

# 根入れを有する直接基礎における側面と底面の動的相互作用特性と それらの重合による地盤ばねの実用的評価法の検討

## EFFECTS OF SIDE AND BASE ELEMENTS OF EMBEDDED SPRED FOUNDATIONS ON DYNAMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION AND CONVENTIONAL ESTIMATION METHODS FOR SOIL SPRINGS BY COMPOSING THE IMPEDANCE OF EACH ELEMENT

護 雅史\*, 福和伸夫\*\*, 酒井理恵子\*\*\*, 文 学章\*\*\*\*  
*Masafumi MORI, Nobuo FUKUWA, Rieko SAKAI and Xuezhang WEN*

In this paper, we research a conventional evaluation method of soil springs in the dynamic soil-structure interaction analysis of buildings with embedment foundations. First of all, the bottom element and the side elements are decomposed from the embedment foundation and the dynamic interaction characteristics that each element possesses are examined. The estimation method developed by WEN and Fukuwa(2006) are applied to this examination. Based on the above results, it is mentioned that the soil spring of the embedment foundation which is composed with the impedance of both side and bottom elements is overestimated. Finally, we discuss impedance evaluation methods in the limit strength method and the sway-rocking model with embedment.

**Keywords:** *Embedment Foundation, Dynamic Substructure Method, Impedance, Foundation Input Motion, Sway-Rocking Model with Embedment, The Calculation of Response and Limit Strength*

根入れ基礎、動的サブストラクチャー法、インピーダンス、基礎入力動、埋込み SR モデル、限界耐力計算法

### 1. はじめに

近年の被害地震においては、観測された地震動強さに比べて被害が小さかった建物の事例が何件か報告されており<sup>例えば、1)、2)</sup>、この要因の一つとして、建物と地盤との動的相互作用効果が挙げられることがある。これらは、基礎の浮き上がりや地盤の非線形性など、非線形形の動的相互作用効果として注目されている。このような事例を通して、これまでは原子力発電所を主要な対象構造物として取り扱われてきた動的相互作用が、一般建物の耐震設計への適用にも拡張されつつある<sup>3)、4)</sup>。例えば、軟弱地盤に立地する杭基礎建物等では、既に動的相互作用効果を取り入れた検討がなされている。また、2000年に建築基準法施行令の改正により限界耐力計算法（以降、限耐法と呼ぶ）が導入された<sup>5)、6)</sup>。限耐法では、構造物と地盤との動的相互作用効果を簡易に評価する方法が初めて提案され、一般建物の耐震設計にも動的相互作用効果を導入することが可能となった。

動的相互作用効果を考慮した検討を行うための実用的な方法として、基礎周辺の地盤を地盤ばねでモデル化したスウェーロッキングモデル（SR モデル）や、地下室や免震ピットなど、基礎の埋込み（根入れ）がある場合には、埋込みを考慮した埋込み SR モデル<sup>7)</sup>が提案されている。SR モデルに用いる地盤ばねは、地表面基礎のインピーダンスとして、理論解を用いて比較的簡単に算定することがで

きる。しかし、根入れがある場合には、地盤の3次元性を厳密に扱うことが煩雑となり、インピーダンスを解析的に評価することは実用的ではない。したがって、埋込み SR モデルでは、地盤ばねを底面と側面で互いに独立なばねとして簡便に算定する方法が用いられている。原子力発電所の耐震設計などで利用される場合には、底面部分は半無限地盤上の無質量剛基礎として算定される地盤ばねを、側面部分は Novak のばね<sup>8)</sup>を用いる場合が多い。一方、限耐法では、地下室の側面土圧を評価する際の地盤ばねの算定方法として、底面部分は地表面基礎の水平地盤ばね、側面部分は地表面基礎の水平地盤ばねを各種係数で補正して評価する方法が提案されている。これらの地盤ばね評価の妥当性については、根入れ基礎全体のインピーダンスを精算解と比較することにより検証がなされている。

本論では、動的相互作用の基本物理量の観点から、根入れ基礎を底面・側面の各要素に分解し、条件を整理して各要素の特性を詳細に分析する。さらに、分解したインピーダンスを再び重ね合わせることで、埋込み SR モデルや限耐法における地盤ばね評価方法の物理的意味や妥当性について検討するとともに、新たな評価方法について検討する。根入れ基礎における側面の影響について分析したこれまでの研究事例として、栗本・関(1995)<sup>9)</sup>、また、根入れ基礎における底面・側面の検討を行った事例としては、石田ほか(1994)<sup>10)</sup>や吉

\* 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

\*\*\* 岐阜県庁・修士（工学）

\*\*\*\* 湖南大学（中国）・准教授・博士（工学）

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

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Gifu Pref., M. Eng.

Assoc. Prof., College of Civil Engineering, Hunan Univ., China., Dr. Eng.

田ほか(2004)<sup>11)</sup> などがあるが、本論のように地盤ばねを独立で評価して重ね合わせることの物理的な解釈を動的相互作用の基本物理量の観点から非常に詳細に行っている研究事例は見当たらない。

## 2 解析対象と解析手法

### 2.1 解析対象

本論では、図 1 に示すように、基本的な性状を把握するために、半無限一様地盤に設置された根入れを有する直方体の直接基礎を解析対象とする。基礎形状、および地盤の諸元を表 1 に示す。基礎形状は、加振直交方向の幅を  $2b$ 、加振方向の幅を  $2c$ 、根入れ深さを  $E$  とする。底面と側面は剛とする。

解析では、根入れ部分を底面と側面に分離し、各要素の動的相互作用に関する基本的な物理量の特性について検討する。側面については、さらに、加振方向と加振直交方向に分離して詳細な検討を行う。具体的な検討項目について以下に示す。

#### 1) 側面部分が根入れ基礎の特性に与える影響

側面部分が根入れ基礎の特性に与える影響を検討するため、以下に示す根入れ基礎から側面部分を除いた 3 ケースの解析モデルを作成し、根入れ基礎と比較する (図 2 参照)。

- (ア) 側面を全て取り除いた場合 (「側面なし」)
- (イ) 加振方向側面 (2 面) を残した場合 (「加振方向側面のみ」)
- (ウ) 加振直交方向側面 (2 面) を残した場合 (「加振直交方向側面のみ」)

#### 2) 底面部分の検討

底面部分の特性を見るため、底面位置などの設置状況を変えた以下の 3 ケースについて比較する (図 3 参照)。

- (ア) 地表面とした場合 (「地表面」)
- (イ) 根切り底とした場合 (「根切り底」)
- (ウ) 根切り底と同じ深さで地中にある場合 (「埋戻し」)

#### 3) 側面部分の検討

側面部分の特性を見るため、加振方法などの条件を変えた以下の 3 ケースについて比較する (図 4 参照)。

- (ア) 相対する根切り面の片側だけに側面があるとして、側面を加振した場合 (「根切り片面」)
- (イ) 相対する根切り面の両側に側面があるとして、両方の側面を加振した場合 (「根切り両面・2 面加振」)
- (ウ) 相対する根切り面の両側に側面があるとして、片方の側面を加振した場合 (「根切り両面・1 面加振」)

ここでは、加振方向に対する側面の配置や根切り幅 ( $2c$ ) を変えた検討 (表 1 参照) も行う。なお、 $2c=0\text{m}$  の場合は剛体 1 枚が地中に埋め込まれている状態に相当する。加振方向は、図 4 に示したように、剛体と直交方向に加振した場合を「x 方向」、剛体と平行方向に加振した場合を「y 方向」とする。

### 2.2 解析方法

解析にあたっては、基本的に SASSI<sup>12)</sup> の考え方に準拠した、文・福和 (2006)<sup>13)</sup> による薄層要素法と有限要素法を動的サブストラクチャー法の容積法により統合した手法を用いる。根入れ部分は、図 1(a) に示すように、3 次元のアイソパラメトリック要素でモデル化し、 $12 \times 12 \times 6$  を目安に要素分割する。地盤については、図 1(b) に示す薄層モデルを作成し、地盤の分割数は地表面から  $16 \times 0.625\text{m}$

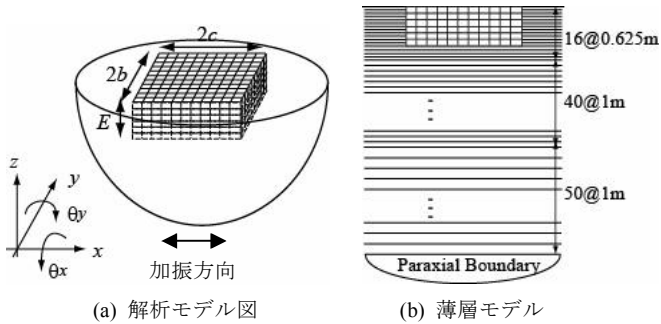


図 1 解析モデル

表 1 解析に用いる諸元一覧

地盤物性	根入れ基礎の形状	側面の比較 (2.1 節 3) 参照)
$V_s=250\text{m/s}$	$2b=15\text{m}$	$2b=15\text{m}$
$\rho=1.8\text{t/m}^3$	$2c=15\text{m}$	$2c=0, 2.5, 7.5, 15\text{m}$
$\nu=0.45$	$E=7.5\text{m}$	$E=7.5\text{m}$
$h=0.03$		(図 1 参照)

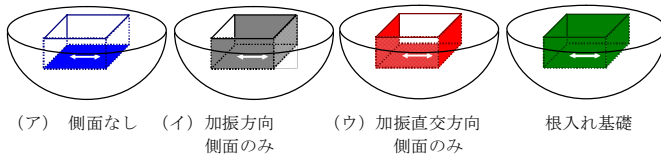


図 2 側面部分が根入れ基礎の特性に与える影響検討に用いる解析モデル

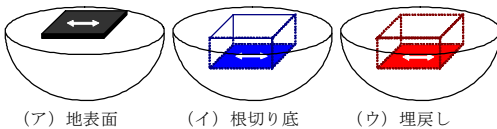


図 3 底面部分の検討に用いる解析モデル

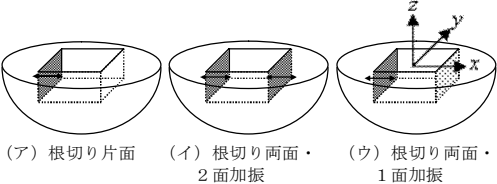


図 4 側面部分の検討に用いる解析モデル

$+40 \times 1\text{m} + 50 \times 2\text{m} + 25 \times 4\text{m}$  とする。底面境界にはパラキシャル境界を適用する。また、入力地震波は S 波の鉛直下方入射とする。

## 3 検討結果と考察

本章では、2.1 で示した検討項目ごとの解析結果について、インピーダンス、及び基礎入力動を中心に示す。以降では、インピーダンスについては、横軸を無次元化振動数  $a_0 (= \omega b / V_s)$ 、 $\omega$  は固有円振動数) で、縦軸を、水平方向 ( $K_{HH}$ )、及び上下方向 ( $K_{VV}$ ) は  $Gb$  ( $G$  は地盤のせん断剛性)、回転方向 ( $K_{RR}$ 、 $K_{\alpha\alpha}$ 、 $K_{\theta\theta}$ ) は  $Gb^3$  で無次元化した値で示す。また、実線は実部、破線は虚部を表す。一方、基礎入力動については、横軸は無次元化振動数  $a_0 (= \omega b / V_s)$  を、縦軸は自由地表における水平変位  $U_G$  に対する値を示す。

### 3.1 側面部分が根入れ基礎の特性に与える影響

図 5(1)に、各ケースのインピーダンス ((ア) 側面なし: 青線、(イ) 加振方向側面のみ: 黒線、(ウ) 加振直交方向側面のみ: 赤線) を根入れ基礎 (緑線) と比較して方向ごとに示す。なお、(b) 上下方向の (イ) と (ウ) は、同条件となるので、同じ結果となる。

まず、(a) 水平方向や(c) 回転方向における実部の準静的な値を比較すると、根入れ基礎と (ウ) の差が小さいことから、加振方向側面は、インピーダンスに対する寄与が小さいことが分かる。また、根入れ基礎以外では、(a) 水平方向における (イ)、(ウ) や(b) 上下方向や(c) 回転方向における (ア)、(イ) で、実部、虚部ともに波打ちが見られる。これは、側面を除去することで、地盤応答に対する拘束効果が低減するため、その基礎幅に相当する波長の振動数 ( $a_0=\pi/2$ ) 付近で共振することによる。

(a) 水平方向に着目すると、実部については、根入れ基礎と (ウ) の場合で、付加質量効果により高振動数側で実部が小さくなる傾向が見られる一方で、(ア)、(イ) ではこの傾向が見られない。このことから、付加質量効果には、加振直交方向の側面の影響が大きいことが分かる。虚部については、勾配の程度から、側面の枚数が多い方が、また同じ枚数であれば加振直交方向にある方が、逸散減衰効果が大きいことが分かる。(b) 上下方向に着目すると、側面がない場合でも、 $a_0=2$  程度までは、実部・虚部とも根入れ基礎と大差はない。これより、上下方向のインピーダンスには、底面部分の影響が大きいと考えられる。これは、上下方向に対して、底面は軸剛性と

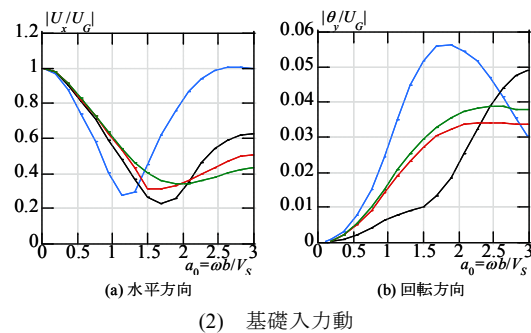
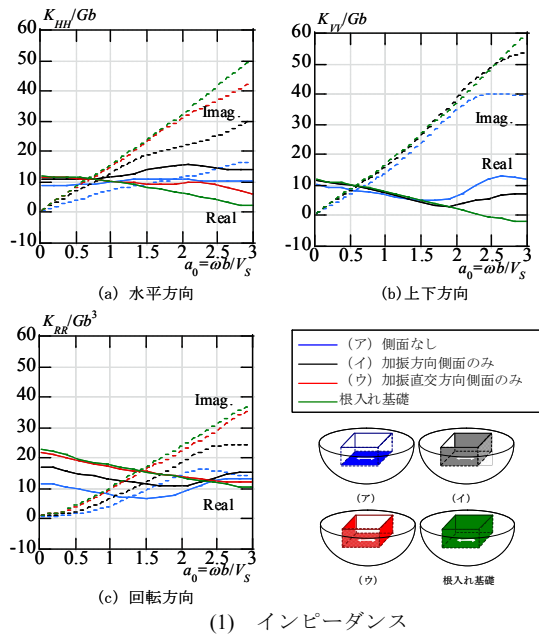


図 5 側面部分が根入れ基礎の特性に与える影響

して、側面はせん断剛性として寄与することからも推察できる。(c) 回転方向に着目すると、(ウ) が (イ) よりも大きく、根入れ基礎と同程度となっている。これは、(ウ) の方が加振方向に対する側面の断面二次モーメントによる抵抗が大きいためと考えられる。

図 5(2)に、各ケースの基礎入力動について示す。(a) 水平方向に着目すると、(ア) では、基礎底面の拘束効果により、基礎底面深さを  $1/4$  波長とする振動数 ( $a_0=\pi/2$ ) 付近で谷になっている。また、側面を考慮すると、高振動数側での根入れ部分の拘束により、入力損失効果が大きくなる。(b) 回転方向については、根入れによって回転方向は励起されるが、側面を付与することで底面に対する上下方向の拘束効果が増すことにより、回転方向の基礎入力動は抑制される。したがって、側面の拘束効果が小さい (ア)、(イ) は、他に比べて基礎入力動が大きくなっている。

### 3.2 底面部分が根入れ基礎の特性に与える影響

図 6(1)に、各ケースのインピーダンス ((ア) 地表面: 黒線、(イ) 根切り底: 青線、(ウ) 埋戻し: 赤線) を根入れ基礎 (緑線) と比較して方向ごとに示す。これより、実部については、いずれの方向でも、根入れ側面の抵抗により、(ア) よりも (イ) の方が大きく、(イ) では、基礎底面より上部にある地盤の共振の影響が認められる。埋戻しの有無による (イ) と (ウ) の比較では、実部の準静的な値では差がほとんど認められないが、(ウ) では、付加質量効果 ((b) 上下方向、(c) 回転方向) や埋戻しによる共振の影響 ((a) 水平方向) が現れている。虚部については、特に水平方向で (イ) よりも (ウ)

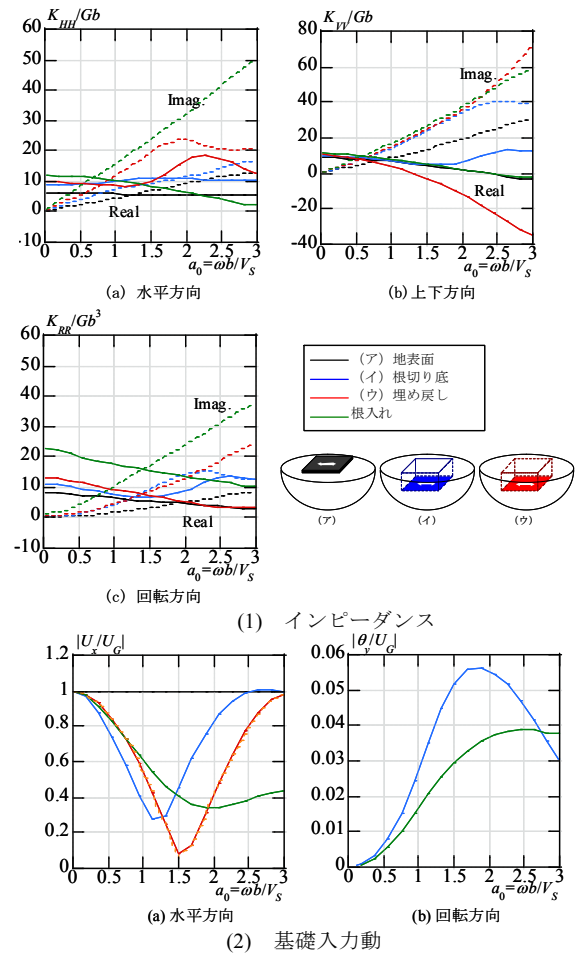


図 6 底面部分の違いが根入れ基礎の特性に与える影響

の方が大きく、埋戻しによる逸散減衰効果が大きいことがわかる。

一方、図 6(2)に示した各ケースの基礎入力動については、(イ)、(ウ)の場合は、3.1 節で述べたように、(a)水平方向において基礎底面より上部の地盤の共振振動数付近で谷になっている。また、(イ)では、根切りによって(c)回転方向が励起されていることが分かる。

次に、図 7 に示すように、地中に埋込まれた基礎（以下、「地中基礎」と根入れ基礎に排土相当分の質量を与えた場合を比較することにより、上述の付加質量効果や埋戻しによる共振の影響について、さらに検討を進める。排土質量は、付加質量効果だけを評価することを目的に、根入れ部の地盤を剛体としてモデル化している。埋込み深さは、 $E=2.5\text{m}$ （(ア)、(ウ)）と  $E=7.5\text{m}$ （(イ)、(エ)）とした。それらの結果を図 9 に示す。 $E=2.5\text{m}$ （(ア)、(ウ)）については、いずれの方向も良く対応しており、付加質量効果により振動数の増加

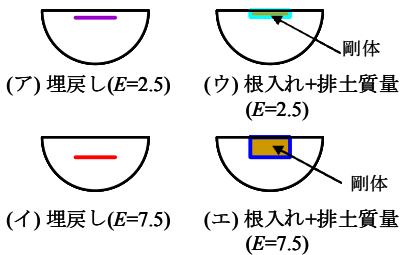
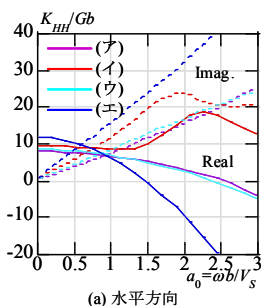
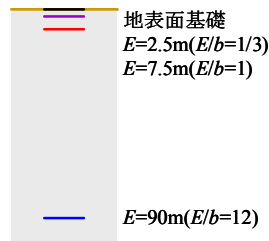
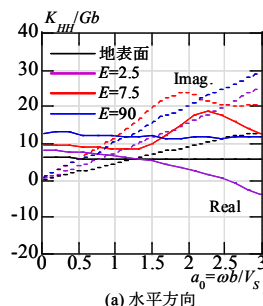


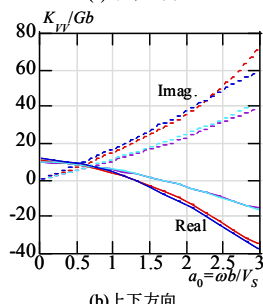
図 7 排土質量を与えたときのモデル 図 8 埋込み深さを変えたときの位置関係



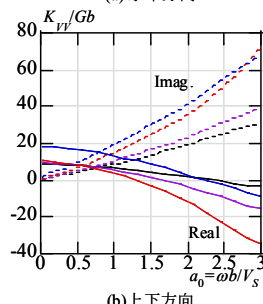
(a) 水平方向



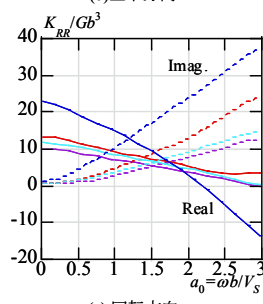
(a) 水平方向



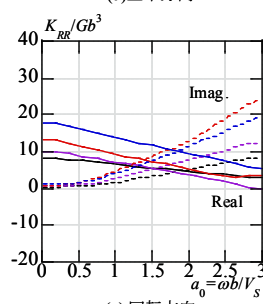
(b) 上下方向



(b) 上下方向



(c) 回転方向



(c) 回転方向

図 9 排土質量との関係 図 10 地中基礎の深さの違いがインピーダンスに与える影響

に伴って、実部のインピーダンスが低下している。一方、 $E=7.5\text{m}$ （(イ)、(エ)）については、(a)水平方向において、埋込み位置から上部にある地盤の振動の影響が現れ始める波長  $4E$  にあたる振動数 ( $a_0=\pi/2$ ) より高振動数側で差が現れ始め、(イ)では地盤振動の影響によりインピーダンスが増加している。

地中基礎の深さ ( $E=0\text{m}, 2.5\text{m}, 7.5\text{m}, 90\text{m}$ 、図 8 参照) がインピーダンスに与える影響について検討した結果を図 10 に示す。実部に着目すると、準静的な場合では、埋込みの深い方が大きな値を示している。また、インピーダンスは、埋込み深さがさらに深くなる ( $E=90\text{m}$ ) と、地表面基礎の場合の 2 倍程度になる。これは、全無限一様地盤に近い条件となることから解釈できる。付加質量効果についてみると、(a)水平方向では、 $E=90\text{m}$  ではその効果が認められないが、(b)上下方向、(c)回転方向では、顕著に現れており、せん断剛性と軸剛性で影響範囲の違いが見られる。また、 $E=7.5\text{m}$  の(a)水平方向では、共振に伴う地表面から反射波の影響を強く受けて、インピーダンスが  $E=90\text{m}$  の場合よりも大きくなる振動数領域が認められる。

虚部についても、実部と同様に、 $E=7.5\text{m}$  の場合、(a)水平方向において共振の影響が認められ、 $E=90\text{m}$  では地表面基礎 ( $E=0\text{m}$ ) の 2 倍程度となっている。

### 3.3 側面部分の詳細な検討

#### (1) 根切り片面の場合

解析では、加振直交方向の片面（1 面）だけに剛体を配し、剛体の下端中心を加振することにより、その位置におけるインピーダンス、及び基礎入力動を算定している。根切り片面の場合のインピーダンスを図 11 に示す。(a)～(e)を比較すると、実部については、根切り幅による差が小さいことがわかる。虚部については、剛体の両側に地盤が付く場合 ( $2c=0\text{m}$ ) の勾配が、根入れ基礎を除くその他の場合に比べて 2 倍程度大きいことが分かる。これらのことから、実部が表すばね剛性の効果は、地盤と接する面積に比例するとは限らない一方、虚部が表す減衰効果は、地盤との接地面積に比例することが分かる。ただし、根切り幅が狭い場合 ( $2c=2.5\text{m}$ ) の(a)水平 x 方向の虚部は、 $a_0=2.5$  程度までは剛体の両側に地盤がある場合 ( $2c=0\text{m}$ ) と対応が良く、これより高振動数域では根切り幅が広い場合と対応が良くなることを確認している。これは、長波長の波動は、加振した側面と反対側まで逸散するが、短波長の波動は直進性があり一方方向しか逸散しないためと考えられる。なお、(e)回転 y 方向にも同様の傾向が認められた。図 12 に、根切り片面の場合の基礎入力動を示す。これより、根切り幅による両水平方向の入力損失効果と両回転方向の励起の状態の差はあまり大きくないことが分かる。

#### (2) 根切り両面・2 面加振の場合

解析では、加振直交方向の両面（2 面）に剛体を配し、両剛体と基礎底面中心が 1 つの剛体として挙動すると仮定して、基礎底面中心を加振することにより、その位置におけるインピーダンス、及び基礎入力動を算定している。図 13 に、根切り両面・2 面加振の場合のインピーダンスを示す。根切り幅間の地盤の影響により、根切り幅が広がるほど、インピーダンスは、(a)～(e)のいずれにおいても、実部、虚部ともに増大している。また、底面が地盤振動を抑制する効果が期待できないため、特に  $2c=7.5\text{m}, 15\text{m}$  の場合では、根切り幅に対応した共振が見られる。図 14 に、基礎入力動を示す。(a) 水平 x 方向では、高振動数側で根切り幅の違いによる入力損失の差が



大きくなっている。(d) 回転  $x$  方向では根切り幅が広いほど、側面の断面二次モーメント的な効果で、回転角が小さくなっている。

### (3) 根切り両面・1面加振の場合

解析では、加振直交方向の両面（2面）にそれぞれ剛体を配し、片方の剛体の下端中心を加振することにより、その位置におけるインピーダンス、及び基礎入力動を算定している。図15に、根切

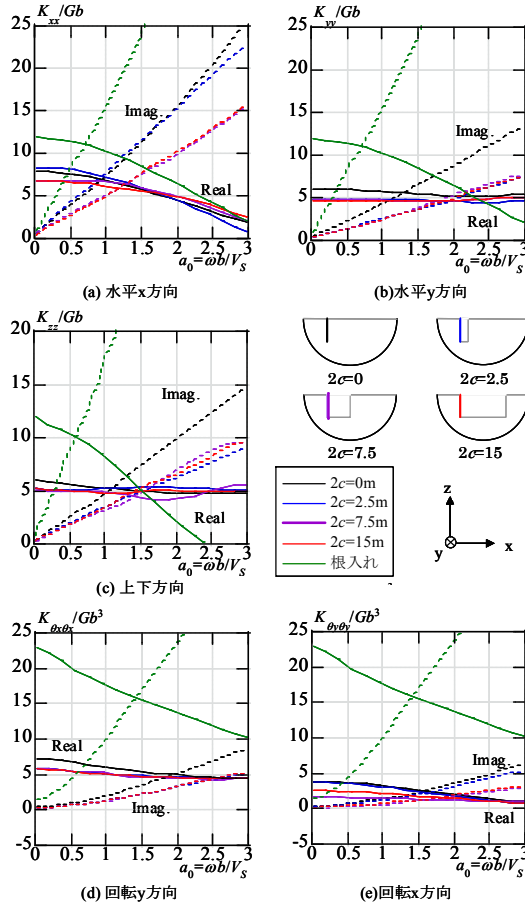


図11 側面部分の違いがインピーダンスに与える影響(1面の場合)

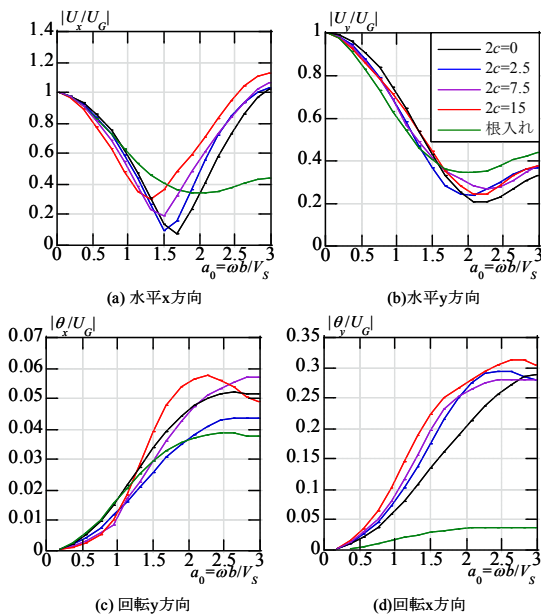


図12 側面部分の違いが基礎入力動に与える影響(1面の場合)

り両面・1面加振の場合のインピーダンスを、図16に基礎入力動を示す。相対する根切り面の両側に側面があり、1面だけを加振している状態とは、一方の側面に接触する地盤をある程度拘束した状態で、反対側の側面を加振することを意味しているが、根切り幅が広い場合は、加振されない側面の影響が小さくなるため、結果は、根切り片面の場合（図11、図12）と似た傾向を示している。

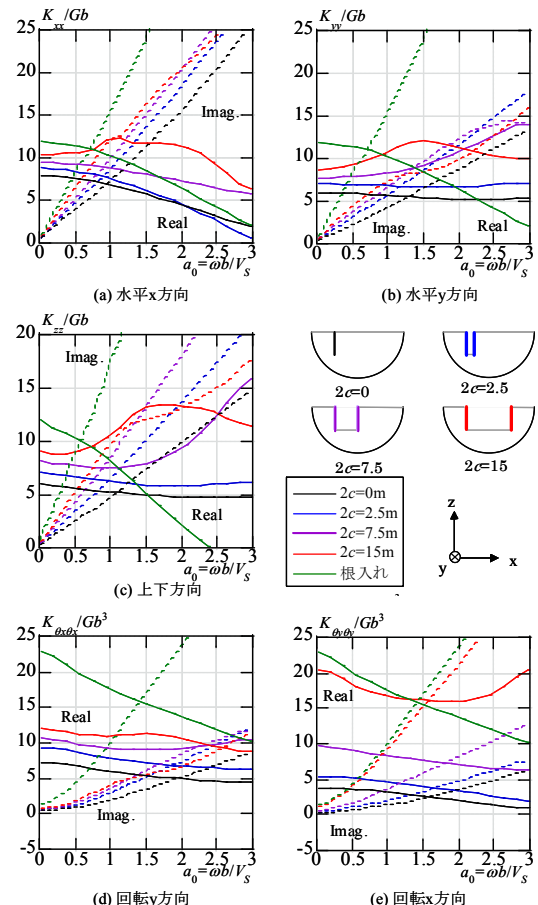


図13 側面部分の違いがインピーダンスに与える影響(2面・2枚に加振の場合)

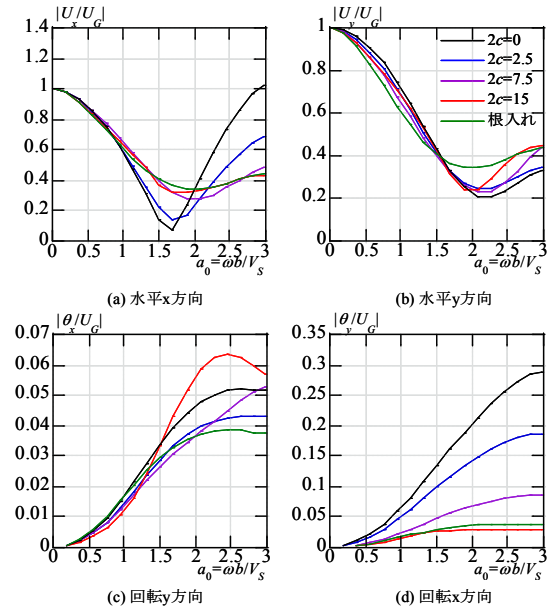


図14 側面部分の違いが基礎入力動に与える影響(2面・2枚に加振の場合)

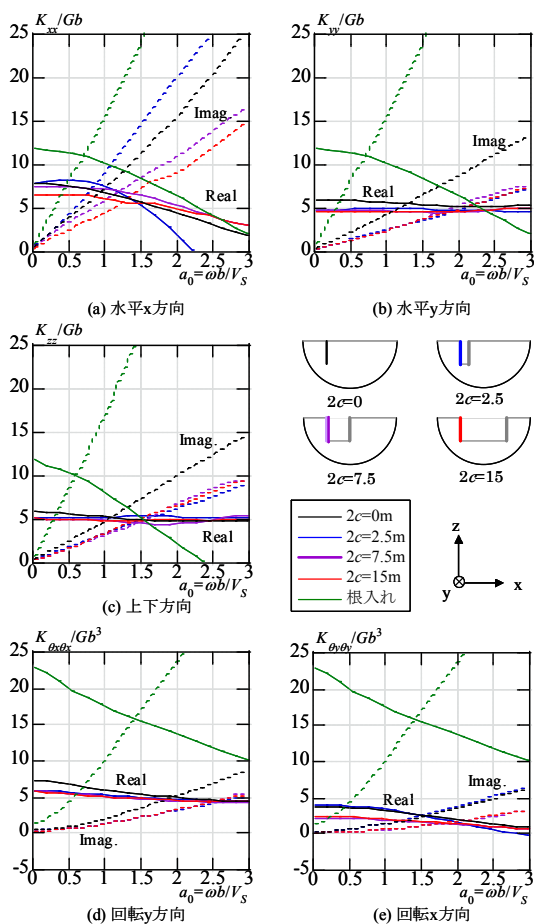


図 15 側面部分の違いがインピーダンスに与える影響 (2面・1枚に加振の場合)

#### 4 各要素の足合せによる動的相互作用特性の評価

##### 4.1 底面要素と側面要素の足合せの検討

本章では、3章での検討結果を基に、要素毎に計算したインピーダンスを単純に足合せた結果を根入れ基礎のインピーダンスと比較する。まず、底面要素は根切り底基礎、あるいは地表面基礎、側面要素は、相対する根切り面の片側だけに側面がある場合 ( $2c=15m$ ) について、加振方向に2面分、加振直交方向に2面分、それぞれインピーダンスを加算する。図17に、加算結果 (根切り底+側面: 黒線、地表面+側面: 赤線) を根入れ基礎の値 (以降、精算値という: 緑線) と比較して示す。結果は、いずれの場合も精算値に比べて過大評価となっている。これは、図19のように底面要素では底面より上部の地盤の影響、側面要素では側面より下部の地盤の影響がインピーダンスに含まれており、同じ部分の影響を重複して加算してしまうことが原因である。虚部については、その効果が支配面積に比例し、重複の影響が少ないため、実部ほど精算値との差は大きくない。

次に、側面要素の足合せ方法について検討した結果を図18に示す。ここでは、①側面を1面ずつのインピーダンスとして加算する場合、②2面のインピーダンスとして加算する場合、あるいは③4面のインピーダンスとして加算する場合のそれぞれについて、精算値と比較している。ここに、②の2面は、相対する根切り面の両側に側面があるとして、両面を加振した場合 ( $2c=15m$ )、③の4面は、底面を除く全根切り面に側面がある場合である。この結果から、①→②→③の順で精算値に近づくことが分かる。これは、上述したように、

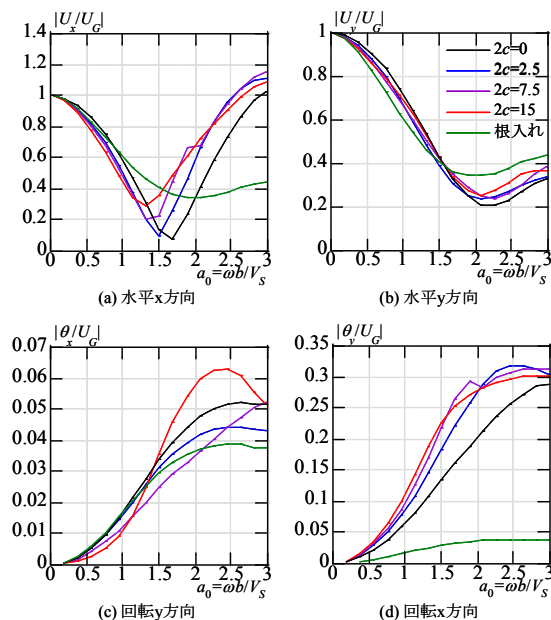


図 16 側面部分の違いが基礎入力動に与える影響 (2面・1枚に加振の場合)

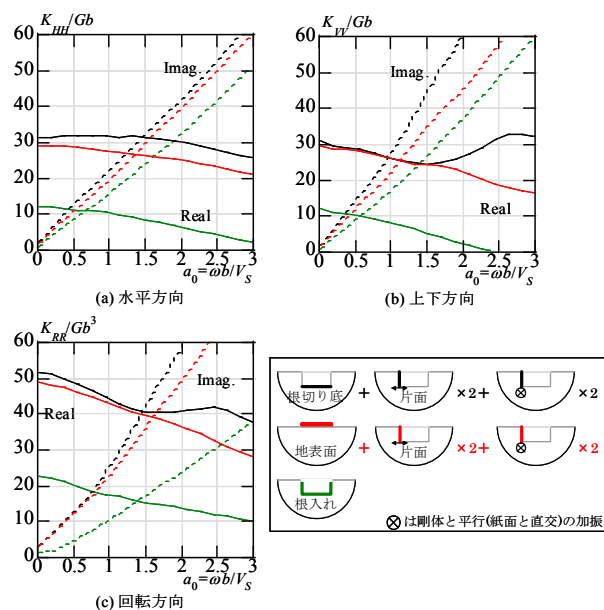


図 17 各要素の足合せ・底面要素を変えた場合

要素を細かく分解してするほど、平面的に同じ部分の影響が重複して加算されるためである。したがって、③の場合についても、側面部分より下部の地盤の影響が除かれないため、精算値に対してまだ過大評価となっている。

##### 4.2 埋込みSRモデルと限耐法における地盤ばねの足合せの検討

ここでは、実設計における根入れ基礎の簡易的計算法である、埋込みSRモデルと限耐法におけるインピーダンス評価方法の妥当性について検討する。埋込みSRモデルでは、底面地盤ばねを地表面基礎の地盤ばねで、側面地盤ばねをNovakばねで評価している。限耐法では、地表面基礎の地盤ばねの組み合わせにより、地盤ばねを評価している。図20に、埋込みSRモデルの手法に従って、足合せたインピーダンスを精算値と比較して示す。ここで、側面要素には、Novakばねを用いている。Novakばねは2次元領域で算定されており、側面の上下にある地盤の影響が含まれないため、精算値と対応

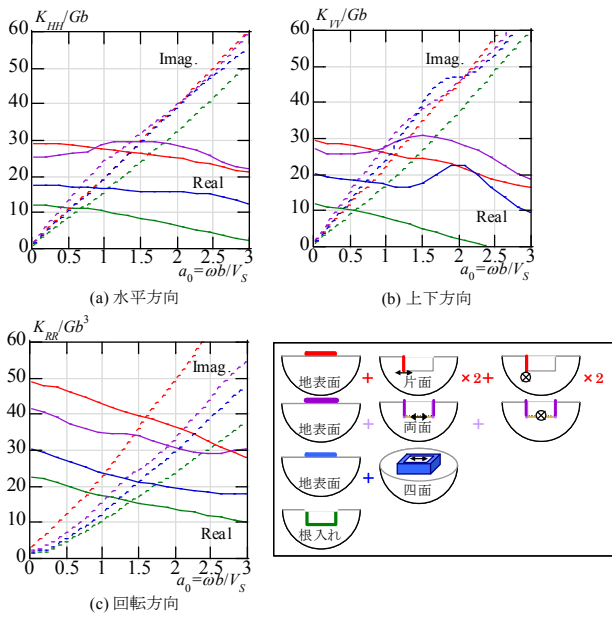


図 18 各要素の足合せ（側面要素を変えた場合）

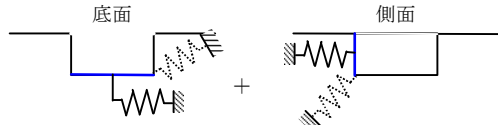


図 19 各要素のインピーダンスの概念図と足合せの問題

が比較的良好。ただし、(c)回転方向の虚部については、過大評価となっている。

次に、限耐法に従って、地表面基礎の組合せで根入れ基礎を計算した結果を図 21 に示す。図中の赤線が限耐法の手法による結果である。(a)水平方向の準静的な場合、実部における両者の対応は非常に良い。また、図 21 中の青線は、側面要素を地表面基礎の上下ばねから算定した結果であるが、高振動数域の対応関係が改善されることが分かる。以上の結果から判断すると、根入れ基礎における（準）静的な水平地盤ばねを評価する場合には、限耐法による方法を用いることができる。しかし、動的な水平地盤ばねを評価する場合には、根入れ基礎側面には主に軸方向の土圧が作用することを考慮すると、上下方向の地盤ばねを利用することも考えられる。なお、側面要素として水平方向、上下方向のばねを両方とも加算した場合（紫線）には、精算値と比較して過大評価となっている。また、(b)回転方向については、準静的な場合では、過大評価、高振動数側では、過小評価の傾向がある。

以上の結果より、埋込み SR モデルにおけるインピーダンス評価方法は、回転方向の虚部を除けば概ね適切であると言える。また、限耐法については、水平方向の準静的な値としては、概ね適切であるが、回転方向や動的な水平地盤ばねを評価する場合には、精算解との有意な差が認められる。

#### 4.3 地盤ばねの足合せ方法の提案

ここでは、埋込み基礎のインピーダンスの新たな簡易評価式について検討する。検討では、簡便性に配慮して、これまでの検討結果も参考にして、(1)～(3)式に示すように、地表面基礎のインピーダンス ( $K_{HH}^b, K_{VV}^b, K_{RR}^b$ ) の足合わせにより、根入れ基礎のインピー

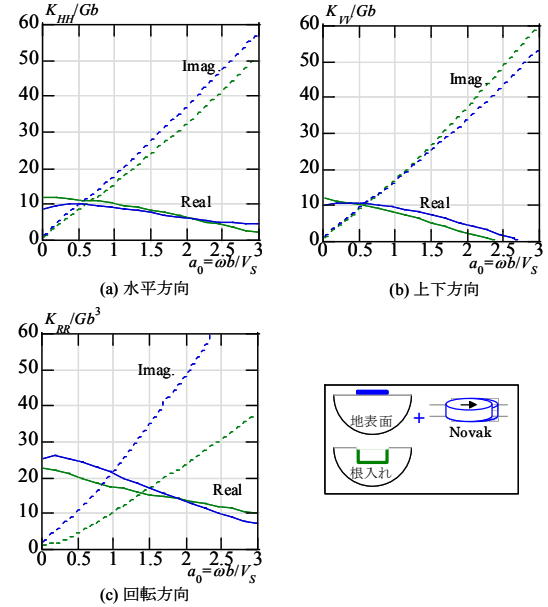


図 20 各要素の足合せ（埋込み SR モデル）

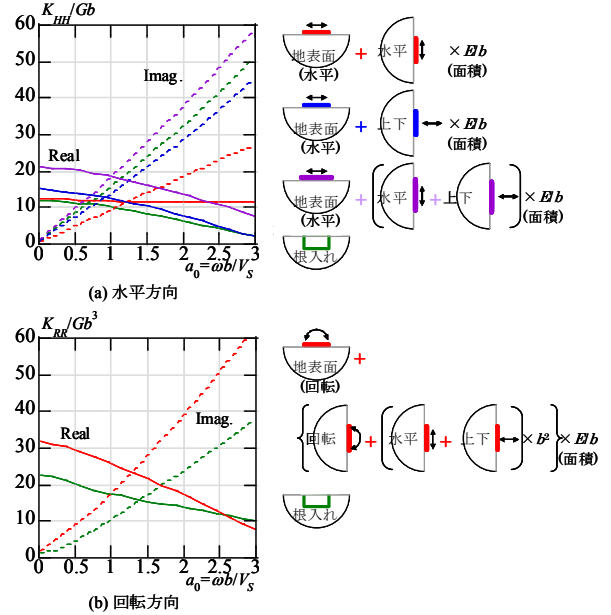


図 21 各要素の足合せ（限耐法）

$$K_{HH} = K_{HH}^b + \alpha K_{HH}^b + \beta K_{VV}^b \quad (1)$$

$$K_{VV} = K_{VV}^b + \alpha K_{HH}^b + \beta K_{VV}^b \quad (2)$$

$$K_{RR} = K_{RR}^b + \alpha K_{HH}^b b^2 + \beta K_{VV}^b (E/2)^2 \quad (3)$$

ダンス ( $K_{HH}, K_{VV}, K_{RR}$ ) を評価すること、すなわち、側面の効果を地表面基礎のインピーダンスで表すことを試みる。具体的には、埋込み深さ  $E$  と基礎半幅  $b$  の比  $E/b$  をパラメータとして、(1)～(3)式の係数  $\alpha, \beta$  を実部、虚部に分けて推定する。なお、計算の都合上、 $a_0 \leq 2.5$ 、 $1/3 \leq E/b \leq 3$  ( $E=7.5\text{m}$ ) を検討対象範囲とする。また、地表面基礎のインピーダンス ( $K_{HH}^b, K_{VV}^b, K_{RR}^b$ ) を用いる場合には、地表面基礎形状と側面形状の違いを予め補正しておく。

表 2 に各係数の算定式を、また、図 22 に、評価式によるインピーダンスの精算解との比較を示す。 $K_{HH}$  を除いて、対象範囲  $1/3 \leq E/b \leq 3$  で、同じ係数を用いて評価している。この結果から、対象検討範囲内では、上下方向の対応がやや不十分ではあるが、推定値と精算解とが概ね対応していることが分かる。

表2 各係数の算定式

			$1/3 \leq E/b < 1$	$1 \leq E/b \leq 3$
$K_{HH}$	$\alpha$	実部	1	$-0.12 \times (E/b) + 0.12$
		虚部	0.8	
	$\beta$	実部	0	0.65
		虚部	0.8	
$K_{VV}$	$\alpha$	実部	0.5	
	$\beta$	虚部	1.6	
		実部・虚部	0	
$K_{RR}$	$\alpha, \beta$	実部	$-0.18 \times (E/b)^2 + 0.62 \times (E/b) + 0.93$	
		虚部	$0.2 \times (E/b) + 0.8$	

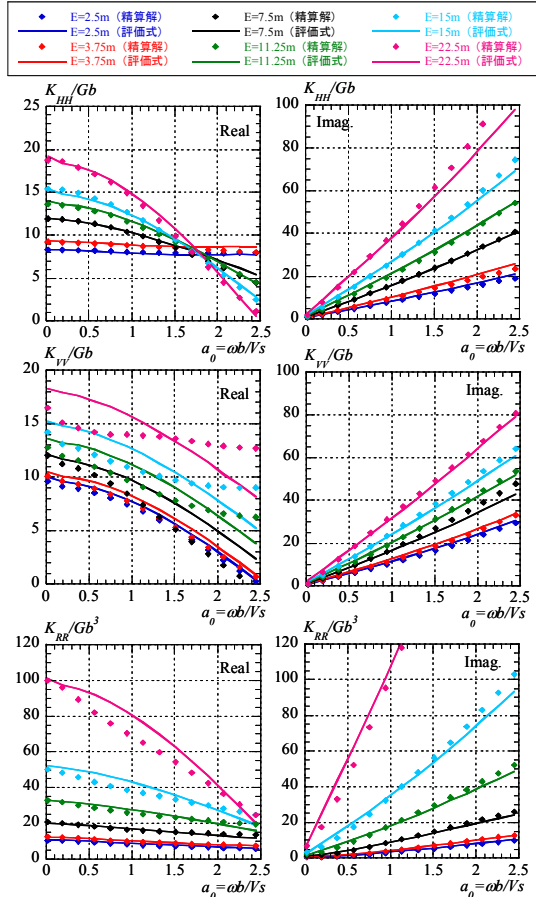


図22 評価式によるインピーダンスの精算解との比較

なお、ここでは半無限一様地盤における限られた検討結果に基づく評価に留まっているので、今後は、成層地盤に対する検討等が必要であろう。ただし、根入れ部分の等価せん断波速度の適用や限耐法にあるせん断剛性の補正等を行うことにより、成層地盤に対してもある程度適用が可能ではないかと考えている。

## 5 まとめ

本論では、動的相互作用の基本物理量の観点から、根入れ基礎の底面・側面を要素に分解し、各要素の特性を分析した上で、再び足合せることで、埋込みSRモデルや限耐法における地盤ばね評価方法の物理的意味や妥当性について検討した。また、それらの検討結果を参考に、埋込み基礎のインピーダンスの新たな簡易評価方法について検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

1) 側面部分について：加振方向に直交する側面が、水平方向や回転方向のインピーダンスに与える影響は大きい。一方、上下方向については、逆に底面の影響が大きい。側面の剛体を除くと、

回転動に対する抑制効果が小さくなるため、共振現象が現れる。また、虚部に関しては、側面の数が多いほど減衰効果は大きい。基礎入力動については、側面を付与することで、水平方向、回転方向で入力損失効果が大きくなる。

2) 底面部分について：実部、虚部共に地表面基礎よりも根切り底の基礎の方がインピーダンスは大きい。ただし、根切り底の基礎では、基礎底面より上部の地盤振動の影響が、特に回転方向に認められる。また、根切り底の基礎と埋戻した地中基礎との差は、埋戻し土の共振や付加質量効果の違いとして現れる。

3) 側面部分の詳細な検討：インピーダンスの虚部は、地盤と接する面積に比例して増大する。根切り片側だけに側面がある場合と根切り両側に側面があり1面のみ加振した場合のインピーダンスは、いずれの方向も根切り幅が広い場合には差が小さい。根切り両側に側面があり2面加振した場合には、根切り幅が広がるほど、インピーダンスはいずれの方向も大きくなり、加振方向の回転の基礎入力動は小さくなる。また、底面が拘束されていないため、根切り幅に依存した共振現象が現れる。

4) 埋込みSRモデルや限耐法の妥当性：埋込みSRモデルの地盤ばねは、回転方向の虚部を除けば概ね適切である。一方、限耐法については、水平方向の準静的な値は、概ね適切であるが、回転方向や動的な地盤ばねについては、精算解と有意な差がある。

5) 各要素の足合せ方法：各要素のインピーダンスを単純に加算すると、過剰評価となる。虚部は、支配面積に依存するため、実部よりも精算値との差は小さい。4.3節の評価式を用いることにより、精算値と概ね対応したインピーダンスを評価できる。

今後は、成層地盤での検討や、杭基礎建物（支持杭やパイルドラフト）に対する同様の検討を進める予定である。

謝辞：本論の作成にあたっては、名古屋大学大学院環境学研究科の飛田潤准教授、小島宏章助教に貴重なご意見をいただいた。また、査読者からは有益なご意見を賜った。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 林康裕：直接基礎構造物の基礎浮上がりによる地震被害低減効果、日本建築学会構造系論文集、No.485, pp.53-62, 1996.7.
- 2) 宮本裕司ほか：2004年新潟県中越地震での地震動と建物応答に関する研究（その1～その3）、日本建築学会学術講演梗概集B-2, pp.456-460, 2006.9.
- 3) 日本建築学会・構造委員会振動運営委員会・基礎構造物系振動小委員会：第8回構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム—非線形動的相互作用の解明と設計への組み込み—、2006.12.
- 4) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006.
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2001年度版限界耐力計算法の算定とその解説、2001.
- 6) 国土交通省建築研究所：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景、2001.
- 7) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用、1996.
- 8) Novak, M., Nogami, T. and Aboul-Ella, F.: Dynamic soil Reactions for Plain Strain Case, ASCE, Vol.104, No.EM4, pp.953-959, 1978.
- 9) 栗本修、関崇夫ほか：不整形な埋め込みを有する基礎の動特性の簡便な評価手法、日本建築学会構造系論文集、pp.19-、1995.2.
- 10) 石田理都子ほか：埋め込み基礎底面・側面地盤の支持分担について、日本建築学会学術講演梗概集B-1, pp.609-610, 1994.9.
- 11) 吉田一博ほか：埋込み部の接触条件が構造物の動的応答に与える影響について（その1～その2）、日本建築学会学術講演梗概集B-2, pp.285-288, 2002.8.
- 12) Lysmer, J., Tabatabaie, R.M., Tajirian, F., Vahdani and S., Ostadan, F.: SASSI – A System for Analysis of Soil-structure Interaction, UCB/GT/81-02, University of California, 1981.
- 13) 文学章、福和伸夫：隣接建物の存在が直接基礎の動的相互作用特性に与える影響、日本建築学会構造系論文集、No.600, pp.97-105, 2006.2.