

# 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

# A REVIEW OF $p$ - $y$ RELATION FOR SINGLE PILES BASED ON FIELD HORIZONTAL LOADING TEST DATA

吉川那穂 — \* 1      鈴木康嗣 — \* 2  
小林恒一 — \* 3      金井重夫 — \* 4  
阿部幸夫 — \* 5

Nao YOSHIKAWA — \* 1      Yasutsugu SUZUKI — \* 2  
Koichi KOBAYASHI — \* 3      Shigeo KANAI — \* 4  
Yukio ABE — \* 5

キーワード：  
単杭, 水平載荷試験,  $p$ - $y$  関係, 水平地盤反力, モデル化

Keywords:  
Single piles, Horizontal loading tests,  $p$ - $y$  relationship, Unit horizontal subgrade reaction force, Modeling

Based on past field test data on the horizontally loaded single piles, the authors have proposed a  $p$ - $y$  model, which relates unit subgrade reaction force and pile displacement, for single piles. Particular attention was paid to evaluate the coefficient of horizontal subgrade reaction taking the pile diameter and the soil properties into account. The hyperbolic model presented in this paper shows good applicability to simulate the non-linear response of single piles subjected to horizontal loads regardless of the types of piles and soils, which can be useful for the advanced seismic design of piles.

## 1. はじめに

建築物の杭基礎の耐震設計は、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」<sup>1)</sup>(以下、指針と呼ぶ)等を参考に行われている。設計に用いる水平地盤反力係数は、地盤の特性に依存して強い非線形性を示すため、杭の水平載荷試験を直接行って求めることが理想であるが、通常の設計において水平載荷試験を行うことはまれであり、既往の水平載荷試験結果の分析・評価から求められた既往の関係式(例えば文献2)-8))を用いることが多い。既往の研究では、現場における水平載荷試験結果から水平地盤反力係数と  $N$  値や杭径との関係がそれぞれ導かれており、水平地盤反力係数の非線形性が導かれているものもある。これらの文献で基準となる水平地盤反力係数は全て杭頭(地表面位置)変位10mm時とされている。

指針では既往の研究をもとに、杭頭(地表面位置)変位10mm時の水平地盤反力係数を基準水平地盤反力係数  $k_{h0}$  とし、この値を基準として杭の地表面変位の増減に対して $-1/2$ 乗で地盤反力係数を増減させる式が示されている。この式は、杭変位の増大に対して水平地盤反力が増え続ける関係であるため、極限に相当する塑性地盤反力は別途定められており、連続性に欠く設計式になっていると考えられる。

現在、一般的な基礎構造の設計では、短期レベルに相当する設計のみが行われ、終局レベルの設計を行うことがまれであるため、極限をあまり意識しない設計が行われているのが現状と考えられるが、将来終局レベルの設計を導入した場合、初期から極限までの水平地盤反力係数を連続的に評価できる手法の開発が望まれる。

そこで、本報告では既往の水平載荷試験結果を再度収集・分析し、初期から極限に至る水平地盤反力-変位関係を再検討した。なお、

本報告は日本建築学会基礎構造運営委員会「地盤と基礎構造物の相互作用小委員会 杭の静的水平抵抗 WG」の活動成果の報告である。

## 2. 既往の水平地盤反力係数評価法

既往の研究における  $k_{h0}$  は、杭の地表面変位10mm時の水平地盤反力係数  $k_h$  として評価する場合が多い。この  $k_h$  値は、杭頭荷重と杭の地表面変位の関係を満たすように、深さ方向に同じ  $k_h$  を有する地盤を仮定したモデル<sup>9)</sup>に基づき逆解析により求められている<sup>3)</sup>。指針における水平地盤反力係数  $k_h$  は、杭径、杭種、地盤条件等に関係なく水平変位10mm時を基準とし、それ以外の変位量の時の  $k_h$  は(1)式によって求められる。

$$k_h = k_{h0} \times (y / 10)^{-0.5} \quad (y \geq 1) \quad (1)$$

既往の実大杭の水平載荷試験のうち、終局状態に達していると判断される13例(PC杭8例、鋼管杭5例)の結果と、(1)式を比較した結果を図1<sup>10)</sup>に示す。ここで終局状態とは、荷重保持不能や杭材破壊あるいは破壊濃厚な状態とされている。図1の縦軸は一様地盤中の弾性支承上のはりの解<sup>1)</sup>を用いて載荷重ごとに算出した  $k_h$  を地表面変位10mm時の  $k_h$  で無次元化した値であり、杭材の剛性低下等は考慮していない。文献10)ではこの図から鋼管杭は(1)式と良い対応を示すが、既製コンクリート杭は(1)式との相関性が低く、この要因としては既製コンクリート杭のひび割れによる剛性低下が考えられるとされている。しかし、(1)式の既製コンクリート杭への適用性については図1からだけでは判断が難しい。また、杭種によらず変位が大きい範囲では(1)式は  $k_h/k_{h0}$  を過大評価してしまう傾向が認められる。そこで、本論では図1の関係を再評価することとする。

本稿の一部は日本建築学会大会学術講演会(2010)において発表した<sup>注1)</sup>。

<sup>1)</sup> ジャパンパイル(株)技術開発部  
(〒103-0007 中央区日本橋浜町2-1-1)

<sup>2)</sup> 鹿島建設(株)技術研究所 博士(工学)

<sup>3)</sup> 独原子力安全基盤機構耐震安全全部土木・建築グループ 博士(工学)

<sup>4)</sup> 千代田工営(株) 社長室長・博士(工学)

<sup>5)</sup> 一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会

<sup>1)</sup> Engineering Development Division, Japan Pile Corporation

<sup>2)</sup> Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation, Dr. Eng.

<sup>3)</sup> Seismic Safety Division, Japan Nuclear Energy Safety Organization, Dr. Eng.

<sup>4)</sup> Planning Section, Chiyoda Geotech Co., Ltd., Ph. D.

<sup>5)</sup> Japanese Technical Association for Steel Pipe Piles and Sheet Piles

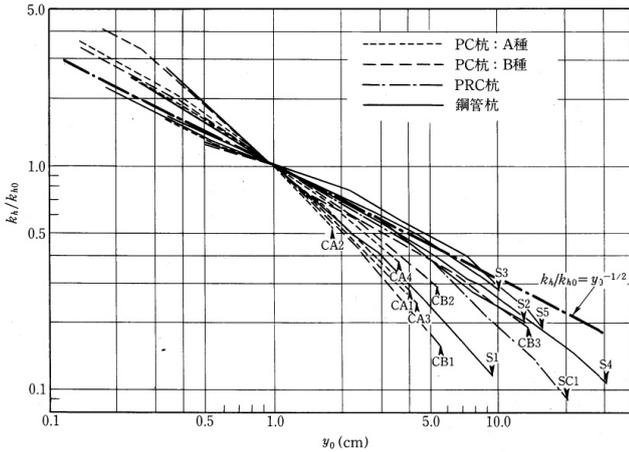


図1 各種杭の逆算  $k_h/k_{h0}$ -地表面変位  $y$  関係<sup>10)</sup>

### 3. 水平載荷試験データの収集

WG で収集した水平載荷試験データは、論文集・雑誌等で公表されている論文や報文・各工法の実験資料・水平載荷試験結果の報告書等 69 編の文献で、記載されている実験は 120 ケースである。これらのうち、下記前提条件に当てはまる 7 文献、26 ケース<sup>11)~17)</sup>を検討の対象とした。

- ・日本国内の単杭の試験
- ・杭頭の境界条件が自由
- ・地盤条件や杭諸元が明らかとなっている
- ・表層部 (杭頭から  $1/\beta$  程度,  $\beta$ : 杭の特性係数) の土質構成が複雑でない
- ・杭頭部付近で地盤改良等を行っていない
- ・杭頭部付近が粘性土のものは、一軸圧縮強度  $q_u$  値や粘着力  $c$  値が記述されている
- ・地表面変位が杭径の 3%以上まで載荷している

検討対象とした杭の水平載荷試験の諸元を表 1 にまとめて示す。これら 26 ケースのうち杭頭部付近が砂質土 (砂, 礫) 地盤のものが 16 ケース, 粘性土地盤のものが 10 ケースである。ここで, 粘性土地盤のケース数が少ないのは,  $q_u$  値や  $c$  値のあるデータに限定したためである。杭径は  $\phi 400 \sim \phi 1,000$  であり, 砂質土地盤では広い範囲に分布しているが, 粘性土地盤では  $\phi 600$  と  $\phi 1,000$  が大半である。杭頭部付近の地盤は, 砂質土では  $N$  値の範囲が 3~12, 粘性土では  $N$  値の範囲が 0~5,  $q_u$  値の範囲が 20~75kN/m<sup>2</sup> であり, 両地盤共に杭頭部付近が比較的緩い地盤である。ここで  $N$  値は地表面から  $1/\beta$  の平均  $N$  値とし,  $q_u$  値は  $1/\beta$  の範囲に含まれる粘性土の試験結果とした。杭種は鋼管杭が大半であるが, PC 杭, PRC 杭も含まれている。杭が降伏している実験は, 降伏するまでのデータのみを対象とした。検討対象とした水平載荷試験結果の杭頭荷重  $H$ -杭頭変位  $y_{top}$  関係を, 杭径 700mm 未満と 700mm 以上に分類して図 2 (砂質土地盤), 図 3 (粘性土地盤) に示す。図中のプロットはそれぞれ  $N$  値,  $q_u$  値の範囲で記号を変えており, プロットを判別し易くするために白抜きと塗りつぶしを用いている。最大杭頭変位が 100mm を超える試験データまで含まれており, 強い非線形を示している。また, 図 2, 図 3 から杭の降伏などに伴う不連続な関係は認められず, 検討対象として良好な試験データであることがわかる。

表 1 検討対象とした杭の水平載荷試験データ一覧

No.	杭径 (mm)	杭種・工法	杭長 (m)	杭頭部付近		
				土質	$N$ 値	$q_u$ 値 (kN/m <sup>2</sup> )
1 <sup>11)</sup>	600	鋼管ソイル	24.1	礫	6	—
2 <sup>12)</sup>	609.6	鋼管回転	14.7	細砂	5	—
3 <sup>12)</sup>	609.6	鋼管回転	12.6	細砂	6	—
4 <sup>13)</sup>	508	鋼管打撃	8	礫混砂	3	—
5 <sup>13)</sup>	508	鋼管回転	8	礫混砂	3	—
6 <sup>14)</sup>	609.6	鋼管打撃	24	細砂	12	—
7 <sup>15)</sup>	400	鋼管コンクリート	15	砂	8	—
8 <sup>16)</sup>	800	鋼管ソイル	25.8	砂	3	—
9 <sup>11)</sup>	800	鋼管ソイル	25.8	砂	5	—
10 <sup>12)</sup>	800	鋼管回転	26.4	細砂	5	—
11 <sup>14)</sup>	1000	鋼管打撃	46	細砂	10	—
12 <sup>17)</sup>	1072.2	鋼管中掘り	19.5	砂	7	—
13 <sup>17)</sup>	1072.2	鋼管中掘り	19.5	砂	7	—
14 <sup>17)</sup>	914.4	鋼管中掘り	26	砂	4	—
15 <sup>17)</sup>	914.4	鋼管中掘り	26	砂	4	—
16 <sup>17)</sup>	914.4	鋼管中掘り	26	砂	4	—
17 <sup>14)</sup>	609.6	鋼管打撃	18	ローム	0	24
18 <sup>14)</sup>	609.6	鋼管	28.7	ピート	—	20
19 <sup>15)</sup>	400	鋼管コンクリート	18	粘土	2	75
20 <sup>14)</sup>	600	PRC	18	シルト	0	24
21 <sup>14)</sup>	600	PC 打撃	10	シルト	2	27
22 <sup>14)</sup>	600	SC 打撃	36	粘土	0	40
23 <sup>14)</sup>	609.6	鋼管	28.7	ピート	—	20
24 <sup>15)</sup>	1000	鋼管コンクリート	23.5	粘土	2	75
25 <sup>15)</sup>	1000	鋼管コンクリート	21	粘土	2	75
26 <sup>15)</sup>	1000	鋼管プレボーリング	17.5	粘土	5	57

### 4. 載荷試験結果から求まる逆算 $k_h$

対象とした水平載荷試験は, 地表部付近の土質構成が複雑ではない試験結果であることから, 一様地盤中の弾性支承上のはりの解<sup>9)</sup>を用いて逆解析を行って水平地盤反力係数  $k_h$  を求めた。一様地盤中の杭頭変位は次式で表される。

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

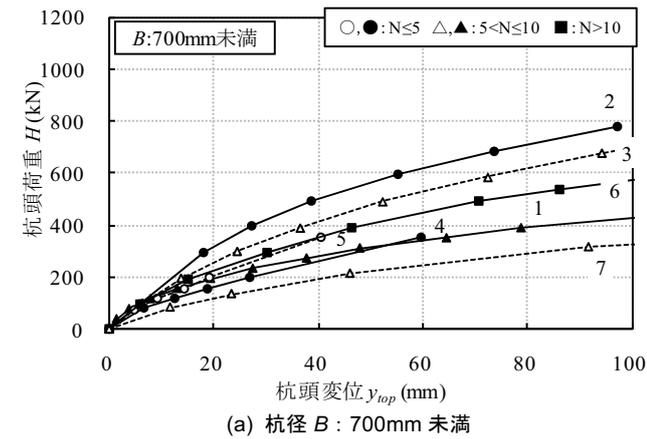
ここで,  $h$ : 杭突出長,  $B$ : 杭径,  $E$ : 杭の弾性係数,  $I$ : 杭の断面 2 次モーメント,  $M_{top}$ : 杭頭曲げモーメントである。また, 杭頭の境界条件が自由のケースのみのため, 第 2 項の  $M_{top}$  は 0 としている。得られた特性係数  $\beta$  を, 特性係数の定義式

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h \cdot B}{4EI}} \quad (3)$$

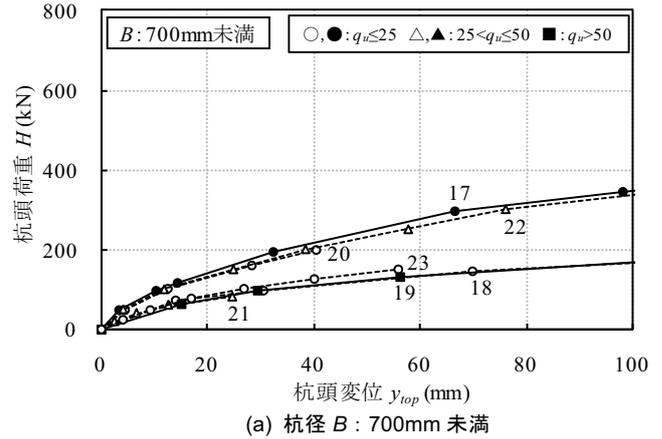
に代入することで, 地盤反力係数  $k_h$  を求めることができる。この様にして求めた地盤反力係数を, 以後本論では逆算  $k_h$  と呼ぶことにする。次に, 地表面から載荷点までの高さ  $h$  から, 次式を用いて地表面変位  $y$  を算出する。

$$y = \frac{1 + \beta(h + h_0)}{2EI\beta^3} H \quad (4)$$

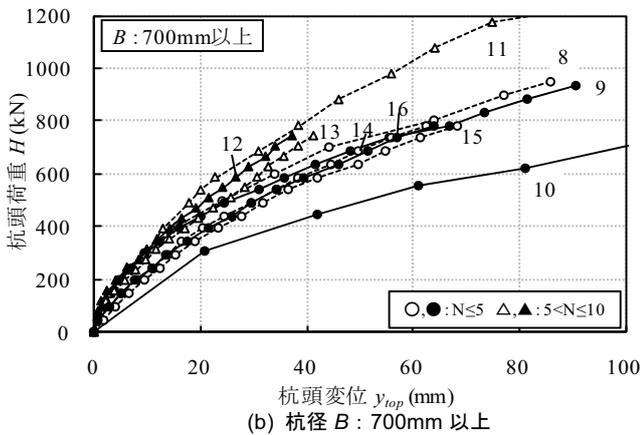
ここで,  $h_0 = M_{top} / H = 0$  とした。計算に際し,  $y_{top}$  と  $h$  の数字の記載がない場合はグラフから読み取り,  $E$  と  $I$  は各文献に記載されて



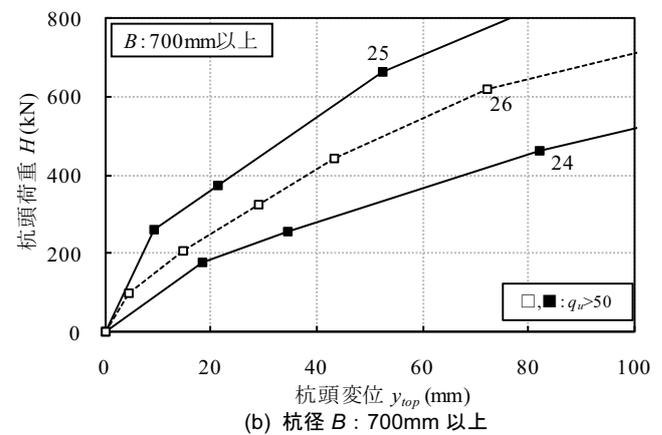
(a) 杭径  $B$ : 700mm 未満



(a) 杭径  $B$ : 700mm 未満



(b) 杭径  $B$ : 700mm 以上



(b) 杭径  $B$ : 700mm 以上

図2 杭の水平載荷試験における  $H$ - $y_{top}$  関係 (砂質土地盤)

図3 杭の水平載荷試験における  $H$ - $y_{top}$  関係 (粘性土地盤)

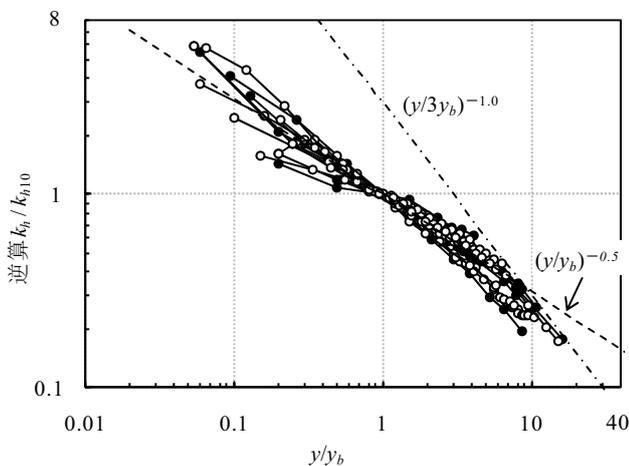


図4 逆算  $k_h/k_{h10}$ - $y/y_b$  関係 (砂質土地盤)

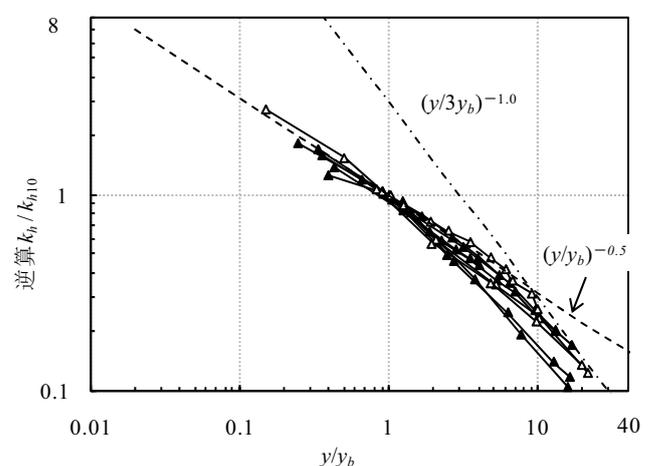


図5 逆算  $k_h/k_{h10}$ - $y/y_b$  関係 (粘性土地盤)

いる値を用いたが、記載されていない場合は公称値を用いた。

地表面変位  $y$  はこの逆算  $k_h$  から計算によって求めた。得られた結果から基準変位  $y_b=10\text{mm}$  とし、逆算  $k_h$  を地表面変位  $y_b$  時の  $k_{h10}$  で除して無次元化した  $k_h/k_{h10}$  と、地表面変位  $y$  を基準変位  $y_b$  で無次元化した  $y/y_b$  の関係を、図1と同じ両対数表示で図4 (砂質土地盤)、図5 (粘性土地盤) に示す。図には (1) 式および傾きの一例として次式の関係も同時に示している。

$$k_h = k_{h10} \times (y / 3y_b)^{-1.0} \quad (5)$$

図4、図5に示すように、逆算  $k_h/k_{h10}$  は変位の小さな範囲においては変位の $-0.5$ 乗で表現できると判断されるが、変位が大きくなると変位の $-1.0$ 乗に近づいている。これは水平地盤反力が降伏して変位の増大に対して一定値を示していることになる。このことから、杭の挙動を終局状態まで表現するためには初期剛性と極限地盤反力を持つ関係を用いなければ、変位が大きい範囲を表現できないことが分かる。

なお、図4、図5のデータと図1のデータを比較すると、図4、図

5 のほうがばらつきが小さく、検討対象として良好なデータが得られたと判断できる。

### 5. 地盤反力 $p$ -地表面変位 $y$ 関係のモデル化

杭の水平抵抗に関する解析法としては、非線形弾性地盤反力法<sup>18)</sup>、 $p$ - $y$  曲線法<sup>19)</sup>、複合地盤反力法<sup>3)</sup>等があるが、大変形時までの挙動を連続的に評価でき、地盤反力の極限状態を表現することが可能な  $p$ - $y$  曲線法を用いてモデル化を試みた。 $p$ - $y$  曲線法のモデル化の代表的なものとしては、バイリニア型<sup>20)</sup>と双曲線型がある<sup>21), 22)</sup>が、バイリニア型では連続的に剛性が変化する  $p$ - $y$  関係の非線形性の影響を十分に評価することは難しいことから双曲線型を採用した。双曲線による水平地盤反力-変位関係については、深度方向に分割した模型杭の実験結果からモデル化を行った例<sup>21)</sup>や、地盤定数を用いた評価式に補正係数を考慮した双曲線モデルを用い、载荷試験結果から補正係数を逆解析した例<sup>22)</sup>がある。本報では前章の方法を基に各载荷試験の  $p$ - $y$  関係を求め、それぞれを双曲線にモデル化して検討を行った。双曲線は (6) 式で表わされる。

$$p = \frac{k_{h1-h} \times y}{1 + \frac{k_{h1-h} \times y}{P_{max-h}}} = \frac{y}{\frac{1}{k_{h1-h}} + \frac{y}{P_{max-h}}} \quad (6)$$

ここで、 $k_{h1-h}$  : 双曲線の初期剛性、 $P_{max-h}$  : 双曲線の最大地盤反力である。 $p=k_h \times y$  関係から (6) 式を書き換えると (7) 式となる。

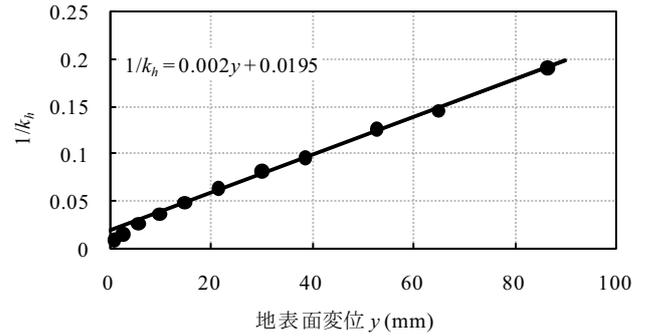


図6  $1/k_h$ - $y$  関係例

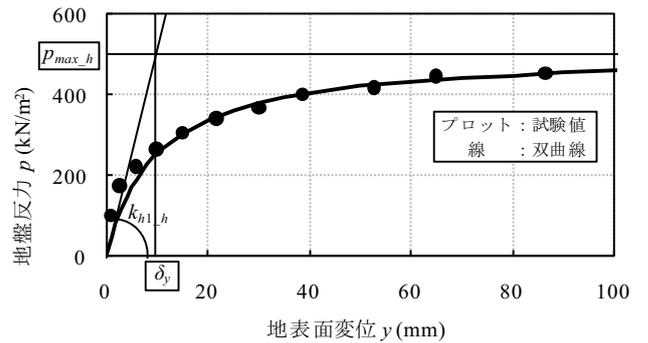
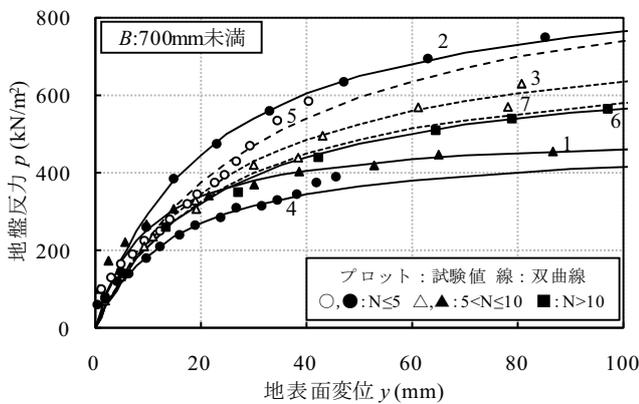
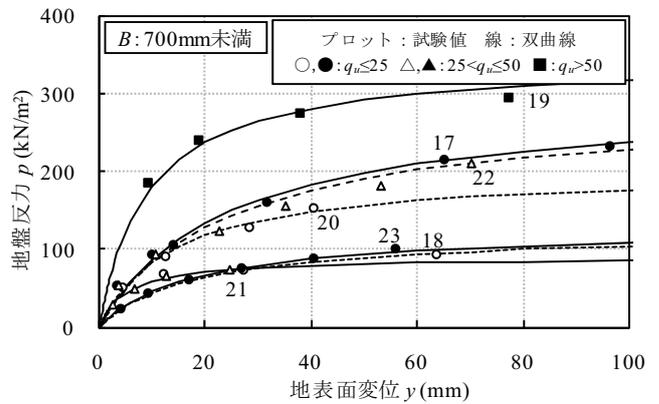


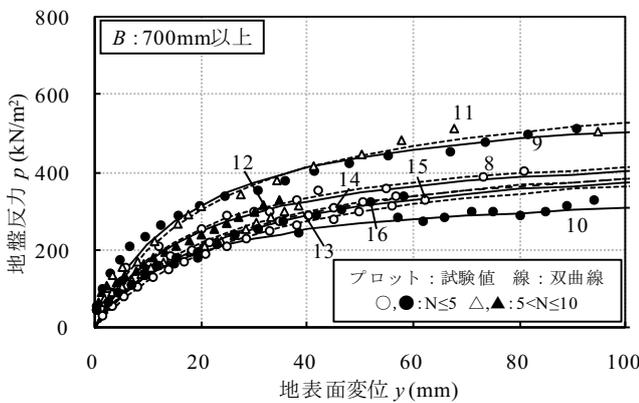
図7 双曲線モデルの例



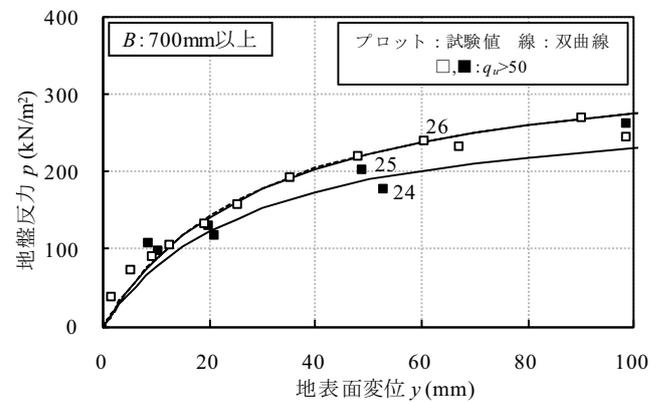
(a) 杭径  $B$  : 700mm 未満



(a) 杭径  $B$  : 700mm 未満



(b) 杭径  $B$  : 700mm 以上



(b) 杭径  $B$  : 700mm 以上

図8  $p$ - $y$  関係の実測値と双曲線近似値 (砂質土地盤)

図9  $p$ - $y$  関係の実測値と双曲線近似値 (粘性土地盤)

$$\frac{1}{k_h} = \frac{1}{k_{h1-h}} + \frac{y}{p_{max-h}} \quad (7)$$

(7) 式より、 $1/k_h$  と  $y$  の関係は線形関係となることから、4章で求めた逆算  $k_h$ -地表面変位  $y$  関係から  $1/k_h$ - $y$  関係を作成し、最小自乗法を用いて切片と勾配を求め、それらの逆数から  $k_{h1-h}$  と  $p_{max-h}$  を求めた。最小自乗法を用いて切片と勾配を求める際には、双曲線と各载荷試験の  $p$ - $y$  関係が全体的に合うように、データの取捨選択を行った。対象外としたデータは、地表面変位  $y$  が小さい範囲 ( $y < 5\text{mm}$ ) や、地表面変位  $y$  の増加に伴って地盤反力  $p$  が減少している範囲のデータが主である。 $1/k_h$ - $y$  関係と最小自乗法による近似例の比較を図 6 に示す。地表面変位が小さい範囲では試験データは直線関係より小さくなるが、地表面変位が 10mm 程度を超えれば概ね直線関係が認められる。载荷試験結果と双曲線モデル例の比較を図 7 に示す。地表面変位が小さな範囲を除き、概ね良好なモデル化が出来ていることが確認できる。

同様の作業を全ての载荷試験データに対して行い、それぞれ  $k_{h1-h}$  と  $p_{max-h}$  を求めた。それらの値を用いて描いた双曲線と、試験結果から求めた  $p$ - $y$  関係を比較した結果を、杭径 700mm 以上と 700mm 未満に分けて図 8 (砂質土地盤)、図 9 (粘性土地盤) に示す。地表面変位  $y$  が小さい部分を除けば、両土質ともに大きな変位の範囲まで

双曲線でよく近似できていると判断される。また、同一地表面変位時の地盤反力は、砂質土地盤では小径 ( $B < 700\text{mm}$ ) の方が大径 ( $B \geq 700\text{mm}$ ) に比べて大きい傾向が認められる。粘性土地盤については比較できるデータは少ないが、 $q_u > 50\text{kN/m}^2$  のデータを見ると小径の方が大径に比べて大きい傾向が認められる。

## 6. 地表面変位 10mm 時の $k_{h10}$ と双曲線モデル

指針では地表面変位 10mm 時の水平地盤反力係数  $k_{h10}$  を基準水平地盤反力係数  $k_{h0}$  としている。この値が安全率 3 を対象とした長期レベル程度の値であると仮定すると、極限地盤反力の 1/3 の地盤反力時の割線係数と一致することになる。そこで、各载荷試験結果の  $k_{h10}$  と、双曲線モデルの  $p_{max-h}/3$  時の水平地盤反力係数  $k_{h0.3-h}$  の比較を行った。その結果、図 10 に示すように、 $k_{h0.3-h}/k_{h10}$  の平均は 0.98、相関係数は 0.94 であり、杭径・地盤種別によらず  $k_{h0.3-h}$  と  $k_{h10}$  は非常に良く一致していることが確認できた。既往の研究において地表面変位 10mm を基準とした理由が明確ではなかったが、図 10 の結果から最大地盤反力に対して安全率 3 を考慮した程度、すなわち長期レベルの水平地盤反力係数と考えることができ、既往の値を設計時の基準水平地盤反力として用いてきた妥当性を再確認した結果となった。

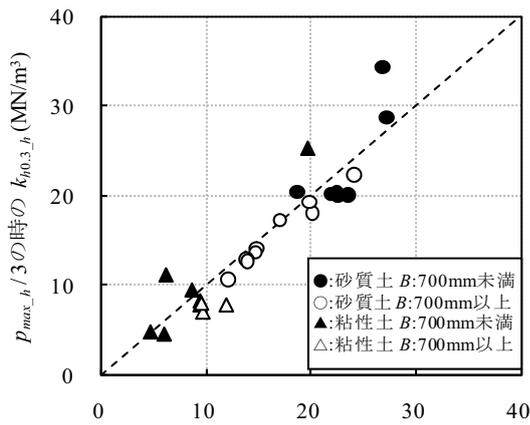


図 10  $k_{h0.3-h}$  と  $k_{h10}$  の比較

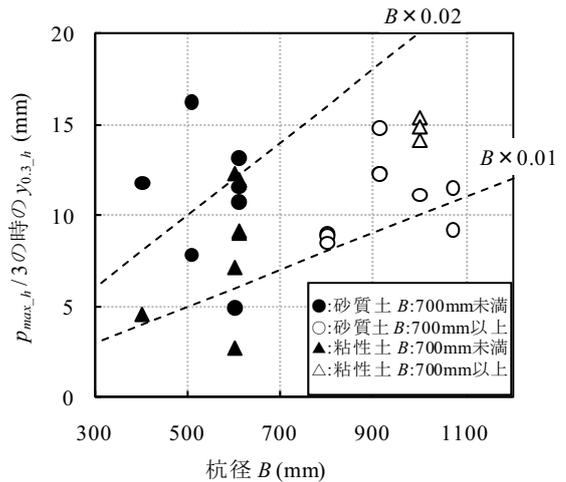


図 11  $p_{max-h}/3$  時の変位  $y_{0.3-h}$  と杭径  $B$  の関係

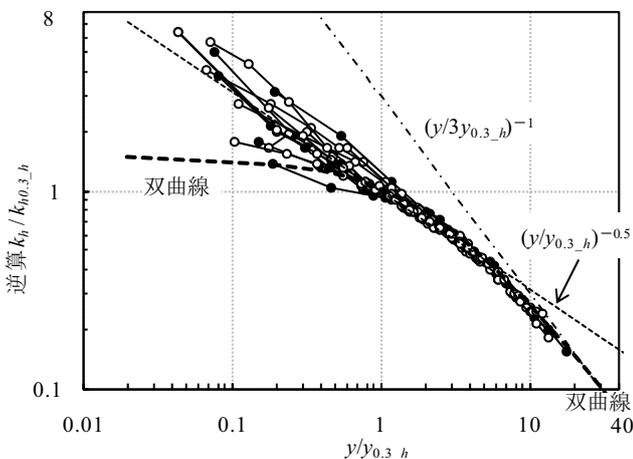


図 12 逆算  $k_h/k_{h0.3-h} - y/y_{0.3-h}$  関係 (砂質土地盤)

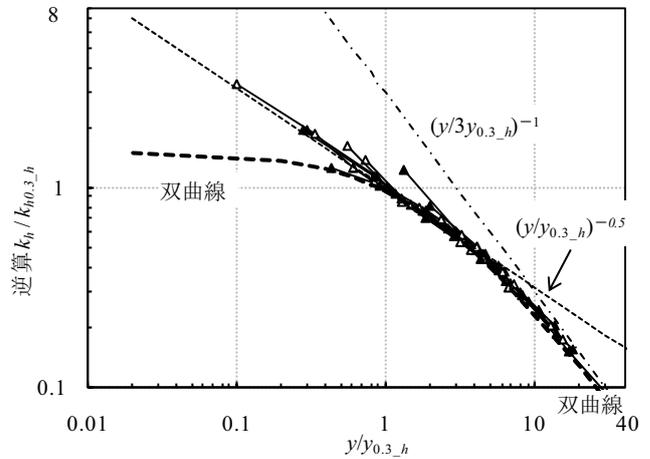


図 13 逆算  $k_h/k_{h0.3-h} - y/y_{0.3-h}$  関係 (粘性土地盤)

次に、 $p_{max\_h}/3$  時の地表面変位  $y_{0.3\_h}$  と杭径  $B$  の関係を図 11 に示す。杭径  $B$  が 700mm 未満のものは土質による違いは認められず、 $B$  が 700mm 以上のものは、粘性土のほうが砂質土よりも大きい傾向が認められるが、データが少ないため明確に評価するのは難しいと考えられる。全体的には  $y_{0.3\_h}$  は杭径  $B$  の 1% から 2% の間に分布していると判断される。

逆算  $k_b/k_{b0.3\_h}$  と  $y/y_{0.3\_h}$  の関係図を、両対数表示で図 12 (砂質土地盤)、図 13 (粘性土地盤) に示す。 $k_{b0.3\_h}$  と  $y_{0.3\_h}$  は双曲線モデルから得られた値なので、図 4、図 5 の関係のように縦軸・横軸が共に 1 の点で、全データが重なる関係にはならない。また図には、(6) 式の代表的な関係および (1) 式と傾きの一例として (5) 式の  $k_{h10}$  を  $k_{b0.3\_h}$  に、 $y_b$  を  $y_{0.3\_h}$  に置き換えた関係を併記している。砂質土地盤では  $y/y_{0.3\_h} < 1$  ではばらつきが大きい、1 より大きい範囲ではばらつきが小さく、粘性土地盤では全体的にばらつきが小さいことがわかる。また、図 13、図 14 を図 4、図 5 と比較してもデータのばらつきが少なくなり、良好な関係が得られていると判断される。なお、両土質共に、 $y/y_{0.3\_h}$  が 1.0 以下の領域を除き、双曲線が試験データと非常に良く一致していると判断される。

## 7. まとめ

実地盤における既往の杭の水平載荷試験を収集し、静的に水平力が作用する単杭の水平地盤反力  $p$  - 地表面変位  $y$  関係を双曲線でモデル化して検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

① 水平地盤反力  $p$  - 地表面変位  $y$  関係は、地盤条件や杭径・杭種に関わらず双曲線モデルで良く近似できる。特に変位が大きい範囲では指針の  $y^{-0.5}$  よりも実際の杭の挙動に近い評価が行える。

② 双曲線モデルの最大地盤反力  $p_{max\_h}$  に対して安全率 3 を考慮した場合の水平地盤反力係数は、地表面変位が 10mm 時の水平地盤反力係数と同程度の値であった。また、この時の地表面変位  $y_{0.3\_h}$  は杭径の 1% から 2% の間に分布している。

本報告では既往の水平載荷試験結果の地盤反力  $p$  - 地表面変位  $y$  関係の双曲線モデルへの適用性に関する検討結果を示した。双曲線モデルを決定付けるには、初期地盤反力係数と最大地盤反力を地盤定数から求める必要がある。この関係に関しては、次報で報告する予定である。

## 謝辞

本報告は日本建築学会基礎構造運営委員会「地盤と基礎構造物の相互作用小委員会 杭の静的水平抵抗 WG」の活動成果の報告である。関係者に記して感謝いたします。また、本研究を実施するにあたり、(独)土木研究所寒地土木研究所の富澤幸一氏、(株)フジタの小林勝巳氏、岸下崇裕氏、JFE テクノリサーチ(株)の高野公寿氏、ジャパンパイル(株)の本間裕介氏に、文献収集や分析方法について多大なご協力を頂きました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 建築基礎構造設計指針 (2001 年版) : 日本建築学会, 2001
- 2) 吉中竜之進 : 横方向地盤反力係数, 土木技術資料, 10-1, pp.32-37, 1968
- 3) 今井常雄: 地盤の横方向  $k$  値の研究 (3) - 設計に用いる  $k$  値 -, 土と基礎, Vol.17-11, pp.13-18, 1969
- 4) 萩原庸嘉, 建築業協会基礎部会 : 鋼管杭の水平抵抗, 第 14 回土質工学研究発表会, pp.945-958, 1979
- 5) 富永晃司: 砂地盤中杭の横方向地盤反力係数の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 446 号, pp.67-72, 1993
- 6) 日本建築学会構造委員会, 基礎構造運営委員会 : 杭基礎の耐震設計に関する諸問題, pp.33-47, 2000
- 7) 橋詰尚慶, 建築業協会基礎部会 : PC 杭の水平抵抗, 第 14 回土質工学研究発表会, pp.949-952, 1979
- 8) 道路橋下部構造設計指針・同解説 くい基礎の設計編, pp.57-59, 1971
- 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) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 日本建築学会, p164, 1990
- 11) HYSC 杭 (鋼管ソイルセメント工法) : 一般土木工法・技術審査証明報告書, 2000
- 12) NS エコパイル工法 (回転圧入鋼管杭工法) : 建設技術審査証明事業 (一般土木工法) 報告書, 2004
- 13) つばさ杭(先端翼付き回転貫入鋼管杭) : 建設技術審査証明報告書, 2001
- 14) 建築業協会基礎部会・杭の水平耐力分科会 : 杭の水平載荷試験結果に関する調査報告書, 1979
- 15) 石橋輝樹, 加藤勉, 古藤田喜久雄, 岸田英明, 蓮田常雄 : 線路上空利用建物の杭基礎の大変形交番水平載荷試験 (その 1-4) , 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1323-1330, 1989
- 16) 森山陽一, 前田良刀, 古川克三, 柴田厚志, 林正宏 : 鋼管ソイルセメント杭の原位置載荷試験とその支持力特性, 土木学会論文集, No.637, VI-45, pp.115-124, 1999
- 17) 轟丈詩, 中島孝裕 : 鋼管杭の水平載荷試験, 基礎工, pp.68-73, 1987
- 18) 例えば, 久保浩一 : 杭の横抵抗の新しい設計法, 港湾技術研究所報告, Vol.2, No.3, 1964
- 19) 例えば, 岸田英明, 中井正一 : 地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗, 日本建築学会論文報告集, No.281, pp.41-55, 1979
- 20) 例えば, 岸田英明, 中井正一 : 地盤反力 - 変位関係の非線形性, 土と基礎, Vol.2, No.8, pp.21-28, 1977
- 21) 神田政幸, 竹村次郎, 日下部治 : 砂地盤中の単杭の  $p$ - $y$  関係のモデル化, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.191-207, 2000
- 22) 有木廣江, 富永晃司 : 双曲線水平地盤反力モデルに基づく水平抵抗に関する解析法, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 30 巻, pp.169-172, 2007

## 注釈

注 1) 小林恒一, 吉川那穂, 鈴木康嗣, 金井重夫, 阿部幸夫, 岸下崇裕 : 既往の水平載荷試験結果に基づく単杭の水平地盤反力係数 (その 1-2) , 2010 年度日本建築学会大会に投稿中。

[2010 年 6 月 18 日原稿受理 2010 年 9 月 1 日採用決定]