

# 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 THE EFFECTS OF ADJACENT BUILDING ON SOIL-STRUCTURE INTERACTION

文学章<sup>\*1</sup> 福和伸夫<sup>\*2</sup>

*Xuezhang WEN and Nobuo FUKUWA*

In this paper, the effects of adjacent building on soil-structure interaction of spread foundation are studied by the thin layered element method combined with flexible volume substructure method. The effects of the adjacent building on the impedances and foundation input motions are examined. The inertia effect of adjacent building prominently appears on horizontal impedance and rotational foundation input motion. The effects of the factors such as the distance between the foundations, the size and height of the adjacent building, the embedment depth, the stiffness of the backfill soil and three buildings interaction are also analyzed in this paper.

**Keywords:** *Soil-Structure Interaction, Cross Interaction, Impedance, Foundation Input Motion, Spread Foundation, Thin Layered Element Method, Flexible Volume Substructure Method*

構造物と地盤との動的相互作用, 隣接建物間相互作用, インピーダンス, 基礎入力動, 直接基礎, 薄層要素法, 容積法

## 1 はじめに

建築基準法の改正に伴って導入された限界耐力計算法では, 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提案され, 耐震設計に動的相互作用効果を導入することが可能となった. 建築物の地震時挙動に大きな影響を及ぼす動的相互作用効果を耐震設計に考慮できるようになったことは, 設計と実現象とのギャップを埋める大きな一歩であった.

しかし, 一方で, 動的相互作用効果の導入に当たっての適用範囲を明示することも重要である. 地盤を介した隣接建物間の相互作用問題もその一つである. 都市部の建築物の多くは, 隣接して建築物が存在する. 筆者らの地震観測や振動実験では, 隣接建物の存在が振動挙動に与える影響は無視できず, 大きな建物に隣接する小さな建物では, その影響が大きいことが明らかになっている<sup>1)</sup>. また, 原子力発電施設を対象とした一連の実験・解析でも, 隣接建物の与える影響の大きさが指摘されている<sup>2)</sup>. そこで, 本論では, 直接基礎を対象として, 隣接建物の存在が, 動的相互作用に与える影響について解析的に考察する.

隣接建物との動的相互作用については, 古くから数多くの研究が行われてきている. これまでに, 2次元面外SH波場での複数の半円球基礎の応答を扱ったLucoらの研究<sup>3)</sup>を端緒に, Voigt型粘弾性一様地盤上の複数基礎の解析<sup>4)</sup>, 薄層法による複数円筒基礎の解析<sup>5)</sup>, 境界積分方程式法による2次元地表面基礎の解析<sup>6)</sup>, 境界要素法による2次元・3次元の地表面基礎や埋込み基礎の解析<sup>7-9)</sup>, 本論と同様に薄層法と容積法を組合せた方法による連棟複数建物の解析<sup>10)</sup>な

どが行われてきた. また, 原子力発電施設の配置計画の基礎資料として, 様々な解析手法を用いた総合的な研究も行われている<sup>11)</sup>. しかし, 隣接建物間の動的相互作用に関して, 系統的に検討した研究事例は余り無いようである.

そこで, 本論では, Lysmerらの方法<sup>12)</sup>に則り, グリーン関数として薄層要素解を用い, 容積法を用いた動的サブストラクチャー法を適用して, 有限要素法と組み合わせることにより, 隣接建物の存在が剛基礎のインピーダンス及び基礎入力動, さらに, 建物応答に及ぼす影響を検討する.

本論では, 直接基礎を対象とし, 主たるパラメータとして, 隣接建物の階数, 建物間距離, 基礎の根入れ深さ, 建物間の埋土の剛性, 隣接建物の棟数・規模・隣接方向などを考えている. 動的相互作用の基本的な物理量である, インピーダンスと基礎入力動に与える影響を主として検討すると共に, 建物応答への影響を考察するために建物の伝達関数についても一部検討を加える. なお, 既往の論文では, 隣接基礎を含めた複数剛基礎の自由度に対してインピーダンスと基礎入力地動を提示している例が多い. この場合は, 無質量の隣接基礎を空間的に固定した状態での値を求めることに相当し, 隣接建物を含めて上部構造の解析を行うことが前提になる. これに対して, 本論では, 隣接建物の影響を反映した単独基礎としてのインピーダンスと基礎入力動を提示する. このインピーダンスと基礎入力動は, 対象とする上部構造物のみを解析するために用いる値に相当し, 隣接建物の影響を直接的に検討することが可能となる.

本論の特徴は, 直接基礎で支持された隣接建物間の相互作用問題

\*1 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生・修士(工学)

\*2 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博

\*1 Graduate Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., M. Eng.

\*2 Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

に関して、豊富なパラメータスタディにより、その影響を体系的に整理している点、隣接建物の規模・高さ・距離などが当該建物のインピーダンスや基礎入力動に与える影響を示すことにより、単独基礎のインピーダンス・基礎入力動の適用性を示している点にある。なお、杭基礎の場合には、建物間相互作用効果の現れ方が直接基礎とは異なるので、直接基礎と杭基礎との差異を中心にした検討は改めて行う予定である。

## 2 解析手法

本論では、隣接建物の規模や建物階数が、相互作用特性に与える影響を考察するために、図1に示すように無質量剛基礎Aに隣接して建物Bが存在する問題を考え、基礎Aのインピーダンスや基礎入力動を算定する。解析法は、基本的に Lysmer らによる SASSI<sup>12)</sup>の考え方に準拠しており、薄層法と有限要素法を、容積法を用いた動的サブストラクチャー法により結合した方法であり、新規にシステムの開発を行った。薄層法には、線形の内挿関数を利用し、薄層底面境界にはパラキシヤル境界<sup>13)</sup>を適用している。グリーン関数としては、ディスク加振解（加振点と受振点が同一鉛直軸上の場合）と点加振解を用いている。また、根入れ部・建物部には、3次元アイソパラメトリック要素、せん断変形を考慮した梁要素を用いている。地盤の薄層分割は、対象振動数範囲での波長の変化を表現するため、図2に示すように  $50 \times 1\text{m} + 50 \times 2\text{m} + 25 \times 4\text{m}$  に分割した。

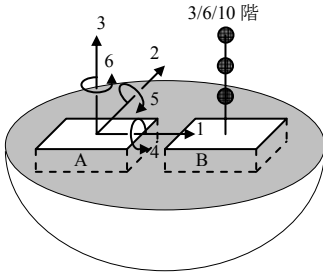


図1 解析モデル

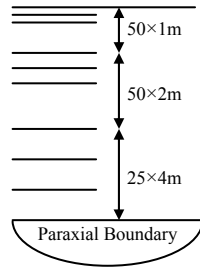


図2 地盤の薄層モデル

### 2.1 インピーダンスの評価

無質量剛基礎Aの隣に建物Bが建つ場合の基礎A—地盤—建物Bの、振動数領域での運動方程式は式(1)のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} [K_{AA}] & 0 & [K_{AB}] \\ 0 & [K_{TT}] & [K_{TB}] \\ [K_{BA}] & [K_{BT}] & [K_{BB}] + [K_{BB}]_T \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} [M_A] \\ [M_T] \\ [M_B] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_A\} \\ \{u_T\} \\ \{u_B\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_A\} \\ \{F_T\} \\ \{F_B\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $[K]$ 、 $[M]$ 、 $\{u\}$ はそれぞれ剛性マトリクス、質量マトリクス及び変位ベクトルである。下添字A、T、Bは、図3に示すように、それぞれ基礎Aの自由度、隣接建物の上部構造の自由度、基礎B—地盤系の自由度を意味する。各行列は、以下に示すように、薄層法により得られた地盤剛性行列 $[K]^S$ 、基礎の質量・剛性行列 $[K]^A$ 、 $[M]^B$ 、 $[K]^B$ 、原地盤の質量・剛性行列 $[M]^E$ 、 $[K]^E$ から求められる。ただし、地表面基礎の場合には、原地盤についての部分(上添字E)がない。

$$\begin{aligned} [K_{AA}] &= [K_{AA}]^S + [K_{AA}]^A - [K_{AA}]^E & [M_A] &= [0] - [M_A]^E \\ [K_{AB}] &= [K_{AB}]^S & \\ [K_{BA}] &= [K_{BA}]^S & \\ [K_{BB}] &= [K_{BB}]^S + [K_{BB}]^B - [K_{BB}]^E & [M_B] &= [M_B]^B - [M_B]^E \end{aligned} \quad (2)$$

容積法を用いた動的サブストラクチャー法の考え方を利用して、式(1)を構築した後、地盤と建物Bの自由度を消去することにより、無質量剛基礎Aに対する6自由度の運動方程式に変換することがで

きる。これにより、基礎Aのインピーダンスは式(3)のように評価することができる。

$$[K_A] = [T]^T [K_{AA}]^* [T] \quad (3)$$

ここに、

$$[K_{AA}]^* = [K_{AA}] - \omega^2 [M_A] - \begin{bmatrix} 0 & [K_{AB}] \\ [K_{BT}] & [K_{BB}] + [K_{BB}]_T - \omega^2 [M_B] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ [K_{BA}] \end{bmatrix}$$

である。また、 $[T]$ は、剛基礎の変位拘束条件を表す座標変換マトリクスである。

### 2.2 基礎入力動の評価

基礎入力動は、外力を式(4)で表せることから、これを式(1)に代入して、基礎Aの応答を評価している。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \{F_A\} \\ \{F_B\} \\ \{F_T\} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} [K_{AA}]^S & [K_{AB}]^S \\ [K_{BA}]^S & [K_{BB}]^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_A\}_G \\ \{u_B\}_G \end{Bmatrix} \\ \{F_T\} &= \{0\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\{u_A\}_G$ と $\{u_B\}_G$ は地震波入射時の自由地盤の変位応答である。

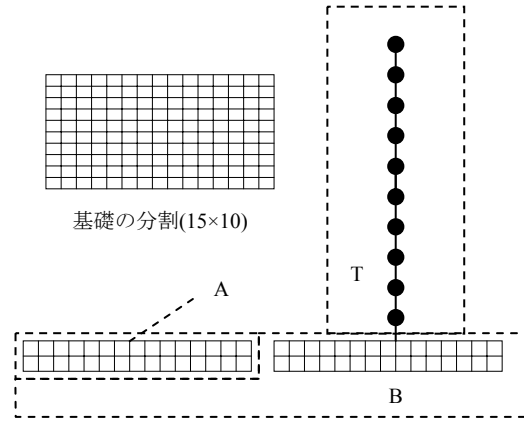


図3 離散化モデル

## 3 地表面基礎のインピーダンスと基礎入力動

### 3.1 基礎間距離の影響

図4に示すように、同一の基礎形状の建物が長辺方向に隣接する問題を考え、隣接建物階数が10階の場合を想定する。解析に用いた主要なパラメータを表1に示す。ただし、基礎Aは無質量で、基礎Bは  $2.4\text{t/m}^2$  とし、入射波は、鉛直下方からS波が入射すると考える。

表1 解析パラメータ

地盤	基礎	上部構造 (B)
$V_s=250\text{m/s}$ $\rho=1.7\text{t/m}^3$ $\nu=0.45$ $h=0.03$	$2B_1=2B_2=30\text{m}$ $2C_1=2C_2=15\text{m}$ $\rho=0\text{t/m}^2$ (基礎A) $\rho=2.4\text{t/m}^2$ (基礎B)	階数=10 $\rho=1.2\text{t/m}^2$ $f_1=2\text{Hz}$ $h=0.03$

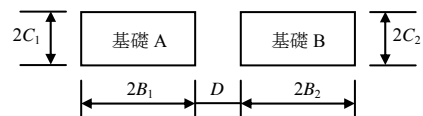
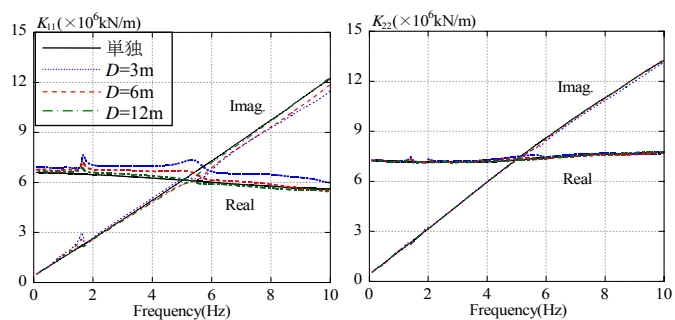
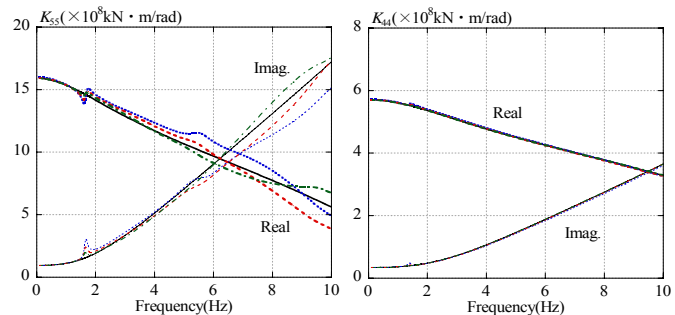


図4 基礎平面図 ( $B_e = \sqrt{B_1 \times C_1}$ )



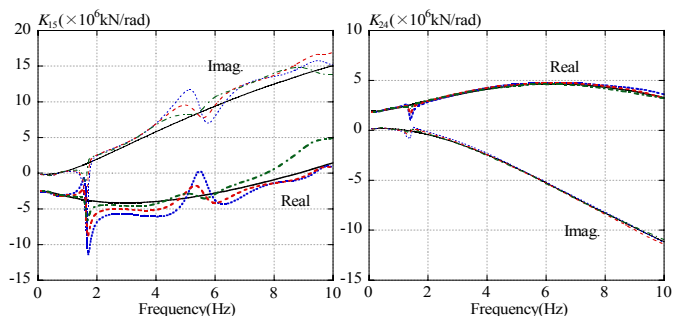
(a) 水平 (長辺)

(b) 水平 (短辺)



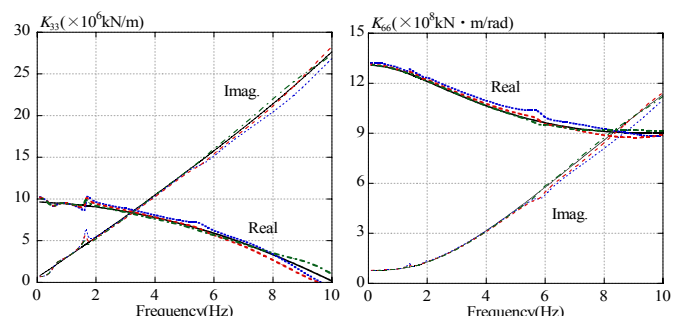
(c) 回転 (長辺)

(d) 回転 (短辺)



(e) 水平—回転 (長辺)

(f) 水平—回転 (短辺)



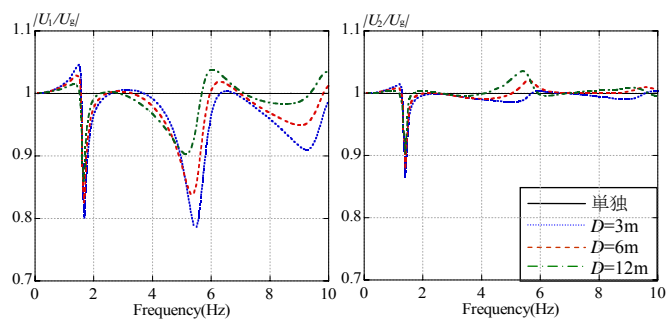
(g) 上下

(h) ねじれ

図5 基礎間距離がインピーダンスに及ぼす影響(地表面基礎)

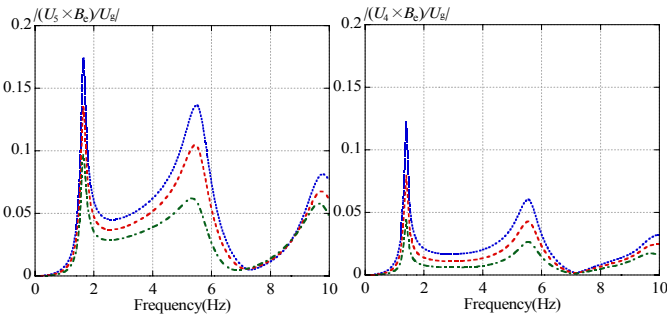
図5に、基礎間距離が3m, 6m, 12m及び $\infty$ (単独基礎)と増加する場合の基礎Aのインピーダンスの変化を示す。これらの図より、隣接建物の影響は、隣接建物の連成系の固有振動数近傍で顕著に現れ、短辺方向に比べて、建物が隣接する長辺方向でその影響が大きいことが分かる。また、上下・回転成分よりも、水平—回転連成成分や水平成分で隣接建物の影響が大きくなっており、建物間距離の増加と共にその影響度合いは減少している。また、回転成分については、高振動数域で差異が現れている。

つぎに、図6に、基礎Aの基礎入力動を示す。建物が隣接する長辺方向で隣接建物の影響が大きくなっており、インピーダンスより



(a) 水平 (長辺)

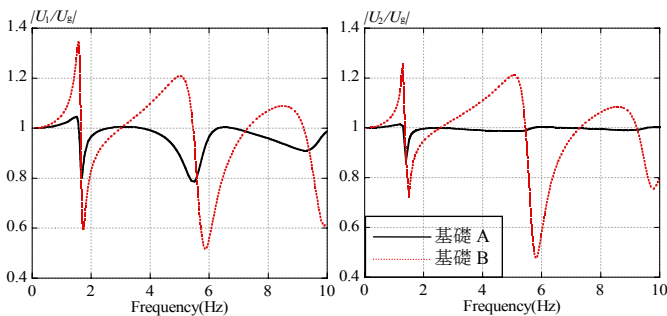
(b) 水平 (短辺)



(c) 回転 (長辺)

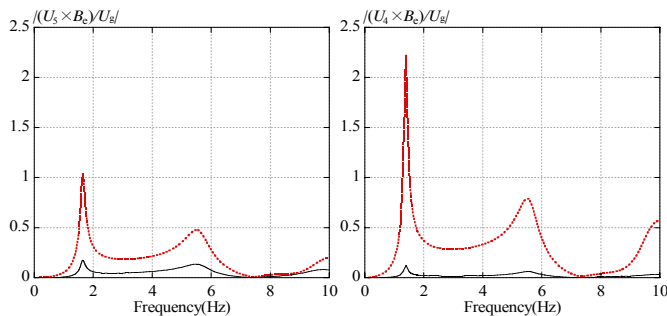
(d) 回転 (短辺)

図6 基礎間距離が基礎入力動に及ぼす影響(地表面基礎)



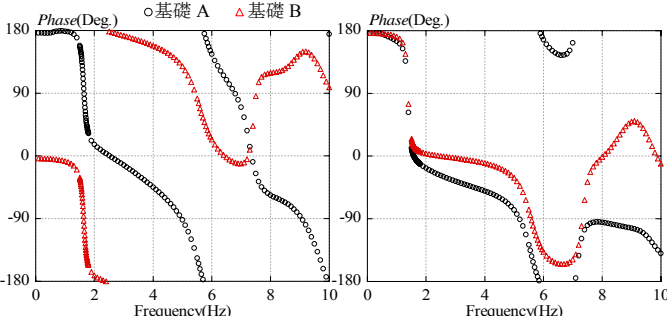
(a) 水平振幅 (長辺)

(b) 水平振幅 (短辺)



(c) 回転振幅 (長辺)

(d) 回転振幅 (短辺)



(e) 回転位相 (長辺)

(f) 回転位相 (短辺)

図7 基礎Aの基礎入力動と隣接建物の基礎応答の比較(D=3m)

隣接建物の存在による変動が大きい。水平方向では、隣接建物の固有振動数付近でピークと谷が隣り合って存在している。このため、上部構造物の固有振動数が近接した建物が存在する場合などに隣接建物の影響が顕著になる。一方、回転成分については、地表面単独基礎の場合には存在しないものであるが、建物が隣接して存在することにより、大きく励起されている。本例題では、隣接建物の影響は1次振動数より2次振動数の方が強い。これは、10階建て建物の場合、2次の方がスウェイやロッキングによる変形割合が大きいと思われる。

図7に、基礎間距離が $D=3\text{m}$ の場合について、基礎Aの基礎入力動と建物Bの基礎応答を比較して示す。隣接する建物Bの基礎の応答の影響が、隣接建物の応答が励起される固有振動数を中心に、地盤を介して基礎Aに伝わっている。方向の比較を行うと、建物が隣接する方向である長辺方向の方が、短辺方向より建物間の地盤の等価的なバネが堅くなるため、隣接建物の影響をより強く受けている。また、建物Bの基礎応答から、スウェイ変形は1次振動数より2次振動数の方が広い振動数範囲で大きくなっていることが分かる。

つぎに、回転成分の位相に着目してみる。低振動数域では、短辺方向では、2つの基礎がほぼ同位相で応答しているが、建物が隣接する長辺方向では基礎Aと基礎Bの位相が180度ずれている。これは文献1に示した実測結果と調和する結果であり、隣接する方向で、隣の基礎にお辞儀をさせるような回転入力を与えていることが分かる。

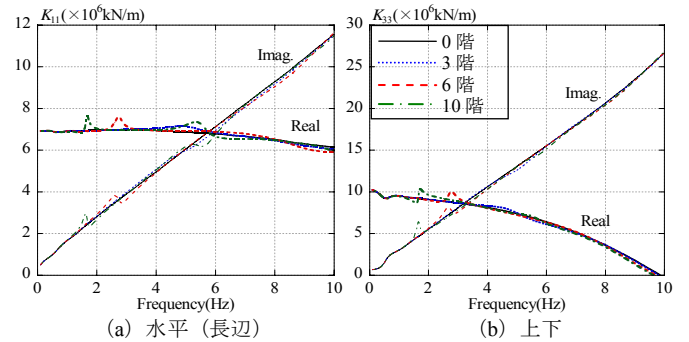
以上のように、隣接建物の存在によるインピーダンス、基礎入力動の変化は、主として隣接建物の連成系の振動数周辺で影響が現れ、建物の隣接する方向成分で変化の度合いが大きい。また、インピーダンスに比べ基礎入力動に影響が顕著である。

### 3.2 隣接建物の階数の影響

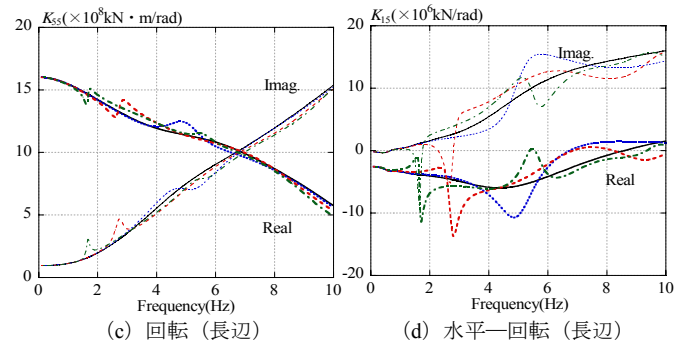
隣接する建物の建物階数の影響を見るために、隣接建物の階数を0階（基礎の質量は考慮）、3階、6階及び10階と変動させた場合の結果を示す。ただし、各階質量と各層のせん断剛性は同一とし、3階、6階及び10階建物の基礎固定時の1次固有振動数はそれぞれ6.0Hz、3.2Hz及び2.0Hzとする。また、地盤と基礎の解析パラメータには、表1の値を用い、基礎間距離は $D=3\text{m}$ に固定することとする。

基礎Aのインピーダンスを図8に示す。階数の違いによって隣接建物の固有振動数が変化するため、隣接建物の影響を受けやすい振動数が階数によって異なっている。ただし、隣接する建物高さによる影響度合いの変化は小さい。

つぎに、図9に、基礎入力動を示す。隣接建物の影響が、隣接建物の連成系の固有振動数周辺で顕著に認められる。隣接する建物による影響度合いを比較すると、隣接建物が低層であるほど影響の及ぶ振動数範囲が広く、影響度合いが大きくなっている。これは、隣接する建物が高層になるほど、建物規模は大きくなるが、逆に上部構造の変形が卓越しやすくなって基礎変位に伴う地盤の変形（スウェイ・ロッキング変形）割合が小さくなるためと思われる。一方で低層の建物では、相対的に建物剛性が大きくなるために、地盤の変形割合が大きくなり、その結果、隣接基礎への影響も増大することになると判断される。

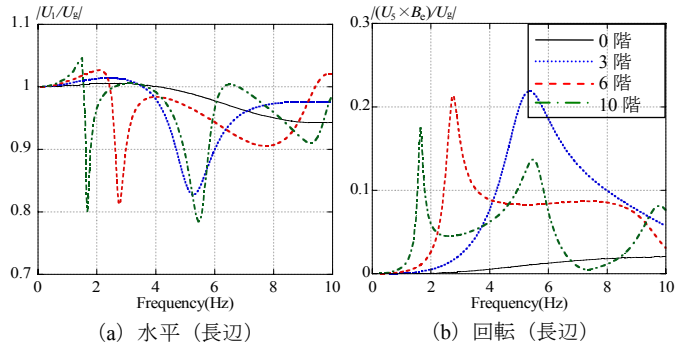


(a) 水平（長辺） (b) 上下



(c) 回転（長辺） (d) 水平—回転（長辺）

図8 隣接建物の階数がインピーダンスに与える影響



(a) 水平（長辺） (b) 回転（長辺）

図9 隣接建物の階数が基礎入力動に与える影響

## 4 根入れ基礎のインピーダンスと基礎入力動

### 4.1 隣接建物の数の影響

つぎに、根入れが存在する場合について検討を加える。図10に示すように、同一の根入れ深さを有する基礎面積の等しい2つ或いは3つの建物が長辺方向に隣接する問題を考える。地盤、基礎、隣接建物の主要な解析パラメータを、表2に示す。基礎間距離は $D=3\text{m}$ に固定し、基礎Aは無質量、基礎Bと基礎Cは $2.4\text{t/m}^2$ とする。

図11に、根入れの深さが $E=4\text{m}$ の場合について、隣接建物の棟数による基礎Aのインピーダンスの変化を示す。図3に示した地表面基礎の結果と比べ、根入れ部の抵抗増大と、逸散減衰増加により、実部・虚部共に増加している。また、基礎間の地盤の等価的なバネが相対的に堅くなるため、隣接建物の影響も地表面基礎の場合より強く現れている。隣接建物の影響は、水平成分と水平—回転連成成分で顕著であり、回転成分と上下成分については小さい。これは、基礎間の地盤バネの軸剛性とせん断剛性の大きさの違いによる。

隣接建物の影響については、地表面基礎の場合と同様に、隣接建物の連成系の固有振動数位置での変動が大きい。これに加え、水



平インピーダンスは実部・虚部が全振動数で大きく増大し、回転と上下のインピーダンスは 5Hz 以上の高振動数で増加している。

表 2 解析パラメータ

地盤	基礎	上部構造 B(C)
$V_s=250\text{m/s}$ $\rho=1.7\text{t/m}^3$ $\nu=0.45$ $h=0.03$	$2B_1=2B_2=30\text{m}$ $2C_1=2C_2=15\text{m}$ $\rho=0\text{t/m}^2$ (基礎 A) $\rho=2.4\text{t/m}^2$ (基礎 B, C)	階数=10 $\rho=1.2\text{t/m}^2$ $f_1=2\text{Hz}$ $h=0.03$

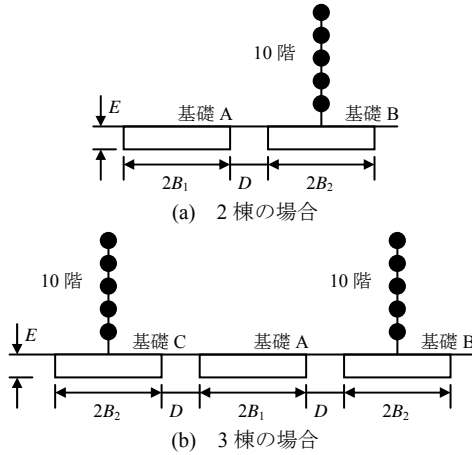


図 10 根入れ基礎の場合の解析ケース

水平インピーダンスの場合は、基礎間の地盤のバネ剛性が大きいために、隣接基礎が一体的に振動し、等価的な基礎底面積が増加して、バネ的抵抗と逸散減衰が増加していると考えられる。このため、2 棟隣接の場合に比べ、3 棟隣接の場合には、さらにインピーダンスが増加している。なお、既往の研究のように<sup>9)</sup>、隣接基礎の自由度も含めてインピーダンスを算出した場合には、隣接基礎を空間的に固定した場合の水平インピーダンスを算出していることになるため、一般に実部は大きく増加し、虚部は逆に減少する傾向にある。虚部の減少は、基礎から放出された逸散波が隣接基礎で反射されて戻ってくるためである。しかし、実際には隣接基礎も一緒に振動するため逸散減衰は増加する結果になる。

一方、回転と上下のインピーダンスの場合は、隣接建物間の S 波の波長による影響が現れているようである。隣接建物の影響が最大になっている 8Hz は、丁度、隣接建物との中心間距離が S 波の 1 波長になるときに相当する。

つぎに、図 12 に基礎 A の基礎入力動を示す。根入れの存在により、水平入力動は振動数と共に減少し、回転入力動が増加する。隣接建物の影響は、地表面基礎の場合と同様に、隣接建物の連成系の固有振動数付近で大きい。しかし、インピーダンスとは異なり、根入れによって、隣接建物の影響が大きくなっているようには見受けられない。これは、根入れの存在によって隣接建物の応答が抑制されていることが一因していると考えられる。隣接建物棟数の違いを見ると、3 棟隣接の場合は 2 棟隣接の場合に比べ、隣接建物の影響を強く受けている。

#### 4.2 根入れ深さの影響

次に、根入れ深さによる差異を検討するために、2 棟隣接の場合

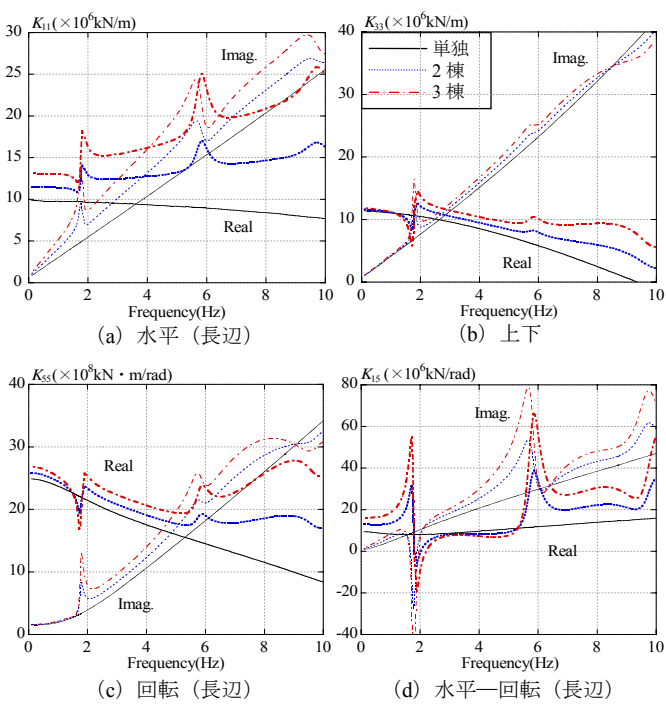


図 11 根入れ基礎のインピーダンス

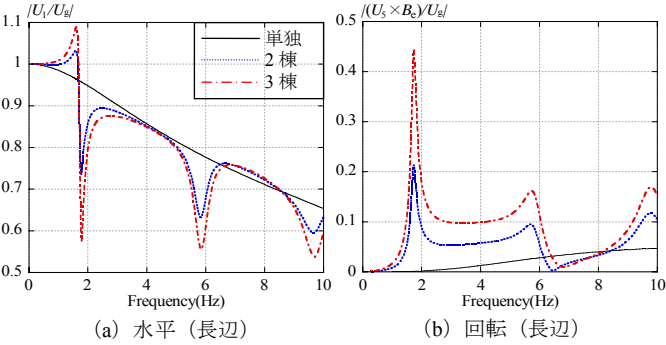


図 12 根入れ基礎の基礎入力動

を対象に、根入れ深さを 0m、2m、4m 及び 8m とした場合の結果を比較する。

インピーダンスに関しては、図 13 に示すように、単独基礎の場合と同様に根入れ深さの増加と共に、全成分のインピーダンスが実部、虚部共に増加している。また、隣接建物の影響は、根入れが深いほど明確に現れている。

基礎入力動に関しては、図 14 に示すように、根入れ深さの増加と共に水平成分は減少し、回転成分は増加している。隣接建物の影響は隣接建物の固有振動数付近でのみ認められ、根入れ深さには余り依存していない。一方、回転成分は、隣接建物による影響が根入れ深さとは関係なく現れている。

図 15 に、根入れ深さが 4m 及び 8m の場合について、基礎 A の基礎入力動と建物 B の基礎応答を比較して示す。これらの結果に加え、図 7 に示した地表面基礎の結果を含めて考察すると、根入れが深いほど、隣接建物の応答は上部建物の弾性応答の影響を受けにくくなっており、隣接建物の固有振動数周辺の基礎入力動の乱れは小さくなっている。また、根入れが深くなると、基礎間の地盤の等価的なバネが堅くなるため、基礎入力動は隣接建物の基礎応答と殆ど一致し、2つの基礎が一体になって動くようになっている。

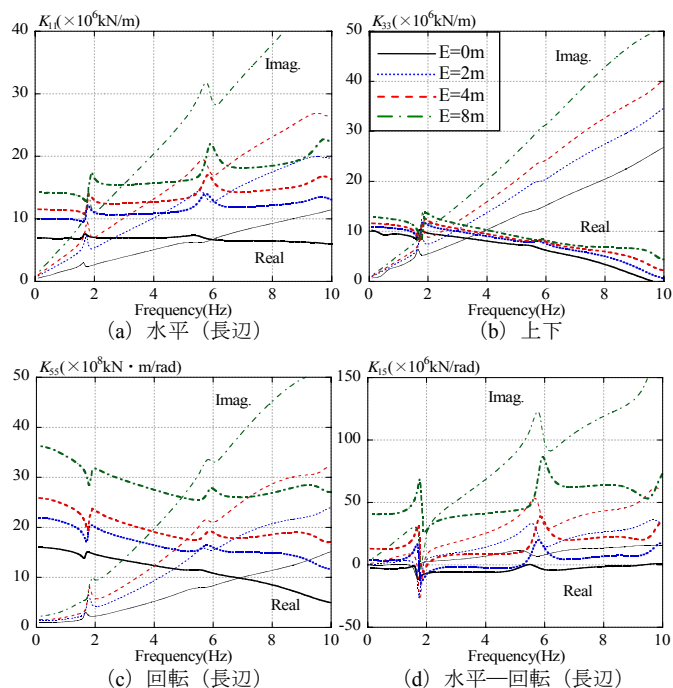


図 13 根入れ深さがインピーダンスに与える影響

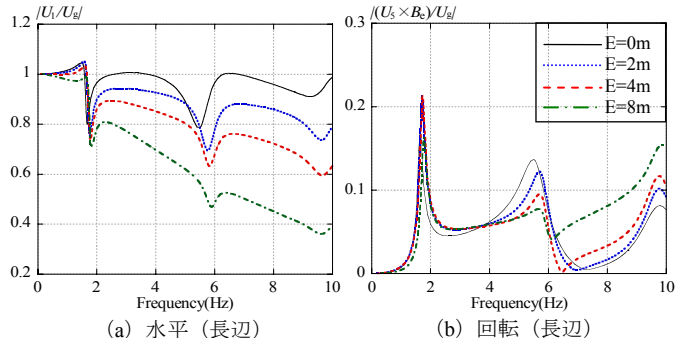


図 14 根入れ深さが基礎入力動に与える影響

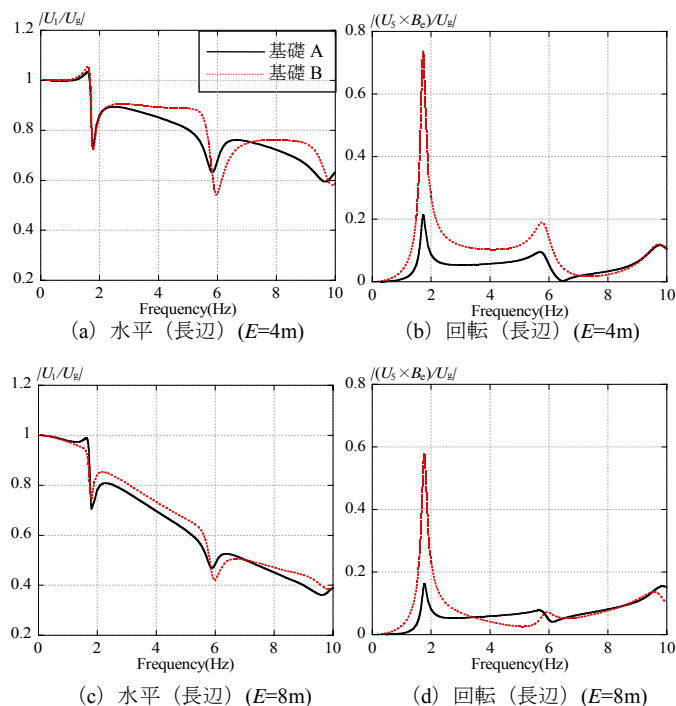


図 15 基礎 A の基礎入力動と隣接建物の基礎応答の比較(D=3m)

### 4.3 埋土の影響

つぎに、建物間の埋土材料の影響について考察する。図 16 に示すように、基礎根入れ部の間に埋め戻す土の影響について検討する。根入れ深さを  $E=4\text{m}$ 、基礎間距離を  $D=3\text{m}$  とし、基礎間の埋土として、表 3 に示す 3 ケースを考える。

表 3 基礎間の埋土の解析パラメータ

CASE1	CASE2	CASE3
$V_s=250\text{m/s}$ $\rho=1.7\text{t/m}^3$ $\nu=0.45$ $h=0.03$	$V_s=150\text{m/s}$ $\rho=1.7\text{t/m}^3$ $\nu=0.45$ $h=0.03$	トレンチ (埋土無し)

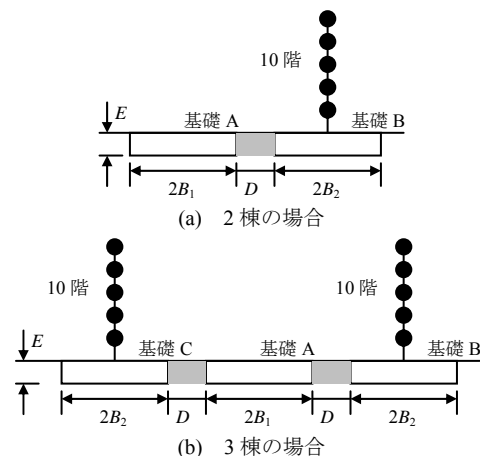


図 16 基礎間の埋土を考慮したモデル

図 17 に、埋土と周辺地盤の S 波速度比が 1.0, 0.6, 0.0 の場合の結果を、単独基礎の結果と比較して示す。図のように、基礎間の埋土が軟らかくなるに従って、隣接建物の影響が減じられており、隣接建物間の相互作用には、基礎間の地盤が大きな役割を果たしていることが分かる。つぎに、図 5 に示した地表面単独基礎の結果と比較すると、3 棟が隣接して基礎間に埋土が無い場合でも、根入れによる実部・虚部の増大効果が認められる。ただし、根入れ側面部からの逸散減衰効果が減じられるため、単独根入れ基礎よりも虚部の値は小さくなっている。

基礎入力動については、図 18 に示すように、基礎間の埋土条件による差は余り顕著ではない。これは、基礎入力動に及ぼす隣接建物の影響が、根入れ深さに余り依存していないこと、基礎入力動には基礎底面位置からの入力の影響が大きいこと等が原因していると思われる。

### 5 建物の応答

最後に、隣接建物の存在が建物応答に及ぼす影響について、建物の伝達関数を中心に検討する。

#### 5.1 同一基礎形状の建物が隣接する場合

図 19 に示すように、同一の根入れ深さを有する基礎面積の等しい 2 つ建物が長辺方向で隣接する場合の検討を行う。主たる解析パラメータは、これまでに示したものと同様であり、根入れ深さを

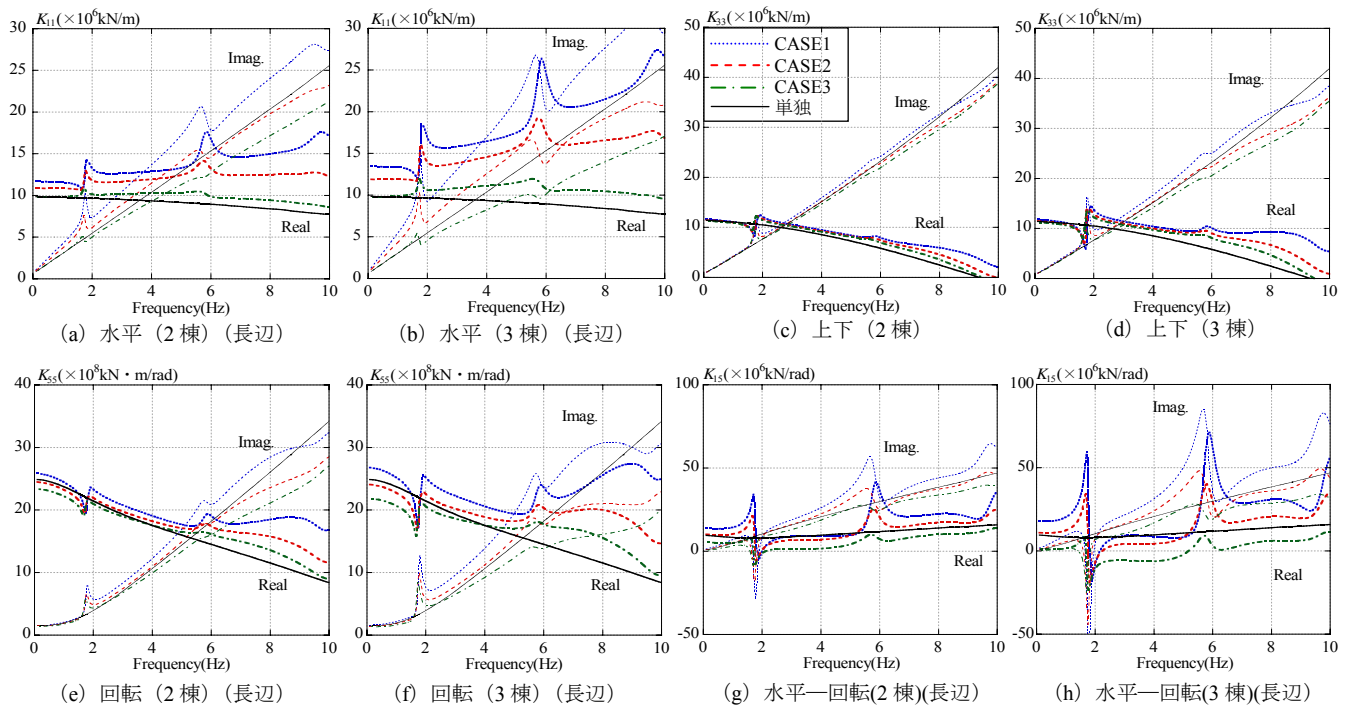


図 17 埋土が根入れ基礎のインピーダンスに与える影響

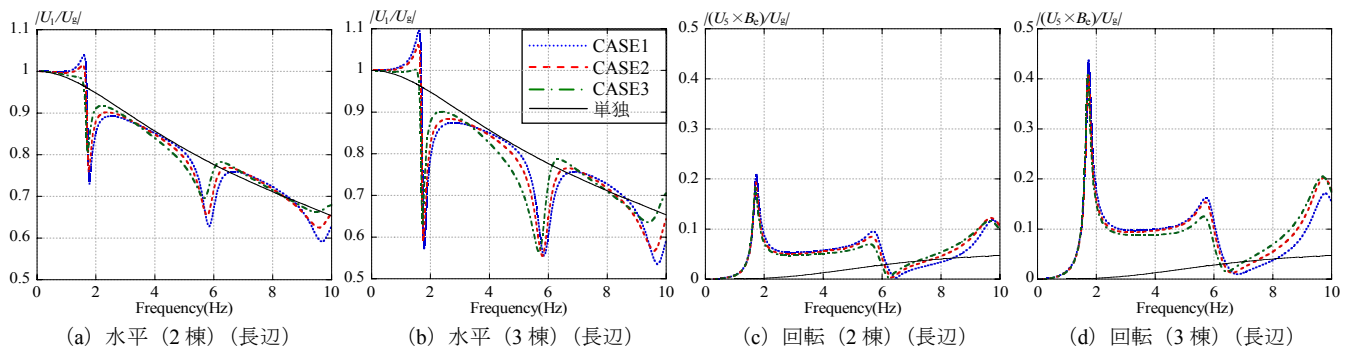


図 18 埋土が根入れ基礎の基礎入力動に与える影響

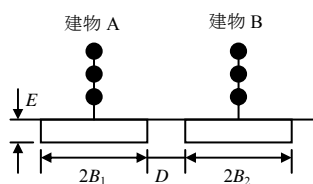


図 19 隣接建物

$E=4\text{m}$ , 基礎間距離を  $D=3\text{m}$  とする。隣接しあう建物階数としては, 3, 6, 10 階建てを想定し, それぞれの基礎固定時の振動数は, 6.0 Hz, 3.2 Hz, 2.0Hz とする。

図 20 に, RF/GL の伝達関数と 1 次モード形の比較を示す。ここに示すモード形の振幅は, 自由地盤地表に対する伝達関数の振幅を示している。何れの場合にも, 同一高さの建物が隣接する場合に単独建物との差が最も大きくなっている。これは, 隣接建物の連成系の振動数で隣接建物の影響が最も大きくなるため, 固有振動数が 2 つの建物で近接する同一高さの建物が隣接する場合に, その影響が顕著になることによる。一方, 隣り合う建物の階数が異なる場合には,

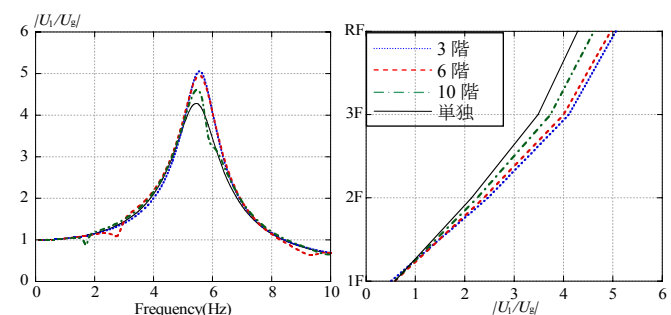
建物が高くなるほど隣接建物の影響度合いが小さくなっている。

## 5.2 異なる基礎形状の建物が隣接する場合

図 21 に示すように, 基礎面積が異なる 2 つ建物が隣接する場合を考える。ここでは, 根入れ深さを  $E=4\text{m}$ , 基礎間距離  $D=3\text{m}$  とし, 長辺方向に隣接する場合と, 短辺方向に隣接する場合を想定する。また, 建物 A の階数は 3 階に固定し, 建物 B の階数として 3 階と 6 階の 2 ケースを考える。基礎サイズについては, 短辺方向の基礎長は  $2C_1=2C_2=15\text{m}$  のように建物 A と建物 B とで同一とし, 長辺方向の基礎長は, 建物 A は  $2B_1=30\text{m}$ , 建物 B は  $2B_2=15\text{m}, 30\text{m}, 60\text{m}$  の 3 ケースを設定する。なお, 基礎と各階の質量はこれまでの検討と同様に, 各層のせん断剛性は床面積に比例し, 建物の基礎固定時の 1 次固有振動数は 3 階建 6Hz, 6 階建 3.2Hz に固定する。

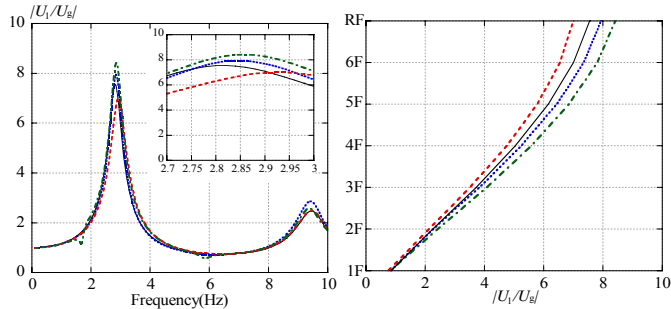
図 22~23 に, RF/GL の伝達関数と 1 次モード形を示す。図 22 は, 長辺方向に建物が隣接する場合, 図 23 は短辺方向に隣接する場合であり, 両図中には単独基礎の結果も合わせて示してある。

図のように, 隣接建物の影響は, 隣接建物が短辺方向に存在する



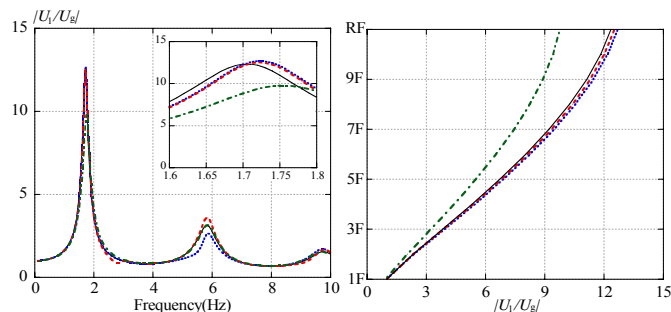
(a) 3階建物 RF/GL

(b) 3階建物 1次モード形



(c) 6階建物 RF/GL

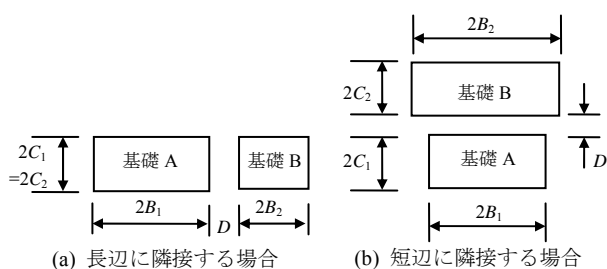
(d) 6階建物 1次モード形



(e) 10階建物 RF/GL

(f) 10階建物 1次モード形

図 20 隣接する建物の応答



(a) 長辺に隣接する場合

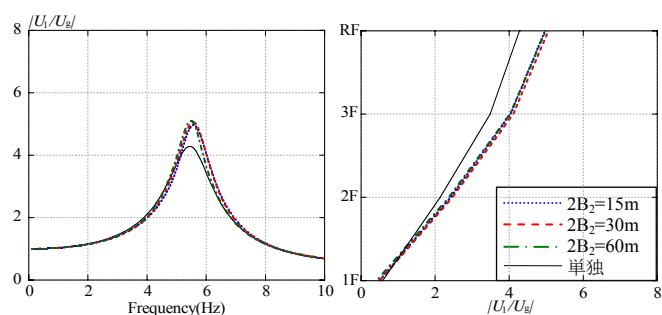
(b) 短辺に隣接する場合

図 21 基礎平面図

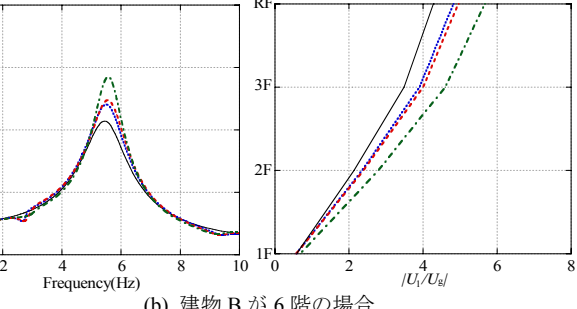
場合の方が顕著であり、隣接する建物の平面規模が大きくなるほどその影響は強くなっている。これは、短辺方向に隣接する場合の方が、隣接建物間の地盤の断面積が増加し、基礎間の等価的なバネが堅くなること、隣接建物のロッキング動が卓越しその影響が現れやすくなることなどが原因している。

## 6 まとめ

隣接建物の存在が直接基礎のインピーダンスと基礎入力動及び建物応答に与える影響について解析的に検討した。得られた知見は以下の通りである。

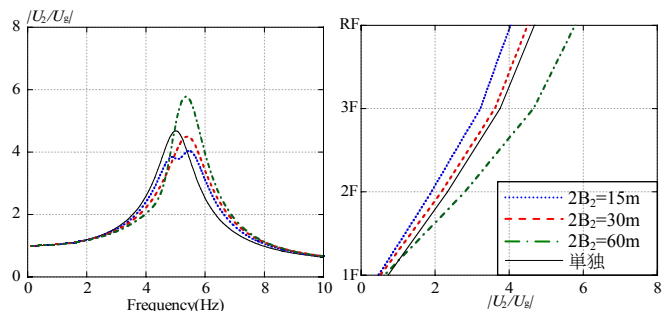


(a) 建物 B が 3 階の場合

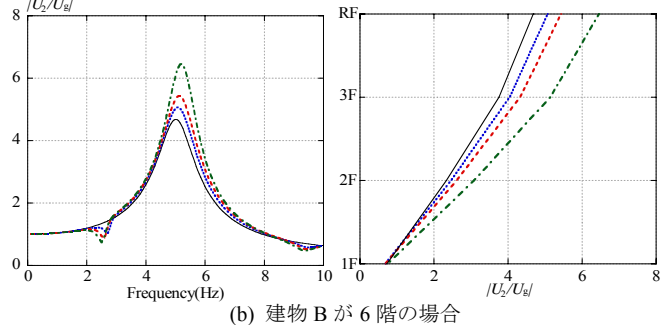


(b) 建物 B が 6 階の場合

図 22 長辺方向で隣接する場合の 3 階建物 A の応答



(a) 建物 B が 3 階の場合



(b) 建物 B が 6 階の場合

図 23 短辺方向で隣接する場合の 3 階建物 A の応答

- ① 隣接建物の存在によるインピーダンスへの影響は、水平一回転連成分と水平成分で大きく、隣接建物の連成系の固有振動数付近でのインピーダンスの変動と、実部及び虚部の増大として現れる。
- ② 隣接建物の存在による基礎入力動への影響は、インピーダンスよりも強く現れ、水平成分よりは回転成分に影響が顕著で、隣接建物の連成系の固有振動数周辺で大きく変動する。
- ③ 建物応答については、上部構造の固有振動数が近接する建物が隣接する場合に最も隣接建物の影響を強く受ける。
- ④ 隣接建物の影響は建物が隣接する方向成分で大きく、基礎間距



離が短いほどその影響が大きい。

- ⑤ 根入れの有無による差異については、隣接建物が存在する場合にも、単独基礎と同様の根入れ効果が認められる。隣接建物の影響は、インピーダンスでは地表面基礎よりも強く現れるが、基礎入力動は単独基礎の結果との差異が小さくなる。
- ⑥ 隣接建物間の埋土材料の影響については、埋土剛性が小さくなると、インピーダンスの実部・虚部共に減少する。ただし、根入れ効果は十分に認められる。
- ⑦ 建物が隣接する方向については、建物が短辺方向に隣接する場合の方が、長辺方向に隣接する場合より、隣接建物の影響が大きく現れる。
- ⑧ 隣接建物の高さによる影響度合いの差異については、隣接する建物が低いほど、隣接建物の応答に占める基礎変位の割合が大きくなるため、隣接建物の影響が強く現れる。
- ⑨ 隣接建物の高さが同一で、隣接建物間距離が等しい場合、隣接建物の平面規模が大きいほど、隣接建物の影響が大きい。
- ⑩ 隣接する建物棟数の影響については、直接隣接する建物数が増加すると、隣接建物の影響が大きくなる。

今後は、杭基礎の場合について、検討を加えていく予定である。

## 謝辞

本論の作成に当たっては、名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻の小島宏章助手、同大学院生の酒井理恵子氏に協力を頂いた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 松山智恵, 福和伸夫, 飛田潤: 強震観測・強制振動実験・常時微動計測に基づく隣接する中低層建物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, No.545, pp.87-94, 2001.7
- 2) 例えば, 北田義夫, 廣谷勉, 井口道雄: 複数建屋の隣接効果に関するモデル試験, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.2415-2420, 1998 ( (財) 原子力発電技術機構による, 「原子炉建屋の隣接効果試験 (1994.4-2002.3)」についての一連の調査報告書)
- 3) J.E. Luco and L.Contesse : Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction, Bull. Seis. Soc. America, Vol.63, pp.1289-1303, 1975
- 4) 小堀鐸二, 南井良一郎, 日下部馨: 粘弾性層地盤上の構造物群の振動特性, 関東地震 50 周年記念地震工学シンポジウム, pp.195-202, 1973
- 5) T.Kobori and K.Kusakabe : Dynamic Cross Interaction between Two Embedded Foundations, Proc. 5th Japanese Earthq. Eng. Symp., pp.521-528, 1978
- 6) H.L. Wong and J.E. Luco : Dynamic Interaction between Rigid Foundations in a Layered Half-space, Soil Dyn. Earthq. Eng., Vol.5, pp.149-158, 1986
- 7) 中井正一, 福和伸夫: 埋め込み剛基礎の動特性に基づく動的擬似 3 次元効果の考察, 境界要素法による動的擬似 3 次元効果に関する研究 (その 2) , 日本建築学会構造系論文集, No.380, pp.56-66, 1987.10
- 8) 川瀬博, 吉田一博, 佐藤利明: 境界要素法による地表面上剛基礎の相互連成解析, 清水建設研究報告, 第 38 号, pp.11-21, 1984
- 9) 吉田一博, 川瀬博: 埋設された剛構造物相互の連成振動, 第 7 回日本地震工学シンポジウム, pp.1045-1050, 1986
- 10) 岩本賢治, 兵頭陽, 喜多村英司, 宮本裕司, 大塚康弘: 複数隣接建屋の動的相互作用解析 (その 1) 埋込みが無い場合, (その 2) 埋込みが有る場合,

日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.387-390, 1995.8

- 11) 今村晃, 渡辺孝英, 吉田一博, 石崎萬平, 源栄正人: 埋め込みを有する複数建屋の地震応答性状に関する研究 (その 1) 解析手法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.461-462, 1990.9
- 12) J. Lysmer, R.M. Tabatabaie, F. Tajirian, S. Vahdani, F. Ostadan : SASSI – A System for Analysis of Soil-structure Interaction, UCB/GT/81-02, University of California, 1981
- 13) 増田潔, 佐々木文夫: 半無限層を考慮した薄層法による点加振解の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.221-222, 1985
- 14) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996