

埋込み基礎の基礎入力動簡易評価法におけるインピーダンス評価の影響

Effect of Impedance on Conventional Evaluation Method for Foundation Input Motion of Embedded Foundation

動的相互作用
埋込み基礎

2. 構造 - 2. 振動
基礎入力動
切欠き力

インピーダンス
限界耐力計算法

正会員 ○鈴木 承慈* SUZUKI Tsuguyoshi
正会員 護 雅史** MORI Masafumi
正会員 福和 伸夫*** FUKUWA Nobuo

1. はじめに

建物と地盤の動的相互作用は、より実現象に近い解析や設計の為に重要な現象だが、一般建物の設計ではあまり考慮されていない。その原因として、解析手法の理論が高度であることが挙げられており、一般建物にも広く考慮される為には簡易な評価手法の提案が必要である。

埋込み基礎の基礎入力動は、Luco¹⁾によって示された厳密な表現に対し、インピーダンスが既知であることを前提として、Iguchi²⁾は最小2乗近似を導入し近似解析法を提示した。また、栗本・井口³⁾はそれを自由地盤の変位のみから計算するよう改良した。筆者ら⁴⁾もインピーダンスを用いない基礎入力動の簡易評価法と、地表面基礎のインピーダンスから計算する埋込み基礎のインピーダンス、基礎入力動の簡易評価法を提案している。このように、現在提案されている埋込み基礎の基礎入力動簡易評価法の多くは、インピーダンスを必要とする。

一般的にインピーダンスは振動数依存性を有するが、動的相互作用効果を簡便に取り入れた解析では、例えば、インピーダンスを定数化したり、元より静的な値として評価する等、この特性が考慮されないことが多い。2000年に導入された限界耐力計算法(以下、限耐法と略記)でも同様の扱い方となっている⁵⁾。

そこで本論では、インピーダンスの評価法の違いが、栗本・井口、あるいは筆者らが提案している簡易手法に基づく基礎入力動評価結果に与える影響について分析するとともに、その分析結果から、各種インピーダンス評価法の適用性について検討する。

2. 計算手法の概要

本論では、半無限一様地盤に埋め込まれた剛基礎を対象として、基礎入力動簡易評価法の適用可能性を検討する。その際に使用するインピーダンスとして、手法A：精算解、手法B：精算解を定数化したもの、手法C：限耐法の3種類を検討する。基礎入力動は、精算解法を手法1、簡易評価法に手法A～手法Cのインピーダンスを使用するものを手法2～手法4、切欠き力を考慮しないも

のを手法5とし、評価結果を互いに比較検討する。ここで、精算解法には薄層要素法と有限要素法を容積法に基づく動的サブストラクチャー法によって結合した手法⁶⁾を用いる。表1、2に検討する手法の一覧を示す。

表1 検討するインピーダンス評価法一覧

手法A	精算解
手法B	精算解定数化
手法C	限耐法

表2 検討する基礎入力動評価法一覧

手法1	精算解法
手法2	簡易法+手法A
手法3	簡易法+手法B
手法4	簡易法+手法C
手法5	簡易法+切欠き力なし

2.1 基礎入力動の近似解法の概要

栗本・井口はインピーダンスと自由地盤の変位から基礎入力動を求める近似解析法を以下のように提案した。

$$\{U^*\} = [H]^{-1} \int_S [A(\bar{X})]^T \{u^f(\bar{X})\} dS - [K]^{-1} \{T^f\}, \bar{X} \in S \quad (1)$$

ここで、

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

$$[H] = \int_S [A(\bar{X})]^T [A(\bar{X})] dS \quad (3)$$

$$\{u^f(X)\} = \{u_x^f(X), u_y^f(X), u_z^f(X)\}^T \quad (4)$$

$$\{T^f\} = \omega^2 \int_V \rho(X) [A(X)]^T \{u^f(X)\} dV, X \in V \quad (5)$$

$$[A(X)] = \begin{bmatrix} 1 & . & . & z & -y \\ . & 1 & . & -z & . & x \\ . & . & 1 & y & -x & . \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\{U^*\}$ は基礎入力動の並進変位、回転の各成分である。積分区間の S は基礎と地盤の境界面を表し、その領域上の変数を $\bar{X}$ とする。 V は基礎内部の領域を表し、その領域内の変数を X で表す。 $\{u^f(\cdot)\}$ は自由地盤の変位で、 $\{T^f\}$ は基礎が占める地盤領域内の慣性力の合力、合モーメントであり、切欠き力とも呼ばれている。 $[K]$ はインピーダンス、 ω は円振動数、 ρ は地盤の密度である。

*名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

**名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・博士(工学)

***名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
Assoc. Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ. Dr. Eng.
Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ. Dr. Eng.

式(1)で表される近似解法では、以下のように物理的な解釈が与えられている。第1項は、剛基礎の変位と地盤の変位を平均操作によって適合させるものであり、第2項は基礎のある領域に発生する慣性力(いわゆる切欠き力)によって生じる変位を除去する操作である。第2項は厳密な評価式であるが、インピーダンスを必要とする。

文献⁴⁾では、SH波調和振動が鉛直入射した場合の式(1)第1項に相当するものが具体的に計算してある為、本論ではそれを使用する。一方、第2項は次式で与えられる。

$$[K]^{-1}\{T^f\} = \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 4U_0 G^* b_e a_0 \sin(E/b_e \cdot a_0) \\ 4U_0 G^* b_e^2 (1 - \cos(E/b_e \cdot a_0)) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここに、 U_0 は地表面での振幅、 G^* は地盤の材料減衰(減衰定数 h)を考慮した複素剛性 $G^* = G(1 + 2hi)$ 、 $b_e = (bc)^{0.5}$ は基礎底面の面積($2b \times 2c$)と等価な正方形基礎の半幅を表し、 E は埋込み深さを表す。 a_0 は無次元化振動数で、 $a_0 = \omega b_e / V_s$ である。

2.2 インピーダンスの評価方法

本節では、手法B、Cの具体的な計算手法を述べる。

手法B(精算解定数化)では、インピーダンス実部は、振動数0付近の準静的な値を全振動数に適用する。インピーダンス虚部は、動的な地盤ばね虚部の勾配のうち、最小となる値として減衰係数とし、それに円振動数を乗じて求める。なお、精算解を定数化する場合、虚部は解析の精度を考慮して振動数1.0Hz以上の値に対して最小値を求めた。また、水平—回転連成項は考慮していない。

$$C = \min(K_{im} / \omega) \quad (8)$$

$$K_{im}(\omega) = C\omega \quad (9)$$

次に、手法C(限耐法)について述べる⁷⁾。埋込み基礎のインピーダンス実部は、底面の成分と側面の成分を足し合わせて評価する。底面はコーンモデルを用い、側面は底面要素を補正して求める。本検討で用いる半無限一様地盤での結果を示す。

$$K_h = K_{hb} + K_{he} = \frac{8Gr_{h0}}{2 - \nu} \left(1 + \xi_{he} \frac{E}{r_{h0}} \right) \quad (10)$$

$$K_r = K_{rb} + K_{re} = \frac{8Gr_{r0}^3}{3(1 - \nu)} \left\{ 1 + \xi_{re} \left(2.3 \frac{E}{r_{r0}} + 0.58 \left(\frac{E}{r_{r0}} \right)^3 \right) \right\} \quad (11)$$

ここで、 K_h, K_r は水平、回転のインピーダンス実部である。 r_{h0}, r_{r0} はそれぞれ等価な面積、断面2次モーメントを持つ円形基礎の半径で、以下のように表される。なお、側面土圧の低減係数 ξ_{he}, ξ_{re} は1.0とした。

$$r_{h0} = \sqrt{4bc/\pi} \quad (12)$$

$$r_{r0} = (16b^3c/3\pi)^{1/4} \quad (13)$$

減衰効果を表すインピーダンス虚部は、地盤の材料減

衰に起因する項と逸散減衰の項の和で、半無限一様地盤では以下のように表す。なお、埋込み部分による減衰は考慮していないと解説されている⁸⁾。

$$K_h'' = 2h_h' K_{hb} + \rho V_s \pi r_{h0}^2 \omega \quad (14)$$

$$K_r'' = 2h_r' K_{rb} + \rho V_L \pi r_{r0}^4 / 4 \cdot \omega \quad (15)$$

K_h'', K_r'' は水平、回転のインピーダンス虚部であり、 V_L はLysmerのAnalog Velocityである。 h_h', h_r' は基礎底面のインピーダンスの虚部と実部から計算するもので、半無限一様地盤の場合、以下ようになる。

$$h_h' = h_r' = \sin(0.5 \tan^{-1}(K'/K)) \quad (16)$$

3. 精算解との簡易解法との比較

3.1 解析条件

解析ケースと精算解の解析条件について述べる。半無限一様地盤中に埋め込まれた剛基礎に対し、埋込み深さ E をパラメータとして $E/b_e = 1/3, 2/3, 1.0, 2.0, 3.0$ の5ケースを検討する。基礎の平面規模は $2b \times 2c = 24\text{m} \times 24\text{m}$ とし、 $b_e = 12\text{m}$ である。表3に解析ケースのパラメータを、表4に地盤条件を示す。埋込み部分は6面体SOLID要素を用いてモデル化し、地盤の分割数は地表面から埋込み深さの $1/16\text{m} \times 40, 1\text{m} \times 50, 2\text{m} \times 50, 4\text{m} \times 25$ とした。

表3 検討パラメータ一覧

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
$E(\text{m})$	4	8	12	24	36
E/b_e	1/3	2/3	1.0	2.0	3.0

表4 地盤条件

$V_s (\text{m/s})$	$\rho (\text{t/m}^3)$	ν	h
250	1.8	0.45	0.03

3.2 インピーダンスの比較

図1に、精算解と簡易評価法の比較を示す。横軸は全無次元化振動数 a_0 であり、左列から無次元化したインピーダンスの水平(K_{HH}/Gb_e) (図1(1a)~(5a))、回転(K_{RR}/Gb_e^3) (図1(1b)~(5b))、自由地盤の地表面での応答(U_0)に対する基礎底面での水平(Δ_x^*) (図1(1c)~(5c))、回転(Φ_y^*) (図1(1d)~(5d))応答の伝達関数である。

水平インピーダンス実部では、手法B、Cともに振動数依存性は考慮できないが、CASE1程度の埋込み深さでは手法Aとよく対応している。また手法B、手法Cの実部はよく対応しており、限耐法の妥当性が確認できる。水平インピーダンス虚部は、埋込みが深くなるに従って手法Aと手法Bとは次第に乖離していく傾向が見られる。手法Cでは埋込み部の減衰効果を考慮していない為、全てのケースで小さい値となった。

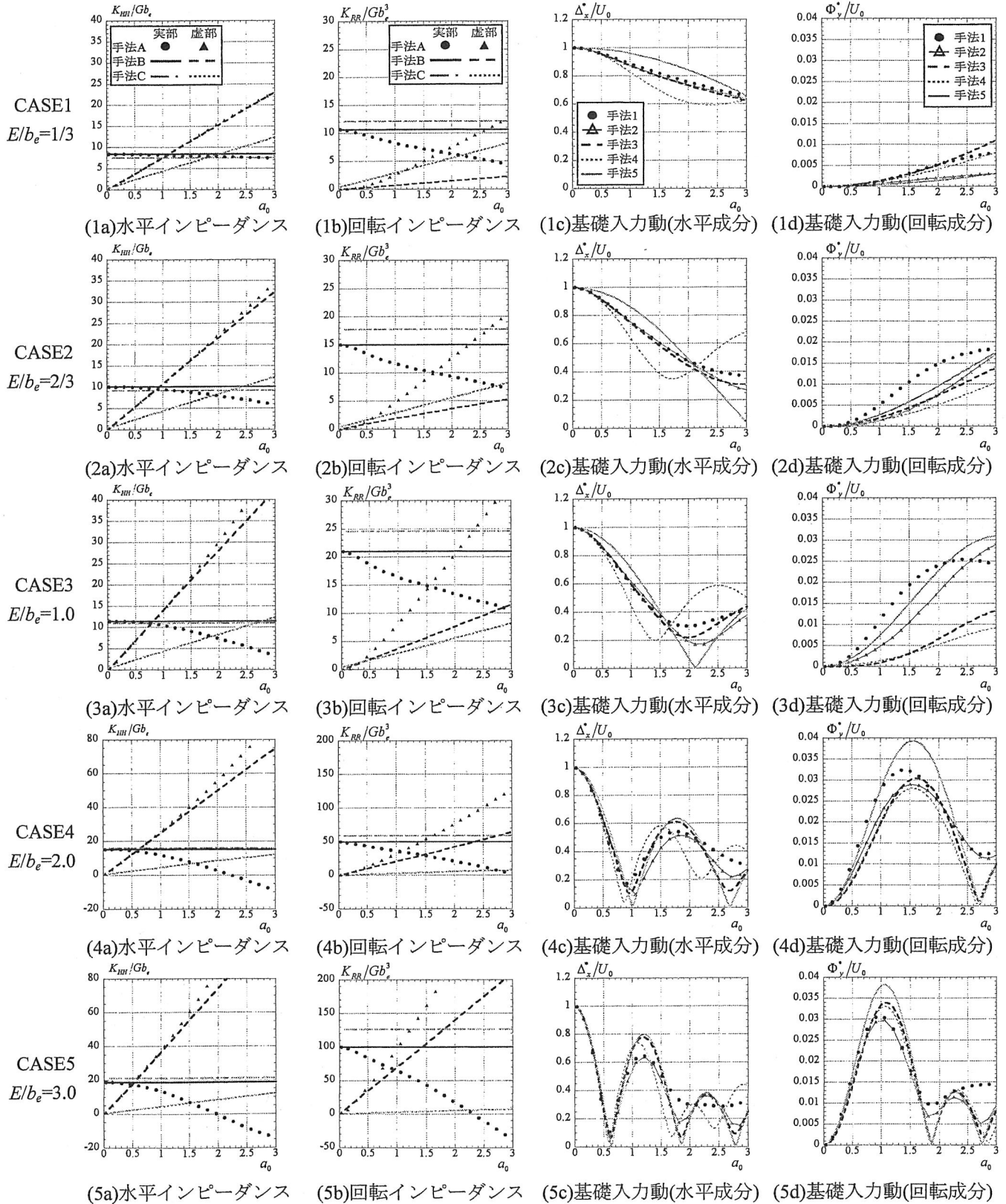


図1 精算解と簡易評価法の比較

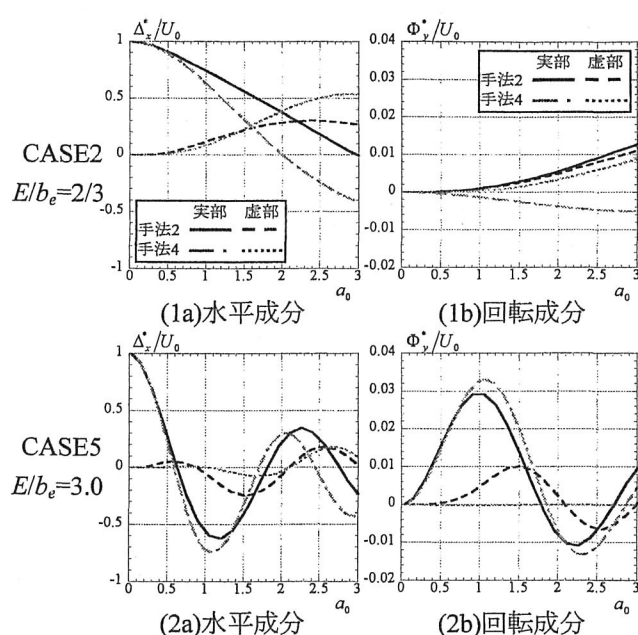


図2 基礎入力動の実部・虚部別比較例

回転インピーダンス実部について、手法Cでは、手法Bより1~3割程度大きい評価となっていることが分かる。これは側面の評価方法による影響と考えられる。回転インピーダンス虚部は実部と同様に振動数依存性が強く、手法Bでは低振動数で最小値をとる為、手法Aとの差は大きい。手法Cでも同様に全てのケースで小さい値だが、埋め込みが深くなるに従って、手法Bと比べてもその差は非常に大きい結果となった。

3.3 基礎入力動の比較

水平成分では、全てのケースで手法1と手法2がよく対応している。手法3は、CASE1~3では手法1ともよく対応しているが、埋込みが深いCASE4、5では手法5とあまり変わらず、切欠き力の影響があまり無いことが分かる。これは、手法3が水平・回転連成インピーダンスを無視しており、回転の切欠きモーメントによる水平変位が考慮されない為である。また、手法4は、CASE1~3で谷となる振動数が低振動数側に移動する傾向を示した。この要因に関連して、図2に手法2、4の実部・虚部別の比較を示す。手法4では使用する水平インピーダンスの虚部が精算解より小さい為、インピーダンスの逆行列の実部が大きくなり、より強く切欠き力の影響が表れる。その結果、図2(1a)に示すように、基礎入力動の実部が負となり、振幅で示すと谷になって見える(図1(2c))。CASE4、5では、水平インピーダンスの実部の増加に伴ってインピーダンスの逆行列と切欠き力の虚部が小さくなる為、最初の谷の位置は他の手法と変わらない結果となった。これらを踏まえると、手法4の適用性は高くない

と言える。手法5では、値が0に落ち込む谷があるものの、基本的な性状は十分捉えられている。

回転成分についても、手法1と手法2はよく対応していることが分かる。特に、埋込みが深いCASE4、5は最大応答をよく表現している。手法3、4のCASE3では手法5よりも手法1との対応が悪いが、図2(1b)のように基礎入力動を実部、虚部に分けて検討すると、CASE2でも手法1と差が大きいことが分かる。さらに、CASE1でも同様の傾向があることを確認している。この原因は基礎入力動水平成分の手法4で対応が悪いことと同様に、回転インピーダンスの虚部が精算解より非常に小さいことにある。これらから、回転成分では、手法3、4の適用性は高くないと言える。手法5では、値が0になる谷があるものの、全ケースで基本的な傾向が捉えられている。

4. まとめ

本論では、栗本・井口や著者らが提案した埋込み基礎の基礎入力動簡易評価法を対象として、各種インピーダンス評価の適用性について検討した。基礎入力動の水平成分では、埋込みが浅い場合は、定数で評価したインピーダンスを用いる手法3でも十分評価できるが、埋込みが深い場合は、切欠き力を考慮しない手法5でもあまり差は無いことを示した。回転成分については、インピーダンスの振動数依存性が強い為、定数で評価したインピーダンス(手法3、4)は適用性があまり高くない。一方で、手法5は、検討した範囲では概ね対応していた。限耐法に基づく手法4は、埋込み部の減衰効果を見逃していることが、評価結果に影響している可能性がある。

謝辞

本論の作成に当たって、東京理科大学の井口道雄名誉教授に貴重なご意見、ご討論をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Luco, J. E. : On the relation between radiation and scattering problems for foundations embedded in an elastic half-space, Soil Dyn. Earthq. Eng., Vol. 5, No. 2, pp.97-101, 1986.
- 2) Iguchi, M. : An Approximate Analysis of Input Motions for Rigid Embedded Foundations, Trans. of A.I.J., No.315, pp.61-75, 1982
- 3) 栗本修、井口道雄：実地震記録に基づく基礎入力動評価、日本建築学会構造系論文集、第472号、pp.67-74、1995.7
- 4) 鈴木承慈、福和伸夫、護雅史：埋込み基礎の基礎入力動簡易評価法、日本建築学会構造系論文集、第661号、pp.535-541、2011.3
- 5) 国土交通省ほか：2007年度版建築物の構造関係技術基準解説書、2007.8
- 6) 文学章：地盤と建物との動的相互作用における基礎形式・基礎形状・隣接建物の影響に関する解析的研究、名古屋大学学位論文、2006.3
- 7) 飯場正紀：振動台実験に基づく建物・基礎の地震時挙動の解明および地盤の影響を考慮した地震応答評価法の提案に関する研究、名古屋大学学位論文、2002
- 8) 日本建築学会：ワークショップ「建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法」、pp.2-7-2-18、2011