

埋込み基礎における動的相互作用効果の簡易評価法に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期課程 2年 飛田研究室 鈴木 承慈

1. 序論

近年の地震被害では、観測された地震動の強さに比較して建物の被害が少ない例が報告されている。この要因として、設計では考慮されていない建物の余力や、建物と地盤との動的相互作用効果等が挙げられることがある。動的相互作用効果の影響を示す研究も多い。

しかし、動的相互作用効果を取り入れた設計は、原子力発電施設や大規模構造物等の限られた場合でしか行われていない。一般の建物の設計でこの効果を取り入れるためには、簡便な評価手法が必要不可欠である。そうした中で、2000年に導入された限界耐力計算法(以降、限耐法と表記)では、入力地震動が工学的基盤で定義され、地盤増幅が考慮されるとともに、動的相互作用効果を簡易に評価する方法が提示された。これによって、一般の建物でも動的相互作用効果を取り入れた、より実現象に近い耐震設計が可能となったが、限耐法では簡便性ゆえにインピーダンスを静的値として表現しているなど、考慮していない点もある。

また、直接基礎と同様に、杭基礎にも何らかの埋込みが存在する場合が多い。限界耐力計算法における杭基礎インピーダンスの評価方法にあるように、杭基礎はロッキングに対する抵抗力は大きいものの、スウェイに対する抵抗力はその静的なインピーダンスで地表面基礎と同程度である。杭基礎で埋込みを考慮することで、側面の抵抗によるインピーダンスの増加が期待できるが、簡便な手法によってそれを取り入れる取り組みはまだ少ないのが現状である。

本研究では、埋込み基礎における動的相互作用効果を簡易に評価する手法の提案を行い、その妥当性を薄層要素法と有限要素法と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文の解析手法¹⁾による精算解と比較する。簡易評価法を提案するに先立ち、精算解のモデル化が解析精度に及ぼす影響を検討し、モデル化方法と解析結果に関する知見を得る。また、精算解による埋込みを有する杭基礎の動的相互作用特性を把握し、提案手法を埋込みを有する杭基礎へと応用した結果を検証する。

2. モデル化が解析精度に及ぼす影響

埋込み基礎は、有限要素を用いてモデル化する。本検討では、基礎の分割による影響を見るために、同じ大きさの埋込み基礎に対して、水平方向、鉛直方向の分割数を変更したケースを検討した。その解析ケース一覧を表1に、要素分割の概念図を図1に示す。共通の条件として、基礎は $2b \times 2c \times E=24 \times 24 \times 12(E/b_e=1.0)$ で均等に分割し、地盤条件は半無限一様地盤でせん断波速度 $V_s=250\text{m/s}$ 、密度 $\rho=1.8\text{t/m}^3$ 、ポアソン比 ν

$=0.45$ 、材料減衰定数 $h=0.03$ である。図2に、水平インピーダンスの実部、図3に回転入力を例に基礎の要素分割の影響を示す。基礎節点数を横軸に、図4(a)に水平インピーダンス、図4(b)に回転入力の影響を示す。対象振動数は、 0.1Hz 、 $10\text{Hz}(a_0=ab_e/V_s=3)$ であり、インピーダンスは地盤剛性 G と底面の面積等価な正方形基礎の半幅 b_e を用いて無次元化している。

図2よりインピーダンスは鉛直よりも水平方向の要素分割数の影響が大きい。図4(a)より水平方向の分割数を増すと実部高振動数域のインピーダンスが増加する。鉛直方向の分割数を増すことで、実部は高振動数域のインピーダンスが減少するが、虚部には殆ど影響がない。基礎入力動では、水平入力よりも回転入力の方が影響が大きい。回転入力では、水平方向の分割数を増すことで応答が減少し、鉛直方向の分割数を増すことで応答が増加する傾向が得られた。

3. 埋込み基礎のインピーダンスの簡易評価法の提案

提案手法では、一般建物への適用性を考慮し、基礎一

表1 解析ケース一覧

case	E/b_e	dx, dy	dz	Node
dx2.0	2.0	3.0	3.0	721
dx1.5	1.5	3.0	3.0	1281
dx1.0	1.0	3.0	3.0	2881
dz2.0	2.0	2.0	2.0	1009
dz1.5	2.0	1.5	1.5	1297
dz1.0	2.0	1.0	1.0	1873
dz0.6	2.0	0.6	0.6	3025

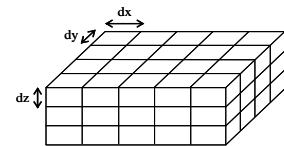


図1 要素分割の概念図

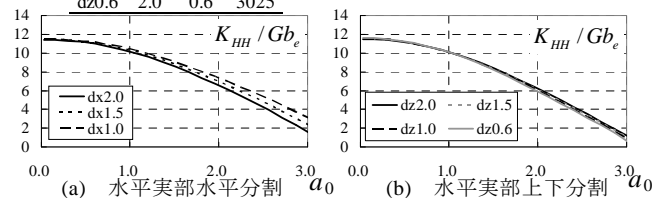


図2 基礎の要素分割がインピーダンスに与える影響

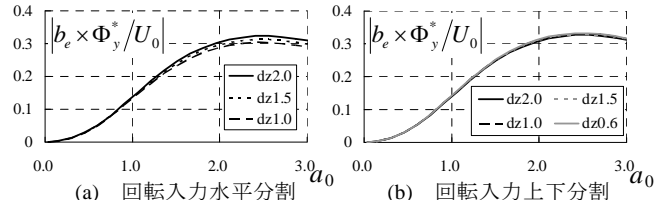


図3 基礎の要素分割が基礎入力動に与える影響

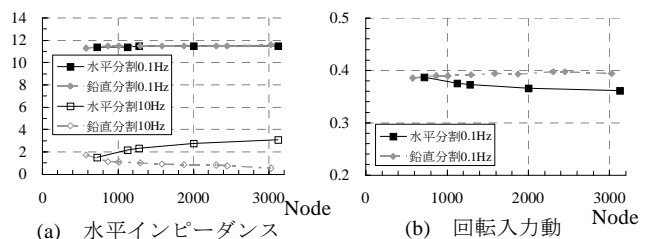


図4 分割節点数による相互作用特性の比較

現する SR モデルを対象とする。基礎は無質量剛体の矩形基礎、地盤は半無限一様地盤とする。

本研究で提案するインピーダンスの簡易評価法の概要を述べる。埋込み基礎のインピーダンスは、底面要素と側面要素に分離し、それらが埋込みの無い地表面基礎のインピーダンスの和によって表現できると仮定する。底面要素には用意した地表面基礎のインピーダンスをそのまま用い、側面要素にはそれに補正係数を施して用いる。補正係数として基礎の形状補正係数、底面要素と側面要素の地盤重複効果補正係数を提案する。補正係数を2種類設定することで、係数の定性的な意味が表現できるものとする。なお、本手法の評価対象は $a_0 \leq 3.0$ 、 $E/b_e \leq 1.0$ 、基礎底面のアスペクト比 $b/c = \lambda$ で $0.1 \sim 10.0$ とする。

式(1)~(4)に、インピーダンスの簡易評価式を、図5に足し合わせる側面の概念図を示す。

$$K_{HH} = {}^b\gamma_1 K_{HH}^b + 2\alpha_{HH} ({}^{s1}\gamma_1 K_{HH}^b + {}^{s2}\gamma_3 K_{VV}^b) \quad (1)$$

$$K_{VV} = {}^b\gamma_3 K_{VV}^b + 2\alpha_{VV} ({}^{s1}\gamma_2 + {}^{s2}\gamma_2) K_{HH}^b \quad (2)$$

$$K_{RR} = {}^b\gamma_3 K_{RR}^b + 2\alpha_{RR} \left\{ ({}^{s1}\gamma_1 K_{HH}^b + {}^{s2}\gamma_3 K_{VV}^b) \times \left(\frac{E}{2}\right)^2 + {}^{s2}\gamma_2 K_{HH}^b c^2 \right\} \quad (3)$$

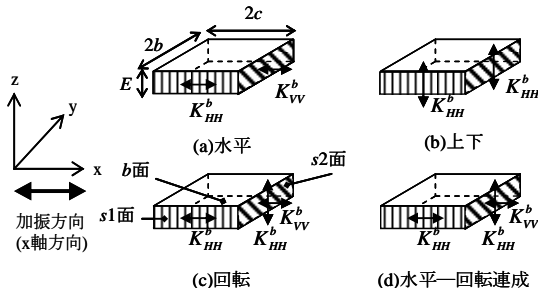


図5 側面要素の足し合わせ

表2 形状補正係数の一覧

	実部	虚部
K_{11}	$\gamma_1 = \eta \times (0.55\lambda^{0.37} + 0.45\lambda^{-0.31})$	$\gamma_1 = \eta^2$
K_{22}	$\gamma_2 = \eta \times (0.48\lambda^{0.28} + 0.52\lambda^{-0.38})$	$\gamma_2 = \eta^2$
K_{33}	$\gamma_3 = \eta \times \{0.205(\sqrt{\lambda} + 1/\sqrt{\lambda}) + 0.59\}$	$\gamma_3 = \eta^2$
K_{44}	$\gamma_4 = \eta^3 \times \lambda^{0.61}$	$\gamma_4 = \eta^{4.35} \times \lambda^{0.06}$
K_{55}	$\gamma_5 = \eta^3 \times \lambda^{-0.86}$	$\gamma_5 = \eta^{4.35} \times \lambda^{-1.05}$
K_{66}	$\gamma_6 = \eta^3 \times 0.49(\lambda + 1/\lambda)$	$\gamma_6 = \eta^{4.3} \times 0.66\lambda^{-0.9} (\lambda < 0.6)$ $\gamma_6 = 1.0 (\lambda \geq 0.6)$

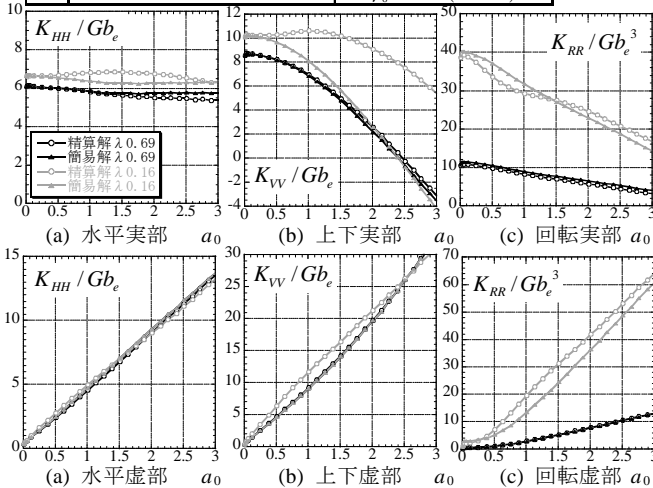


図6 形状補正係数の比較

$$K_{RR} = 2\alpha_{HH} ({}^{s1}\gamma_1 K_{HH}^b + {}^{s2}\gamma_3 K_{VV}^b) \frac{E}{2} + 2\alpha_{VV} {}^{s2}\gamma_2 K_{HH}^b c \quad (4)$$

ここで、各式左辺の K_{HH} 、 K_{VV} 、 K_{RR} 、 K_{RR} は埋込み基礎の水平、上下、回転、水平-回転連成インピーダンスである。各式右辺の K_{HH}^b 、 K_{VV}^b 、 K_{RR}^b は地表面基礎の水平、上下、回転インピーダンスであり、本手法では既知であるとしている。加振方向と側面要素の位置関係により側面要素の作用の仕方が異なることを考慮するため、加振方向に平行な側面を $s1$ 面、直交な側面を $s2$ 面と呼ぶ。また、底面を b 面と表記した。

3.1 基礎形状補正係数

杉本²⁾は、基礎の面積やアスペクト比による地表面基礎の静的インピーダンスが変化する特性を表2のように提案している。表2中の η は面積比である。本研究では、これを動的な領域にまで拡張する。

長方形基礎を対象にして、形状補正係数による簡易解と精算解の比較を図6に示す。解析モデルは2節で述べた面積の基礎に対し、アスペクト比 $\lambda = 0.69$ 、 0.16 の2ケースを比較した。図6(b)に示す上下成分の実部を除いて動的な領域もよく評価できている。細長になると上下実部の高振動数で過小評価だが、本研究ではこのまま使用する。

3.2 地盤重複効果の補正係数

式(1)~(4)に示す地盤重複効果の補正係数 α は、埋込み深さと基礎半幅の比の異なる複数の正方形埋込み基礎に対してインピーダンスが最もよく精算解と合うように、最小2乗法によりそれぞれ推定し、さらに得られた α を埋込み深さ比の関数として表現した。図7に最小2乗法によるフィッティング結果と、地盤重複効果の補正係数の比較を示す。また、図8にインピーダンスの精算解と簡易解の比較を示す。実部の $E/b_e \leq 1$ では埋込みが深くなるほど係数が増加する傾向が見られる。基礎に加力したときの応力球根との類推から、

表3 地盤重複効果の補正係数

	実部	虚部
水平 α_{HH}	$-0.25 \times (E/b_e)^2 + 0.4 \times E/b_e + 0.08$	1.0
上下 α_{VV}	$-0.03 \times (E/b_e)^2 + 0.13 \times E/b_e$	1.0
回転 α_{RR}	$-0.4 \times (E/b_e)^2 + 1.23 \times E/b_e$	1.0
連成	α_{HH} 、 α_{VV} を使用	0.5

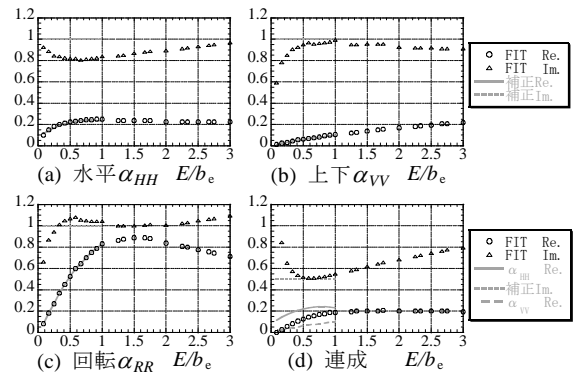


図7 地盤重複効果補正係数の比較

基礎が大きくなるほど影響する地盤の領域が増加し、重なりあう領域も増えることが予想され、定性的な傾向は正しいと考えられる。またこの範囲では、補正係数はフィッティング結果をよく表現できている。虚部の補正係数について、フィッティングでは(a)~(c)は1.0付近で最適な近似となっているが、簡便性を考慮して1.0の定数とした。図8を見て、精算解とよく対応していることが分かる。これは、インピーダンスの虚部は逸散減衰を表しており、接地面積に依存するため、側面要素と底面要素を単純に足しても過大とならないためであると考えられる。また、本提案式は、底面要素にも3.1節の形状補正係数を用いることで、矩形基礎を同様に表現できると考えられる。別途比較したところ、虚部は全体的に過大評価であったが、概ね精算解に対応している結果を得た。

4. 埋込み基礎の基礎入力動の簡易評価法の提案

埋込み基礎の基礎入力動は、底面要素と側面要素に分離したインピーダンスを用いて、入力動が作用したときのドライビングフォースを簡易評価し、それと埋込み基礎全体のインピーダンスを用いて計算する。式(5)に動的相互作用基礎物理量の関係を示す。

$$\begin{Bmatrix} \Delta_x^* \\ \Phi_y^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HR} \\ K_{RH} & K_{RR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} F_H \\ F_R \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式(6)、(7)にドライビングフォースの簡易評価を示す。

$$F_H = {}^b\gamma_1 K_{HH}^b \times u^b + 2\alpha_{HH} ({}^s\gamma_1 K_{HH}^b + {}^s\gamma_3 K_{VV}^b) \times u^s - P_H \quad (6)$$

$$F_R = K_{HR} \times u^s \quad (7)$$

ここで、 u^b は底面位置での地動変位、 u^s は側面中央位置での地動の平均変位を表す。 P_H は、底面位置での切欠き力である。なお、式(7)では、切欠き地盤の側面摩擦力は考慮していない。それは、本研究が実用的に使

用できる簡便な評価方法を志向しているとともに、一般的には施工の様子等を考慮して埋込み部の側面摩擦力を期待せずに設計を行うことが多いという知見を参考にしたためである。

図9に本提案手法によるドライビングフォースの比較、図12に基礎入力動の比較を示す。図10(a)水平動については、簡易解は精算解と良く対応していることが分かる。(b)回転動では、埋込みが浅い場合はやや大きめの評価、深い場合には過小評価となっているものの、概ね傾向は捉えられている。このような傾向になる主な要因としては、図9(b)のドライビングフォースの回転成分の実部が、精算解と比較して、埋込み深さが増すとともに小さくなっていくことが挙げられる。以上より、今回検討した範囲では、提案する簡易評価法は簡便性を考慮すると実用に供しうるものであると言える。

5. 埋込みを有する杭基礎への簡易評価法の応用

5.1 埋込みを有する杭基礎の動的相互作用特性

第3章で提案した埋込み基礎の簡易評価法を、埋込みを有する杭基礎への応用を試みる。想定するモデルについて図11に、基本条件を表4に示す。検討する解析ケースを図12に、その結果を図13に示す。地盤は2層で、杭は支持基盤に貫入する支持杭である。埋込みを有する杭基礎では解析パラメータは多岐にわたるが、埋込みの効果を把握するために、表層厚さを固定したケース(CASE-1~3)、杭長を固定したケース(CASE-4~6)を検討する。

インピーダンスの各成分全てにおいて、CASE-4~6では埋込み深さによるインピーダンスの変化、すなわち振動数に対してインピーダンスが波打つ傾向は、埋込みが深くなるほど極値を取る振動数が高振動数側に

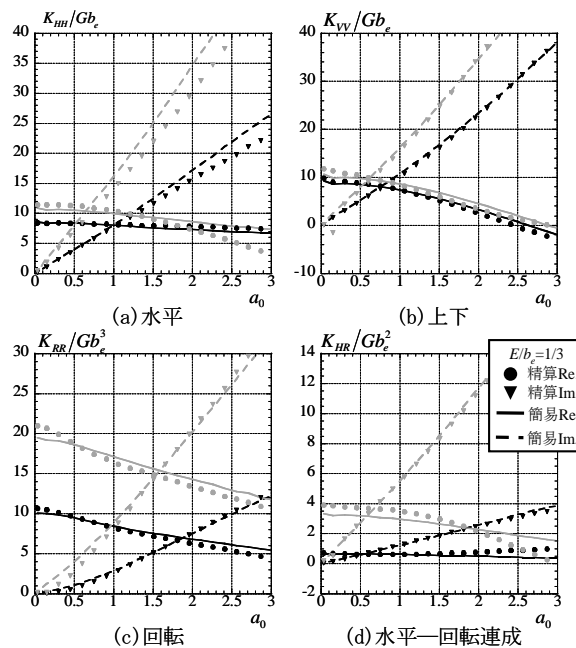


図8 埋込み深さによるインピーダンスの比較

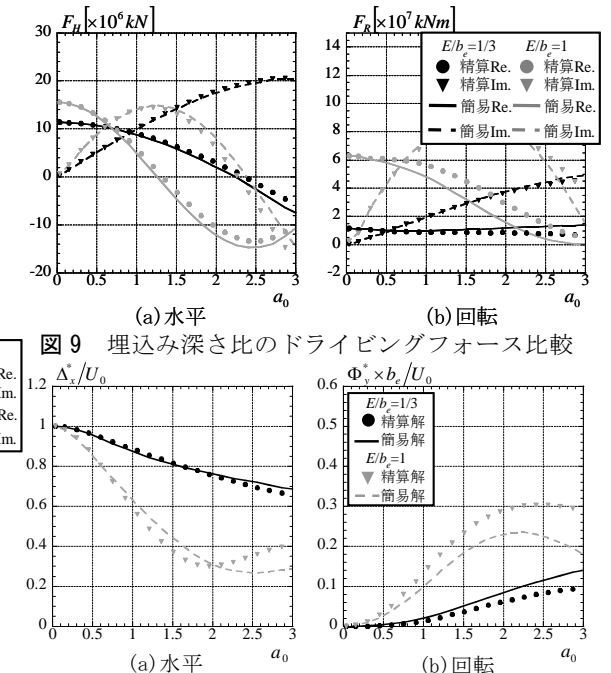


図9 埋込み深さ比のドライビングフォース比較

図10 埋込み深さ比の基礎入力動の比較

移動していることが分かる。このインピーダンスが極大となる振動数は、鉛直下方入射時に基礎底面と地盤の層境界が節とする振動数と対応していた。2層地盤での埋込みを有する基礎形式の動的相互作用特性を見る場合、基礎底面以深の地盤厚さによって分類すると傾向が読み取りやすいと類推できる。

5.2 インピーダンスの簡易評価法の応用

埋込みを有する杭基礎でも、直接基礎と同様に考え、底面要素に杭基礎のインピーダンスを使用して計算した簡易解と精算解を比較し、図14に示す。側面には地表面基礎を用いている。検討ケースは5.1節の検討を踏まえ、図12のCASE-4~6とする。なお、水平インピーダンスには、限耐法の結果を合わせて示す。限耐法には本来、埋込みを有する杭基礎の計算法は無いが、杭基礎の水平地盤ばねの計算法を拡張して用いた。

図14の各インピーダンスの虚部は、埋込み深さに関わらず、精算解と良く対応している。虚部の逸散減衰は面積に依存するため、埋込みを有する杭基礎でも同様に評価可能であると考えられる。低振動数域での実部は、(f)の埋込みが深い場合の回転成分を除いて概ね良く評価できていることがわかる。別途行った検討

で、回転成分は杭のパラメータや地盤の成層条件に因らずに過小であるため、回転成分に対する側面の寄与が埋込み基礎とは異なることが原因と考えられる。検討した範囲では解析条件に因らずに同様の割合で小さく、杭基礎で回転成分の地盤重複効果の補正係数を再度検討する必要がある。(a)、(b)限耐法では、水平実部の地盤ばねを良く評価できた。一方、虚部は埋込み側面の逸散減衰を考慮していないため、常に過小評価であった。

6. 結論

本研究では、精算解の要素分割による影響を検討したのち、それと提案する埋込み基礎の簡易評価式を比較検討してその妥当性を確認した。提案式は、インピーダンス、基礎入力動ともに埋込み深さ、アスペクト比の影響を考慮でき、十分実用的であると言える。埋込みを有する杭基礎のインピーダンスの簡易評価に応用したところ、虚部はよく評価できたが、特に回転成分の実部はより詳細な検討が必要と考えられる。基礎入力動の評価も重要であり、今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 杉本浩一、護雅史、福和伸夫：基礎の浮上りに伴う振動方向間の応答連成効果を評価可能な地震応答解析モデルの構築、日本建築学会大会学

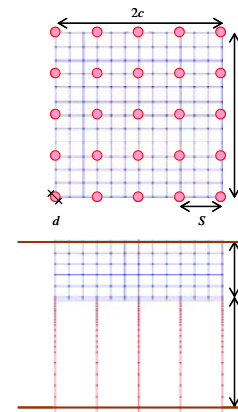
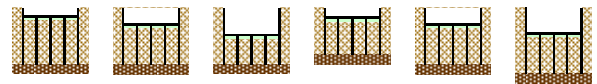


表4 基本モデルの解析条件

基礎条件		地盤条件	
2b	30 m	V_s	200 m/s
2c	30 m	ρ	1.8 t/m ³
E	10 m	表層 ν	0.45
E/b _e	2/3	h	0.03
c/b	1.00	H	30 m
N _p	25 本	V_s	400 m/s
L'	20 m	支持層 ρ	1.8 t/m ³
d	1.5 m	ν	0.45
S	7.5 m	h	0.03
E _p	2.1 × 10 ⁶ kN/m ²		
ρ_p	2.4 t/m ³		
ν_p	1/6		
h _p	0.03		

図11 基本モデル



	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5	CASE-6
埋込み深さE [m]	5	10	15	5	10	15
杭実長L' [m]	25	20	15	20	20	20
表層厚さH [m]	30	30	30	25	30	35

図12 解析モデルの概念図

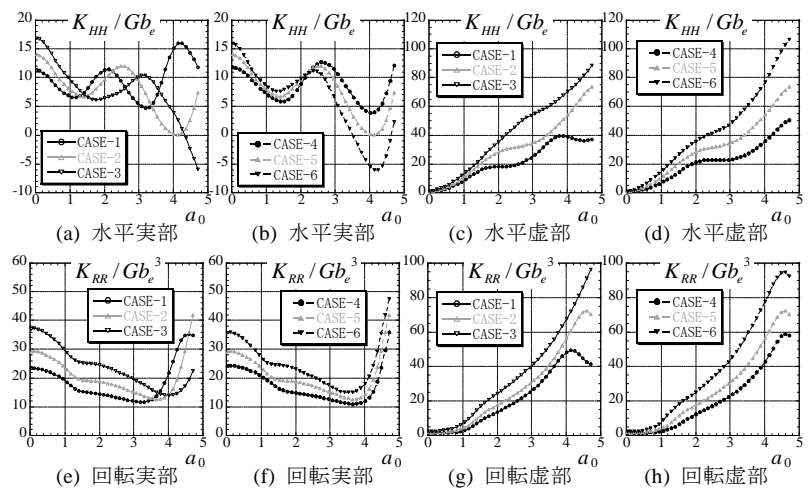


図13 埋込み部と杭の負担割合がインピーダンスに与える影響

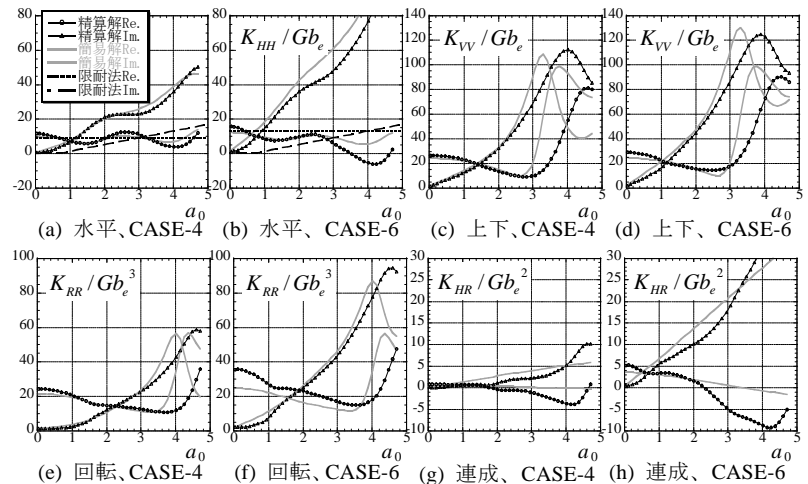


図14 埋込み深さによる精算解と簡易解との比較