# 異種基礎建物のねじれに関する研究

### 弾性地盤上の異種基礎の遠心模型実験

# 西尾博人・長尾俊昌・真島正人

Keywords: pile foundation, spread foundation, dip bearing stratum, centrifuge model test, FEM analysis, torsion 杭基礎,直接基礎,傾斜した支持層,遠心模型実験,FEM解析,ねじれ

# 1. はじめに

異なった基礎形式を併用する異種基礎は,従来はでき るだけ避ける基礎形式とされていた.しかしながら,支 持層の傾斜や建物の計画上の理由などによって,異種基 礎とせざるを得ないことは比較的少なくない.異種基礎 では,支持性能や変形性能が基礎形式によって異なるた め,常時の沈下の問題に加え,地震時のねじれの問題が あると言われている<sup>1)</sup>.異種基礎の地震時の被害につい ては,地盤の変状が主原因となった事例を除くと,通常 の基礎に比較して特に多くはないとの報告<sup>2)</sup>もあり,適 切な評価を行うことで安全な異種基礎を設計することは 十分可能であると思われる.本報告は,異種基礎の地震 時の挙動のうち現状で不明な点の多い,ねじれの問題に ついて検討するために実施した遠心模型実験と,そのシ ミュレーション解析の結果について述べる.

### 2. 実験方法

異種基礎の挙動を把握するため,模型基礎を用いて遠 心力場での振動実験を実施した.遠心模型実験とするこ とで,小型の模型で大きな加振力を与えられるととも に,実物を想定した応答を得ることができる.表-1に想 定した実大基礎と模型の関係を示す.実験はタイプA, タイプBの2つのケースについて行った.タイプAは支持

> 表 -1 想定した実大基礎と模型の関係 Comparison of actual size foundation and model

		模型	実物換算
杭	材質	PNSLOA	コンクリート
	直径	10mm	500mm
	肉厚	1mm	中実杭を想定
基礎 917°A	長辺	160mm	8.0m
	短辺	80mm	4.0m
	荷重	1.48kN/m <sup>2</sup>	74kN/m <sup>2</sup>
基礎 <b>917</b> B	長辺	160mm	8.0m
	短辺	80mm	4.0m
	荷重(低層部)	0.54kN/m <sup>2</sup>	27kN/m <sup>2</sup>
	荷重(高層部)	6.2kN/m <sup>2</sup>	310kN/m <sup>2</sup>







図 -2 試験体(タイプB) Test specimen (typeB)

層が傾斜し,直接基礎と杭基礎の組み合わせとなる場合 である.タイプBは高層部が杭基礎,低層部が直接基礎 となる(支持層が異なる)場合である.図-1にタイプA の試験体断面を図-2にタイプBの試験体断面を示す.写 真-1には,タイプAの試験体の全景を写真-2にはタイプB を示す、模型基礎は剛体としてアルミプレートを用い、 想定した建物重量となるようにウェイトをネジ止めし た.タイプBでは,高層部分(9×8cm)におもりとなる プレートをネジ止めし,プレートの枚数を変えることで 高層部と低層部の重量比を変えられる構造とした.模型 杭はアルミパイプであり,杭頭部が固定条件となるよ う,ネジロック剤を塗布して基礎に杭径の2倍差し込ん だ.直接基礎部分の基礎は,シーラントを用いて基礎底 面と支持層表面を接着した.模型地盤は円柱状であり, せん断リングで構成されたせん断土層の内部に打設し た.模型地盤の材料は線形挙動を得るため2液性のシリ コン(表-2)を用いたが,硬化したシリコン材の応力と ひずみの関係は,線形弾性とはならず図-3に示すような 非線形弾性の特性が確認された。

加振実験は50g場の遠心力場で行った.実験では,振動台,基礎,地盤表面の加速度及び,模型杭のひずみを 測定した.図-4に模型杭のひずみ測定位置を示す.タイ プAでは杭1で4断面,杭2で3断面,タイプBでは杭 1,杭2とも4断面測定した.

種別	主剤	硬化剤	密度(g/cm³)	<b>変形係数</b> * (kN/m²)
地盤1	<b>X</b> -32-1695	СХ-32-1695	1.57 ~ 1.61	2000 ~ 5000
地盤 2				13000 ~ 16000
*50g場での推定値				

表 -2 地盤材料の物性値 Properties of ground materials

## 3. 解析方法

シミュレーション解析は,図-5,図-6に示す3次元の FEMモデルを用いて実施した.模型地盤及び基礎はソ リッド要素とし,杭はビーム要素である.解析では地盤 を線形弾性体と仮定し,計算時間を短縮する目的でモー ド合成法を用いた.杭基礎部分の基礎底と地盤表面は 別々の節点を用いてモデル化し,両者の間で力のやり取 りはないものとした.

解析に用いた材料定数を表-3に示す.地盤材(シリコン)の密度については材料試験結果を基に設定した.弾 性係数はひずみレベルに応じて変化するため試験結果から特定することが困難である.そこで,材料試験結果と 整合する範囲で基礎の最大応答値が実験値と概ね一致す



写真 -1 試験体(タイプA) Test specimen (typeA)



写真-2 試験体(タイプB) Test specimen (typeB)



Stress-strain relationship of silicone



る値とした.減衰定数については数値計算にモード合成 法を用いてることからモード減衰で与え,1~5次モード に対してタイプAでh=0.08,タイプBでh=0.05とした.

杭頭の固定条件はタイプAでは固定としたが,タイプ Bでは,後述するように,実験結果では杭頭部よりも杭 中間部での杭の曲げモーメントが大きく, 杭頭部が固定 と見なせないことから,解析では杭頭部の梁要素の曲げ 剛性を低下させることによって(杭1:0.1倍 杭2: 0.2倍) 実験結果との整合を試みた.

#### 実験及び解析結果 4.

## 4.1 タイプA

実験では,加速度レベルを変化させた正弦波を入力波 として用いた.加振方向は図-5のZ方向とX方向とし, 図-7に示す位置での加速度と杭のひずみを測定した.図-8,図-10にZ方向,X方向の入力波(振動台上での測定 結果)の一例を示す(表示のスケールは応答値を想定し た実スケールに換算した値).

図-9に,図-8の入力波によるZ方向の基礎の応答加速 度の時刻歴を示す.図で測定点a(杭基礎部分)と測定 点b(直接基礎)の差である相対加速度は,基礎のねじ れ応答を示している.その大きさはa及びb部分とほぼ 同じ大きさとなっており,基礎には大きなねじれが生じ ていると言える.図には解析結果を併記したが,解析結 果は,基礎のねじれを含め,実験結果を非常によく再現 していることが分かる.解析による基礎の変形状況か ら、基礎のねじれは地盤の応答が原因であることが確認 された.即ち,杭基礎直下と直接基礎直下の地表面の応 答が異なり、それぞれの基礎部分が地表面の応答の影響 を強く受けるため,基礎にはねじれが生じたと言える.



### 表-3 解析に用いた材料定 Physical standerds for analysis

図-7 加速度と杭応力の測定位置 Measurement points of acceleration and pile stress



図-9 基礎の応答加速度の比較 (タイプA Z 方向) Comparison of acceleration of foundation (typeA Z-direction)

(Gal)

加速度(

(Gal)

100

図 -11 に,図-10の入力波によるX方向の基礎の加速 度の時刻歴を示す.測定点cと測定点dの差である相対 加速度は、実験でも解析でもほとんど生じておらず基礎 にはねじれが生じていないことが分かる.測定点c,測 定点dの加速度についても実験と解析でよく一致してお り、Z方向で設定した各材料定数が妥当であったことが 確認できた.

図-12,図-13には杭のひずみゲージから求めた Z 方向 及びX方向の杭頭部の曲げモーメントの時刻歴を,また 図14,図-15にはZ方向,X方向の最大曲げモーメント 分布を示した.解析による杭の曲げモーメントはZ方 向,X方向共にやや大きめながら実験結果と良い対応を 示している(杭1の杭頭部の曲げモーメントでは実験と 解析の差がやや大きい.これは実験における杭頭部が完 全固定でなかったためと思われる). 杭の曲げモーメン トが最も大きくなるのは杭長が長い外端部ではなく,建 物の中央部の杭であり, 文献1)の場合とやや異なった 結果となった.曲げモーメント分布を見れば明らかなよ うに,杭頭部のせん断力が大きくなるのも中央部の杭で あり,本実験では中央部の杭が端部の杭に比較してより 厳しい条件下にあると言える.











解析







図-15 杭の最大曲げモーメント分布の比較 (タイプA X 方向) Comparison of pile moment distribution (typeA X-direction)

### 4.2 タイプB

実験は高層部の重量を変えた3ケースについて,正弦 波によるZ方向とX方向の加振を行った.図-16,図-18 はそれらの実験ケースの中の1例であり,基礎のねじれ が最も大きくなる,高層部のおもり6枚の場合の入力加 速度(測定値)である.

図-17に,図-16の入力波によるZ方向の基礎の応答加 速度の時刻歴を示す.同図には解析の結果も併記してい る.直接基礎部分,杭基礎部分,直接基礎と杭基礎部分 の加速度の差より求めた相対加速度(ねじれ)は解析結 果とよく一致しており,解析結果はねじれ挙動を含め実 験結果をよく再現できていることが分かる.

図 -19 に,図 -18 の入力波による X 方向の基礎の加速 度の時刻歴を示す.タイプA と同様に,相対加速度は, 実験でも解析でもほとんど生じておらず基礎にはねじれ が生じていないことが分かる.測定点c,測定点dの加速 度についても,実験と解析でよく一致しており,タイプ Bの場合もZ方向と同一の材料定数で実験結果をよく再 現できている.

図-20,図-21に,杭のひずみゲージから求めた Z方向, X方向の杭頭の曲げモーメントの時刻歴を示す.Z方向 では,杭1,杭2の曲げモーメントの時刻歴は最大振幅 はほほ一致しているものの,位相について見ると実験で は周期が短く,解析結果と位相のずれを生じている.こ れに対して,X方向の結果ではZ方向の場合のような位 相のずれはほとんど生じておらず,解析がやや小さめな がら実験結果をよく再現できている.

図-22,図-23は,各深度におけるZ方向,X方向の杭 の曲げモーメントの最大値の分布を示したものである. Z方向の加振時には,図から明らかなように曲げモーメ ントの最大値は杭頭部ではなく地中部で生じており,杭 頭部の固定度が低いものと思われる.解析結果は,杭頭 部で実験結果との対応が良いが,地中部では実験に比較 して小さい(特に杭2).X方向では,解析結果は実験結 果より小さめの値となり,特に杭1の杭頭部で小さい.こ れは解析ではZ方向の実験結果から杭頭部の固定度が低 い状態を設定しており,実験ではX方向の結果はZ方向 ほど固定度が落ちていないためであると思われる.

このように実験では,Z方向とX方向では,基礎の応答は異なった挙動を示す.そこで,あらためてZ方向の挙動について注目すると,Z方向では,基礎の加速度の対応が良いにも関わらず,図-20の曲げモーメントの時刻歴において実験との対応(特に位相)が良くない.これは,実験においては解析で想定していない挙動が杭基礎部分で生じているためと思われる.



図 -16 入力加速度の時刻歴 (タイプB Z 方向) Time history of input acceleration (typeB Z-direction)











Comparison of acceleration of foundation (typeB X-direction)

その最大の要因と考えられるのが,基礎のロッキング によって杭部分の基礎底面と地表面が接触し,大きな水 平抵抗が生じていると思われることである.即ち,高層 部重量が原因となる基礎のロッキング動によって,高層 部直下の基礎底面が接触と剥離を繰り返し,その結果と してスウェイ方向の剛性変化と杭の応力に複雑な挙動を 与えていると推定される.今回の実験ではZ方向はロッ キングが生じやすい形状となっており,その影響がZ方 向に顕著に現れた結果であると思われる.この点につい ては杭基礎底面の接触と剥離を考慮した解析を実施し, 確認する予定である.

図 -24 には,高層部重量とZ方向の基礎の相対加速度 (ねじれ応答)の関係を示した.図に示した加速度は,最 大値ではなく応答の安定する時刻8秒以降の最大値であ る.図から,高層部重量が大きいほど相対加速度(ねじ れ)が大きくなる傾向が明瞭であり,解析においてもそ の傾向は再現されている.

# 5. まとめ

本報告では,異種基礎のねじれについて検討するため に実施した,遠心模型実験とそのシミュレーション解析 の結果について報告した.検討した異種基礎は,杭基礎 と直接基礎の組み合わせであり,支持層が傾斜している 場合と支持層が異なる場合の2種類である.実験及び解 析結果から,以下の知見が得られたと考えている.

- (1)異種基礎のねじれ挙動は、3次元のFEM解析で再現可能である.
- (2)高層部重量の慣性力によってねじれが生じる場合,基礎のロッキング動は杭の応力に大きく影響する.

### 参考文献

- 三浦,梅野「併用基礎構造物の弾塑性地震応答解析 その1~その2」,日本建築学会大会,pp.397-400,1999
- 2) 松尾,加倉井他「兵庫県南部地震における異種基礎建築物の被害調査」日本建築学会大会,pp.711-712,2000



図 -24 高層部重量と応答値の関係 (910°BZ方向) Relationships between weight of high-rize area and relative acceleration (typeBZ-direction)



図 -23 杭の最大曲げモーメント分布の比較 (タイプB X 方向) Comparison of pile moment distribution (typeB X-direction)