

異種基礎建物のねじれ挙動に関する研究

—杭頭モーメントの簡便な評価法—

西尾博人・長尾俊昌・真島正人

Keywords: pile foundation, spread foundation, dip bearing stratum, simple method, FEM analysis, torsion

杭基礎、直接基礎、傾斜した支持層、簡易手法、FEM解析、ねじれ

1. はじめに

異なる基礎形式を組み合わせる異種基礎は、組み合わせた基礎によっては、水平剛性がそれぞれ大きく異なるため、次に示す2つの問題を生じる可能性がある。1つは、形式の異なる基礎間で負担する水平力の移行の問題であり、もう1つは建物がねじれることにより特定の基礎の負担する水平力が大きくなることである。特に杭基礎と直接基礎を組合せた異種基礎の場合、上記の問題によって特定の杭に水平力が集中する可能性があり、その結果、杭が損傷する恐れがある。

本報は、直接基礎と杭基礎を組み合わせる異種基礎建物について、基礎の剛性差による荷重移行とねじれ挙動が杭頭モーメントに与える影響を評価する簡易な手法を提案し、静的弾性挙動の範囲を対象に3次元FEM解析との比較を行った結果について述べる。

2. 基礎のねじれを考慮した杭応力評価法

図-1に異種基礎建物に水平荷重が作用した場合の杭頭モーメントの評価方法を示す。水平荷重によって生じる杭頭モーメントは、地盤及び杭が弾性範囲では、杭頭の変位と杭頭モーメントの関係が比例関係にあることを利用して杭の水平変位より算定する。ここで、水平荷重時に生じる杭頭モーメントは、水平力の作用方向のモーメントのみを対象とし、水平力の作用方向と直交する方向のモーメントは考慮しないものとする（変位についても同様）。

杭頭モーメントの算定手順は大きく分けると次の2つのステップからなる（図-1）。

step1 各杭位置の変位の算定（①～⑧）

step2 杭位置の変位からモーメントの算定（⑨）

step1で求める杭位置の変位は水平力による並進変位

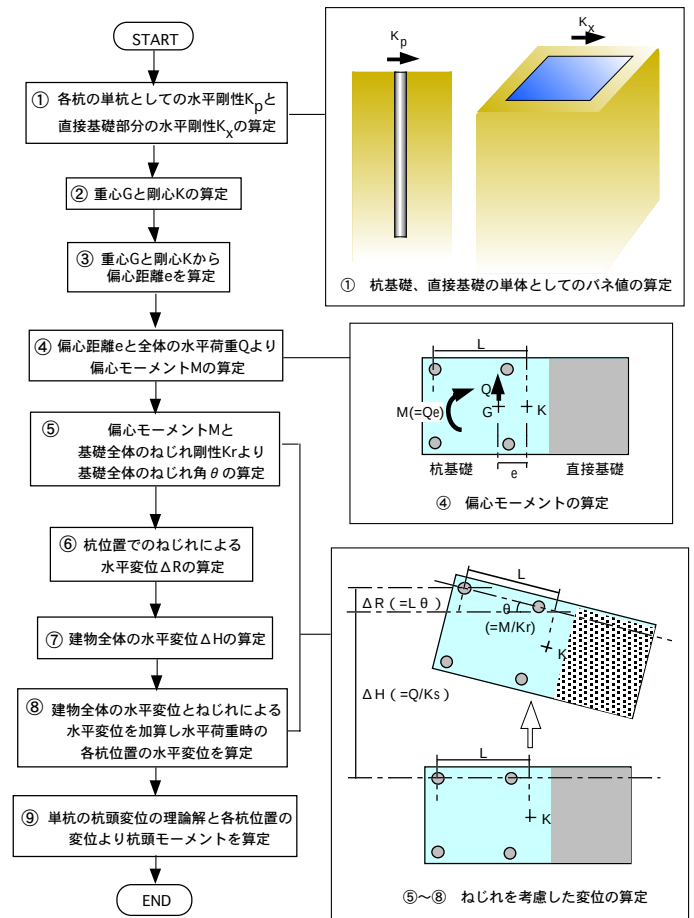


図-1 杭応力の評価方法

Estimation method of bending moment at pile head

ΔH と基礎のねじれによる変位 ΔR を別々に求め、これらを加算して求める。 ΔR は基礎の水平剛性から求めた剛心と建物重量より決まる重心から、重心に水平力が作用した場合の基礎の偏心モーメントを求め、これを基礎のねじり剛性で除して求める（図-1の①～⑥）。

step2では、予め求めておいた杭頭変位とモーメントの関係を利用して、step1で求めた変位を基に杭頭モーメントを算定する。

3. 基礎の水平剛性の算定方法

簡易手法では杭頭モーメントの評価を手計算レベルで実現することを目的としている。そのため、基礎の水平剛性は、以下に示す条件を設定し、弾性論の解から算定した。

- ・地盤は一様な弾性地盤とする。
- ・杭先端はピンとし、水平変位は拘束する。
- ・基礎同士の相互作用は考慮しない。

3.1 直接基礎

直接基礎の加力方向のバネ値 K_x は(1)式¹⁾より求める。

$$K_x = \frac{\pi b E_s}{(2-\nu)(1+\nu)} B_x \quad (1)$$

$$B_x = (2-\nu) \left[\frac{b}{c} (1-\nu) \log \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{c}{b} \right) + \log \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{b}{c} \right) \right]^{-1}$$

また、建物全体のねじれ剛性を算定する際に考慮する直接基礎のねじれ剛性 K_θ は(2)式¹⁾より求める。

$$K_\theta = \frac{\pi b^3 E_s}{4(1-\nu)(1+\nu)} B_\theta \quad (2)$$

$$B_\theta = 4 \frac{c}{b} \left\{ 1 + \left(\frac{c}{b} \right)^2 \right\} \left[3 \left\{ \log \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{c}{b} \right) + \frac{c}{b} \log \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{b}{c} \right) \right\} \right]^{-1}$$

E_s : 地盤のヤング係数 ν : 地盤のポアソン比
 b : 加力方向と並行する辺の長さの1/2
 c : 加力方向と直交する辺の長さの1/2

3.2 杭基礎

杭頭部のバネ値 K_p は杭が短い場合も考慮できるよう有限長杭の理論式である(3)式²⁾より求める。

$$K_p = \frac{4E_p I \beta^3}{\psi_1} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_b B}{4E_p I}}, \quad k_b B = 0.65 \left(\frac{E_s B^4}{E_p I} \right)^{\frac{1}{12}} \frac{E_s}{1-\nu^2}, \quad Z = \beta L$$

$$\psi_1 = \frac{\cosh Z \cdot \sinh Z - \cos Z \cdot \sin Z}{\sinh^2 Z + \cos^2 Z}$$

また、杭頭のモーメント M_0 は杭頭変位を基に(4)式より求める。

$$M_0 = \frac{K_p y}{2\beta} \psi_3 \quad (4)$$

$$\psi_3 = \frac{\cosh Z \cdot \sinh Z + \cos Z \cdot \sin Z}{\sinh^2 Z + \cos^2 Z}$$

E_s : 地盤のヤング係数 ν : 地盤のポアソン比
 E_p : 杭体のヤング係数 I : 杭の断面二次モーメント
 B : 杭径 L : 杭長 y : 杭頭変位

以上を示した方法により、基礎の水平剛性を評価し、異種基礎としての剛性を評価することで、荷重移行とねじれを考慮した杭頭モーメントの評価が可能となる。

4. 提案手法の検証

簡易手法の妥当性を確認するため、地盤条件、杭本数、建物の重量バランスを変えた18ケースについて3次元FEM解析を行い、簡易手法との比較を行った。

4.1 検討モデルと検討ケース

表-1に全解析ケースの一覧を、図-2に3次元FEMモデルの一例(ケースA10)の平面図を、図-3に全シリーズの断面図を示す。いずれの基礎も直接基礎と杭基礎を組合せたタイプの異種基礎であり、支持層が傾斜している場合(Aシリーズ)と、杭基礎と直接基礎で支持層が異なる場合(Bシリーズ)との2種類である。各シリーズで杭本数を10~20本、杭基礎部の建物重量を30~300(kN/m²)と変更したケースについて検討を行った。

3次元FEMモデルでは地盤、建物基礎をソリッド要素、杭をビーム要素でモデル化し、基礎は完全剛とした。直接基礎部分では地盤と基礎底盤の節点を共有させたが、杭基礎部分では地盤と基礎底盤の節点を別々に設け、杭部分のみで荷重のやり取りを行うようモデル化した³⁾。水平荷重は建物重量に対して震度0.1相当の力を静的にY方向に与えた。

4.2 計算結果

図-4にケースA11, B11のFEM解析による基礎の変形図を示す。どちらのケースも上部構造の条件は同じで、杭の条件が異なる。この二つのケースでは杭基礎部分と直接基礎部分の建物重量が等しいため、基礎のねじれは杭基礎部分と直接基礎部分の剛性差によって生じ、ケースA11では杭基礎部分の変形が大きく、ケースB11では直接基礎部分の変形が大きくなっている。

表-2に簡易手法と3次元FEM解析の杭頭モーメントの比較を示す。まず、FEM解析では、各杭毎に異なるモーメントが算出されるが、簡易手法では1~4通りは同じモーメントが算定される。そのため、FEM解析の結果から1~4通りの各通りの杭頭モーメントの平均値を求め、この値と簡易手法による杭応力の比較を行う。

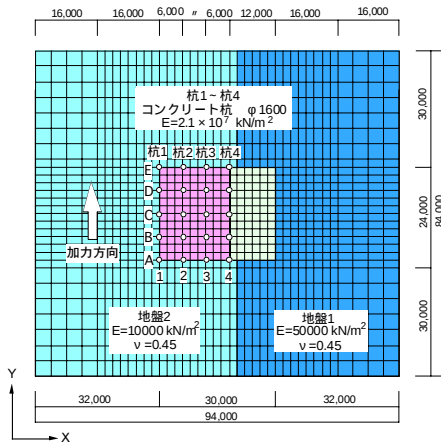
ケースA11のFEM解析の結果では、1から4通りに向かうに従って、杭が短くなる(杭の剛性が高くなる)ので、基礎の変位の大きさと杭のモーメントの大きさが対応しない。杭のモーメントの大きさはFEM解析の結果では、4→3→1→2の順となるが、簡易手法もほぼ同様である。FEM解析の平均モーメントに対する比率も0.93~1.13と良い対応を示している。

次に、各杭の長さが等しく剛性が同じであるケースB11では、変位が大きい4通り側の杭ほどモーメントが大きくなる傾向が見られ、ねじれにより杭頭モーメント

表-1 解析ケース一覧

List of analysis case

ケース名	支持層	杭基礎部		直接基礎部		杭本数	杭長 (m)			
		面積	重量(kN/m ²)	面積	重量(kN/m ²)		杭1	杭2	杭3	杭4
A11	傾斜地盤	24×18m	30	24×12m	30	20	20	18	12	6
A12	傾斜地盤	24×18m	150	24×12m	30	20	20	18	12	6
A13	傾斜地盤	24×18m	300	24×12m	30	20	20	18	12	6
A21	傾斜地盤	24×12m	30	24×18m	30	15	18	12	6	-
A22	傾斜地盤	24×12m	150	24×18m	30	15	18	12	6	-
A23	傾斜地盤	24×12m	300	24×18m	30	15	18	12	6	-
A31	傾斜地盤	24×6m	30	24×24m	30	10	12	6	-	-
A32	傾斜地盤	24×6m	150	24×24m	30	10	12	6	-	-
A33	傾斜地盤	24×6m	300	24×24m	30	10	12	6	-	-
B11	成層地盤	24×18m	30	24×12m	30	20	20	20	20	20
B12	成層地盤	24×18m	150	24×12m	30	20	20	20	20	20
B13	成層地盤	24×18m	300	24×12m	30	20	20	20	20	20
B21	成層地盤	24×12m	30	24×18m	30	15	20	20	20	-
B22	成層地盤	24×12m	150	24×18m	30	15	20	20	20	-
B23	成層地盤	24×12m	300	24×18m	30	15	20	20	20	-
B31	成層地盤	24×6m	30	24×24m	30	10	20	20	-	-
B32	成層地盤	24×6m	150	24×24m	30	10	20	20	-	-
B33	成層地盤	24×6m	300	24×24m	30	10	20	20	-	-

図-2 3次元FEMモデル
(ケースA10シリーズ平面図)

3D FEM model (plan of case A10 series)

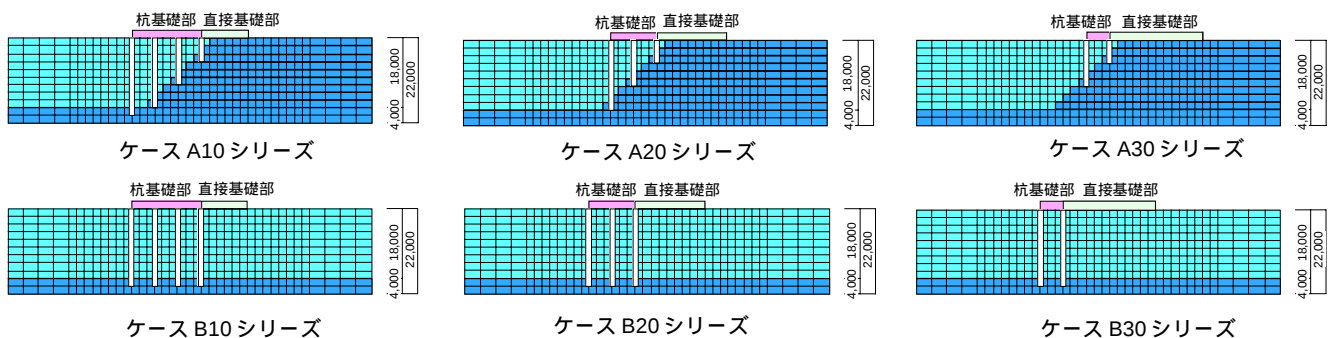


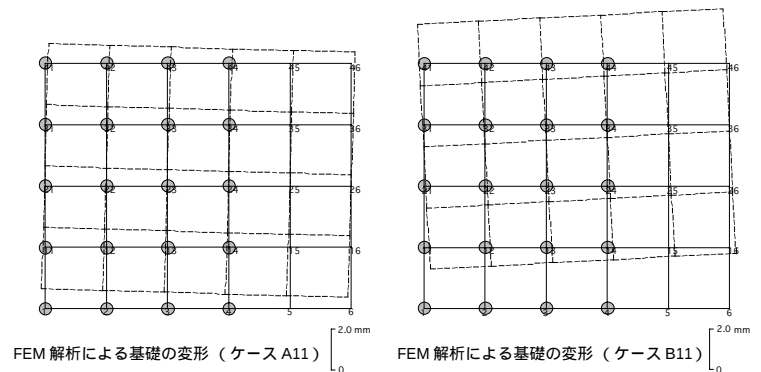
図-3 3次元FEMモデル (断面図)

3D FEM model (section)

が増加している。簡易手法では杭頭モーメントの大きさは変位に比例するため4→3→2→1となる。それに対してFEM解析では1通りの杭に3通りの杭と同程度のモーメントを生じている。このため、簡易手法のFEMに対する比率も1通りは0.67と2～4通り(0.93～1.07)に比べ対応が悪くなっている。

図-5にはケースA12, B12のFEM解析より得られた変形図を、表-3に簡易手法とFEM解析の杭頭モーメントの比較を示す。この二つのケースは前述したケースに比べ、杭基礎部分の水平力が直接基礎部分より大きい、杭基礎部分の変位が大きくなる結果となっている。表-3の杭頭モーメントについてみると、ケースA12では、4通り側の杭のモーメントが最も大きく、次いで1通りの杭が大きい。一方、ケースB12では建物全体のねじれの向きがケースB11(図-4)の結果と逆になっており、杭頭モーメントもほぼこれと対応している。

簡易手法のFEM解析に対するモーメントの比率はケースA12で0.91～1.15、ケースB12で0.75～0.98(1通りを除くと0.93～0.98)となっている。簡易手法による杭頭モーメントはケースB11と

図-4 3次元FEM解析によるケースA11, B11における基礎の変形
Displacement of foundation by 3D FEM (case A11, B11)表-2 ケースA11, B11における杭頭モーメントの比較
Comparison of bending moment at pile head (case A11, B11)

	3次元FEM解析 (ケースA11)				3次元FEM解析 (ケースB11)			
	杭1	杭2	杭3	杭4	杭1	杭2	杭3	杭4
A, E通り	150	132	160	399	257	241	257	295
B, D通り	127	114	152	395	228	206	218	252
C通り	122	110	150	394	222	197	209	242
各通りの平均値	135	120	155	396	238	218	232	267
簡易手法	146	136	145	387	160	198	236	274
(1.08)	(1.13)	(0.93)	(0.98)		(0.67)	(0.91)	(1.02)	(1.03)
1通り	2通り	3通り	4通り		1通り	2通り	3通り	4通り

単位はkNm、()内はFEM解析に対する比率

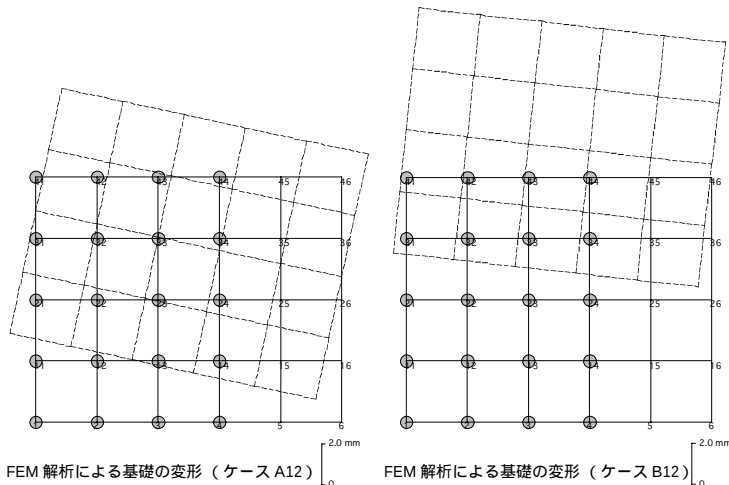


図-5 3次元FEM解析によるケースA12,B12における基礎の変形
Displacement of foundation by 3D FEM (case A12,B12)

表-3 ケースA12,B12における杭頭モーメントの比較
Comparison of bending moment pile head (case A12,B12)

	3次元FEM解析 (ケースA12)				3次元FEM解析 (ケースB12)			
	杭1	杭2	杭3	杭4	杭1	杭2	杭3	杭4
A,E通り	698	562	625	1378	1188	954	880	874
B,D通り	586	488	593	1360	1019	797	748	764
C通り	562	471	585	1355	983	760	716	738
各通りの平均値	626	514	604	1366	1079	852	794	803
簡易手法	697	590	551	1251	806	794	782	770
	(1.11)	(1.15)	(0.91)	(0.92)	(0.75)	(0.93)	(0.98)	(0.96)
	1通り	2通り	3通り	4通り	1通り	2通り	3通り	4通り

単位はkNm、()内はFEM解析に対する比率

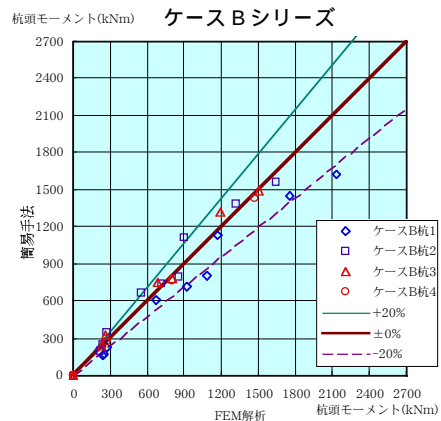
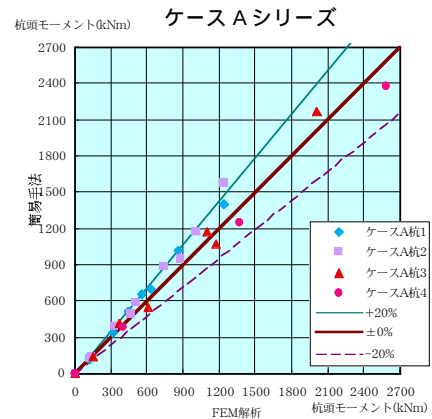


図-6 3次元FEM解析との杭頭モーメントの比較
Comparison of bending moment at pile head with 3D FEM analysis

同様に、1通りの杭を除いて、FEM解析の結果と概ね良い対応を示しているといえる。

Bシリーズの1通りにおいて、簡易手法による杭頭モーメントとFEM解析の対応が悪いのは、簡易手法では基礎間の相互作用を考慮していないためと思われる。

Bシリーズの3次元FEM解析の結果を見れば分かるように、杭頭モーメントは外周部ほど大きくなる傾向がある(1通りで言えばC→A方向、A通りで言えば4→1通り)。これは地盤が連続体であるために基礎の変位が他の基礎の変位に影響を与える(相互作用)ためである。相互作用の影響は、外周部の杭ほど小さく、同じ杭でも相対的な水平剛性が高くなると考えられる。Aシリーズでは4→1通りに向って杭の水平剛性が小さくなり、杭頭モーメントに与える相互作用の影響が、Bシリーズほど顕著でないため簡易手法との対応が良いと思われる。

図-6はA,Bシリーズの全結果について簡易手法と3次元FEM解析との杭頭モーメントの比較を示す。簡易手法によるモーメントはAシリーズではやや高めに、Bシリーズではやや低めに評価される傾向にある。FEM解析の結果を正とした場合、どちらのケースも簡易手法はFEM解析の結果に対して概ね±20%の範囲に収まっている。

5. まとめ

直接基礎と杭基礎を組み合わせた異種基礎建物について、ねじれ挙動が杭頭モーメントに与える影響を評価する簡易な手法を提案した。本手法の妥当性を確認するため、静的弾性挙動の範囲を対象に、3次元FEM解析結果との比較を行った。その結果、簡易手法では、FEM解析の結果に対して、杭頭モーメントを概ね±20%の差で予測でき、簡易手法の有効性が確認できた。本手法では相互作用を考慮していないためBシリーズのような異種基礎に適用する場合には、杭頭モーメントを過少評価する場合がある。今後はこの点についてさらに検討していきたいと考える。

参考文献

- 1) 山原浩「環境保全のための防振設計」彰国社, pp118-129
- 2) 杉村, 平出「高強度プレストレストコンクリート杭の杭頭接合部の構造的な性能に関する研究」建設省建築研究所 建築研究報告 No112, 1987. 3, pp2-9
- 3) 長尾, 西尾他「異種基礎建物の遠心模型載荷実験 (その1) ~ (その2)」日本建築学会大会, pp667-670, 2002