られる．一方，表層地盤を主体とする 2 次卓越振動数近傍では，剛性項の減少は生じていない．この特性は，前述した 50Gal 入力のケースにおける作用動土圧項の特性と相反する傾向である．そのため， G_{eff}^* の分子に相当する作用動土圧項よりも分母に相当する剛性項の方が小さくなり，結果，およそ 1.0Hz から 2.6Hz の範囲において， G_{eff}^* が線形時よりも大きくなることになる．したがって，有効入力動係数がこの振動数範囲において増幅する理由は，上述した特性が要因であると考えられる．さらに入力レベルが増加すると，剛性項 K_s は 1 次卓越振動数 1.65Hz を中心とした振動数領域に亘り減少する傾向にある．しかし前述したように，分子の作用動土圧項 G_s も同様に，境界非

線形性の影響により広範囲に減少することになる．したがって， G_{eff}^* はこの分子項と分母項の大小関係により，その増減特性が定まると考えられる．ところで解析結果からは，入力レベルが増加し，境界非線形性の影響が顕著になるに従って，入力損失効果が増加する傾向が強い．この傾向が一般性を有する特性であるかを評価するためには，境界非線形性が進展し，側壁における地盤と基礎の接触点の多くが失われた状態を考えると分かりやすい．接触点を失えば，基礎側壁-地盤間での作用土圧は零に収束し，またそれに対する側壁のインピーダンスも零に収束することになる．これにより基礎底面のロッキングインピーダンス項 K_r^* のみが顕在し，基盤面に対するキネマティック応答は生じなくなる．したがって水平方向の有効入力動は基盤入力動そのものとなり，回転方向の有効入力動は零となる．式(23a)(23b)に示すように，これを振動数成分ごとに自由地盤の加速度応答振幅で除した値が有効入力動係数となることから，水平方向の有効入力動係数は，表層地盤の基盤に対する伝達関数の逆数となり，回転方向の有効入力動係数は全振動数領域に亘り零となる．そのため，境界非線形性が顕著に現れる場合には，上述した理由により入力損失効果が増加する傾向が強くなると考えられる．

5. 結論

上記所論を要約すると以下ようになる．

(1) 基礎側壁とそれに接する地盤間において，滑りや剥離の境界非線形性が生じた場合の入力損失効果について評価するため，3次元弾性波動論に基づく解析手法を提案した．本手法により，慣性系応答による境界非線形性の進展を考慮した全体系非線形応答から，そのときの有効入力動を抽出することが可能となった．これにより，境界非線形時における入力損失効果を評価することが可能となった．

(2) 本手法では，既往のジョイント要素に見られる物体間の貫入や剥離状態における応力の発生がなく，境界部の滑りや剥離の非線形性を適切に表現することができた．ただし本手法では，数学的な取り扱いの困難さから，滑りの判定を受けた後の境界条件式として，静止土圧力度項を無視している．そのため，静止土圧に起因する摩擦抵抗が無視されることになり，実際よりも基礎の運動に対する拘束効果が過小に評価されている可能性がある．

(3) 本手法は，各時刻で境界条件とその状態を適

合させるための収束計算を行うものであり、その収束性は、入力振動数や振幅、あるいは境界節点数や採用するモード次数の上限値に依存する。そのため、全ての計算ステップにおいて矛盾がない境界条件に収束できるわけではない。収束しない状態は2種類あり、1つは循環型の非収束状態、もう一つは非循環型の非収束状態である。現時点では収束性を確実に向上させるための方法はなく、今後その対応策を検討する必要がある。

(4) 入力損失効果は、入力レベルが増加し境界非線形性が卓越することで、表層地盤を主体とする連成系卓越振動数を中心とした振動数領域において増加することが判明した。その理由の一つとして、基礎側壁に作用する動土圧が、境界非線形性の影響によりその振動数を中心に顕著に減少することが挙げられる。

(5) 基礎側壁のインピーダンスは、上部構造物を主体とする卓越振動数を中心として減少が生じることが明らかとなった。このインピーダンスの減少はキネマティック応答を増幅させることから、動土圧の減少が起こりにくい上部構造物を主体とする卓越振動数において、入力損失効果の減少が生じることになる。しかしこの特性は、作用動土圧の減少が顕著になるにしたがって見られなくなる。

(6) 境界非線形性の影響が顕著になると、入力損失効果は増加する傾向にあることが本検討結果から明らかとなった。その理由として、境界接点の多くを失った場合、基礎の作用動土圧と側壁インピーダンスは零に収束し、基礎底面のロッキングインピーダンスのみが顕在することになる。これにより基礎盤面に対するキネマティック応答は零となり、水平方向の有効入力動係数は自由地盤の基礎に対する伝達関数の逆数に一致し、回転方向の係数は零に収束することになるためである。

(7) 以上により剛体基礎側壁と地盤との境界非線形性が入力損失効果に与える影響について、慣性系応答に起因する境界非線形性を含めた動特性を明らかにしたと考えられる。ただし、本論で検討した解析モデルは様々に想定される諸元の一例であり、表層地盤と慣性系の卓越振動数の違い、あるいは解析諸元の違いが境界非線形性を考慮した入力損失効果に如何なる影響を与えるか今後更なる検討が必要である。加えて基礎底面の浮き上がりや塑性化などの複合した非線形条件下での入力損失効果については未解明な点が多く今後の課題とする。

謝辞:本研究は、第1著者が(財)鉄道総合技術研究所在籍中に実施した基礎研究に基づくものであり、当時ご指導頂いた棚村史郎主幹(現在、鉄道技術推進センター次長)を始めとする研究室の皆様により、記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 星谷 勝, 石井 清: RC 階校舎の実測資料による地震波の入力損失の効果の検討, 土木学会論文報告集, No.327, pp.13-20, 1982.
- 2) 山原 浩: 地震時の地動と地震波の入力損失(第1報), 日本建築学会論文報告集, No.165, pp.61-66, 1969.
- 3) 山原 浩: 地震時の地動と地震波の入力損失(第2報), 日本建築学会論文報告集, No.167, pp.25-30, 1970.
- 4) 岩崎敏男, 川島一彦, 高木義和: 強震記録を用いた道路橋井筒ケーソン橋脚の地震応答解析, 土木学会論文報告集, No.293, pp.35-47, 1980.
- 5) 石井 清, 山原 浩: 大型地下タンクの実測記録による地震波の入力損失の検討, 日本建築学会論文報告集, No.312, pp.54-62, 1982.
- 6) 石井 清, 小山和夫: 地下タンクの常時微動観測による入力損失効果の検討, 土木学会論文報告集, No.339, pp.51-57, 1983.
- 7) 原田隆典, 久保慶三郎, 片山恒雄: 有効地震動の計算式とその実測例による検討, 土木学会論文集, No.362/1-4, pp.435-440, 1985.
- 8) 大平 彰, 田蔵 隆, 中桧 新, 清水勝美: 軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究, 土木学会論文集, No.362, pp.417-426, 1985.
- 9) 田中宏志, 吉田 一, 山原 浩, 平島新一, 石井 清: FEMを用いたパラメータスタディによる入力損失効果の定量的評価, 第6回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1585-1591, 1982.
- 10) 安井 讓, 井口道雄, 赤木久真, 林 康裕, 中村 充: 1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.111-118, 1998.
- 11) 齊藤正人, 西村昭彦, 渡邊啓行: 曲げ柔性の影響を考慮した大型基礎の入力損失効果に関する理論的評価, 土木学会論文集, No.731, pp.317-330, 2003.
- 12) 齊藤正人, 池亀真樹, 棚村史郎, 渡邊啓行: 地盤のひずみ依存性が入力損失効果に与える影響に関する評価, 土木学会論文集, No.738, pp.219-231, 2003.
- 13) 土岐憲三, 佐藤忠信, 三浦房紀: 強震時における地盤と構造物の間の剥離と滑動, 土木学会論文集, 第302号, pp.31-41, 1980.
- 14) Goodman, R.E.: Methods of geological engineering in

- discontinuous rocks , West Publishing Company , Ch.8 , pp.300-368 , 1976.
- 15) 土岐憲三, 三浦房紀, 大竹敏雄: 3次元ジョイント要素による地盤-構造物系の非線形震動解析, 土木学会論文報告集, 第322号, pp.51-61, 1982.
- 16) Peric, D.J. and Laursen, T.A.: Computational model for 3-D contact problems with friction based on the penalty method , *Int. J. of Mech. Engrg.*, Vol.35, 1992.
- 17) Nogami, T. and Novak, M.: Resistance of soil to a horizontally vibrating pile , *Int. J. Earthquake Engrg. and Structural Dynamics* , Vol.5 , pp.249-261 , 1977.
- 18) 田治見宏: 深い基礎を有する構造物の地震応答について, 第2回日本地震工学シンポジウム, pp.55-60, 1966.
- 19) 土岐憲三, 小松昭雄: 井筒基礎の地震応答解析に関する研究, 土木学会論文報告集, 第281号, pp.29-40, 1979.
- 20) Veletsos, A. S. and Wei, Y. T.: Lateral and rocking vibration of footings , *Proc. ASCE* , No.97, SM9 , pp.1227-1248 , 1971.
- 21) Novak, M. and Nogami, T.: Soil-pile interaction in horizontal vibration , *Int. J. Earthquake Engrg. and Structural Dynamics* , Vol.5 , pp.263-281 , 1977.
- 22) Takemiya, H. and Yamada, Y.: Layered soil-pile-structure dynamic interaction , *Int. J. Earthquake Engrg. and Structural Dynamics* , Vol.9 , pp.437-457 , 1981.
- 23) Veletsos, S. and Younan, H.: Dynamic modeling and response of rigid embedded cylinders , *J. Engrg. Mechanics* , Vol.121 , No.9 , 1995.
- 24) 原田隆典, 山下典彦, 坂梨和彦: 地盤との動的相互作用を考慮した道路橋橋脚の周期と減衰定数に関する理論的研究, 土木学会論文集, No.489/1-27, pp.227-234, 1994.
- (2002.10.10 受付)

EVALUATION OF INPUT LOSS OF DEEPLY EMBEDDED FOUNDATIONS REFLECTED TO SLIPPAGE AND SEPARATION BETWEEN SOIL AND FOUNDATION WALL

Masato SAITOH and Hiroyuki WATANABE

The present study focuses on input loss of deeply embedded foundations that support bridges and viaducts. It is predicted that slippage and separation occur at the interface between soil and the sidewall of the foundations when subjected to strong motions. Therefore, it is desirable to know the effect of slippage and separation on the input loss. This study investigates the above effect by means of analytical approach based on a three-dimensional wave propagation theory, including the influence of inertial interaction due to the mass of foundation and superstructure upon the interface. The present study gives physical understanding of the effect of slippage and separation on the input loss.