

杭基礎建物の振動性状に影響する諸要因についての解析的検討  
—杭の断面性能、基礎のねじれ振動について—

Analytical Examination of Various Factors Effecting Dynamic Characteristics of Pile Supported Buildings

2. 構造 - 2. 振動

杭基礎 相互作用 薄層要素法  
地盤ばね 基礎入力動 ねじれ振動

正会員

○岩城 梨佳\*

Rika IWAKI

同

福和 伸夫\*\*

Nobuo FUKUWA

同

護 雅史\*\*\*

Masafumi MORI

1. はじめに

都市部では、軟弱地盤上に杭基礎で支持された建物が多く存在する。このような建物の地震時挙動を正確に評価するためには、地盤と構造物との動的相互作用を適切に考慮する必要がある。そのためには、杭の断面性能や非矩形杭基礎のねじれ振動といった、杭基礎建物の振動性状に影響する諸要因についての理解が必要である。特に基礎のねじれ振動については、近年多く建設されている免震建物の免震層変位を大きくする可能性があるため、留意する必要がある。

本論では、薄層要素法と有限要素法を、動的サブストラクチャー法により結合した動的相互作用解析手法<sup>1)</sup>を用いて、仮想的な解析モデルを対象に、解析的検討を行う。2章では、杭径や杭の軸剛性、曲げ剛性がインピーダンスに及ぼす影響についての検討を行う。3章では、三角形杭基礎に地震波が入射する場合に誘発される、上下軸周り回転方向（以降、ねじれと呼ぶ）の基礎入力動について検討する。木村ら<sup>2)</sup>は、杭配置に偏心のある杭基礎のねじれ振動に関する検討を行っているが、本論は、杭配置に偏心のない場合の検討である。

2. 杭の断面定数の影響

2.1 解析概要

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。想定するモデルは9本の杭を有する正方形杭基礎であり、地盤と基礎面は非接触とする。地盤は、表層地盤厚さ18mの2層地盤とする。表層地盤としては、2ケースを想定している。

比較対象とする解析ケースを表3に示す。杭径、杭の軸剛性（ヤング率 $E$ ×断面積 $A$ ）、杭の曲げ剛性（ヤング率 $E$ ×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。実際には、断面2次モーメントを保持したまま、断面積を変えることにより軸剛性を変化させる。同様に、断面積を保持したまま、断面2次モーメントを変えることにより

曲げ剛性を変化させる。杭径を変化させる場合は、断面積、断面2次モーメントなどの断面性能は保存する。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杭の実情に沿った杭径とするためである。なお、表3に示すパラメータ以外の定数は表2に示す共通の値を用いる。

2.2 解析結果

杭径、杭の軸剛性、杭の曲げ剛性をパラメータとしたインピーダンスの比較をそれぞれ、図2、図3、図4に示す。それぞれに、地盤ケースと方向成分(水平成分： $K_{11}$ 、回転成分： $K_{55}$ )の別により4つのグラフを示している。

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。

表1 地盤物性値

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

表2 基礎の解析諸元

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

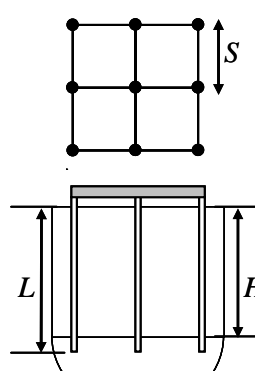


図1 解析モデル

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	$0.25EI$	$0.5EI$	$EI$

\* 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生  
\*\* 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博  
\*\*\* 名古屋大学大学院環境学研究科・准教授・博士（工学）

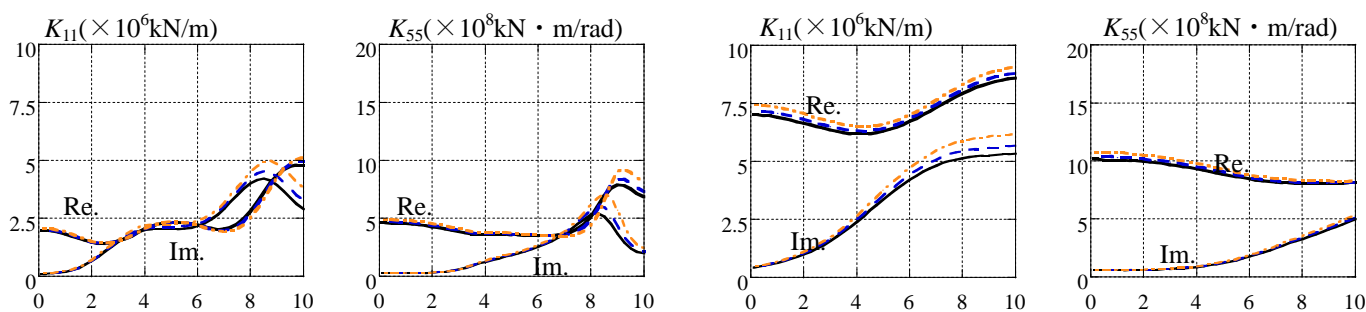
\* Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.  
\*\* Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.  
\*\*\* Assoc. Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

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、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。また、虚部の傾きも同様に増大している。

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。

杭基礎は、水平力に対して、主に杭背後の地盤の抵抗と杭自体の曲げ剛性で抵抗すると考えられている。また、

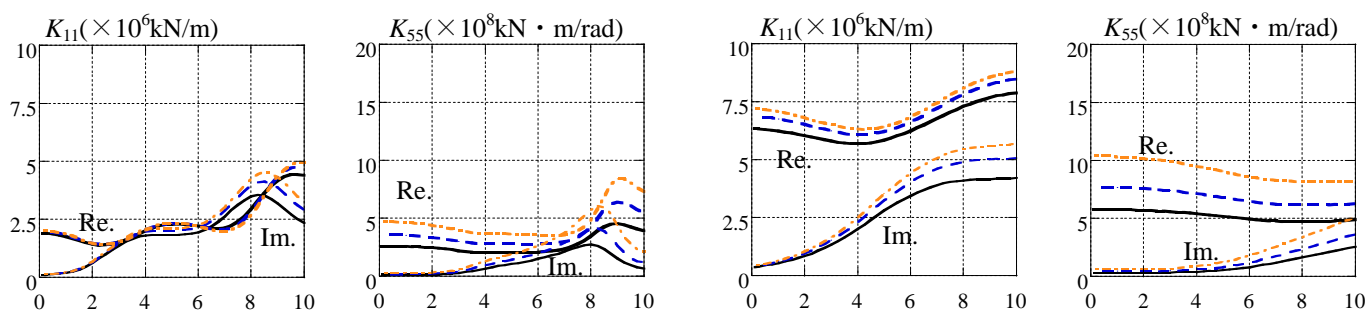
回転力に対しては、主に杭周地盤の摩擦抵抗、杭自体の軸剛性を介した杭先端部の地盤剛性で抵抗すると考えられている<sup>3)</sup>。本解析結果からは、水平抵抗に対しては、地盤抵抗と杭の曲げ剛性が影響していること、回転抵抗に対しては杭の軸剛性が影響していることが確認できた。なお、今回の解析では、杭径と杭の軸剛性、曲げ剛性のcaseによる比が異なるため、全体の抵抗に対する、地盤抵抗の寄与度合いと杭剛性の寄与度合いを単純に比較することはできない。しかし、回転成分については、地盤の摩擦抵抗よりも、杭の軸剛性による抵抗のほうが、全体の抵抗に対する寄与が大きいと言える。



(a) 地盤ケース1 (左：水平、右：回転)

(b) 地盤ケース2 (左：水平、右：回転)

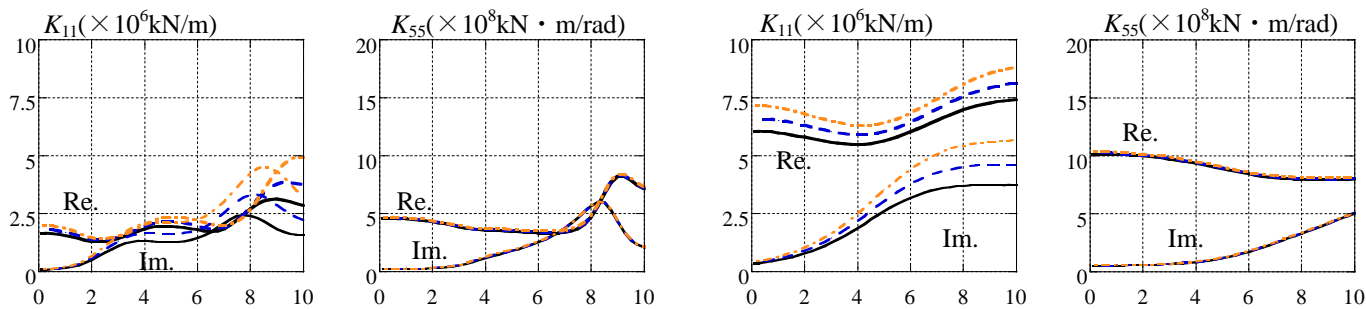
図2 杭径による比較 (EA,EI定数) (横軸：振動数(Hz) )



(a) 地盤ケース1 (左：水平、右：回転)

(b) 地盤ケース2 (左：水平、右：回転)

図3 軸剛性による比較 (1.5m, EI定数) (横軸：振動数(Hz) )



(a) 地盤ケース1 (左：水平、右：回転)

(b) 地盤ケース2 (左：水平、右：回転)

図4 曲げ剛性による比較 (1.5m, EA定数) (横軸：振動数(Hz) )

3. 三角形杭基礎のねじれ振動

杭配置が矩形・対称ではない場合に生じる応答、特にねじれの特性について検討する。3.1 節では杭の配置形状が、インピーダンス、基礎入力動の水平・回転成分、基礎ねじれ振動に及ぼす影響について検討する。3.2 節では、三角形基礎を対象に、表層地盤の物性値、杭径、杭のヤング率を変化させ、各要素が基礎のねじれ振動に及ぼす影響について検討する。なお、杭配置の偏心距離を上部構造の耐震設計法における偏心距離の算定方法により計算したところ、本章で想定する三角形基礎は全て、重心(図心)位置と剛心位置が一致しており、杭配置の偏心はないモデルとなっている。

3.1 基礎形状の影響

3.1.1 解析概要

表 4 に示す地盤、基礎物性値及び基礎形状を共通として、図 5 に示す基礎形状の異なる 3 種類の解析モデルを想定する。杭本数はいずれも 9 本であり、( a )三角形 1 と( b )三角形 2 は互いに 45 度回転した形状である。( c )正方形の基礎幅は、杭で囲まれる面積が三角形基礎と等しくなるように定める。地盤と基礎底面は非接触とする。入射波には X、Y 方向の鉛直下方 SH 波を用いる。インピーダンス、基礎入力動は基礎の図心位置で評価する。

3.1.2 解析結果

解析結果のインピーダンス（水平成分： $K_{11}$ 、 $K_{22}$ 、回転成分： $K_{55}$ 、 $K_{44}$ ）、自由地盤応答で基準された基礎入力動（水平成分： $U_1/U_g$ 、 $U_2/U_g$ ・回転成分： $\phi_3/U_g$ 、 $\phi_4/U_g$ ）を図 7、図 8 に示す。自由地盤応答で基準された図心位置の z 軸周り回転方向（ねじれ）の基礎入力動（ $\phi_6/U_g$ ）を比較して、図 9 に示す。

図 7 より、インピーダンスについて、三角形 1 と正方形の場合は、加振に対する基礎形状が X、Y 方向で同じであるため、水平、回転成分ともに、X、Y 方向のインピーダンスの値が等しい。三角形 2 について、水平、回転成分ともに、X 方向よりも Y 方向の方がインピーダンスの値が大きい。

図 8 より、基礎入力動について、水平成分は 3 つのモデルでほとんど差がないことがわかる。

図 9 より、正方形基礎では、X、Y 方向入射時ともに、ねじれ振動が生じないことがわかる。三角形 1 については、X、Y 方向入射時にねじれ振動が生じる

が、入射方向と形状の関係が変わらないので、双方は同じ値である。三角形 2 については、X 方向入射時にねじれ振動が生じ、Y 方向入射時には生じない。杭配置が入力動の加振方向に対して軸対称でない場合にねじれ振動が生じると考えられる。三角形 1 と三角形 2 の X 方向入射時を比較すると、三角形 2 の方がねじれ振動の振幅が大きい。

以上より、杭配置に偏心がない場合でも、杭配置が入力動の加振方向に対して軸対称でなく、地盤の抵抗に偏りがある場合には、鉛直下方入射時にねじれ振動が生じることが確認された。

3.2. 地盤物性値、杭断面の影響

3.2.1 解析概要

解析モデルの概要を図 6 に示す。杭本数は 15 本であり、基礎面と地盤とは非接触とする。基本となる地盤物性値、基礎解析諸元は 3.1 節と同様に表 4 に示す値を用いる。ただし、杭間隔は図 6 に示す値とする。比較対象とする解析ケースを表 5 示す。入射波には X 方向の鉛直下方 SH 波を用い、図心位置でのねじれ振動を比較する。

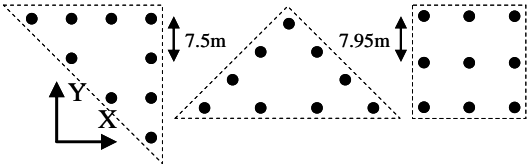
3.2.2 解析結果

ねじれ振動の評価値として、図心位置の z 軸周り回転方向の基礎入力動に基礎半幅（図 6 における三角形底辺の半幅）を乗じ、自由地盤応答で基準化したものを比較し、図 10 に示す。

図 10 より、表層地盤が軟らかくなるほど、また、杭が硬くなるほど、ねじれ振動が増大する傾向にあることがわかる。以上より、杭の硬さが地盤の硬さよりも相対的に大きくなる場合、杭の地盤改良効果により、非一様な地盤が形成されるため、ねじれ振動を励起すると考えられる。

表4 地盤、基礎の解析諸元

地盤	基礎
$V_s=150, 300\text{m/s}$	$E=2.0\times10^7\text{kN/m}^2$
$\rho=1.5, 1.8\text{t/m}^3$	$\rho=2.4\text{t/m}^3, \nu=1/6$
$\nu=0.45$	$h=0.03$
$h=0.03$	$L=20\text{m}$
$H=18\text{m}$	$d=1.5\text{m}$



( a ) 三角形1 ( b ) 三角形2 ( c ) 正方形  
図5 解析モデル（形状比較）

表5 解析ケース

			case1	case2	case3	
表層地盤	S波速度 $V_s(\text{m/s})$	caseS	100	150	200	
	密度 $\rho(\text{t/m}^3)$		1.4	1.5	1.7	
杭径 $d(\text{m})$			caseD	0.6	1.5	2.0
杭剛性 $E(10^7\text{kN/m}^2)$			caseE	1.0	2.0	3.0

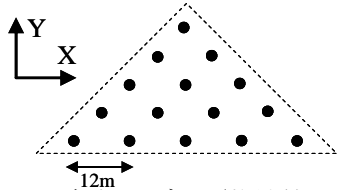


図6 解析モデル（物性値比較）

#### 4. まとめ

杭基礎建物の振動性状に影響する諸要因について、地盤と建物の動的相互作用の観点から実施した解析的検討の結果を以下にまとめる。

##### 杭径、杭の軸剛性、曲げ剛性が杭基礎建物のインピーダンスに及ぼす影響について

水平抵抗に対しては、地盤抵抗と杭の曲げ剛性が影響していること、回転抵抗に対して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。

##### 三角形杭基礎に地震波が入射する場合に生じる、ねじれ振動（上下軸周り回転方向の基礎入力動）の影響について

杭配置に偏心がない場合でも、杭配置が入力動の加振方向に対して軸対称でなく、地盤の抵抗に偏りがある場合には、入射時にねじれ振動が生じることが確認された。

杭の硬さが地盤の硬さに比べて相対的に大きくなるほど、ねじれ振動が増大するという結果を得た。

#### 【参考文献】

- 1) 文学章, 福和伸夫: 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, 日本建築学会構造系論文集, No.600, pp.97-105, 2006
- 2) 木村匠ら: 杭配置に偏心を有する杭支持建物の地震時ねじれ挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.626, pp.543-549, 2008
- 3) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996.4

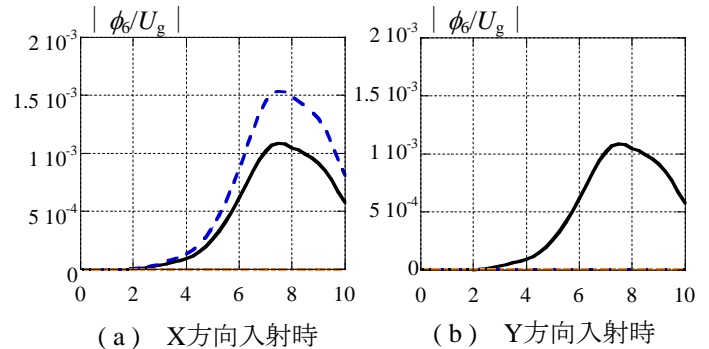


図9 ねじれ振動の比較（基礎形状）（横軸：振動数(Hz)）

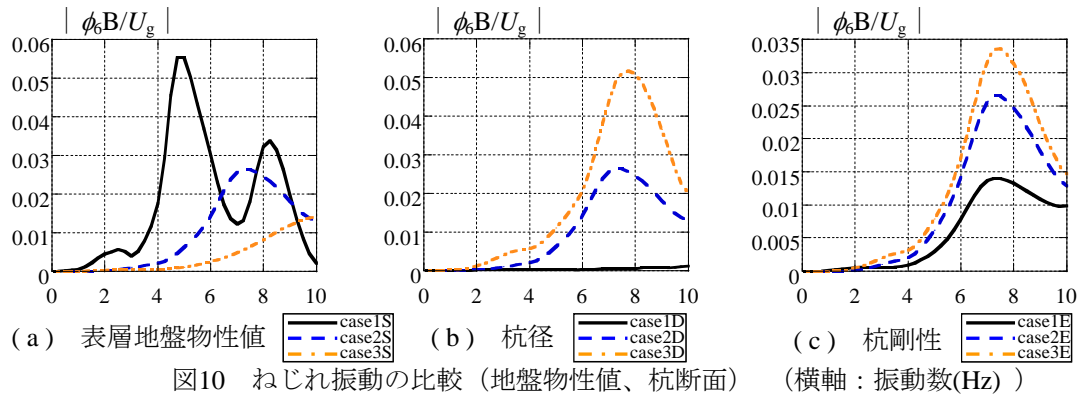


図10 ねじれ振動の比較（地盤物性値、杭断面）

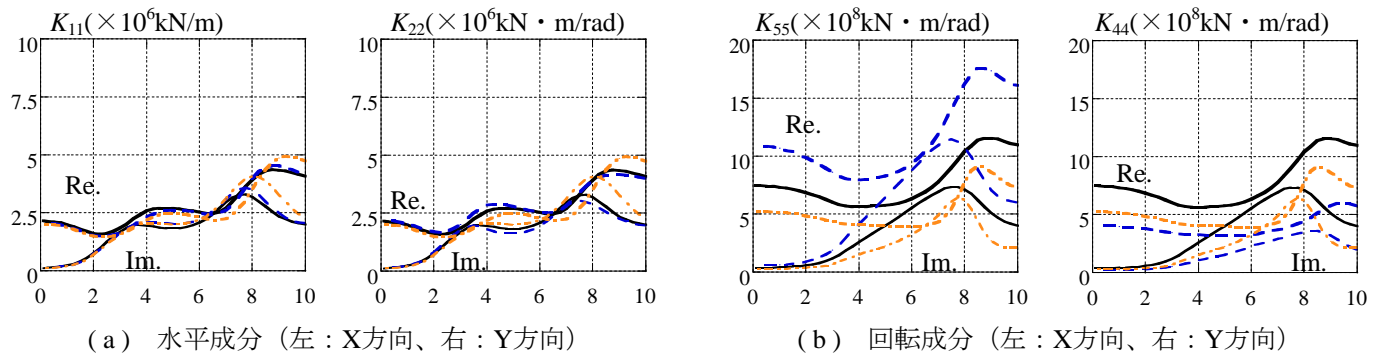


図7 インピーダンスの比較（基礎形状）（横軸：振動数(Hz)）

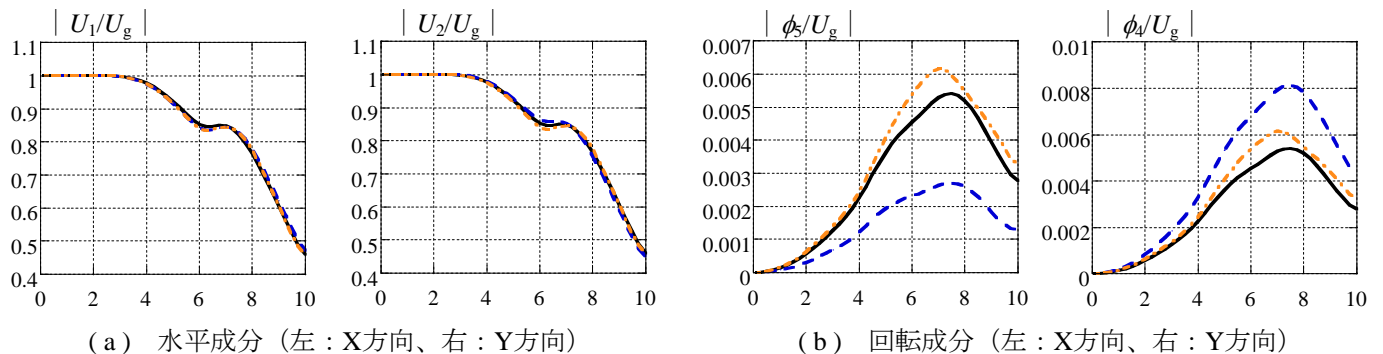


図8 基礎入力動の比較（基礎形状）（横軸：振動数(Hz)）