広範囲な杭径の水平載荷試験結果に基づく砂質土地盤における単杭の水平地盤反力係数

COEFFICIENT OF SUBGRADE REACTION ESTIMATED FROM HORIZONTAL LOAD TEST DATA OF SINGLE PILES WITH WIDE RANGE DIAMETER IN SAND DEPOSIT

下村修一 — * 1 鈴木康嗣 — * 2

Shuichi SHIMOMURA — * 1 Yasutsugu SUZUKI — * 2

キーワード:

単杭, 水平地盤反力係数, 水平載荷試験, 砂地盤, N 値

Keywords:

Single pile, Coefficient of subgrade reaction, Horizontal load test, Sand, SPT blow count

In this paper, inversed coefficients of subgrade reaction (k_h) estimated from past horizontal load test data of single piles with wide range diameter in sand deposit are studied. As the result, reference k_h (k_{h0}) calculated with SPT blow counts (N-value) is smaller than the inversed k_{h0} in small N-value ground. The inversed k_{h0} obtained from the values at $y/B = 0.01$ (y : pile displacement, B : pile diameter) has good correspondence with the test data than that obtained from the values at $y = 1\text{cm}$. Further, the variation of the calculated k_{h0} based on B^{-1} and $y/B = 0.01$ is smaller than that based on the method of the AIJ recommendations.

1. はじめに

建築基礎構造設計指針(以下, 指針)¹⁾には, 杭の耐震設計に用いる水平地盤反力係数の評価方法として, 原位置水平載荷試験に基づく方法と共に既往の水平載荷試験結果に基づく水平抵抗算定式が示されており, 一般的な建築物の設計では, 水平抵抗算定式を採用することがほとんどである。水平抵抗算定式に用いる水平地盤反力係数は, 地盤の変形係数と杭径から基準となる水平地盤反力係数(以下, 基準水平地盤反力係数 k_{h0})を評価すると共に, 水平地盤反力が地盤の塑性地盤反力に達するまで, 変位が 0.1cm までは線形, 0.1cm 以降は変位の $1/2$ 乗に反比例する非線形で評価することが推奨されている(図 1)。その際, 基準水平地盤反力係数は地表面位置における杭の水平変位(以下, 基準変位)が 1cm 時の値としている。

指針には, 砂質土地盤の変形係数評価方法として標準貫入試験の N 値から推定する方法や孔内水平載荷試験から求める方法が示されている。N 値から地盤の変形係数 E_0 を評価する方法として, 吉中の報告²⁾に基づき $E_0=700\text{N}(\text{kN/m}^2)$ が示されている。この手法によれば, N 値がゼロや自沈の場合, 地盤の変形係数をゼロと評価することになる。一方, 田部井³⁾は自動落下法による N 値に限定して吉中と同様に N 値と孔内水平載荷試験から求まる変形係数の関係を再整理し N 値がゼロに近づいても地盤の変形係数がゼロに近づかないこと, $E_0=700\text{N}$ で評価した変形係数は孔内水平載荷試験から評価した値の下限値を与えることを示している。また, 砂質土の内部摩擦角と N 値との関係において, N 値がゼロに近づく場合でも内部摩擦角はゼロに近づかない関係が示されており^{4),5)}, N 値がゼロに近づいても地盤の強度や剛性がゼロに近づかないことを示唆している。

指針には, 杭径の影響の評価方法として吉中の報告²⁾に基づき, 基準水平地盤反力係数 k_{h0} が杭径の $3/4$ 乗に反比例する評価方法が

示されている。しかし, 吉中の報告にある水平方向の平板載荷試験から求めた地盤反力係数の対象変位は 1cm ではないこと, 試験を行った載荷盤の直径は最大 1200mm であることから, 杭径の影響については検討の余地が残されている。一方, 文献⁶⁾では基準変位を 1cm とした場合に大口径杭では不合理な面が認められることから杭径の 1% とした検討が行われている。道路橋示方書⁷⁾では基準変位を許容変位と合わせて杭径の 1% とし, 水平地盤反力係数は杭径の $3/4$ 乗に反比例する関係を採用している。しかし, 小口径杭から大口径杭までの広範囲な杭径の水平載荷試験結果からこれらの課題を総合的に検討した報告^{8),9)}は少ない。

そこで本研究では, 砂質土地盤を対象として広範囲な杭径の既往の水平載荷試験結果を再度収集・分析し, 水平地盤反力係数の評価における基準変位および杭径の影響について検討した。検討にあたっては水平載荷試験結果の杭頭荷重と地表面における杭水平変位の関係を満たすように, 一様地盤中の弾性支承上の梁の解(通称, Chang 式)^{10),11)}に基づく逆解析から逆算水平地盤反力係数 k_h を評価した。そのため, 本研究の内容は一様地盤中の単杭に対して, 杭頭慣

図 1 指針における水平地盤反力係数の評価方法

*1 日本大学生産工学部建築工学科 専任講師・博士 (工学)
(〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

*2 鹿島建設技術研究所都市防災風環境グループ グループ長・博士 (工学)

*1 Assistant Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

*2 General Manager, Disaster Prevention and Wind Engineering Group, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

性力が作用した場合の杭の水平地盤反力～杭頭変位関係にのみ適用
できることに注意されたい。

2. 水平載荷試験データおよび逆算 k_h

表 1 に検討対象とした水平載荷試験データの一覧を示す。全て国内の砂質土地盤における杭頭拘束条件が自由な単杭の結果であり、杭頭部付近では地盤改良は行われていない。文献¹⁰⁾の小口径杭(杭径 $\phi 400\sim 1100\text{mm}$)16 データに、大口径杭(杭径 $\phi 1200\sim 3000\text{mm}$ の杭と壁厚 600mm で壁幅 B2200～6600mm の壁杭)7 データ^{11)～13)}を加えた。

表 1 の N 値は、Chang 式^{1),9)}を用いた収束計算により、水平載荷試験の地表面変位 1cm 時の逆算 k_h を求めて(1)式から杭の特性係数 β を算出し、地表面から $1/\beta$ の範囲の平均 N 値とした。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}}$$

(1)

ここに、 k_h ：水平地盤反力係数(kN/m^3)、 B ：杭径(m)、 E ：杭のヤング率(kN/m^2)、 I ：杭の断面 2 次モーメント(m^4)である。杭のヤング率や断面 2 次モーメントは各文献に記載されている値を用いた。ヤング率が文献に記載されていない場合、コンクリートは $2.05 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ 、鋼材は $2.05 \times 10^8 \text{kN/m}^2$ を仮定した。

杭頭部付近の平均 N 値は 3～16 で、比較的緩い砂質土地盤における試験データが多い。表層部の土質構成は比較的単純で、砂質土を主体としているが一部では地表から $1/\beta$ の範囲に粘性土を挟んでいる。そこで、地盤の変形係数の評価にあたっては粘性土の層厚毎にパターン分けをした。図 2 に示すように、多くの地盤は深度 $1/\beta$ までの範囲において粘性土層を含まないパターン①である。粘性土層厚の合計が $1/10\beta$ 以下であるパターン②では、粘性土層の影響は小さく、N 値も得られていないことから粘性土層を無視した。粘性土層厚の合計が $1/10\beta \sim 1/3\beta$ 程度あるパターン③では、粘性土も含めて変形係数を N 値から算出した。なお、粘性土層厚の合計が $1/3\beta$ 以上の場合は検討対象としていない。

図 3 に杭頭水平荷重～載荷点位置における杭水平変位関係を示す。小口径杭は鋼管杭主体であり、比較的大きな水平変位まで杭体は弾性範囲内に収まっている。一方、大口径杭は場所打ちコンクリート杭が多いため、比較的小さな変位で杭体が塑性化する。大口径杭の曲げに関する弾塑性性状を評価するための情報を文献から得ることは難しく、逆に弾性範囲内に限った扱いとした場合には基準変位の検討が困難である。そこで、大口径杭においても比較的大きな変位まで杭体が弾性であると仮定して逆算 k_h を算出した。仮に、Chang 式^{1),9)}に当てはめて考えれば、杭の曲げ剛性が半分に低下したとすると、逆算 k_h は 3 割程度大きくなる。

3. 小口径杭の逆算 k_h

Chang 式^{1),9)}では、杭の載荷点位置における変位 $y_{top}(\text{m})$ は(2)式で表される。

$$y_{top} = \frac{(1 + \beta h)^3 + 1/2}{3EI\beta^3} H + \frac{(1 + \beta h)^2}{2EI\beta^2} M_{top}$$

(2)

ここに、 h ：地表面位置から載荷点位置までの杭の突出長(m)、 H ：載荷水平力(kN)、 M_{top} ：載荷点位置の曲げモーメント($\text{kN} \cdot \text{m}$)である。本研究で対象とした試験データは杭頭自由条件であるため、 M_{top}

表 1 検討対象とした水平載荷試験データ一覧

No.	杭			杭頭部付近の地盤			文献 No.
	径 (mm)	種類・工法	長さ (m)	土質	N 値	パターン (図2)	
1	400	鋼管コンクリート	15.0	細砂	12	①	10
2	508	鋼管打撃	8.0	礫混砂	3	③	10
3	508	鋼管回転	8.0	礫混砂	3	③	10
4	600	鋼管ソイル	24.1	礫混砂	5	①	10
5	609.6	鋼管回転	14.7	細砂	5	②	10
6	609.6	鋼管回転	12.6	細砂	5	②	10
7	609.6	鋼管打撃	24.0	細砂	12	①	10
8	800	鋼管ソイル	25.8	砂	3	①	10
9	800	鋼管ソイル	25.8	砂	4	①	10
10	800	鋼管回転	26.4	細砂	7	③	10
11	914.4	鋼管打撃	26.0	砂	3	①	10
12	914.4	鋼管中掘り	26.0	砂	3	①	10
13	914.4	鋼管中掘り	26.0	砂	3	①	10
14	1000	鋼管打撃	46.0	細砂	10	①	10
15	1072.2	鋼管中掘り	19.5	砂	5	①	10
16	1072.2	鋼管打撃	19.5	砂	5	①	10
17	1200	場所打ちコンクリート	21.6	細砂	16	①	11
18	2200	場所打ちコンクリート	40.0	砂	5	③	12
19	2200	場所打ちコンクリート	70.0	砂	5	③	12
20	3000	場所打ちコンクリート	70.0	砂	6	③	12
21	2200	場所打ちコンクリート (壁杭 短辺幅0.6m)	19.7	砂	9	①	13
22	4400	場所打ちコンクリート (壁杭 短辺幅0.6m)	19.7	砂	9	①	13
23	6600	場所打ちコンクリート (壁杭 短辺幅0.6m)	19.7	砂	9	①	13

図 2 地盤の変形係数評価方法

図 3 杭頭水平荷重～載荷点位置における杭水平変位

はゼロとし、(2)式で得られる杭の特性係数 β を用いて(1)式から逆算 k_h を算出した。

また、地表面位置における杭変位 $y(m)$ は(3)式で求まる。

$$y = \frac{1 + \beta(h + h_0)}{2EI\beta^3} H \quad (3)$$

ここに、 $h_0 = M_{top}/H = 0$ である。指針の水平抵抗算定式では、砂質土地盤における単杭の基準水平地盤反力係数を(4)式で評価する。

$$k_{h0} = 80E_0 \bar{B}^{-3/4} \quad (4)$$

ここに、 k_{h0} : 基準水平地盤反力係数(kN/m^3)、 E_0 : 地盤の変形係数(kN/m^2)、 $\bar{B}$: 無次元化杭径(杭径を cm で示した無次元数値)である。本研究では、まずは地盤の変形係数を指針に示されている(5)式で評価する。

$$E_0 = 700N \quad (5)$$

ここに、 N : N 値である。

小口径杭(表 1 の No.1~16)の逆算 k_h を、(4)式から得られる推定 k_{h0} で除した逆算 k_h /推定 k_{h0} と地表面位置の杭変位(以後、杭頭変位)の関係を示す。同図には、指針に示されている水平地盤反力係数 k_h が杭頭変位の $1/2$ 乗に反比例する(6)式の関係を示す破線で併記した。

$$k_h = k_{h0} \bar{y}^{-1/2} \quad (\bar{y} > 0.1) \quad (6)$$

ここに、 k_h : 水平地盤反力係数(kN/m^3)、 $\bar{y}$: 無次元化杭変位(変位を cm で示した無次元数値)である。データが指針通りであれば、図 4 の杭頭変位 $1cm$ 時の逆算 k_h /推定 k_{h0} は 1.0 を通る。しかし、 N 値が比較的大きなデータはほぼ指針の評価式付近に分布しているものの、 N 値が小さなデータは N 値が小さいほど逆算 k_h /推定 k_{h0} が大きくなる傾向を示している。

田部井³⁾の報告では、変形係数と N 値の関係は特に N 値が小さな範囲で大きくばらついているので、 $E_0=700N$ の評価では、実験データの下限值に相当する変形係数を与えている。そこで、前述のとおり N 値がゼロに近づく時、変形係数はゼロに近づかないことを考慮し、(7)式を定義した。

$$E_0 = 700(N + \alpha) \quad (7)$$

ここに、 α : 定数である。図 5 は田部井³⁾による砂質土のデータに(7)式の関係を示す破線を併記したものである。同図では $\alpha=2, 3, 5$ を採用し、全体的に変形係数を大きく評価するが、 N 値が小さな範囲でより評価値の増加割合が大きくなる。図 5 より、 $\alpha=3$ とした(8)式とすると N 値が小さな範囲で平均的な変形係数 E_0 を与えるとした。

$$E_0 = 700(N + 3) \quad (8)$$

孔内水平載荷試験の変形係数 E_b を求める時の地盤の変位やひずみレベルと、水平載荷試験の杭頭変位 $1cm$ 時の地盤のひずみレベルはいずれも明確ではなく、必ずしも両者は対応していない。そのため、図 5 で相関が良い関係が必ずしも最良ではないが、定性的な評価の指標としての使用と考え、以降では(8)式で検討を進める。なお、(8)式は N 値が 3 以上の砂地盤に用いることとする。

図 4 の縦軸を、(8)式で評価した変形係数から求めた推定 k_{h0} に変

図 4 逆算 k_h /推定 k_{h0} ($E_0=700N$) ~ 地表面位置の杭変位 (小口径杭)

図 5 $E_0 \sim N$ (田部井³⁾に加筆・修正)

図 6 逆算 k_h /推定 k_{h0} ($E_0=700(N+3)$) ~ 地表面位置の杭変位 (小口径杭)

えて図 6 に示す。 N 値が比較的大きなデータの変化は少ないが、 N 値が小さなデータは同一杭頭変位で逆算 k_h /推定 k_{h0} が小さくなり、図 4 と比較して明らかにばらつきが小さくなっている。また、破線で示した指針の評価式はデータの中央付近を通ることが分かる。

このように、地盤の変形係数評価を(5)式から(8)式に変えることで、より精度の高い地盤反力係数が推定可能であると判断される。

4. 大口径杭の逆算 k_h

図 4、図 6 に大口径杭(表 1 の No.17~23)を追加し、杭径で区分して図 7 に示す。同図より、大口径杭のデータは(8)式を用いても依然としてばらつきが大きく、全体的に小口径杭のデータの上方に位置し、基準水平地盤反力係数を過小評価していることが分かる。これは、大口径杭ほど地盤の変形が深く遠くまで及び同一地表面変位に対して杭の傾斜角が小さくなり、杭頭変位 $1cm$ 時の地盤の平均的なひずみが相対的に小さく、逆算した地盤反力係数を大きめに評価

しているためと考えられる。従って、大口径杭も含めた場合の基準変位を、杭径によらない特定の変位(指針では 1cm)で定義することの難しさを示していると判断される。

そこで、図 7 の横軸を、杭頭変位を杭径で除した値に変えて図 8 に示す。なお、図 8 には水平地盤反力係数 k_h が杭頭変位の 1/2 乗に反比例する関係について、杭頭変位を杭頭変位/杭径に置き換えた下式の関係破線($y/B: 1\%$)および一点鎖線($y/B: 2\%$)で併記した。

$$k_h = k_{h0} (y/aB)^{-1/2} \quad (9)$$

ここに、 a : 基準変位の設定に関する係数(基準変位が杭径の 1% の時: $a=0.01$, 2% の時: $a=0.02$), y : 杭頭変位(cm), B : 杭径(cm)である。図 7(a)と比べて図 8(a)のばらつきは改善されていないが、図 7(b)と比べて図 8(b)のばらつきは全体的に小さくなり、基準変位を杭頭変位/杭径で定義することが有用であることを示唆している。なお、B2200, B4400, B6600 は壁杭で、横軸の杭径には長手方向の壁幅を用いているため、他に比べてデータが左側にシフトし、同一の杭頭変位/杭径では杭の剛性低下が他の大口径杭よりも大きく評価されることから、下限を示したと考えられる。

5. 杭径の影響

(4)式では、基準水平地盤反力係数は杭径の 3/4 乗に反比例する。これは前述のとおり、吉中が行った水平方向の平板載荷試験結果²⁾に基づいている。地盤を様な弾性体と仮定した場合、水平地盤反力係数は理論的には(10)式に示すように載荷幅の 1 乗に反比例することが知られている²⁾。

$$k_h = \frac{E_h}{I_p(1-\nu^2)D} \quad (10)$$

ここに、 E_h : 地盤の変形係数(kN/m²), I_p : 形状係数, ν : ポアソン比, D : 載荷幅(m)である。しかし、(10)式は弾性体で深さ方向に様な地盤を対象としているため、地盤剛性のひずみ依存性(剛性低下)や拘束圧依存性(剛性増加)の影響が考慮されていない。

古関ら¹⁴⁾は 3 次元 FEM 解析により直接基礎と杭基礎の地盤反力係数に及ぼす載荷幅の影響について検討している。直接基礎を対象とした鉛直方向の地盤反力係数は、図 9(a)に示すように載荷幅が大きいほど深い地盤まで荷重が伝わるため、拘束圧が高く地盤剛性が大きな範囲の影響を受ける。そのため、沈下量を載荷幅で除して評価すると、鉛直地盤反力係数は載荷幅の 1/2~3/4 乗に反比例する結果となっている。一方、杭基礎を対象とし、杭地中部(杭径(B)×杭径の 1/2 の高さ(B/2)の範囲)のみを載荷した 3 次元 FEM 解析¹⁴⁾の水平方向の地盤反力係数は、浅部と深部の両方に荷重が伝わり、載荷幅による拘束圧の違いがあまり表れず、その影響をほとんど受けないため、水平変位を換算載荷幅((B²/2)^{1/2})で除して評価すると、水平地盤反力係数は換算載荷幅の 1 乗に反比例するが、水平変位 1cm で評価すると地盤剛性のひずみ依存性(剛性低下)の影響を受けて換算載荷幅の 1/2~3/4 乗に反比例することを明らかにしている。

しかし、杭頭を載荷した杭の水平載荷試験では、図 9(b)に示すように、杭径が大きいほど変形が深く遠くまで及び同一地表面変位に対して杭の傾斜角が小さくなり、杭頭変位 1cm 時の地盤の平均的なひずみは相対的に小さくなると共に、拘束圧が高く地盤剛性が大きな深い地盤の影響も受けることになる。また、杭頭水平変位を杭径

図 7 逆算 k_h /推定 k_{h0} ~ 地表面位置の杭変位

(b) $E_0=700$ (N+3)

図 8 逆算 k_h /推定 k_{h0} ~ 地表面位置の杭変位/杭径

(b) $E_0=700$ (N+3)

で除して評価すると、地盤の平均的なひずみは杭径による差がなくなるわけではないが縮まると考えられる。そこで、杭径の累乗の影響を検討する。

吉中²⁾は直径 30cm の平板載荷試験を基準に指針に用いられている(4)式を導いているので、 $B=30\text{cm}$ では $B^{-1/2}$, $B^{-3/4}$, B^{-1} で地盤反力係数が同一となりながら杭径 B の累乗の影響を考慮すると、(4)式は(11), (12)式となる。

$$k_{h0} = 34E_0 \bar{B}^{-1/2} \quad (11)$$

$$k_{h0} = 187E_0 \bar{B}^{-1} \quad (12)$$

(11), (12)式で図 7(b), 図 8(b)の縦軸の逆算 k_h を変換した関係を図 10, 11 に示す。なお、(11)式を用いて図 7, 8 の縦軸を変換すると全体的に小さくなり、(12)式を用いると全体的に大きくなるため、縦軸の最大値を揃えずに示している。横軸を杭頭変位とした図 10(a),

(b)と図 7(b)を比べると、杭径の $1/2$ 乗に反比例する図 10(a)のばらつきが最も小さくなっている。一方、横軸を杭頭変位/杭径とした図 11(a), (b)と図 8(b)を比べると、杭径の $3/4$ 乗から 1 乗に反比例する図 8(b)と図 11(b)のばらつきが同程度に小さくなっており、水平変位を杭径で除して評価することで載荷幅依存性が強まっている。古関ら¹⁴⁾が行った 3 次元 FEM 解析に従えば、変位 1cm で評価すると杭径の $1/2 \sim 3/4$ 乗、杭頭変位/杭径で評価すると杭径の 1 乗に反比例する。これは前述の関係とほぼ整合する。なお、前述の図 9(b)の説明の通り、ひずみ依存性は完全にはなくなることおよび拘束圧依存性があるため、杭頭変位/杭径で評価した場合、杭径の $3/4$ 乗と 1 乗が同程度のばらつき具合になったものと推測される。

以上の結果から、杭頭変位が 1cm 時および杭径の 1% 時の逆算 k_{h0} を算出し、(4)式および(11), (12)式(変形係数 E_0 は(5)式および(8)式で評価)で求めた推定 k_{h0} で除した逆算 $k_{h0}/\text{推定 } k_{h0}$ と杭径の関係を図 12, 13 に示す。基準変位を 1cm とした場合、指針と同様に E_0 を(5)式(700N)で評価すると、指針の方法である図 12(b)よりも図 12(a)のばらつきが小さくなる。すなわち、前述の通り杭径の $1/2$ 乗に反比例させた方が良い結果になる。これは、 E_0 を(8)式($700(\text{N}+3)$)で評価しても同じである。一方、基準変位を杭径の 1% とした場合、指針と同様に E_0 を(5)式で評価すると、大口径杭の逆算 $k_{h0}/\text{推定 } k_{h0}$ が小さくなる。逆算 k_{h0} は、杭体の非線形化の影響を反映していないので小さめに評価される傾向があることを考慮しても、杭径の $1/2$ 乗や $3/4$ 乗に反比例させた場合には逆算 $k_{h0}/\text{推定 } k_{h0}$ はかなり小さいと判断される。また、 E_0 を(8)式で評価すると、全体的にばらつきが小さくなり、平均的な評価としては杭径の $3/4$ 乗または 1 乗に反比例させた図 13(e), (f)が同程度に最も良いと判断される。

(a) 直接基礎(鉛直力作用時) (b) 杭基礎(杭頭水平力作用時)
図 9 載荷幅による地盤内の影響範囲の違い

(a) 杭径の $1/2$ 乗に反比例

(b) 杭径の 1 乗に反比例

図 10 逆算 $k_{h0}/\text{推定 } k_{h0}$ ($E_0=700(\text{N}+3)$) ~ 地表面位置の杭変位 (杭径の依存)

(a) 杭径の $1/2$ 乗に反比例

(b) 杭径の 1 乗に反比例

図 11 逆算 $k_{h0}/\text{推定 } k_{h0}$ ($E_0=700(\text{N}+3)$) ~ 地表面位置の杭変位/杭径 (杭径の依存)

図 12 逆算 k_{h0} /推定 k_{h0} ~ 杭径 (基準変位: 杭頭変位 1cm)

図 13 逆算 k_{h0} /推定 k_{h0} ~ 杭径 (基準変位: 杭頭変位/杭径=1%)

なお、大口径杭は杭体の非線形化の影響が考慮されていないので、今後シミュレーション解析などで再評価する必要があるものの、(10) 式に示した理論解、古関らの解析結果¹⁴⁾、図 9 の関係などを総合的に判断すると、図 12、13 に示した 12 ケースの中では、平均的な評価として図 12(d)、図 13(e)および図 13(f)が同程度に最も良いと判断される。

指針では、図 12(b)の関係が用いられている。図 12(b)では大口径杭の逆算 k_{h0} /推定 k_{h0} は 1.0 を上回るが、小口径杭では 0.5~3.0 の範囲にあり、杭頭慣性力による杭の水平抵抗を検討する上で概ね安全側の評価を与えるが、逆算 k_h を必ず小さめに評価する関係にはなっていない。平均的な評価として最も良いと判断した図 12(d)、図 13(e)および図 13(f)に関しても、あくまでも平均的な関係を評価したのであって、安全側の評価をするのであれば、たとえば基準変位を地表面における杭の水平変位 0.5cm や杭径の 0.5%にするなどの配慮が必要と考えられる。

6. まとめ

本研究では、砂質土地盤を対象とした小口径杭から大口径杭までの広範囲な杭径の単杭の水平載荷試験結果に基づき、Chang 式^{1),9)}を用いた逆解析により求めた逆算水平地盤反力係数について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 基準水平地盤反力係数 k_{h0} を指針の方法に従って N 値から算出する場合、N 値の小さな範囲では水平載荷試験結果を過小評価する傾向が認められる。
- 2) 地盤の変形係数評価を 700N から 700(N+3)に変えることで、より精度の高い地盤反力係数が推定可能である。
- 3) 基準変位を杭頭変位 1cm で評価する場合、基準水平地盤反力係数に $E_0=700(N+3)$ と杭径依存性($B^{-1/2}$)を用いると、指針の方法に比べて広範囲な杭径に対してばらつきが小さな関係が得られる。
- 4) 基準変位を杭径の 1%で評価する場合、基準水平地盤反力係数に $E_0=700(N+3)$ を用いると、指針の方法に比べて広範囲な杭径に対してばらつきが小さな関係が得られるが、杭径依存性($B^{-3/4}$, B^{-1})

の優劣は水平載荷試験結果の逆算だけからでは判断できない。

今後、粘性土地盤に関しても同様な検討を行う予定である。また、杭体の非線形化の影響は梁ばねモデルなどによるシミュレーション解析で検討する必要がある、今後の課題としたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、実測データの提供にご協力頂いた東京ソイルリサーチの田部井哲夫氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.267-280，2001.10
- 2) 吉中竜之進：地盤反力係数と、その載荷幅による補正，土木研究所資料，第 299 号，1967.7
- 3) 田部井哲夫：N 値から推定する地盤定数の実態と今後の方向，2013 年度日本建築学会大会(北海道)構造部門(基礎構造)パネルディスカッション資料「建築基礎設計・施工のための地盤評価と活用」，pp.35-45，2013.8
- 4) 大崎順彦：建築基礎構造，技報堂出版，p392，1991.1
- 5) Hatanaka M., Uchida A.: Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils, Soils and Foundations, Vol.36, No.4, pp.1-9, 1996.12
- 6) 岡原美知夫，高木章次，中谷昌一，田口敬二，坂本昭夫：載荷試験データによる杭の水平抵抗特性に関する調査，土木研究所資料，第 2721 号，1989.1
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書，IV 下部構造編，pp.284-287，2012.3
- 8) 中谷昌一，白戸真大，河野哲也，中村祐二，野村朋之，横幕清，井落久貴：性能規定体系における道路橋基礎の安定照査法に関する研究，土木研究所資料，第 4136 号，2009.3
- 9) Y. L. Chang : Discussion on "Lateral Pile Loading Tests" by L. B. Feagin, A.S.C.E Transaction Vol.102, pp.272-278, 1937
- 10) 吉川那徳，鈴木康嗣，小林恒一，金井重夫，阿部幸夫：既往の水平載荷試験結果に基づく単杭の p-y 関係の再検討，日本建築学会技術報告集，第 17 巻，第 35 号，pp.95-100，2011.2
- 11) 古藤田喜久雄，清水正：軟弱砂層中のくいに対する地盤反力係数および減衰定数（くいに対する水平載荷重試験），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp.1165-1166，1971.11
- 12) 山本紀夫，相沢林作：大径場所打ち杭の水平載荷試験，杭の水平載荷試験法に関するシンポジウム発表論文集，pp.69-74，1979.12
- 13) 茶谷文雄：水平力を受ける壁杭の挙動について 壁杭の水平抵抗に関する研究(その 1)，日本建築学会構造系論文報告集，第 406 号，pp.81-92，1989.12
- 14) 古関潤一，倉知禎直，緒方辰男：地盤反力係数の寸法効果に及ぼす地盤変形特性の応力レベル依存性および非線形性の影響，基礎工，Vol.33, No.12, pp.26-29，2005.12

[2016 年 2 月 3 日原稿受理 2016 年 4 月 7 日採用決定]