

隣接する構造物の動的相互作用に関する解析的検討

Analytical Study on Dynamic Interaction of Adjacent Structures

内海 耀 司 岩 本 賢 治

要 約

都市部の市街地において、複数の建物が隣接して建設されることが多い。しかし、建物が隣接する場合には基礎が地盤を介して互いに影響しあうため、隣接する建物の地震時挙動は単独の場合とは異なる。本報では、建物の動特性に及ぼす隣接の影響を明らかにするために複数建物の連成解析法を開発し、解析的な検討を行った。動的地盤ばねや基礎入力動について隣接による影響を基礎種類ごとに分析し、建物の地震応答に関しては建物モデルの組み合わせや基礎の間隔をパラメーターとして比較検討を実施した。検討の結果、異なる建物が隣接する場合、重量が大きい建物の振動によって重量が小さい建物の応答にも影響が生じることが明らかとなった。

目 次

- I. はじめに
- II. 手法の概要
- III. 隣接基礎の動特性について
- IV. 上部構造の応答
- V. おわりに

I. はじめに

都市部の市街地において、複数の建物が隣接して建設されることが多い。しかし、建物が隣接する場合には基礎が地盤を介して互いに影響しあうため、隣接する建物の地震時挙動は単独の場合とは異なると考えられる¹⁾。

隣接建物の地震時挙動に関する解析的な研究は、原子力施設を対象としたものが数多く行われているが^{2)~4)}、一般的な建築を対象としたものは比較的少なく⁵⁾、未解明な点が多い。

そこで本報では、建物の動特性に及ぼす隣接の影響を明らかにするために、複数建物の連成解析法を開発し、中低層建物の地震時挙動を対象に解析的な検討を行う。まず、動的地盤ばねや基礎入力動に関して、基礎種類ごとに隣接による影響の検討を行う。その後、隣接する中低層建物の地震応答について、建物モデルの組み合わせや基礎の間隔をパラメーターとして比較検討する。

II. 手法の概要

建物の地震時挙動に及ぼす隣接の影響を評価するためには、地盤を介した他方の建物の影響を考慮する必要がある。本報では薄層要素法を用いたサブストラクチャー法⁶⁾に基づき手法を開発する。薄層要素法は成層地盤に限られるが、計算時間が比較的短く、様々な条件での検討に適している⁷⁾。

2つの基礎が隣接する場合の動的地盤ばね及び基礎入力動は以下のように定義する。

1. 動的地盤ばね

Fig.1 に示す隣接建物基礎の連成地盤ばね $[K_s]$ を、(1)式で示す。

$$[K_s] = [f_s]^{-1} \quad \dots(1)$$

$[f_s]$ は基礎に関する地盤柔性であり振動数に依存する。ラフ

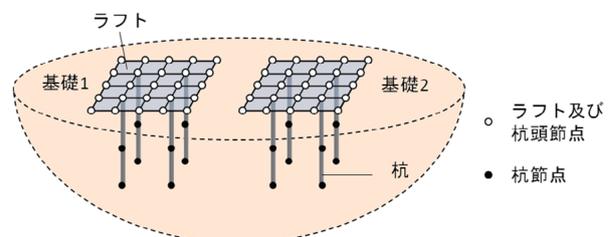


Fig.1 隣接建物基礎の解析モデル
(Analysis Model of Adjacent Building Foundations)

キーワード：隣接建物，薄層要素法，地盤と建物の相互作用，基礎の動的特性，地震応答解析

Keywords：adjacent structures, thin layer element method, soil-structure interaction, dynamic characteristic of foundation, seismic response analysis

トと杭，地盤の相互作用を考慮するために，ラフト及び杭頭に関する地盤節点と杭頭を除く杭に関する地盤節点について，(2)式のように定義する。なお，地盤柔性を求める際にはリング加振解を用い，杭に関する地盤の柔性は，各杭の深さ方向の離散点の位置を考慮し，それぞれの影響を組み合わせた全体柔性を用いることで，ラフト及び杭の連成を考慮したフルマトリクス地盤ばねを算定した。

$$[f_s] = \begin{bmatrix} f_s^{11} & f_s^{11} & f_s^{12} & f_s^{12} \\ & f_s^{11} & f_s^{12} & f_s^{12} \\ & f_s^{11} & f_s^{12} & f_s^{12} \\ & & f_s^{22} & f_s^{22} \\ sym. & & & f_s^{22} \end{bmatrix} \dots(2)$$

ここで，添字の1,2は基礎1,2に関する量であることを示し，
 f_s^{11} , f_s^{12} , f_s^{22} : ラフト及び杭頭間の連成を考慮した地盤柔性
 f_s^{11} , f_s^{12} , f_s^{22} : ラフト及び杭頭と杭（杭頭を除く）間の連成を考慮した地盤柔性
 f_s^{11} , f_s^{12} , f_s^{22} : 杭（杭頭を除く）間の連成を考慮した地盤柔性

また，(1)式で示した連成地盤ばね $[K_s]$ を用いると，杭の剛性を考慮した動的剛性 $[K_f]$ は，(3)式で示される。

$$[K_f] = [K_s] + ([K_p] - \omega^2[M_p]) - ([K_{sp}] - \omega^2[M_{sp}]) \dots(3)$$

ここで， K_p, M_p : 杭の剛性，質量
 K_{sp}, M_{sp} : 杭と置き換わる土柱の剛性，質量

動的剛性 $[K_f]$ を地盤柔性 $[f_s]$ と同様に(4)式のように定義する。

$$[K_f] = \begin{bmatrix} k_f^{11} & k_f^{11} & k_f^{12} & k_f^{12} \\ & k_f^{11} & k_f^{12} & k_f^{12} \\ & k_f^{11} & k_f^{12} & k_f^{12} \\ & & k_f^{22} & k_f^{22} \\ sym. & & & k_f^{22} \end{bmatrix} \dots(4)$$

ラフトを剛基礎として仮定したときの剛体縮約後と剛体縮約前の自由度の変換マトリクス $[\lambda_1]$, $[\lambda_2]$ を(5)式で示す。

$$\begin{Bmatrix} U_{f1} \\ U_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \lambda_1 & \lambda_2 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} U_{f1}^R \\ U_{f2}^R \end{Bmatrix} \dots(5)$$

ここで， U_{f1}, U_{f2} : 基礎1,2の縮約前の地表節点の変位
 U_{f1}^R, U_{f2}^R : 基礎1,2の縮約後の地表節点の変位

$[\lambda_1]$, $[\lambda_2]$ を基礎1と基礎2に対して導入すると，基礎の動的地盤ばね $[K]$ は(6)式で示される。なお添字の1,2は基礎1,2に関する量であることを示している。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{12}^T & K_{22} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{Bmatrix}^t \left([k_{rr}] [k_{rp}]^{-1} [k_{pr}] \right) \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{Bmatrix} \dots(6)$$

ここで， $[k_{rr}] = \begin{bmatrix} k_f^{11} & k_f^{12} \\ k_f^{12} & k_f^{22} \end{bmatrix}$, $[k_{rp}] = \begin{bmatrix} k_f^{11} & k_f^{12} \\ k_f^{12} & k_f^{22} \end{bmatrix}$
 $[k_{pr}] = \begin{bmatrix} k_f^{11} & k_f^{12} \\ k_f^{12} & k_f^{22} \end{bmatrix}$

2. 基礎入力動

基礎1と基礎2の基礎入力動 $[U_{F1}]$, $[U_{F2}]$ は自由地盤上の任意の点を基準とした無質量剛基礎のそれぞれの応答比として定義され，(7)式によって示される。

$$\begin{Bmatrix} U_{F1} \\ U_{F2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{12}^T & K_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} P_{F1} \\ P_{F2} \end{Bmatrix} \dots(7)$$

ここで， P_{F1}, P_{F2} : 地盤振動によって基礎1,2に作用する相互作用力

III. 隣接基礎の動特性について

本検討では，杭基礎，直接基礎，パイルド・ラフト基礎を対象に，同種類，同一形状の基礎が2つ隣接する場合の水平方向と回転方向に関する動的地盤ばねと基礎入力動を求めて，単独基礎との比較を行った。基礎の配置をFig.2に，基礎の仕様及び地盤モデルをFig.3にそれぞれ示す。

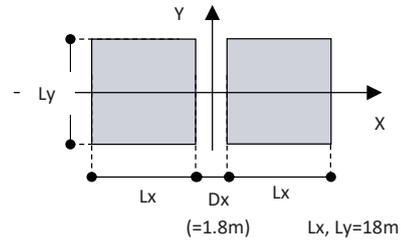


Fig.2 基礎の配置 (Arrangement of Foundations)

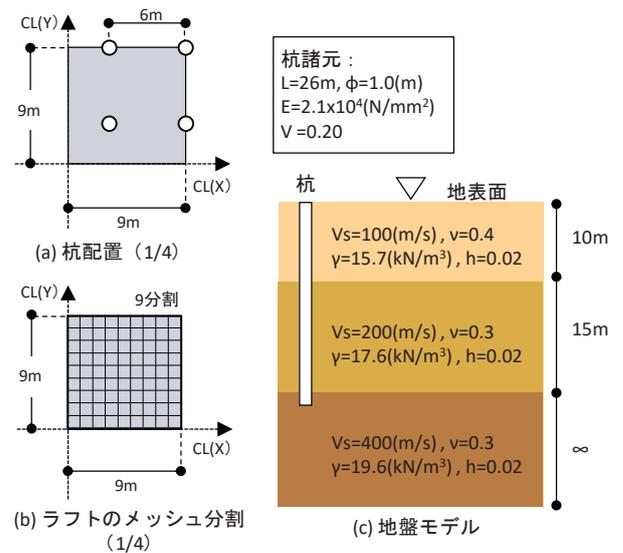


Fig.3 基礎の仕様及び地盤モデル (Specification of Foundation and Soil Model)

隣接基礎の動的地盤ばねは、Fig.4 に示すように 2 つの基礎に対して、水平もしくは回転方向に同じ単位加振力を与えた時に基礎に生じる変位から算定する。水平方向に加振した時の水平変位もしくは回転変位から算定した動的地盤ばね剛性をそれぞれ水平方向 (K_{HH})、水平-回転方向 (K_{HR}) とし、回転方向に加振した時の回転変位から算定した動的地盤ばね剛性を回転方向 (K_{RR}) とする。Fig.5 に杭基礎、直接基礎、パイルド・ラフト基礎に関して、 K_{HH} 、 K_{HR} 及び K_{RR} を単独基礎と隣接基礎 (以下単独、隣接) で比較して示す。

杭基礎について実部を比較すると、 K_{HH} は 6Hz 付近までは隣接が単独に比べて小さい。隣接は双方の基礎を同方向に加振することにより、基礎に生じる変位が単独に比べて大きくなり、単独よりもばね剛性が小さくなると考えられる。 K_{HR} も同様に隣接が単独に比べて小さい。それに対して、 K_{RR} は隣接が単独に比べて大きい。隣接基礎に作用させた回転方向の加振力は杭間の地盤を介して鉛直方向の力として他方の基礎に伝わる。双方の基礎に対して同方向に回転加振力が作

用する場合には、鉛直方向の力によって互いの基礎の回転を拘束しあう。その結果、基礎に生じる回転角が単独に比べて小さくなり、単独よりもばね剛性が大きくなると考えられる。

直接基礎の静的の実部について、杭基礎と比較すると K_{HH} は同程度であるが、 K_{HR} や K_{RR} は杭基礎より小さい。また単独と隣接の大小関係は 6Hz 付近までは K_{HH} 、 K_{HR} は隣接が単独に比べて小さく、 K_{RR} は隣接が単独に比べて大きくなり、直接基礎と杭基礎で同じ傾向である。

パイルド・ラフト基礎は、 K_{HH} に関しては直接基礎の傾向と近く、 K_{HR} 、 K_{RR} に関しては杭基礎の傾向に近い。水平方向に関してはラフトによる抵抗の特徴が、回転方向に関しては杭による抵抗の影響が大きく表れている。

Fig.6 に、杭基礎の自由地盤の地表に対する基礎入力動について水平方向 (U_{FH}) 及び回転方向 (U_{FR}) を示す。 U_{FH} は、単独と隣接はほぼ同等であり、隣接による影響は小さい。一方、 U_{FR} に関しては、一部の振動数帯を除いて、隣接の方が単独と比べて振幅が小さく、隣接により入力が低減している。

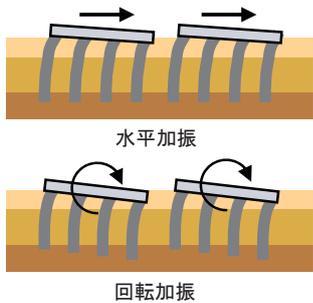


Fig.4 隣接基礎の地盤ばねの算定 (Calculation of Soil Spring for Adjacent Foundations)

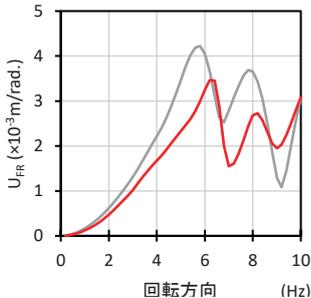
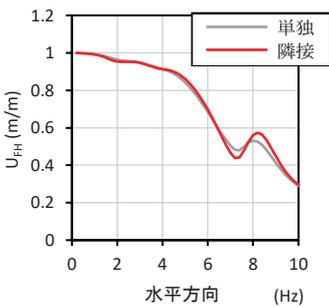
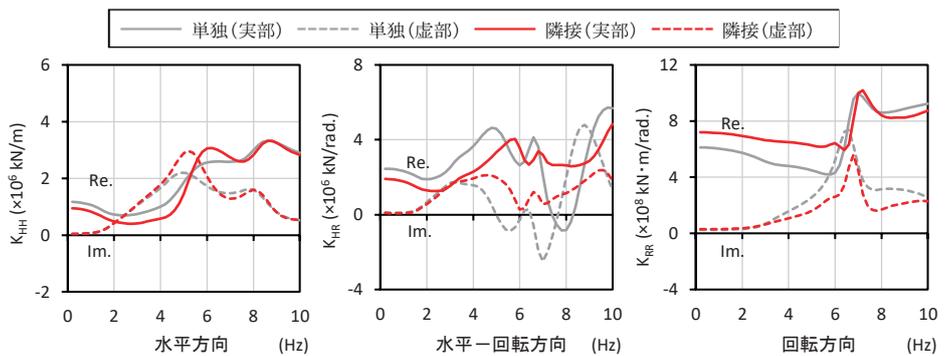
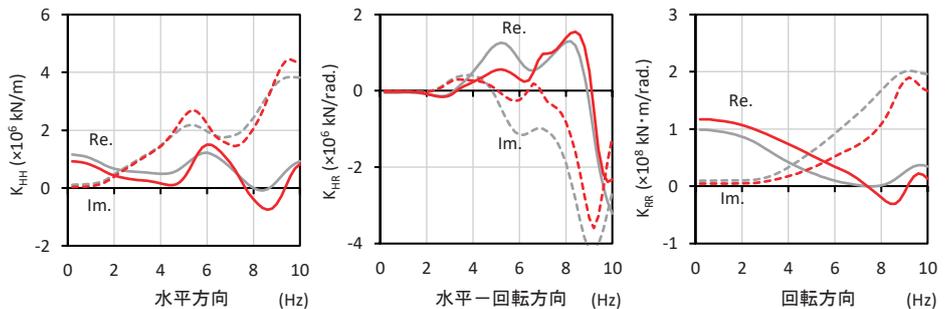


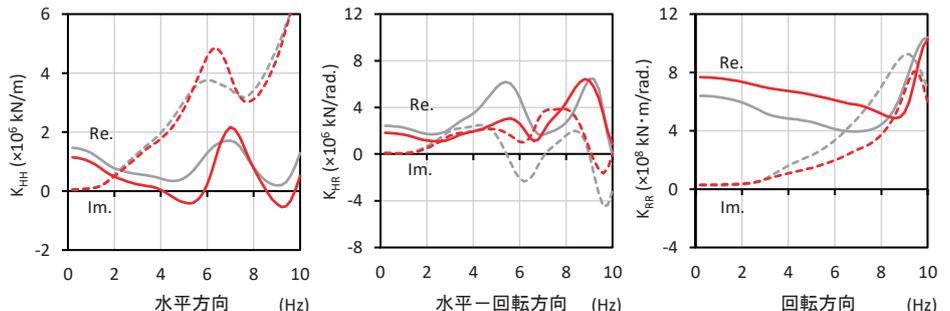
Fig.6 杭基礎の基礎入力動 (Foundation Input Motion of Pile Foundation)



(a) 杭基礎



(b) 直接基礎



(c) パイルド・ラフト基礎

Fig.5 動的地盤ばね (Dynamic Soil Spring)

IV. 上部構造の応答

建物の地震時挙動に及ぼす隣接の影響の評価を目的に、試験解析モデルによる地震応答解析（周波数応答解析）を実施する。検討対象の基礎モデルはIIIで設定した杭基礎モデルとする。Fig.7に示すように基礎Aの上部構造（建物A）は4Fモデルとし、基礎Bの上部構造（建物B）には建物Aと同じ4Fモデル及び7Fモデルを用いる。Table 1に各建物モデルの諸元を、Table 2に各建物モデルの基礎固定系と相互作用系の1次固有振動数と地盤の1次固有振動数を示す。解析は、IIIで設定した地盤モデルのGL-25m位置を解放工学的基礎として、告示波（JMA 神戸 NS位相・L1相当）を入力する。入力地震動の時刻歴波形をFig.8に示す。

Fig.9に、自由地盤の地表に対する建物Aの基礎（水平・回転）、頂部（水平）応答の伝達関数について、単独と隣接（同、異）で比較して示す。(a)基礎の水平応答に関して、単独と隣接（同）は、動特性にやや差がみられるものの、ともに建物Aの相互作用系の固有振動数（1.96Hz）付近でピークが見られる。それに対して隣接（異）では、重量が大きく動特性の異なる建物Bの影響で建物Aの固有振動数の前後でピークが2つに分かれている。2つのピークは、(d)に示す隣接（異）の場合の自由地盤の地表に対する建物Aと建物Bの基礎水平応答の伝達関数を参照して、以下のように説明できる。1つ目のピーク（1.60Hz）は、建物Bの相互作用系の固有振動数（1.65Hz）とほぼ一致していることがわかる。また2つ目のピーク（2.40Hz）は、建物Bの影響で建物Aの相互作用系の固有振動数（1.96Hz）付近が落ち込むことで生じた見かけのピークである。次に、(b)基礎の回転応答に関して、各ケースともに4Hz付近にピークが見られるが、隣接（同）は単独に比べて振幅が小さい。これはそれぞれの基礎が同方

向に回転したとき、隣接基礎の回転方向の地盤ばね剛性が単独基礎と比べて大きいためである。(c)頂部の水平応答に関しては、基礎水平・回転応答の傾向がともに表れており、建物Bの有無や違いによって動特性が異なることが分かる。

Fig.10に、建物Aの最大加速度、最大層せん断力分布とP1杭、P2杭の深さ方向の曲げモーメント分布について、単独の場合と隣接（同、異）を比較して示す。まず建物の応答を見ると、加速度と層せん断力はともに隣接（異）、単独、隣接（同）の順に大きい。特に基礎位置の加速度では隣接（異）が他のケースと比べて大きい。また、杭応力に関しては、P1杭の杭頭曲げは隣接（異）が大きく、単独、隣接（同）が同程度である。一方、隣接側のP2杭は単独、隣接（異）が同程度で、隣接（同）が小さい。P2杭は基礎BのP2'杭と近接し、群杭効果が生じるため、杭位置によって傾向が異なる。

次に、基礎の間隔が上部構造の応答に及ぼす影響について確認するために、隣接（同）を基に、Fig.11に示すように基礎の間隔Dxを基礎幅Lxの0.1倍、0.3倍、0.5倍と変動させることで基礎の間隔の検討を行う。

Fig.12に、自由地盤の地表に対する建物Aの基礎（水平・回転）、頂部（水平）応答の伝達関数について、単独と隣接は基礎の間隔をパラメーターとし、比較して示す。基礎の水平応答に関しては、隣接と単独で動特性にやや差があるのに対し、基礎の間隔の違いによる影響は見られない。一方、回転方向は基礎の間隔が大きくなるにつれ、4Hz付近のピークの振幅が大きくなり、徐々に単独に近づく。また、頂部の水平応答に関しては、基礎水平・回転応答の傾向が表れている。

Fig.13に、建物Aの最大加速度、最大せん断力分布と、P2杭の深さ方向の曲げモーメント分布について、単独と基礎の間隔の違いで比較して示す。建物の応答を見ると加速度、層

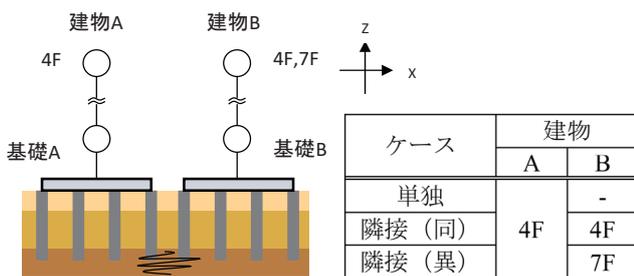


Fig.7 解析モデルとケース (Analysis Model and Case)

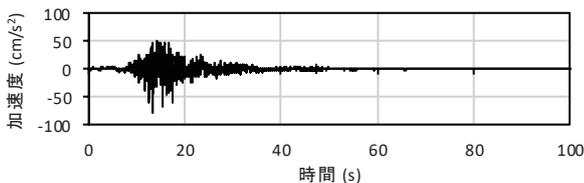


Fig.8 入力地震動 (Input Wave)

Table 1 上部構造モデルの諸元 (Property of Building)

階	高さ (m)	4F モデル		7F モデル	
		重量 (kN)	せん断剛性 (kN/m)	重量 (kN)	せん断剛性 (kN/m)
7	21	-	-	3810	6.09E+05
6	18	-	-	3810	1.13E+06
5	15	-	-	3810	1.57E+06
4	12	3810	1.07E+06	3810	1.91E+06
3	9	3810	1.86E+06	3810	2.17E+06
2	6	3810	2.40E+06	3810	2.35E+06
1	3	3810	2.66E+06	3810	2.43E+06
基礎	0	5715	-	5715	-

Table 2 1次固有振動数 (Natural Frequency)

上部構造モデル	上部構造		地盤
	基礎固定系	相互作用系	
4F	4.06Hz	1.96Hz	1.86Hz
7F	2.31Hz	1.65Hz	

せん断力とともに基礎の間隔が大きくなるにつれて応答が大きくなり、徐々に単独に近づく。しかし、高さ3mにおいては、加速度は基礎の間隔の影響は小さく、単独とは差が見られる。また、P2 杭の杭頭曲げモーメントについても基礎の間

隔が大きくなるにつれて応答が大きくなり、徐々に単独に近づく。基礎の間隔が大きくなることでP2 杭と基礎 B の P2' 杭との間の杭間距離が大きくなり、群杭効果の影響が小さくなるためと考えられる。

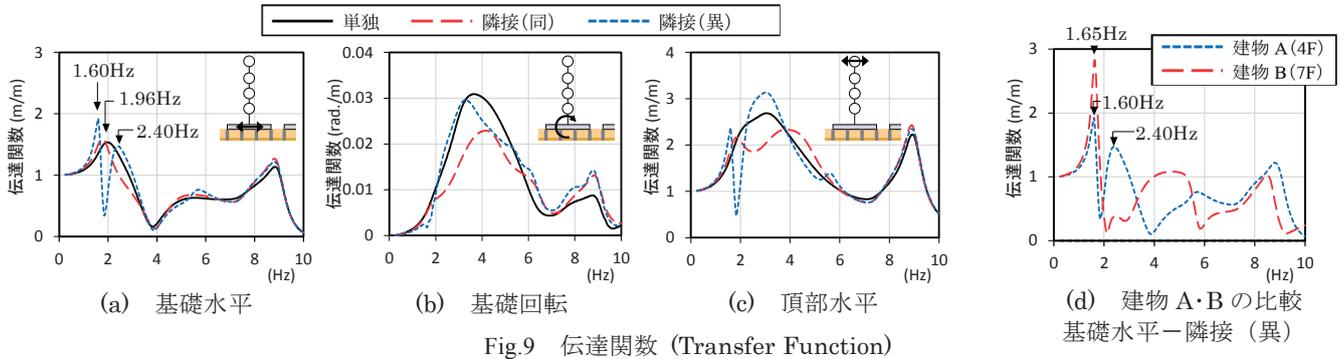


Fig.9 伝達関数 (Transfer Function)

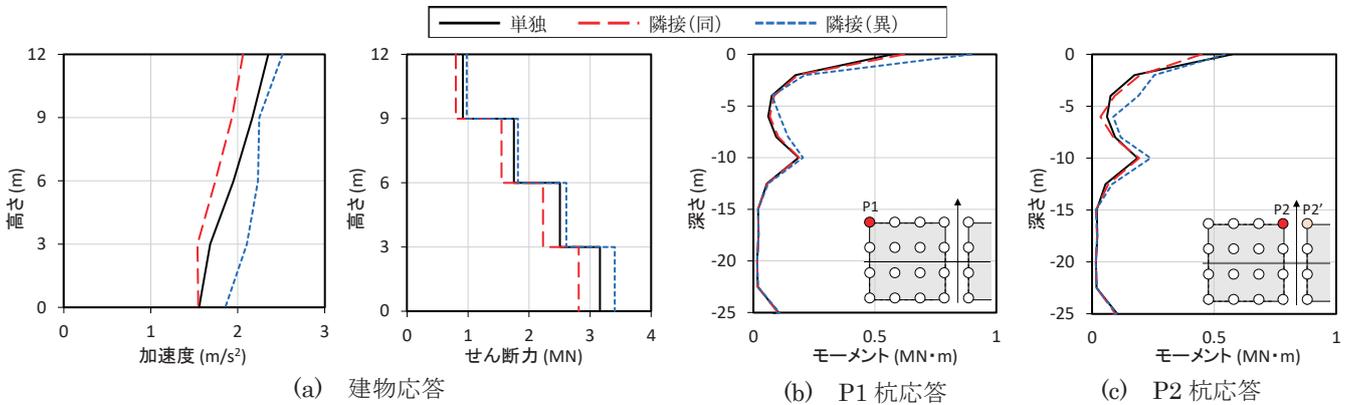
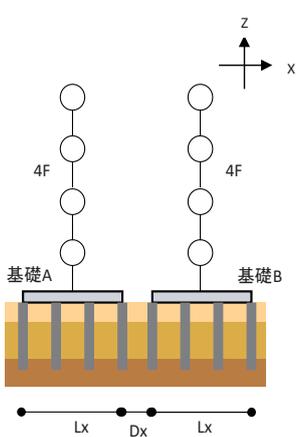


Fig.10 応答最大値 (Maximum Response)



ケース名	Dx
X0.1	0.1Lx
X0.3	0.3 Lx
X0.5	0.5 Lx

Fig.11
解析ケース
(Analysis Case)

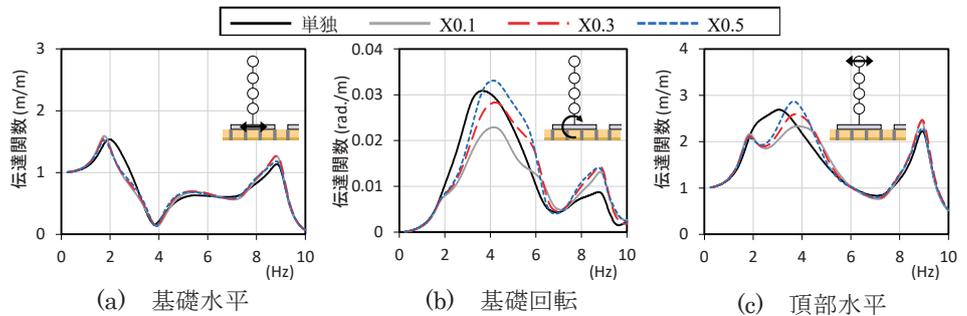


Fig.12 伝達関数 (Transfer Function)

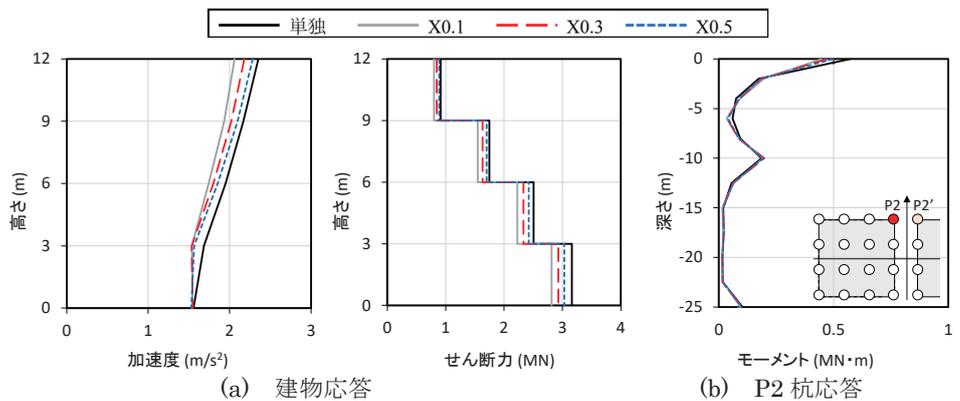


Fig.13 応答最大値 (Maximum Response)

VI. おわりに

建物の動特性に及ぼす隣接の影響を明らかにするために、薄層要素法に基づく複数建物の連成解析法を開発し、動的地盤ばね、基礎入力動について、基礎種類ごとに動特性を評価した。また隣接する中低層建物を対象に地震時挙動の検討を行った。限られた条件による検討ではあるが、検討の結果、以下の知見が得られた。

- a. 同種類、同一形状の2つの隣接基礎に対して、同方向に加振力を与えた場合、基礎の地盤ばね剛性は単独と比べて、水平方向と水平一回転方向は小さくなり、回転方向は大きくなる。
- b. 隣接する建物の地震時挙動に関して、同じ建物が2棟隣接する場合には回転方向の応答が低減する。その一方で異なる建物が2棟隣接する場合には、重量が小さい建物は重量が大きい建物の振動によって、特に水平方向の応答に影響が生じる。その結果、単独で建つ場合と比べて応答が大きくなる可能性がある。
- c. 同じ建物が2棟隣接した時の2棟間の基礎の間隔に関して、基礎の間隔を大きくすることで、建物の応答は単独の場合に近づく。特に、回転方向に対して基礎の間隔による影響が大きく表れている。

今後は地盤モデル、基礎の埋め込みなどの異なる条件に対する検討及び、3棟以上の隣接する建物群を対象とした検討を実施し、建物の隣接の影響について更なる知見を蓄える予定である。

参考文献

- 1) 内山正次, 三浦賢治ほか; 隣接建屋間動的相互作用に関する研究(その1)(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1983.9, pp. 839-840.
- 2) 石崎萬平, 渡辺孝英ほか; 埋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),(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990.9, pp.461-464.
- 3) 岩本賢治, 兵頭陽ほか; 複数隣接建屋の動的相互作用解析:(その1),(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1995.8, pp.387-390.
- 4) 中村尚弘ほか; 原子力発電所建屋の地震応答性状に与える不整形地盤および隣接建屋の影響に関する研究, 構造工学論文集, Vol.58B, 2012.3, pp241-250.
- 5) 文学章, 福和伸夫; 隣接建物の存在が杭基礎の動的相互作用特性に与える影響に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集, No.606, 2006.8, pp147-154.
- 6) 日本建築学会; 入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996.4.
- 7) 独立行政法人 原子力安全基盤機構; 平成13年度耐震安全解析コード改良試験原子炉建物の隣接効果試験に関する報告書, 2001.

Analytical Study on Dynamic Interaction of Adjacent Structures

Yoji Utsumi and Kenji Iwamoto

In urban areas, multiple buildings are often constructed adjacent to each other. However, when buildings are contiguous, the movements of their foundations affect the foundations of the other buildings through the ground, so the behavior during earthquakes is different from that of a single building. This study aims to clarify the dynamic characteristics of adjacent buildings. We developed a coupled analysis method for multiple buildings and conducted an analytical study. We examined the effects of adjacency on dynamic soil springs and foundation input motion for various foundation types and also compared the seismic responses of buildings by changing combinations of building models and distances between foundations. As a result, when a heavy building is adjacent, a response also occurs even in a lighter building due to the vibration of the heavier building.