

地震観測記録に及ぼす地震計基礎形状及び周辺環境の影響に関する研究

— 構造物と地盤との動的相互作用解析に基づいて —

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

環境・安全マネジメント講座 福和研究室 河本悠歩

1. はじめに

近年、兵庫県南部地震以降、急速に地盤の強震観測網が整備されてきている。地震計は、一般に小規模な専用の基礎上に設置されており、建物に隣接して設置されることが少なくない。基礎は地震時に地盤と一体となって振動することが要求されるため、地盤条件や大地震時における基礎の幾何学的な非線形性の影響を考慮して、根入れを有する形状とすることや、建物の揺れの影響に考慮して建物の高さの1/10以上離して設置することが気象庁によって推奨されている。しかし、こうした地震計の記録には、地震計基礎の振動特性や隣接建物の揺れの影響が含まれている可能性があり、正確に自由地盤の揺れを観測できているか確かめておく必要がある。

本論では、薄層要素法と有限要素法を、容積法を用いた動的サブストラクチャーにより結合した動的相互作用解析手法を用いて、地震計基礎形状や、隣接建物が地震観測記録に与える影響について、動的相互作用の観点から検討を行う。

2. 地震計基礎形状の影響

2.1 解析概要

地震計基礎形状の影響について、図1に示す(独)防災科学技術研究所のK-NET、計測震度計の1例、及びライフラインの遮断用のSIセンサー3例の5種類の基礎を対象

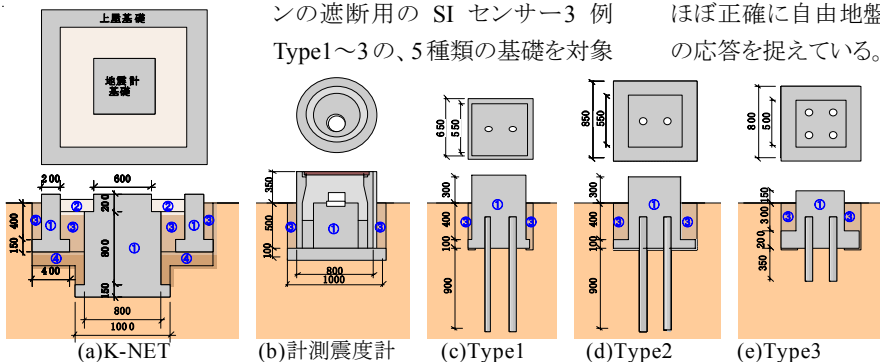


図1 地震計基礎(○数字は、表1中の材料を示す)

に検討を行う。表1に解析に用いた定数を示す。施工時の埋め戻し土の影響を考慮し、基礎周囲に緩み領域を配した。表2に地盤の諸元を示す。ここでは、設置場所の地盤条件の影響をみるために、深度0~3mの地盤物性を、 $V_s=163\text{m/s}$ に加えて、大地震時の表層地盤の非線形化を考慮し、地盤剛性が1/4程度となる場合を想定した $V_s=81.5\text{m/s}$ 、減衰定数 $h=0.1$ と、固い地盤に設置されている場合を想定した $V_s=326\text{m/s}$ の3つの場合について検討する。入射波は、水平・回転方向の評価には鉛直下方S波、上下方向には鉛直下方P波とする。

2.2 地震計基礎の応答

図2に応答模式図、図3に、3つの地盤条件における、自由地盤の応答に対する5種類の地震計基礎の応答の伝達関数を示す。ただし、上下方向は、鉛直下方P波による、自由地盤の上下応答に対する地震計設置位置の上下応答の伝達関数である。なお、伝達関数の位相差は、全て5度程度以下で、ほぼ同位相であることを確認している。

図2より、5種類の基礎は、地震計設置位置の水平・上下応答について、10Hz付近までは、自由地盤の応答との差が非常に小さく、いずれの地盤条件においても、ほぼ正確に自由地盤の応答を捉えている。

表1 解析定数

材料	V_s (m/s)	ρ (t/m^3)	ν	E (kN/cm^2)	h
① コンクリート	2.4	0.2	2100	0.03	
② 埋土砂	50	1.7	0.3	1.11	0.05
③ 埋土(側面)	60	1.7	0.3	1.59	0.05
④ 埋土(底面)	80	1.7	0.3	2.83	0.05

杭(SUSパイプ) 杭径50mm

表2 地盤の諸元

深度	V_s (m/s)	ρ (t/m^3)
0~3m	163	1.7
3~10m	240	1.81
10~18m	274	1.83
18m~	359	1.9

$\nu=0.4$ $h=0.02$

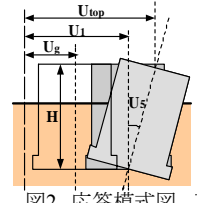


図2 応答模式図

$V_s=81.5\text{m/s}$
 $V_s=163\text{m/s}$
 $V_s=326\text{m/s}$

— $|U_{top}/U_g|$, $|U_1/U_g|$
— $|U_{bottom}/U_g|$, $|U_2/U_g|$
— $|U_{rot}/U_g|$, $|U_3/U_g|$

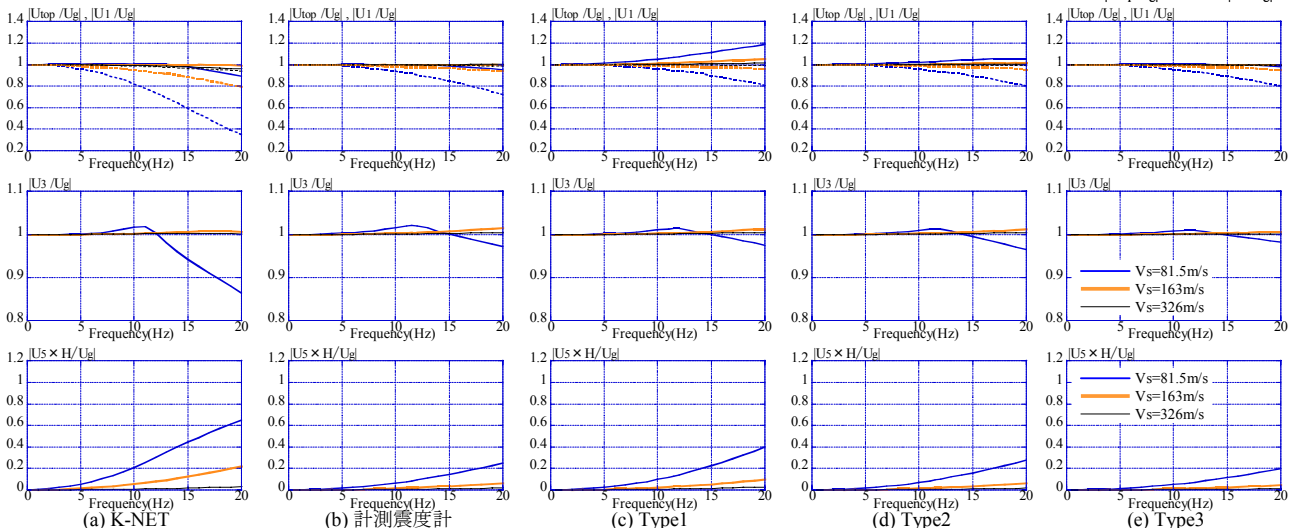


図3 地盤条件の違いによる地震計基礎の伝達関数「H:基礎高さ」(上段:水平、中段:上下、下段:回転)

10Hz 以上の高振動数帯域については、深度 0~3m で $V_s=81.5\text{m/s}$ とした場合の K-NET の水平・上下応答、Type1 の $V_s=81.5\text{m/s}$ 、163m/s のときの水平応答、Type2 の $V_s=81.5\text{m/s}$ のとき水平応答において、自由地盤の応答との差がやや大きくなっているが、それ以外の条件においては、ほぼ正確に自由地盤の応答を捉えている。

また、5種類の基礎とも、地盤が軟らかくなるほど、基礎底面の入力損失と、回転応答の励起が大きくなる傾向がみられ、地表面からの突出高さが低い Type3 と、筒状で地表面以上の質量が小さい計測震度計は、20Hz まで地盤条件によらず、地震計設置位置で自由地盤の水平応答をほぼ正確に捉えている。ただし、K-NET の水平方向(図 1(a))については、地表面からの突出高さは低いが、根入れが深いために、 $V_s=81.5\text{m/s}$ の 15Hz 付近以上で、水平方向の入力損失が大きく、地震計設置位置の応答も自由地盤に対して小さくなっている。

上下応答について、5種類とも $V_s=81.5\text{m/s}$ のとき、12Hz 付近にピークをもち、それ以上の高周波数帯域では応答が減少する傾向がみられる。これは、表層 3m の $V_s=81.5\text{m/s}$ の地盤における、鉛直振動の固有振動数が 12Hz 付近にあり、それ以上の振動数帯域では、基礎の底面と側面で上下方向の力の干渉が起こることが要因と考えられる。特に、根入れの深い K-NET において、応答が大きく低減する傾向がみられる。

3. 隣接建物の影響

地震観測記録に及ぼす隣接建物の影響を、2 地点の地盤観測点を含む高密度強震観測が行なわれている名古屋大学環境総合館を対象に、解析と強震記録により検討する。

3.1 対象建物概要及び分析方法

表 3 に建物概要、表 4 に地盤の諸元、図 4 に建物形状及び強震観測点配置を示す。図 4 (a)に示すように、地盤観測点は建物の南東、建物端部の張間側で距離 5m(G5)、14m(G14)の 2 地点の地表面に設置されている。

解析では、2 章より、地震計基礎が観測記録に与える影響は小さいと考え、図 4 (a) の点線上で、建物から距離 $D=1\text{m}$ 、5m、10m、14m、20m の各地点について、建物が地盤応答に及ぼす影響を評価する。なお、G14 はこの点線から西へ 1.5m 離れているが、解析では $D=14\text{m}$ を G14 と同地点として評価する。建物上部構造は、既報¹⁾に従って、曲げ剛性を剛とした多質点系せん断型モデルに置換し、入射波には鉛直下方 S 波を用いる。一方、強震記録による分析には、紀伊半島南東沖地震(Mj.7.4, 2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分)における観測記録(最大加速度:地表 31gal, 屋上 93gal)を用いる。

3.2 解析モデルと観測記録の建物振動特性の比較

図 5 に、桁行・張間方向について、地盤—建物連成系(RF/G14)、Sway のみ固定した基礎固定系(RF/1F)、Sway と Rocking を固定した基礎固定系(RF/(1F+H θ))、の伝達関数(H:建物の等価高さ、 θ :基礎の回転角)、表 5 に(RF/G14)の固有振動数における Sway、Rocking 率を、それぞれ解析モデル・観測記録について示す。解析モデルは観測記録と比較して、振幅特性にやや差がみられるが、周期特性は概ね捉えられている。表 5 より、解析モデルの Sway、Rocking 率が

やや小さめであるが概ね妥当なモデルといえる。

3.3 隣接建物が地震観測記録に与える影響

図 6 に、解析によって求めた、自由地盤の水平応答に対する、建物基礎・建物存在時の地盤応答の伝達関数(桁行・張間・上下)を示す。上下方向の基礎応答は、それぞれ桁行・張間方向の鉛直下方 S 波によって励起される、建物の桁行・張間両方向の Rocking による基礎端部の上下応答である。

建物周辺の地盤は、3 方向とも、建物の固有振動数付近で建物の振動特性の影響を受けており、建物から距離が離れるほどその影響は小さくなる。水平 2 方向では、建物の固有振動数付近で慣性の相互作用による基礎応答の変動、それより高振動数側で、入力相互作用による基礎応答の減少が認められ、その影響は張間方向のほうが遠方まで及んでいる。上下方向では、建物の Rocking によって、入射波にはない上下成分が、周辺の地盤に励起されている。その影響は、Rocking が大きい張間方向で顕著である。

図 7 に、強震記録の基礎中央・地表 2 地点の加速度フーリエスペクトル、図 8 に、(1F/G14)、(G5/GL14)の伝達関数を示す。ただし、上下方向については、建物の桁行・張間両方向の Rocking の影響をみるため、地盤観測点と反対側に設置されている桁行端部(1F 西)、張間端部(1F 北)の上下応答の逆位相について検討する。水平 2 方向の伝達関数(振幅)には解析結果を重ねて示す。

図 7 より、3 方向とも 1.5Hz 付近より低振動数側では、基礎と地表 2 地点のスペクトルはほぼ一致している。しかし、それより高振動数側では、スペクトル形状に差が現れており、G14、G5 の振幅がやや異なるピークがいくつか見受けられる。図 8 の 3 方向の観測記録の伝達関数についてみると、桁行方向では、建物の固有振動数付近の基礎応答の影響で、観測記録(G5/G14)が、(1F/G14)に対応して変動しており、(G5/G14)は相関も高いので、G14 より建物に近い G5 が建物基礎の振動の影響をより大きく受け、建物基礎に近い揺れをしていると考えられる。張間、上下方向については、桁行方向でみられた、G5 と G14 の明確な差は認められない。

表3 建物概要

延床面積	5956m ²
階数	地上7階, 地下1階
高さ	33.4m
軒高	29.7m
構造種別	(地上)PCaPC造 (地下)RC造
骨組形式	(桁行方向)ラーメン構造 (張間方向)耐震壁付きラーメン構造
基礎種別	杭基礎PHC杭 (杭長32m,36m)

表4 地盤の諸元

上端深度 (m)	質量密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	減衰 定数
0	1.9	330	0.03
-5.3	1.9	220	0.05
-9.6	1.9	260	0.04
-15	1.8	260	0.04
-28.3	1.8	320	0.03
-35.5	1.9	400	0.03

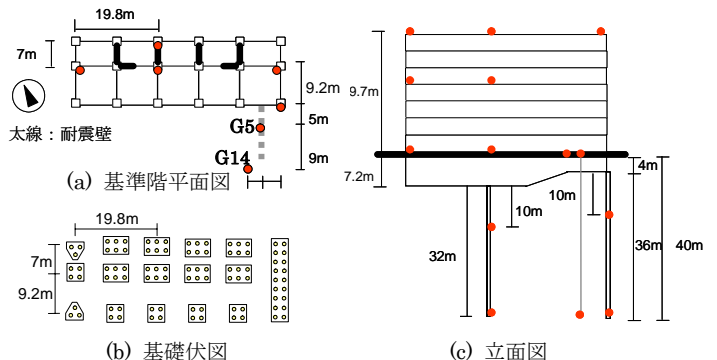


図4 建物形状及び強震観測点(●)配置

図8の水平2方向の解析による伝達関数についてみると、桁行方向では、(1F/G14)、(G5/G14)ともに、観測記録に対応した傾向を捉えられている。張間方向については、解析モデルがやや高振動数となっているが、(G5/G14)の変動は小さくなっており、図6(b)の結果と対応させて考えると、建物の振動の影響が遠方まで及んでいるため、2地点の差が小さくなっていると考えられる。また、上下方向についても、図6(c)より、2地点には建物のRockingによる影響が及んでいることが考えられ、張間方向と同様に、同程度の影響が及んでいることでG5とG14に大きな差がみられないと考えられる。

以上より、地震観測記録における隣接建物の影響が確認され、解析によってその現象を捉えることができた。

4. 隣接建物の各種要因の影響

本章では、隣接建物の平面規模・階数・根入れ(地下階数)・基礎形式・平面形状が地盤応答及ぼす影響について簡易なモデルを用いて解析的に検討する。

4.1 解析概要

図9に解析モデル、表6に検討内容、表7に解析パラメータと従属定数を示す。解析モデルの基礎・各階重量は、それぞれの単位面積重量を与えることで建物の平面規模に従属する定数とする。上部構造は、曲げ剛性を剛とした等価1質点系せん断型モデルとし、一次固有振動数は、建物高さに従属する定数とする。根入れ部分の単位面積重量は、最下階を $\gamma_b=2.4\text{tf/m}^2$ 、その他の階を $\gamma_f=1.5\text{tf/m}^2$ として根入れ部分に均等に分配する。地盤は半無限一様 $V_s=200\text{m/s}$ としている。入射波はX方向(X加振)とY方向(Y加振)の2方向の鉛直下方S波とする。

ここでは、建物から距離

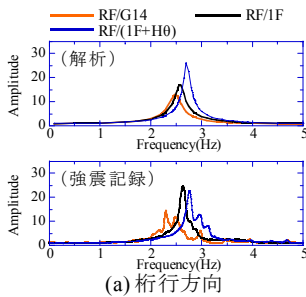


図5 建物の伝達関数(振幅)

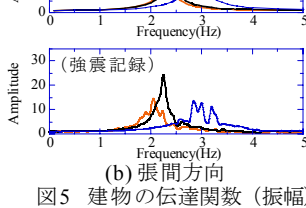


表5 Sway, Rocking率

	桁行		張間	
	Sway率	Rocking率	Sway率	Rocking率
解析	8.14%	7.12%	7.25%	22.0%
観測記録	11.3%	8.10%	10.6%	28.6%

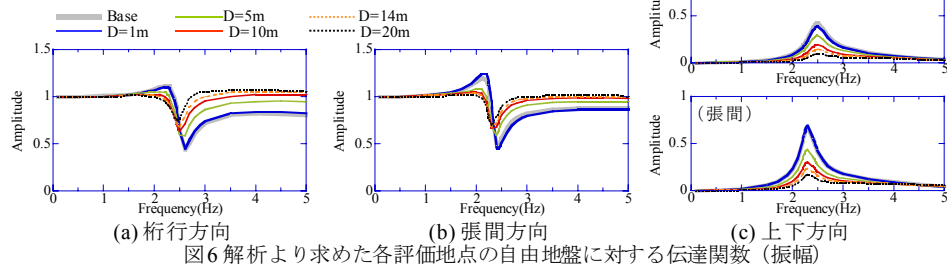


図6 解析より求めた各評価地点の自由地盤に対する伝達関数(振幅)

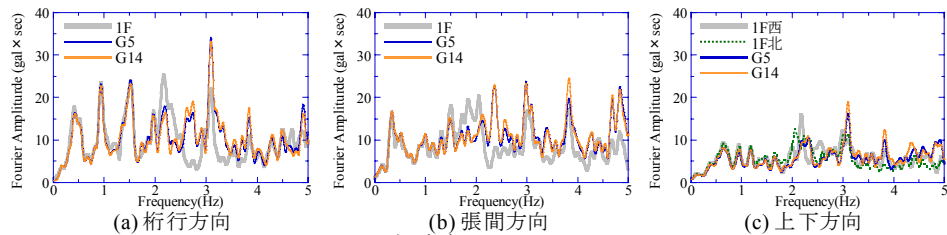


図7 加速度フーリエスペクトル

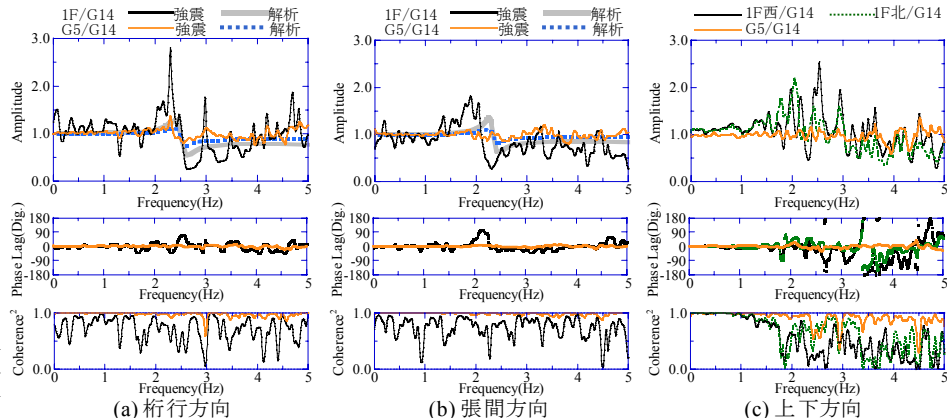


図8 強震記録から求めた地盤の伝達関数(上から振幅・位相遅れ・コヒーレンス)

$D=1\text{m}, 5\text{m}, 10\text{m}, 15\text{m}, 20\text{m}$ の地点A(図9)に対する、地点Aからみた軸・せん断方向の建物の揺れと、Rockingによる基礎端部の上下応答の影響について、自由地盤の水平応答に対する地点Aの応答(3方向)の伝達関数により検討する。ただし、平面形状(長方形)の検討(表7⑤)では、短辺側の地点Bについても同様の検討を行う。

4.2 建物基礎、地盤の応答

図10(a)に、3階建て地表面基礎、 $b=c=10\text{m}$ (b, c は、基礎半幅)のモデル[3F, $b=c=10$]の地点Aの伝達関数を示す。水平2方向について、慣性の相互作用による建物固有振動数付近の基礎応答の変動の影響は、せん断方向より軸方向の方が遠方の地盤にまで及んでいる。また、これより高振動数側では、自由地盤に対してうねるような変動がみられ、鉛直下方入射波と建物を振動源とする波の干渉の影響と考えられる。うねりの形状が軸方向とせん断方向とで異なるのは、建物を振動源とする波が、それぞれP波、S波として伝播するため、波長が異なることが起因している。

以下に、各解析結果についてまとめて示す。

①平面規模: 平面規模が大きいくほど、建物の影響が遠方の地盤にまで及ぶ。

②階数: 階数が少なく低い建物ほど、上部構造の固有振動数が高振動数となり、地盤に対して相対的に固くなるためSway, Rocking率が大きくなる。そのため、地下逸散減衰の影響を大きく受け、慣性の相互

作用による基礎応答の変動が広い周波数帯域に及ぶため、周囲の地盤に与える影響も広い周波数帯域に及ぶ。

③根入れ(地下階数):3階建て根入れ基礎(B1F)、 $b=c=10\text{m}$ [3F,B1F, $b=c=10$]について、図10(b)に示す。これより、地表面基礎(図10(a))に比べて、根入れの影響で、水平方向は、建物の固有振動数付近の慣性の相互作用による基礎応答の変動は小さくなり、地盤応答に与える影響も小さくなっている。逆にこれより高振動数側では入力相互作用によって基礎応答が減少し、建物極近傍の地点においてその影響が顕著に現れている。一方、上下方向については、根入れ基礎では、建物の固有振動数付近における基礎端部の上下応答のピーク値が小さく、9Hz付近以上では入力相互作用によって若干の振幅の増加がみられる。また、地盤応答のピーク値を比較すると、地表面基礎と比べて、根入れ基礎の基礎応答のピーク値の方が小さいが、 $D=10\text{m}$ より遠方の地点では同程度の振幅となっている。これは、地表面基礎に比べて、根入れ基礎の、地盤との接触面積が大きいことが要因と考えられる。

④基礎形式:3階建て杭基礎、 $b=c=10\text{m}$ [3F, Pile, $b=c=10$]について、図10(c)に示す。これより、水平方向の全体的な傾向は、地表面基礎(図10(a))に近いことがわかる。ただし、地表面基礎に比べて、慣性の相互作用による基礎応答の変動が大きく、その影響が近傍地盤に及んでいる。また、ここでは固有振動数より高振動数側の、 $D=10\text{m}$ より遠方の地点では、複数の杭から伝播する波の干渉の影響で、地表面基礎に比べてうねりが少なくなっている。この現象は、杭間隔の影響も受けることが考えられる。一方、上下方向は、杭の効果でRockingが抑えられ、基礎、近傍地盤共に応答が小さくなっているが、 $D=10\text{m}$ より遠方の地点での建物の影響は、根入れ基礎の場合と同様に、地表面基礎と同程度となっている。

⑤平面形状(長方形):3階建て地表面基礎、 $b=10\text{m}, c=5\text{m}$ [3F, $b=10, c=5$]における、地点A、地点Bの結果について、それぞれ図10(d1)、図10(d2)に示す。水平方向について比較すると、地点Aの方が、軸方向、せん断方向とも、全ての距離で建物の振動の影響を大きく受けていることから、評価地点からみた建物の揺れの方向より、見付け幅の差の方が地盤応答に及ぼす影響が大きいことがわかる。また上下方向は、X方向に比べて基礎幅の狭いY方向のRockingが大きいので、地点Aの方が建物の影響を大きく受けている。

5. まとめ

地震観測記録に及ぼす地震計基礎形状及び隣接建物の影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

対象とした5種類の地震計基礎では、地盤条件に関わらず、水平・上下共に、10Hz付近まではほぼ正確に自由地盤応答を捉えられることが確認された。10Hz以上の高振動数帯域では、地盤、基礎間の相互作用の影響が大きくなる場合がある。

隣接建物の影響について、環境総合館を対象に検討した結果、建物は地盤の応答に影響を及ぼしており、建物から距離が離れるほどその影響は小さくなるのが強震記録より確認され、解析によってその現象を再現することができた。

隣接建物の各種要因の影響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。評価地点からみて、せん断方向より軸方向の建物の揺れの影響の方が大きく、建物近傍の地盤には、鉛直下方入射波と建物を振動源とする波の干渉の影響が認められた。地盤に対して相対的に固く相互作用の影響が大きい建物ほど、地盤応答に及ぼす影響が大きく、基礎の見付け幅、地盤との接触面積が大きいほど、その影響は大きくなる。また、建物の揺れの方向より、見付け幅の方が地盤応答に与える影響が大きい。

参考文献

1) 榑原啓太他:観測された動特性を説明可能な構造物の振動解析モデルの構築, 日本建築学会技術報告集 Vol.13, No.25, pp.65-68, 2007

表6 検討内容

検討内容	定数	パラメータ
① 平面規模	$E=0\text{m}, N=3$	$b=c=2.5\text{m}, 5\text{m}, 10\text{m}, 15\text{m}$
② 階数 N ($dH=3.5\text{m}$)	$b=c=10\text{m}, E=0\text{m}$	$N=1, 3, 5$
③ 根入れ(地下階数)	$b=c=10\text{m}, N=3$	$E=0\text{m}, 4\text{m(B1F)}, 8\text{m(B2F)}$
④ 基礎形式	$b=c=10\text{m}, E=0\text{m}, N=3\text{m}$	地表面基礎, 杭基礎, パイルド・ラフト基礎
⑤ 平面形状(長方形)	$b=10\text{m}, E=0\text{m}, N=3$	$c=10\text{m}, 5\text{m}, 2.5\text{m}$

表7 解析パラメータと従属定数

建物からの距離	$D=1, 5, 10, 15, 20\text{m}$
一次周期(sec)	$T_1=0.02 \times N \times dH$
基礎重量($\gamma_b=2.4\text{tf/m}^3$)	$W_b=\gamma_b \times 4bc$
各階重量($\gamma_f=1.5\text{tf/m}^3$)	$W_f=\gamma_f \times 4bc$
地盤(半無限一様)	$V_s=200\text{m/s}, \rho=1.8\text{t/m}^3$ $h=0.03, \nu=0.45$
杭(杭長15m)	$E_p=2.1 \times 10^7\text{kN/m}^2, \nu_p=1/6$ $\rho_p=2.4\text{t/m}^3, h_p=0.03$

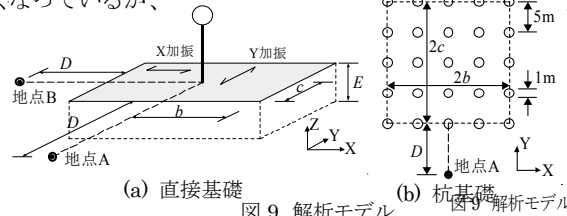


図9 解析モデル

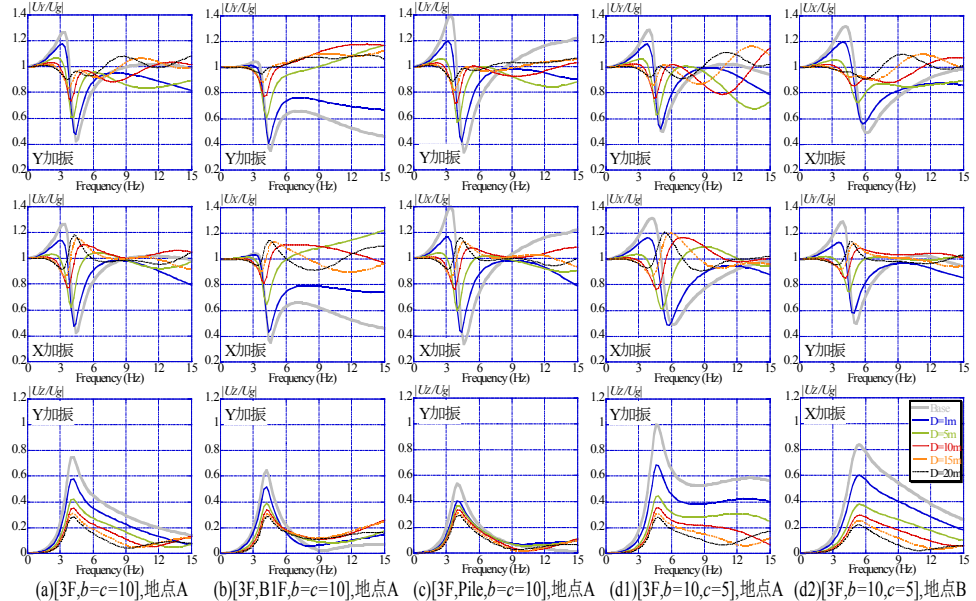


図10 基礎近傍地盤応答の自由地盤の水平応答に対する伝達関数(上から、軸・せん断・上下方向)