

埋込み基礎の動的相互作用基礎物理量と簡易的基礎入力動評価法

名古屋大学 工学部 社会環境工学科
建築学コース 飛田研究室 鈴木承慈

1. 研究の背景と目的

埋込みを有する基礎に S 波が鉛直下方入射する場合、地盤の揺れと基礎の揺れは異なり、地動に比べ水平入力は減少するが回転入力は励起される。これを入力の相互作用と称す。建物の耐震性評価には、このような動的相互作用の影響を適切に考慮することが重要であり、なおかつそれが簡便に設計に反映できる簡易的評価法の開発が望まれている。2000 年に導入された限界耐力計算では、動的相互作用効果を簡易に評価する方法が提案され、一般建物の設計にも利用可能となったが、入力の相互作用については、水平動の入力損失効果のみを考慮し、回転入力の励起は考慮されていない。

本論では、薄層要素法と有限要素法を容積法を用いた動的サブストラクチャー法によって結合した手法を用いて、直接基礎の動的相互作用効果に影響を及ぼす要因を分析した後、これを精算解として新たに提案する簡易的基礎入力動評価法と比較し、その妥当性を検討した。本梗概では紙面の都合上、簡易的評価法の検討について述べる。

2. 基礎入力動の簡易的評価法

基礎入力動とは無質量剛基礎に地震波が入射した時の応答で、振動数に依存する複素関数である。埋込み基礎では地盤の 3 次元性を厳密に扱うことが煩雑で、実用的でない。そこで本論では基礎を底面、側面部分の組合せとして簡易的に評価する方法を試みる。本検討では入射波を SH 波、地盤は半無限一様とする。

(1) 最小 2 乗法による評価法

本評価法は地表面基礎の近似解法を埋込み基礎に拡張したものである。半無限一様地盤中にある基礎幅 $2b \times 2c$ 、埋込み深さ E の基礎と座標を図 1 に示す。地動と剛基礎の変位差を最小にするという条件から基礎入力動を決定する。計算では基礎を 5 つの面に分割し、変位差の 2 乗和の合計 W を以下に定義する。

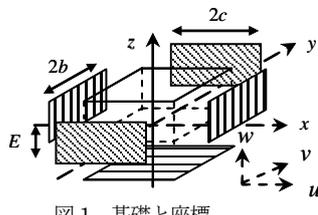


図 1 基礎と座標

これを各基礎入力動の成分で偏微分し 0 と置くことで基礎入力動を得る。ここで S は分離した基礎の面積、 Δ_x^* 、 Δ_y^* 、 Δ_z^* は基礎入力動の各方向の並進成分、 Φ_x^* 、 Φ_y^* 、 Φ_z^* は各軸回りの回転成分を表し、 u 、 v 、 w は地動の各成分で、方向は図 1 による。本評価法では、必要なパラメータが基礎寸法、地盤のせん断波速度、入射角のみで簡便に結果を得ることができ、斜め入射の場合にも適用できる。この解を簡易解[1]とする。

$$W = \sum \int \{ (\Delta_x^* - y\Phi_z^* - z\Phi_y^*) - u \}^2 dS + \sum \int \{ (\Delta_y^* + x\Phi_z^* - z\Phi_x^*) - v \}^2 dS + \sum \int \{ (\Delta_z^* + y\Phi_x^* - x\Phi_y^*) - w \}^2 dS \quad (1)$$

これを各基礎入力動の成分で偏微分し 0 と置くことで基礎入力動を得る。ここで S は分離した基礎の面積、 Δ_x^* 、 Δ_y^* 、 Δ_z^* は基礎入力動の各方向の並進成分、 Φ_x^* 、 Φ_y^* 、 Φ_z^* は各軸回りの回転成分を表し、 u 、 v 、 w は地動の各成分で、方向は図 1 による。本評価法では、必要なパラメータが基礎寸法、地盤のせん断波速度、入射角のみで簡便に結果を得ることができ、斜め入射の場合にも適用できる。この解を簡易解[1]とする。

(2) インピーダンスを用いた評価法

インピーダンスは、実部(Re.)が地盤のばね剛性を、虚部(Im.)が主として地下逸散減衰による減衰抵抗を表す。無質量剛基礎が地震波を受けた時の基礎拘束力をドライビングフォース(f_H 、

f_R)と呼び、インピーダンスの水平(K_{HH})、回転(K_{RR})、水平—回転(K_{HR})成分と基礎入力動を用いて、

$$\begin{Bmatrix} \Delta_x^* \\ \Phi_y^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} f_H \\ f_R \end{Bmatrix} \quad (2)$$

と表される。本評価法ではインピーダンス、ドライビングフォースを簡易的に評価し、式(2)から基礎入力動を求める。今、地表面基礎の水平(K_{HH}^b)、上下(K_{VV}^b)、回転(K_{RR}^b)インピーダンスを既知とする。底面部分は地表面基礎と同じとし、側面部分はこれに埋込み深さをパラメータに持つ係数 α 、 β を乗じて表現し、それらの足し合わせで埋込み基礎のインピーダンスを評価する。基礎寸法は図 1 と同じである。表 1 に係数一覧を示す。

$$K_{HH} = K_{HH}^b + \{ \alpha K_{HH}^b + \beta K_{VV}^b \} \times E / b \quad (3)$$

$$K_{RR} = K_{RR}^b + \{ \alpha K_{HH}^b c^2 + \beta K_{VV}^b (E/2)^2 \} \times E / b \quad (4)$$

$$K_{HR} = \{ \alpha K_{HH}^b c + \beta K_{VV}^b E / 2 \} \times E / b \quad (5)$$

表 1 係数一覧

		$1/3 \leq E/b < 1$	$1 \leq E/b < 3$
K_{HH}	α	実部 1	虚部 $-0.12 \times (E/b) + 0.12$
	β	実部 0	虚部 0.8
K_{RR}	α, β	実部 $-0.18 \times (E/b)^2 + 0.62 \times (E/b) + 0.93$	虚部 $0.2 \times (E/b) + 0.8$
	α, β	実部 $-0.2 \times (E/b) + 0.57$	虚部 1.2
K_{HR}	α	実部 0.2	虚部 0
	β	実部 -0.3	虚部 0.45

ドライビングフォースを求める概念図を図 2 に示す。底面、側面部分のインピーダンスにその位置での変位を乗じて水平力とする。回転成分はそれに基礎底面からの腕の長さを乗じて求める。

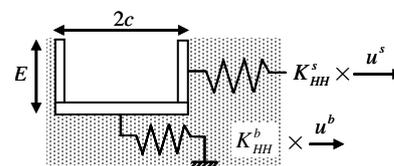


図 2 ドライビングフォースの概念図

$$f_H = K_{HH}^b u^b + K_{HH}^s u^s + p_H \quad (6)$$

$$f_R = K_{RR} u^s + p_R \quad (7)$$

ここで K_{HH}^s は側面部分のインピーダンスであり、式(3)の第 2 項を表す。 u^b は基礎底面の変位、 u^s は側面の平均変位を表し、 p_H 、 p_R はそれぞれ切欠きによる水平力、回転モーメントであり、 U_0 を自由地盤の応答、 G を地盤の剛性、 a_0 を無次元振動数 ($= \omega b / V_s$) とすると、

$$p_H = 4U_0 G c a_0 \sin(E/b \cdot a_0) \quad (8)$$

$$p_R = 4U_0 G b c [1 - \cos(E/b \cdot a_0)] \quad (9)$$

と表せる。本評価法による解を簡易解[2]とする。

3. 精算解と簡易解の比較

図 3 に示すインピーダンスの縦軸は無次元化した水平 (K_{HH}/Gb)、上下 (K_{VV}/Gb)、回転 (K_{RR}/Gb^3)、水平—回転 (K_{HR}/Gb^2) であり、図 4、6 に示す基礎入力動の縦軸は自由地盤の応答 (U_0) に対する基礎底面での水平 (Δ_x^*)、回転 ($b \times \Phi_y^*$)、ねじれ ($b \times \Phi_z^*$) 応答の伝達関数を示している。横軸は無次元振動数 a_0 である。

図3に簡易解[2]で用いるインピーダンスの比較を示す。水平方向の虚部でやや値に差があるものの、精算解と簡易解は概ね対応している。

簡易解[1]を用いて入射角 θ をパラメータに比較した基礎入力動を図4に示す。簡易解[1](灰色)はピークとなる振動数が高振動数側になり、そこでは過大評価となっている。

図5にドライビングフォースの比較を示す。水平成分はよく表現できているが、(b)に示す回転の実部は値が大きく異なる。

図6に基礎入力動の比較を示す。簡易解[1]は水平入力で埋込みが深くなる($E/b=1$)と値が0まで落ち込んでいる。一方、簡易解[2](黒色)では水平入力は精算解の傾向をよく再現できているが、回転入力は常に過小評価している。主な原因として図5(b)に示す回転のドライビングフォースの実部が精算解と大きく異なることが挙げられ、この傾向は(d)に示す切欠きによる回転モーメントの影響であると考えられる。

そこで切欠きによる回転モーメント p_R を除いたものをドライビングフォースとして計算し、得られたドライビングフォースを図5(c)に、基礎入力動を図6(c)、(d)に示す。図5(c)の実部が改善され、図6(d)の回転入力のみならず(c)の水平入力も精算解とよく対応するようになった。今回検討した範囲では、簡易解[2]は十分実用に供しうる結果となった。

4.まとめ

本論では地盤性状、基礎形状、入射角が直接基礎の動的相互作用基礎物理量に及ぼす影響を検討し、さらに基礎入力動の簡易評価手法を新たに提案した。最小2乗法による評価法では、極小値、極大値で差が大きいものの容易に斜め入射問題に適用できる。インピーダンスを用いた評価法では、水平入力は精算解とよく対応するものの回転入力は過小評価となった。そこでドライビングフォースの回転成分を工夫したところ精算解とよく対応するようになった。今後はドライビングフォースの回転成分の扱いをさらに検討し適用範囲を明確にするとともに、これらの評価法を成層地盤へと展開するなど実設計で活用しやすいように改良を加えていく必要がある。

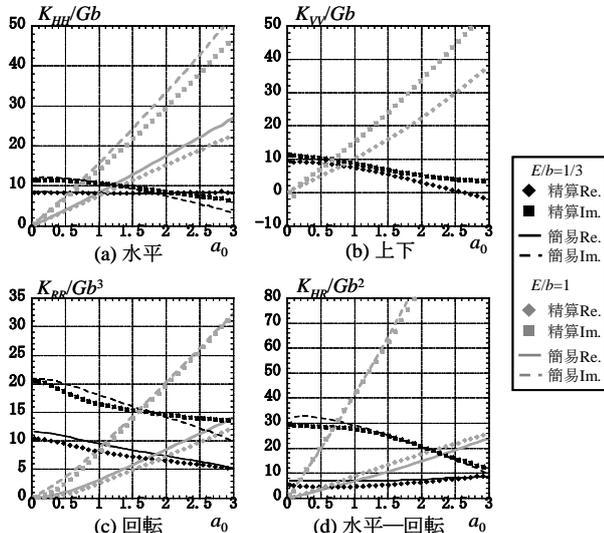


図3 インピーダンスの比較

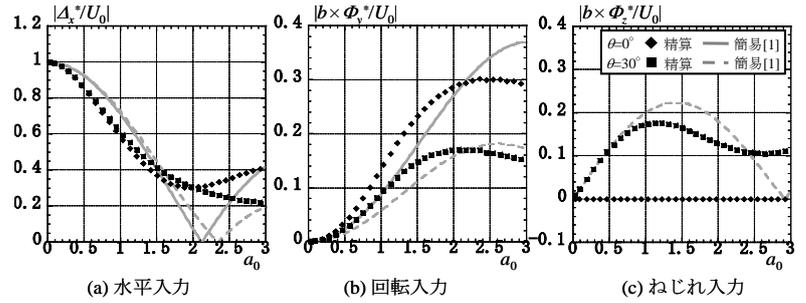


図4 入射角による基礎入力動の比較

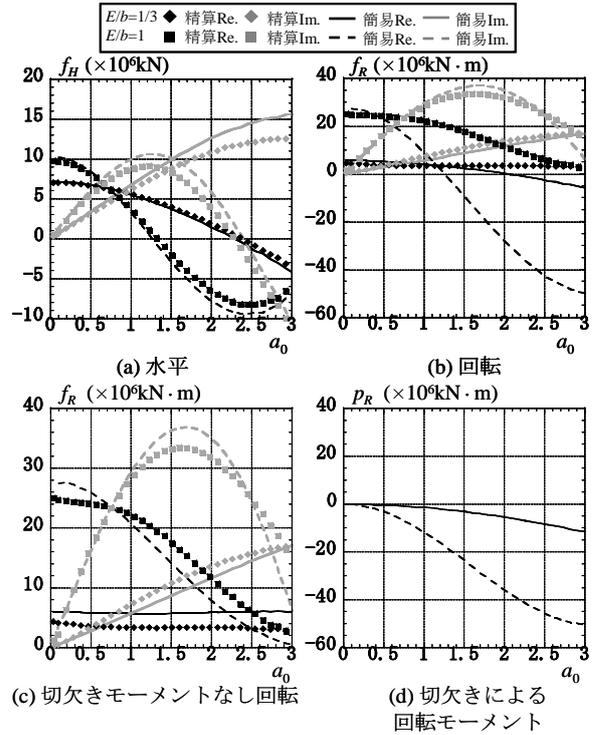


図5 ドライビングフォースの比較

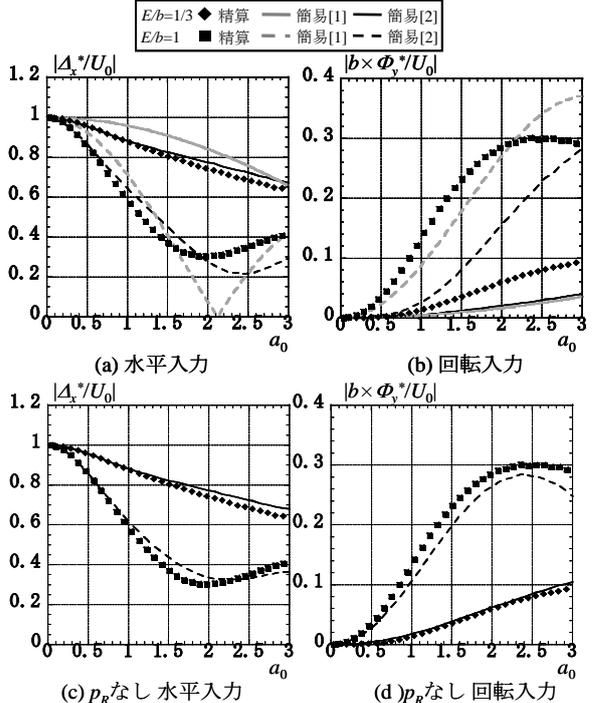


図6 埋込み深さによる基礎入力動の比較