杭基礎・構造物の諸条件が動的相互作用の基本性状に与える影響

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　福和研究室　山下 善也

1. はじめに

沖積平野や埋立地といった軟弱地盤上には杭基礎建物が多く立地する。このような建物を対象とした振動性状の把握や耐震設計においては、動的相互作用効果の理解と考慮が大切である。

本論は、動的相互作用効果の影響やその要因についての理解を深め、定性的傾向や影響の程度を把握することを目的とする。本論は実測と解析の二点から構成され、実測では沖積平野に立地する杭基礎建物を対象とし、地震観測記録や常時微動計測結果から動的相互作用効果の実状把握を試みる。解析では、実測に基づく分析で得られた知見を含めて図 1 に示す項目を対象とし、有限要素法と薄層要素法を動的サブストラクチャー法により結合した相互作用解析手法を用いて動的相互作用効果の一般的、俯瞰的傾向の把握を試みる。

2. 実杭基礎建物の観測記録に基づく分析

2.1 建物概要及び計測概要

本章で対象とする建物は、愛知県西部に位置する庁舎建築物である。表 1 に建物概要を、図 2 に建物の概要および観測点配置を示す。地震観測により計 35 の地震観測記録が得られた。このうち、本論で用いる地震観測記録は 2013 年 8 月 3 日の遠州灘の地震(M_j 5.1、深さ 35 km)で得られたものである。

2.2 周辺地盤の S 波速度構造

建物周辺で実施した L 字アレイ探査によって得られた S 波速度構造を図 3 に示す。同図には N 値からの換算結果と近傍の病院で得られた PS 検層結果を重ね描く。L 字アレイ探査結果と PS 検層結果は比較的よい対応が見られ、建物周辺地盤は平均 S 波速度が 170m/s 程度の、軟弱な水平成層地盤であると推定される。

2.3 入力の相互作用

入力の相互作用として、入力損失効果に着目して検討する。微動時における有効入力動として、基礎スラブ上(1F 中央)観測点と建物周辺を十字に囲む地盤観測点 (図 4) それぞれのフーリエスペクトル比を図 5 に示す。地盤観測点の位置によらず 3Hz 付近から入力損失効果が生じている様子を確認できる。このスペクトル比には上部構造ならびに基礎の質量による影響が含まれており、自由地盤に対する無質量剛基礎の応答(基礎入力動)とは異なる。そこで、高密度観測に基づき基礎入力動の算出を試みる。建物四方を囲んで配した 4 地盤観測点(GL_E、GL_W、GL_N、GL_S)で得られた記録を時刻歴で平均化(GL_avg.)したものを無質量基礎の応答と考え、これと自由地盤とのスペクトル比を図 6 に示す。平均化は長辺方向、短辺方向、上下方向の順にそれぞれ以下の式(1)~(3)による方法により行った。

$$GL_avg. = (GL_E + GL_W + (GL_N + GL_S)/2)/3 \quad (1)$$

$$GL_avg. = ((GL_E + GL_W)/2 + GL_N + GL_S)/3 \quad (2)$$

$$GL_avg. = (GL_E + GL_W + GL_N + GL_S)/4 \quad (3)$$

また、1F_B と GL_B より算出した地震時(1F/GL(eq))、1F と GL_S より算出した微動時(1F/GL(mt))の有効入力動を図 6 に重ね描く。基礎の大きさと周辺地盤の伝播速度を考慮すれば、a)、b)水平方向の 3Hz 以上においてこの手法により推定した入力損失効果の傾向は有効入力動のそれと調和的であり、かつ有効入力動よりも乱れが少ないという結果は、この手法による基礎入力動の推定可能性を示していると考えている。c)上下方向については、微動時に比べて地震時における入力損失効果は明瞭ではない。この理由として、微動時ではレイリー波による上下動が基礎スラブによって拘束されて入力損失効果が生じているのに対して、地震時は工学的基盤における上下動が支持杭によって伝達されている可能性が考えられる。

2.4 慣性の相互作用

本節では地震時及び微動時の地盤建物連成系とスウェイ固定系の振動特性を比較することで慣性の相互作用を捉える。地震時の地盤建物連成系(RF_B/GL_B)、スウェイ固定系(RF_B/1F_B)の伝達関数を算出し 1 次固有振動数を対象として、位相差を考慮し、地盤建物連成系、スウェイ固定系それぞれに等価な 1 自由度系の伝達関数を推定するシステム同定を行った。微動計測 3 によって得られた微動記録に対して、地震観測記録と同様にシステム同定を行った。ただし、位相差が逆転していたため振幅のみを考慮した。表 2 に地震時及び微動時のシステム同定の結果をまとめる。地震観測記録、微動記録ともにスウェイ固定系に対する地盤建物連成系の固有振動数の低下が明瞭である。

2.5 ロッキング挙動と基礎スラブの面外変形

本節では、高密度観測に基づきロッキング挙動と基礎スラブの面外変形について検討する。微動計測 2 において、建物 1F の 6 地点の微動計の内 2 つを選び、その上下成分の差と設置間隔からロッキング回転角 θ を算出し、基礎固定系の伝達関数(RF/(1F+$H\theta$))を計算した(図 7)。ここで H は等価高さを示す。振幅倍率について、長辺方向においては 2~5 倍と大きな差がみられた。図 7 の D、d に示す端部に設置した微動計と中央の微動計それぞれの上下成分から基礎スラブの面外変形角を算出し(図 8)、ロッキング回転角と比較したところ、長辺方向における基礎スラブの面外変形を確認した(図 9)。以上から、基礎に面外変形が生じる際、観測点位置によって基礎固定系の伝達関数の推定結果が影響をうけ、建物固有振動数ならびに減衰定数の評価が大きく異なる可能性が示された。

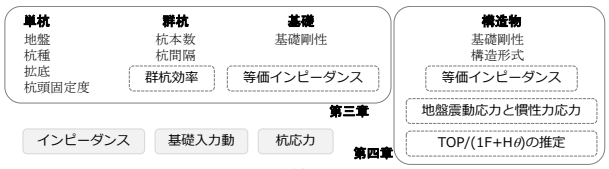


図 1 検討項目

表 1 建物概要

延床面積	7207 m^2	構造種別	RC 造
建築面積	1932 m^2	平面形式	センターコア型
竣工	1976(S51)年 4 月	構造形式	コア部：耐震壁付ラーメン
増築	1 階北小室 2 室		コア周部：ラーメン
増築年	不明	基礎種別	杭基礎
階数	地上 5 階建		PC パイルφ500
	塔屋 2 階建		L = 44.0 m　L = 45.0 m
最高高さ	25.5 m		武智三角杭
軒高	20.0 m		L = 8.5 m

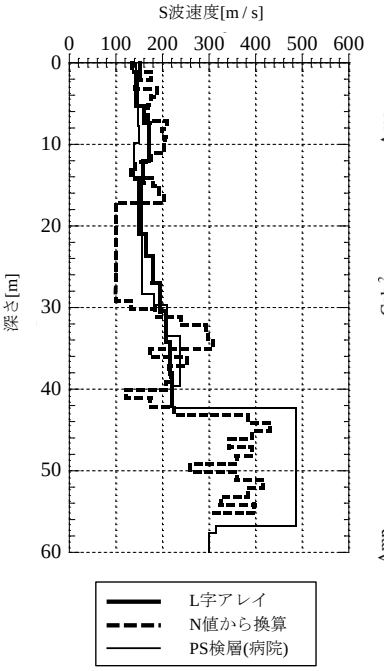


図 3 S 波速度構造

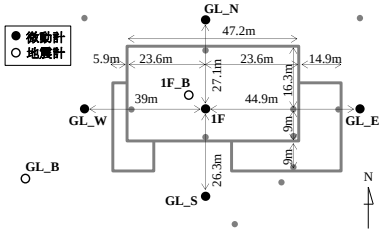
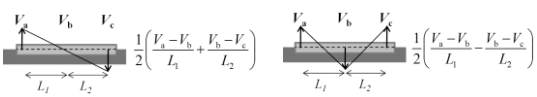


図 4 観測点配置

表 2 固有振動数と減衰定数

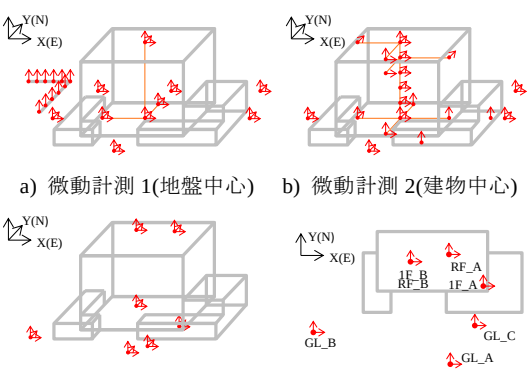
固有振動数[Hz] / 減衰定数[%]

	地盤建物連成系		スウェイ固定系	
	長辺方向	短辺方向	長辺方向	短辺方向
微動計測3	3.3 / 21	3.1 / 11	4.2 / 12	3.6 / 12
eq13	3.4 / 23	3.1 / 12	4.7 / 7.4	3.6 / 9.2



a) ロッキング回転角　　b) 面外変形角

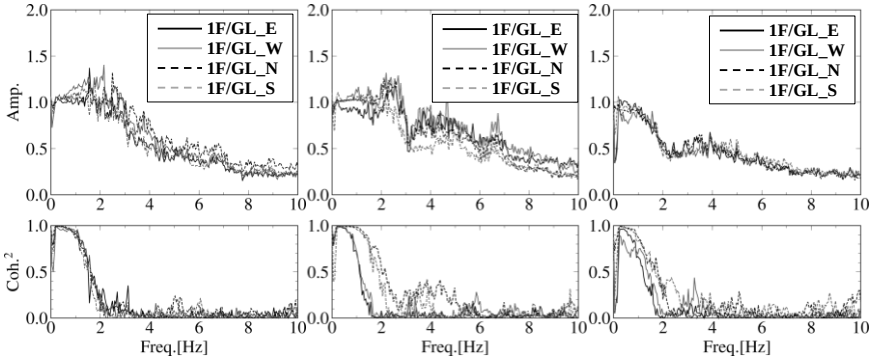
図 8 ロッキング回転角、面外変形角算出の概念図



a) 微動計測 1(地盤中心)　b) 微動計測 2(建物中心)

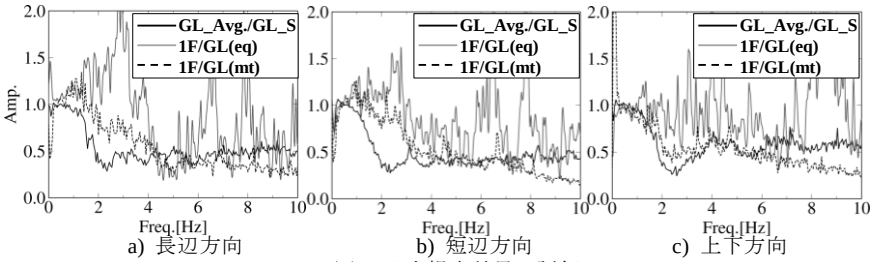
c) 微動計測 3(地震観測点も同様)　d) 微動計測 3(平面図)

図 2 建物概形および観測点配置



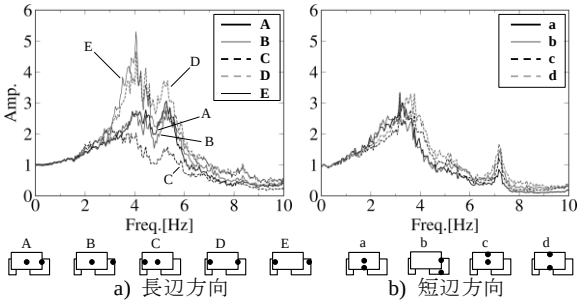
a) 長辺方向　　b) 短辺方向　　c) 上下方向

図 5 入力損失効果の評価(1F/各地盤観測点:微動時)



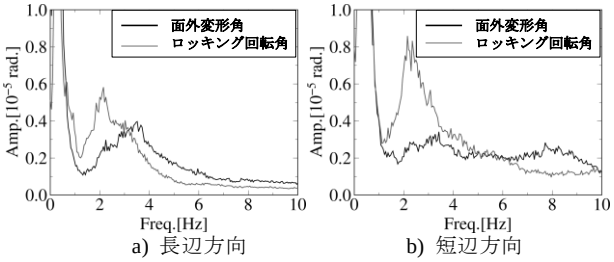
a) 長辺方向　　b) 短辺方向　　c) 上下方向

図 6 入力損失効果の評価



a) 長辺方向　　b) 短辺方向

図 7 観測点配置による伝達関数(RF/(1F+Hθ))の違い



a) 長辺方向　　b) 短辺方向

図 9 ロッキング回転角、面外変形角算出の角速度フーリエスペクトル

3. 地盤−基礎連成系の解析的検討

3.1 単杭についての検討

本節では、単杭を対象とした検討を行う。ここでは杭径を変化させた場合のインピーダンスについて示す。解析に用いるパラメータを表 3、表 4 に、モデルの概要を図 10 に示す。表 4 のパラメータは 3.2 節においても共通とする。杭以外の基礎は無質量とし、地震波は鉛直下方から S 波が入射する場合を考える。杭頭は回転拘束条件とする。杭頭のインピーダンスを図 11 に示す。水平成分では、杭径が大きいほどインピーダンスの実部、虚部が大きくなる。この要因として、杭径が大きくなるほど地盤と杭の接触面積が大きくなることと、杭の曲げ剛性が大きくなることの 2 つが挙げられる。上下成分についても杭径が大きくなるに伴いインピーダンスが大きくなる。これは杭周面の面積と先端支持面積、杭の軸剛性が大きくなるためと考えられる。

3.2 群杭についての検討

本節では、群杭を対象とした検討を行う。ここでは杭間隔を変化させた場合のインピーダンスと群杭効果について示す。解析に用いるパラメータを表 5 に、モデルの概要を図 12 に示す。インピーダンスを図 13 に示す。N 本の群杭における静的地盤ばね(K_G)は、その群杭を構成している杭の単杭(K_S)として静的地盤ばねを N 倍したものよりも小さいことが知られており、これを群杭効果と呼ぶ。水平方向については、実部、虚部ともに杭本数が同一であっても杭間隔が小さいほどインピーダンスが小さくなる。また、杭本数が 4 本の場合よりも 9 本の場合の方がこの傾向が大きいため、杭間隔が小さく、杭本数が多いほど群杭効果が大きいことがわかる。群杭効果を表す値として群杭係数βがあり、式(4)の形で表される。

$$\beta = K_G / K_S \cdot N \tag{3}$$

本節の結果と 3.1 節の単杭の結果を用いることで、静的地盤ばねで定義されていた群杭係数を動的地盤ばねに拡張することができる(図 14)。水平成分については、実部は$\beta < 1$ であり群杭効果によりばね剛性が低下する。虚部については地盤 1 次固有振動数よりも高い振動数域で $\beta > 1$ を上回り、逸散減衰の群杭効果は群杭により減衰が増大する特性を示すことが明らかとなった。また、群杭係数が振動数依存性を有することが明らかとなった。

4. 地盤−基礎−構造物連成系の解析的検討

本章では、基礎や構造物の剛性に着目し、地盤-基礎-構造物連成系を対象とした検討を行う。解析に用いるパラメータを表 6 に、モデルの概要を図 15 に示す。センターコア形式を想定し、X 軸と Y 軸の比較から壁の有無による違いが検討できる。スラブ、連層壁については面内せん断剛性が等しくなるようブレース置換した。梁に対するスラブの補剛効果を考慮した。柱梁接合部の剛域は考慮していない。各階質量は 1.2t/m^2 程度とした。このモデルを柔基礎モデルとし、これに対し基礎を剛体とした剛基礎モデルを作成した。柔基礎モデル、剛基礎モデルの地盤建物連成系(TOP/GL)の伝達関数と上部構造のみの伝達関数を図 16 に示す。センターコア形式の建物の振動特性には連層壁の存在により基礎剛性の影響が大きくなることが明らかとなった。このことは、センターコア式高層建物の動的相互作用効果を考慮した地震応答予測に多質点 SR モデルを用いる際の剛基礎仮定が不適切である可能性を示唆している。基礎が剛体として挙動していない場合の平均的なロッキング回転角を図 17 に示す方法で算出し、これを用いて基礎固定系の伝達関数を TOP/(1F+$H\theta$)から推定する(図 17)。連層壁を有する Y 軸方向において、剛基礎の場合はよく推定できているが、柔基礎の場合はロッキング回転角の平均化手法の違いによって推定した伝達関数(RF/(1F+Hθ))に大きな開きが生じうることがわかり、実測の知見と同様である。

基礎-上部構造物の剛性を考慮した等価なインピーダンスを算出する。上部構造物を無質量とし、加振方法は図 18 に示すように加振力を高さに応じて変化させ各階に振り分けた上で各階の加振力を節点に等分配する。実際の構造物に対する加振力の高さ方向分布は、構造物の振動モードによる振動数依存性を持つと考えられるが、ここではモードの影響が反映されている Ai 分布を用いて加振力の高さ分布を決定した。この時の基礎全体の平均変位より等価インピーダンスを算出した(図 19)。X 軸方向、Y 軸方向のどちらも、柔基礎の水平方向のインピーダンスは実部、虚部ともに剛基礎のそれと比べて小さくなっている。壁を有する Y 軸方向の方が柔基礎のインピーダンスが大きい。一方、回転方向のインピーダンスの実部は、X 軸方向では低振動数域において剛基礎よりも柔基礎の方が大きく、高振動数域ではそれが逆転する。柔基礎の場合、基礎の拘束状況は上部構造物によって左右され、基礎部に面外変形が生じる。上部構造物の剛性が低い X 軸方向では、低振動数域では加振方向に抵抗する方向に、高振動数域では加振方向に回転する基礎部の局所的挙動が、基礎部全体の平均的回転角の多くを占めているためと考えられる。Y 軸方向では、上部構造物の回転に伴い挙動する連層壁直下の局所的回転挙動が基礎部全体の平均的回転角の多くを占めるため、柔基礎と剛基礎の大小関係は変化しないと考えられる。剛基礎の場合は、基礎全体で回転挙動に抵抗できるため、柔基礎に比べインピーダンスが大きいと考えられる。

5. まとめ

本論では、動的相互作用効果の影響やその要因についての理解を深め、定性的傾向や影響の程度を把握することを目的とし、実建物を対象とした常時微動計測や地震観測といった実測結果から動的相互作用効果の実状を明らかにした。また、単杭や群杭、上部構造物を対象とした数値解析から各種条件が動的相互作用効果の基本性状に与える影響を示した。今後の課題として、チャートや式といった形で影響度を定量的に評価することと、強震時応答予測にむけた非線形領域の検討が挙げられる。

表 3　基礎のパラメータ

杭	
本数1x1	E_P = 2.1x10^7 kN/m^2
d = 1.0、0.5、1.5 m	ν_P = 1/6
L = 41 m	ρ_P = 2.4 t/m^3
	h_P = 0.03

表 4　地盤のパラメータ

表層地盤	支持層地盤
V_{S1} = 180 m/s	V_{S2} = 500 m/s
ρ_1 = 1.6 t/m^3	ρ_2 = 1.7 t/m^3
ν_1 = 0.49　h_1 = 0.01	ν_2 = 0.49
H = 40 m	h_2 = 0.01

表 6　基礎・構造物のパラメータ

材料物性	杭	柱	基礎梁	基礎梁
E_P = 2.1x10^7 kN/m^2	本数3x3	b = 0.7 m	b = 0.4 m	b = 0.35 m
ν_P = 1/6	d = 1.0 m	h = 0.7 m	h = 1.2 m	h = 0.8 m
ρ_P = 2.4 t/m^3	S = 6.0 m	スラブ	壁	
h_P = 0.03	L = 41 m	t = 0.18 m	t = 0.15 m	

表 7　地盤のパラメータ

表層地盤	支持層地盤
V_{S1} = 180 m/s	V_{S2} = 500 m/s
ρ_1 = 1.6 t/m^3	ρ_2 = 1.7 t/m^3
ν_1 = 0.49　h_1 = 0.01	ν_2 = 0.49
H = 40 m	h_2 = 0.01

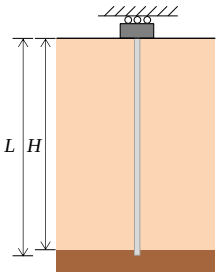


図 10　単杭モデルの概要

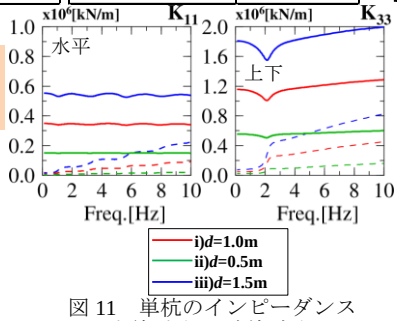


図 11　単杭のインピーダンス
(実線:実部、破線:虚部)

表 5　基礎のパラメータ

i)2x2_S3	ii)2x2_S6	iii)3x3_S3	iv)3x3_S6
本数2x2	本数2x2	本数3x3	本数3x3
d = 1.0 m	d = 1.0 m	d = 1.0 m	d = 1.0 m
S = 3.0 m	S = 3.0 m	S = 3.0 m	S = 3.0 m
L = 41 m	L = 41 m	L = 41 m	L = 41 m
E_P = 2.1x10^7 kN/m^2	E_P = 2.1x10^7 kN/m^2	E_P = 2.1x10^7 kN/m^2	E_P = 2.1x10^7 kN/m^2
ν_P = 1/6	ν_P = 1/6	ν_P = 1/6	ν_P = 1/6
ρ_P = 2.4 t/m^3	ρ_P = 2.4 t/m^3	ρ_P = 2.4 t/m^3	ρ_P = 2.4t/m^3
h_P = 0.03	h_P = 0.03	h_P = 0.03	h_P = 0.03

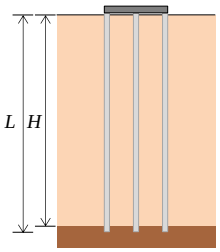
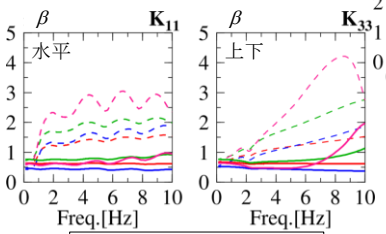


図 12　群杭モデルの概要



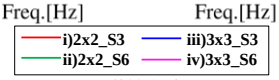


図 14　群杭係数β
(実線:実部、破線:虚部)

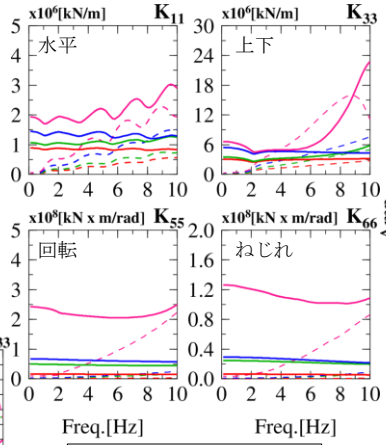
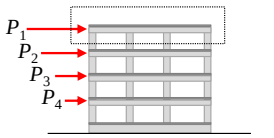


図 13　群杭のインピーダンス
(実線:実部、破線:虚部)



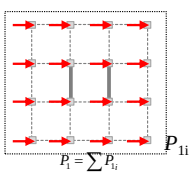


図 18　加振方法

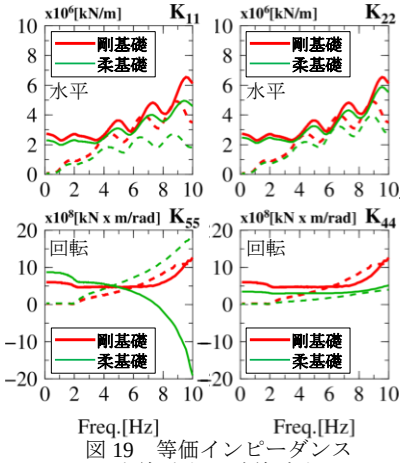
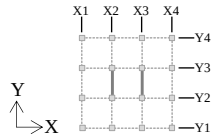
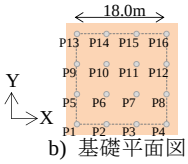


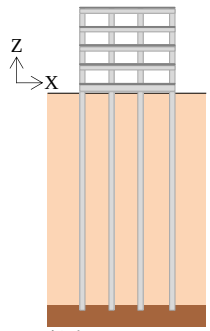
図 19　等価インピーダンス
(実線:実部、破線:虚部)



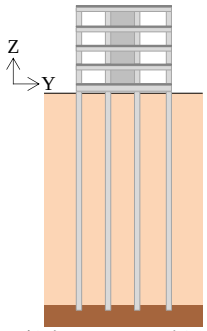
a)　基準階平面図



b)　基礎平面図



c) X 軸方向断面図(壁なし)



d) Y 軸方向断面図(連層壁)

図 15　地盤-基礎-構造物モデルの概要

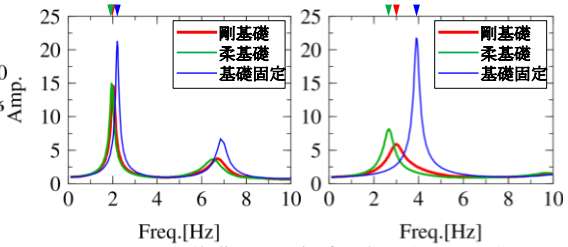
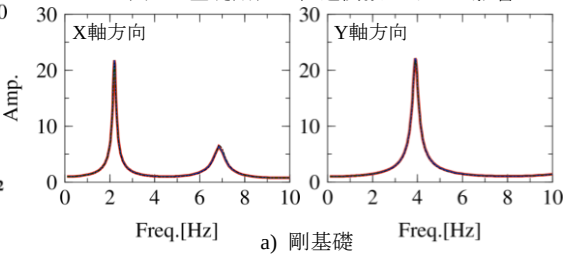
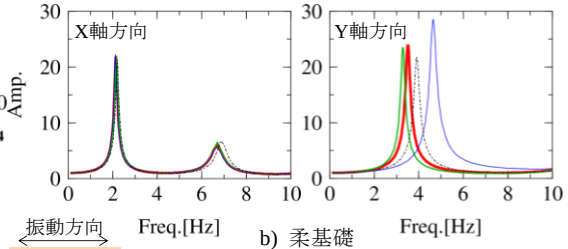


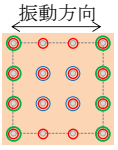
図 16　基礎剛性が伝達関数に与える影響



a)　剛基礎



b)　柔基礎



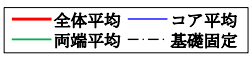


図 17　平均的ロッキング回転角の
算出法の違いが RF/(1F+Hθ)の推定に与える影響