

現実的な地盤・基礎条件を考慮した杭支持建物の動的相互作用効果に関する研究

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 岩城 梨佳

1. はじめに

日本の都市は沖積平野や埋立地を中心に広がっており、軟弱地盤上に杭基礎で支持された建物が多く存在する。このような建物の振動性状を正確に把握するためには地盤と建物の動的相互作用効果の適切な考慮が必要である。地盤と建物の動的相互作用に関する実在の地盤—基礎条件に基づいた検討は、個別の建物を対象としたものが多く、現実的な杭性能や基礎形状・形式などの影響を考慮した研究例は多くはない。

近年、平面的・立面的に不整形な形状をした免震建物や高層建物が多く建設されるようになってきた。このような建物では、基礎—地盤系の剛性に偏りが生じるため、鉛直下方からの水平入力地震動に対して、ねじれ方向の入力が励起されることが考えられる。これにより免震層のクリアランスの余裕度が減少するなどの現象が考えられるが、このような現象についての研究成果はほとんどない。

本研究では、現実的な基礎・地盤条件を考慮した動的相互作用について理解を深め、より実状に即した解析・設計を可能とすることを目的に、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、以下の項目についての解析的検討を行う。

- 1) 杭の断面性能がインピーダンスに及ぼす影響
 - 2) 基礎—地盤系の剛性に偏りのある建物のねじれ入力動
- さらに、実際の現象から相互作用効果を確認するため、軟弱地盤上に立地する実在建物の観測記録分析を行う。

2. 杭断面性能やインピーダンスに及ぼす影響

2.1 解析条件

解析モデルの概要を図1に、地盤物性値を表1に、基本となる基礎解析諸元を表2に示す。地盤は2層地盤とし、地盤と基礎面は非接触とする。ここでは、地盤ケース2の物性値を用いた結果を示す。

解析ケースを表3に示す。杭径、杭の軸剛性（ヤング率 $E \times$ 断面積 A ）、杭の曲げ剛性（ $E \times$ 断面2次モーメント I ）について、個別に case1、case2、case3 と変えた場合のインピーダンスを比較し、各項目がインピーダンスに及ぼす影響を確認する。検討対象とする項目のみを変化させ、そ

表1 地盤物性値

地盤ケース1	地盤ケース2
$V_s=150, 300\text{m/s}$	$V_s=300, 450\text{m/s}$
$\rho=1.5, 1.8\text{t/m}^3$	$\rho=1.8, 2.0\text{t/m}^3$
$\nu=0.45$	$\nu=0.45$
$h=0.03$	$h=0.03$
$H=18\text{m}$	$H=18\text{m}$

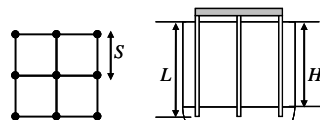


図1 解析モデル

表2 基礎の解析諸元

$S=7.5\text{m}$	$E=2.0 \times 10^7 \text{kN/m}^2$
$d=1.5\text{m}$	$\rho=2.4\text{t/m}^3$
$L=20\text{m}$	$\nu=1/6$
	$h=0.03$

表3 解析ケース

	case1	case2	case3
杭径	caseD 1.3m	1.5m	1.8m
軸剛性	caseA 0.25EA	0.5EA	EA
曲げ剛性	caseI 0.25EI	0.5EI	EI

れ以外の諸元は保持することとする。杭の軸剛性、曲げ剛性の変化率に比べ、杭径の変化率が小さいが、これは場所打ち RC 杭の実状に沿った杭径とするためである。なお、表3のパラメータ以外の定数は表2に示す値を用いる。

2.2 解析結果

図2より、全体として、杭径が大きくなるとインピーダンスの実部、虚部ともに増大する傾向がみられるが、これは水平成分に影響する杭の見付け幅、回転成分に影響する杭の周長が大きくなるためと考えられる。地盤が硬いほどその差が大きいが、杭径の及ぼす影響は顕著ではない。図3より、杭の軸剛性が大きくなると、水平、回転成分ともに、インピーダンスが増大する傾向が見られる。特に回転成分への影響が大きいが、これは基礎全体の回転動に対して、各杭の軸剛性により抵抗するためと考えられる。水平成分が大きくなるのは、せん断剛性が大きくなるためと考えられる。図4より、杭の曲げ剛性が大きくなると、インピーダンスの回転成分はほとんど変化せず、水平成分が増大する傾向が見られる。以上より、水平抵抗には、地盤抵抗と杭の曲げ剛性が、回転抵抗には主として杭の軸剛性が影響していることが確認された。

3. 基礎形状の不整形性・基礎形式の混用がねじれ入力動に及ぼす影響

3.1 杭基礎についての検討

解析条件

図6に基本となる解析モデルを示す。特記しない場合、基礎半幅 $B=35\text{m}$ 、杭間隔 $S=10\text{m}$ 、杭長さ

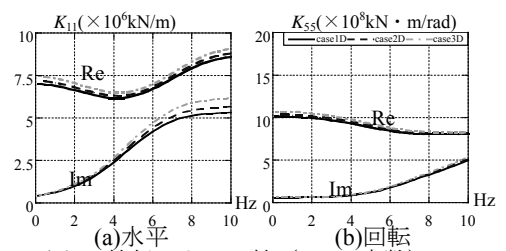


図2 杭径による比較 (EA, EI定数)

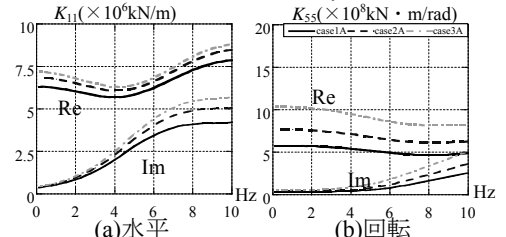


図3 軸剛性による比較 (1.5m, EI定数)

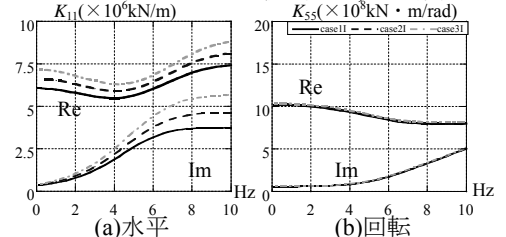


図4 曲げ剛性による比較 (1.5m, EA定数)

$L=22\text{m}$ 、表層地盤厚さ $H=20\text{m}$ 、杭径 $d=1.5\text{m}$ 、表1の地盤条件1を用い、これを基本モデルと称する。杭の物性値を表5に示す。基礎底面は地盤と非接触とする。図7に解析ケースを示す。

杭基礎の平面形状の不整形性が基礎入力動に与える影響について、L字形・三角形基礎を対象に検討を行う。基礎の平面形状を図7(a)に示す。杭配置は、CASE1-1(正方形状)、CASE1-2(L字形)、CASE1-3(三角形)の3ケースを考える。杭本数はそれぞれ、64、39、36本である。

上部構造からの鉛直荷重に偏りのある場合を想定する。荷重が大きい高層部に対して、(A)杭の径を太くする、(B)杭本数を増やすことで対応した場合について検討する。杭配置を図7(b)に示す。径の異なる杭P1($d=3.0\text{m}$)、P2($d=1.5\text{m}$)を混用したものをCASE2-2A、P1杭と鉛直支持力を等価にするためP2杭を4本配置したものをCASE2-2Bとする。全てをP1杭としたCASE2-2A、P2杭4本配置としたCASE2-3Bも検討する。

長さの異なる杭を混用して、支持力の大きい深部の支持地盤に支持させることで鉛直荷重の偏りに対応した場合について検討する。解析モデルの断面図を図7(d)に示す。ここでは、地盤を三層の成層地盤とし、表4の地盤条件2を用いる。CASE4-2は長い杭(杭長22m)と短い杭(杭長12m)を混用した場合を示しており、比較のために、全て長い杭を用いた場合(CASE4-1)と、全て短い杭を用いた場合(CASE4-3)を合わせて検討する。

表4 地盤の解析諸元

地盤条件1	地盤条件2	地盤条件3
$V_{s1}=150\text{m/s}$ $\rho_1=1.5\text{t/m}^3$	$V_{s1}=100\text{m/s}$ $\rho_1=1.4\text{t/m}^3$	$V_{s1}=150\text{m/s}$ $\rho_1=1.5\text{t/m}^3$
$V_{s2}=300\text{m/s}$ $\rho_2=1.8\text{t/m}^3$	$V_{s2}=200\text{m/s}$ $\rho_2=1.6\text{t/m}^3$	$V_{s3}=400\text{m/s}$ $\rho_3=1.8\text{t/m}^3$

表5 杭の解析諸元

$E=2.0 \cdot 10^9 \text{KN/m}^2$	$\nu=0.16$
$\rho_p=2.4\text{t/m}^3$	$\eta=0.03$

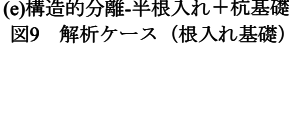
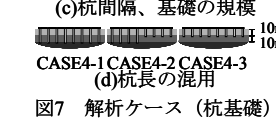
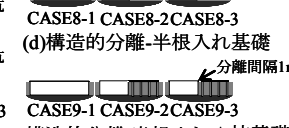
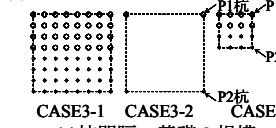
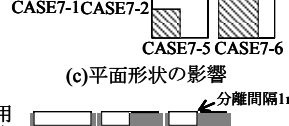
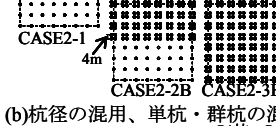
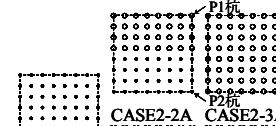
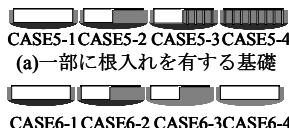
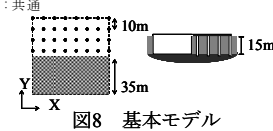
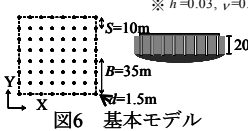
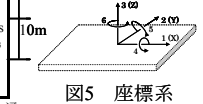


図7 解析ケース(杭基礎)

解析結果 図7(a)の3種類について、基礎入力動を比較して図10に示す。CASE1-2、CASE1-3の場合には、ロッキング入力動が若干増加するとともに、ねじれ入力動が励起されている。しかし、その振幅は、高振動数域でも基礎端部での水平入力動の2%程度である。

図7(b)に示した杭径を混用した場合の検討結果(CASE2-1、2-2A、2-3A)を図11に示す。図12に、単杭・群杭を混用した場合の検討結果(CASE2-1、2-2B、2-3B)を示す。ねじれ成分に注目すると、図11(c)、図12(c)より、CASE2-2A、2-2Bでは、ねじれ入力動が大きく励起されており、特に径の異なる杭を混用したCASE2-2Aのねじれ入力動の振幅は、同一杭を配したCASE2-2Bの2倍程度である。図11(a)、図12(a)より、異なる径で同一の杭を配したCASE2-1、2-3Aの水平入力動の差は大きく、同一径で杭本数の異なるCASE2-1、2-3Bの差は小さい。これは、杭の水平応答の変動が、剛性の大きい杭体の存在による地盤変形の拘束効果によって生じるため、杭と地盤との水平方向の剛性比の影響が大きく、杭径の差異の方が杭本数の差異よりも杭応答に大きな影響を与えるためと考えられる。また、断面積を等価とした場合、P1杭1本の水平剛性の方が、P2杭4本の水平剛性の和よりも大きいことも影響していると考えられる。以上から、径が異なる杭を混用することは、ねじれ入力動を励起しやすいことが指摘できる。鉛直支持荷重が平面内で変動する基礎の場合には、同径の杭を用い、杭本数により支持力の差を調節することで、ねじれ入力動の励起を抑えることができる。

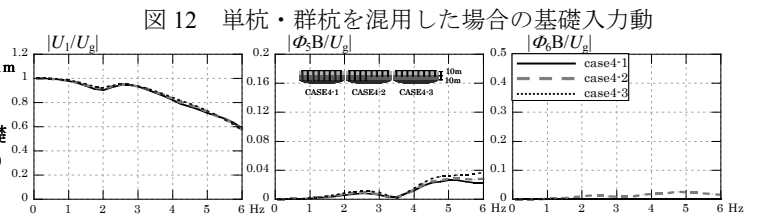
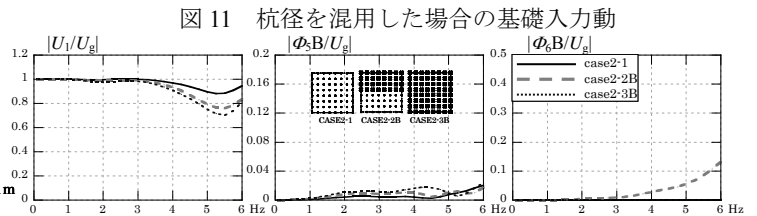
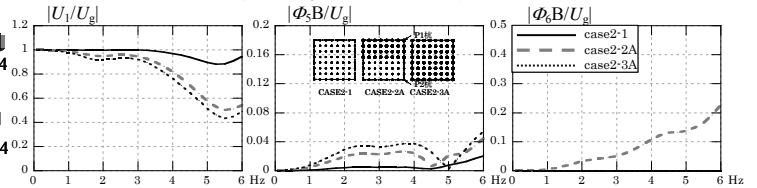
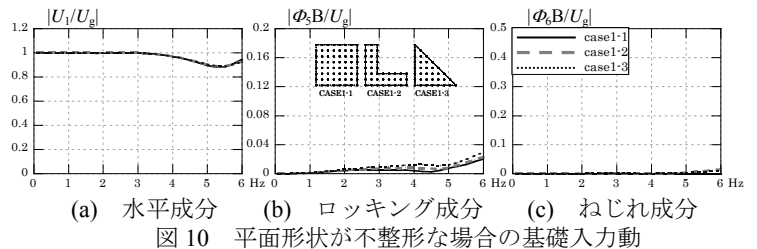


図13 杭長を混用した場合の基礎入力動

図7(d)の検討結果を図13に示す。図13(c)より、CASE4-2ではねじれ入力動が励起されているが、その振幅は、図11(c)の結果と比べて小さい。これは、図13(a)において、CASE4-1、4-3の水平入力動に顕著な差がないことから、各杭の水平応答が同等であり、その結果ねじれ入力動が励起されないと考えられる。以上より、鉛直支持荷重に偏りがある場合には、杭長によって調節することで、ねじれ入力動の励起を低減できることが分かる。

3.2 根入れを有する基礎についての検討

解析条件 基礎の一部に地下室が存在する場合についての検討を行う。図8に基本となる解析モデルを示す。基礎の片側に地下室を有する正方形平面の建物を想定する。根入れ部は無質量剛体とし、地盤条件は表4の地盤条件1を用いる。杭がある場合には物性値は表5の値を用いる。図9に解析ケースを示す。

根入れ部に偏りのある基礎の基本的特性を把握するための検討を行う。解析ケースを図9(a)に示す。CASE5-2は基礎の半分に根入れを有し、残りは地表面基礎であるモデル（以下「半根入れ」と称する）を示し、CASE5-3は残りの半分は杭基礎としたモデル（半根入れ+杭）である。

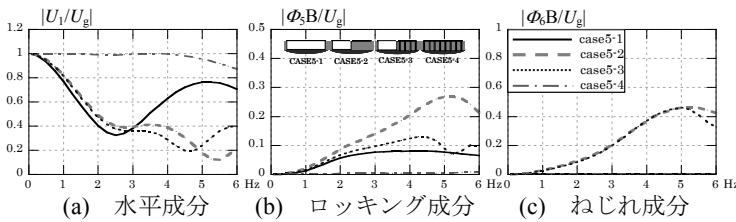


図14 一部に根入れを有する基礎の入力動

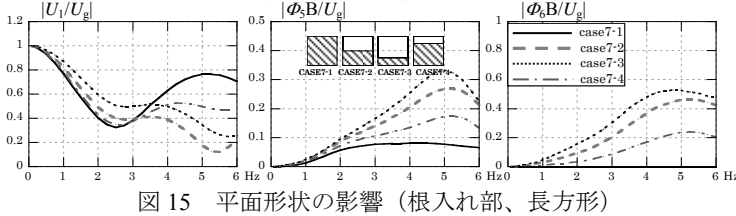


図15 平面形状の影響（根入れ部、長方形）

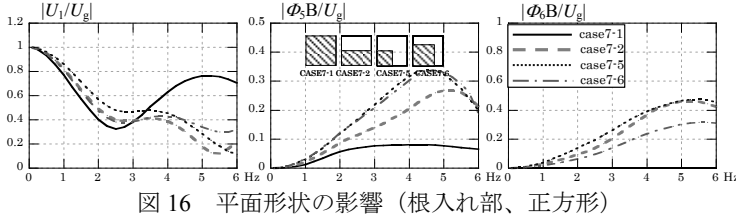


図16 平面形状の影響（根入れ部、正方形）

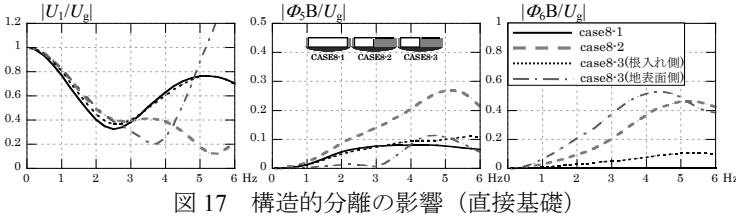


図17 構造的分離の影響（直接基礎）

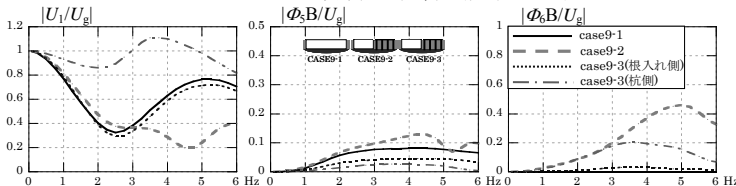


図18 構造的分離の影響（一部、杭基礎）

全域に根入れがある CASE5-1（全根入れ）、全域が杭基礎のモデル CASE5-4（全杭）も合わせて検討する。

偏在する根入れ部分の平面形状の影響について検討を行う。解析ケースを図9(c)に示す。根入れを有する部分をハッチ掛けで表す。全根入れモデル CASE7-1(5-1と同一)、半根入れモデル CASE7-2(5-2と同一)、根入れ部分の面積が基礎面積の1/4である長方形モデル CASE7-3、3/4である長方形モデル CASE7-4、1/4である正方形モデル CASE7-5、1/2である正方形モデル CASE7-6について検討する。

次に、半根入れモデル、半根入れ+杭モデルについて、根入れ部分と地表面基礎・杭基礎部分とを、構造的に分離した場合についての検討を行う。解析ケースを図9(d)、(e)に示す。CASE8-3、9-3は、それぞれ、半根入れモデルおよび半根入れ+杭モデルの、根入れ部分と地表面基礎部分・杭基礎部分を1m離れたモデルを示す。

解析結果 図9(a)の検討結果を図14に示す。図14(c)より、CASE5-2、5-3では、ねじれ入力動が大きく励起されている。CASE5-2、5-3のねじれ入力動は5Hz付近にピークが見られるが、これは、5Hz付近で自由地盤応答が根入れ

深さに対して半波長となるため、根入れ部では自由地盤の変形が拘束されて揺れが小さくなる一方で、地表面基礎部は深さ方向の振動が拘束されにくいいため、根入れ基礎部と地表面基礎で振幅の差が生じ、ねじれ入力動が励起されると推定される。図14(c)で、CASE5-2、5-3の差は小さく、杭のねじれ入力動抑制効果が小さいことがわかる。ロッキングは杭により大きく抑制されている。

図9(c)の検討結果を図15(CASE7-1、7-2、7-3、7-4)、図16(CASE7-1、7-2、7-5、7-6)に示す。図15(c)より、CASE7-4、7-2、7-3の順にねじれ入力動が大きくなる。さらに、図16(c)の結果から、CASE7-2、7-5のねじれ入力動が同程度である。CASE7-5、7-6については、X軸から45°方向の鉛直下方SH波に対して、ねじれ入力動がより大きくなることを確認している。以上より、基礎-地盤系の剛性の偏心距離が大きいかほどねじれ入力動が大きくなると考えられる。

図9(d)、(e)の検討結果を図17、図18に示す。なお、CASE8-3、9-3の場合、根入れ部分および地表面基礎・杭基礎部分の図心で基礎入力動を評価している。回転角に乗じる半幅Bは17.5mとする。図17(c)、図18(c)より、根入れ部分を構造的に分離することで、根入れ部分のねじれ入力動は抑制されるが、地表面・杭基礎部分では、ねじれ入力動が大きく励起されている。ただし、地表面基礎部分に杭を打設することで、その影響は減じられている。

4. 軟弱地盤上に立地する発電所建物の観測記録分析

軟弱地盤上に立地する5つの発電所建物について観測記録の分析を行う。紙面の都合上、K火力発電所について示す。建物・観測概要を表6に、地盤概要を表7に示す。地震計は建屋に9点、地盤に6点（GL-5m3点、-20m、-50m、-100m各1点）設置されている。

4.1 地盤の非線形化の影響について

地盤の非線形化の影響を確認するため、SHAKEによる地盤の応答解析結果を行った。等価線形解析の入力波には地中（GL-50m）観測記録を用いた。図19に、線形・等価線形解析結果の表層地盤の伝達関数（振幅）を示す。図20に、等価線形解析で求めた地盤の最大せん断ひずみを示す。図20より、最大で0.036%程度のひずみが生じている。図19より、線形解析結果と比較して、等価線形解析結果ではピークの位置が低振動数側にあるが、その差は顕著ではない。また、振幅は大きくなっている。

4.2 入力損失効果について

観測記録を用いて推定した建屋屋上/1階、1階/地盤地表面、表層地盤の伝達関数をそれぞれ図21~23に示す。各図において、推定に用いた観測記録の伝達関数を灰色線で、平均的な伝達関数を黒線で示す。図21より、上部構造の1次固有振動数はEW方向：2.7Hz、NS方向：1.7Hzと推測できる。図22に示す建屋1階/地盤地表面の伝達関数は入力損失の指標となる。図22より、振幅は振動数が高くなるにつれて増減を繰り返しながらも減少しており、入力損失が認められる。また、この振幅は表層地盤・上部構造の固有振動の影響を受けて上下していると考えられる。

表6 建物・観測概要

観測対象	本館建屋
観測点数	15
サンプル数	30
建屋高さ	35.7m
基礎形状	240×70m
根入れ深さ	5.75m
杭端深さ	GL-40m

表7 地盤概要

深度(m)	V_s (m/s)	ν
0~5.9	130	0.487
~11.6	190	0.492
~40.3	160	0.492
~47.0	270	0.488
~72.5	370	0.477
~91.6	240	0.487
91.6~	470	0.473

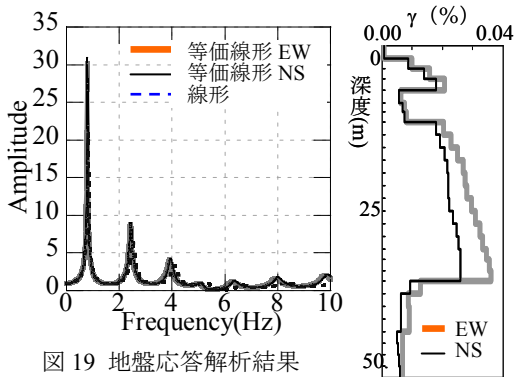


図19 地盤応答解析結果

(伝達関数(振幅)) 図20 最大せん断ひずみ

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

・杭の断面性能がインピーダンスに及ぼす影響

水平抵抗には地盤抵抗と杭の曲げ剛性の影響が大きく、回転抵抗には主として杭の軸剛性が影響が大きいことがわかった。

・地盤—基礎系の剛性に偏りのある建物のねじれ基礎入力動について

平面形状の不整形性によるねじれ入力動の励起は小さい。上部構造からの鉛直荷重に偏りがある場合などに、杭径を混用するとねじれ入力動が励起されやすい。この代替策として、(1)同径の杭を用い杭本数により支持力を調節すること、(2)地盤支持力の違いを利用して、長さの異なる杭を用いること、でねじれ入力動の励起を抑制できる。また、一部に根入れを有する基礎はねじれ入力動を大きく励起する。根入れ部分とそれ以外の部分を分離することでねじれ入力動の励起を抑制できる。

・軟弱地盤上に立地する発電所建物の観測記録分析

等価線形解析を行い、地盤の非線形化の程度を確認した。観測記録から建屋屋上/1階、1階/地盤地表面、表層地盤の伝達関数を推定し振動数特性を把握するとともに、入力損失効果を確認した。

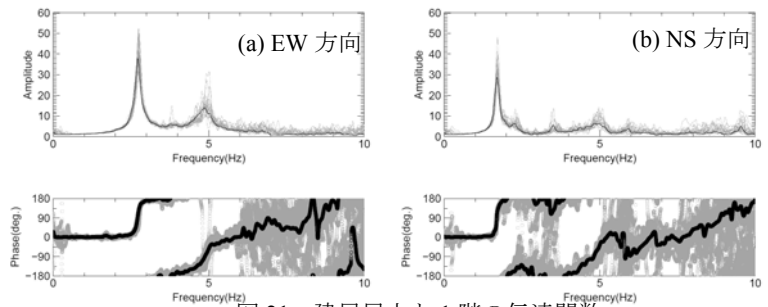


図21 建屋屋上と1階の伝達関数

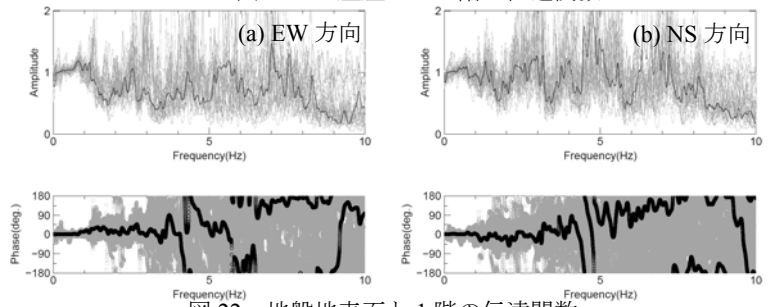


図22 地盤地表面と1階の伝達関数

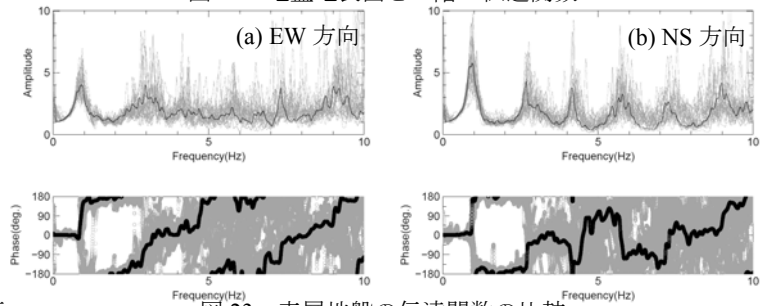


図23 表層地盤の伝達関数の比較