

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: 文献調査と地盤反力-変位量関係のモデル化)

正会員 小林 恒一*¹ 同 吉川 那穂*²
同 鈴木 康嗣*³ 同 金井 重夫*⁴
同 阿部 幸夫*⁵ 岸下 崇裕*⁶

単杭 静的水平抵抗力 水平載荷試験
文献調査 地盤反力-変位量関係 モデル化

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」等を参考に行われている。設計に用いる基準水平地盤反力係数 k_{h0} は、水平載荷試験から求めた値や指針¹⁾などで推奨される評価式を用いることになっているが、実際の現場で k_{h0} を求めるための水平載荷試験はほとんど行われておらず、指針¹⁾などの評価式を用いることが一般的である。これらの評価式は、既往の研究(例えば文献 2)~7))等に基づいて検討されたものである。既往の研究における k_{h0} は、地表面変位が 10mm の時の水平地盤反力係数 k_h として評価する 경우가多く、この時の杭頭荷重と地表面変位の関係を満たすように、深さ方向に同じ k_h を有する地盤と仮定したモデルを用いて逆解析により求められている。このような水平地盤反力係数 k_h は杭径、杭種、地盤条件等に関係なく地表面変位が 10mm の時を基準としているが、実際の杭の挙動(杭頭荷重-水平変位関係など)との関係については十分検討されていない。

これらのことから筆者らは、実際の杭の挙動をさらに精度よく評価することを目的として、既往の実大水平載荷試験データについて再度見直しを行い、静的に水平力が作用する杭の、耐震設計に用いる水平地盤反力係数のモデル化について検討を行った。本報では収集・整理したデータと地盤反力-変位量関係のモデル化について報告する。

2. 使用データ

収集したデータは、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 9 文献、26 ケース⁸⁾⁻¹⁴⁾を検討の対象にした。

- ・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/β程度、β: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 値の値が記述されている

- ・地表面変位が杭径の 3%以上

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、粘性土地盤に対する数が少ないのは、 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φ400~φ1,000 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φ600とφ1,000が大半である。杭頭部付近の地盤(ここでは、地表面から 1/β程度の範囲の地盤を対象とした)は、砂質土では N 値の範囲が 3~12 で、粘性土では N 値が 0~5、 q_u 値の範囲が 20~75kN/m²であり、両地盤共に杭頭部付近が比較的緩い地盤である。杭種は鋼管杭が大半であるが、場所打ち杭や 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。

3. k_h の算定

それぞれの載荷試験結果から水平地盤反力係数 k_h を求めた。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¹⁾を用いて逆解析を行った。杭頭変位量: y_t 、杭突出長: h 、杭頭荷重: H 、杭径: B 、杭の弾性係数: E 、杭の断面 2 次モーメント: I は、文献に記載されている値を用いたが、 y_t 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 が記載されていない場合は公称値を用いた。逆解析によって求めた水平地盤反力係数を以後逆算 k_h とよぶ。地表面変位量 y はこの逆算 k_h から計算によって求めた。

4. 地盤反力 p -地表面変位量 y 関係のモデル化

各載荷試験の p - y 関係は、地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係で用いられる双曲線にモデル化して検討を行った。双曲線は式(3)で表わされる。式(3)を式(4)のように書き換えると、 $1/k_h$ と y の関係は線形となる。

$$p = \frac{k_{h1} \times y}{1 + \frac{k_{h1} \times y}{p_{max}}} = \frac{y}{\frac{1}{k_{h1}} + \frac{y}{p_{max}}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{k_h} = \frac{1}{k_{h1}} + \frac{y}{p_{max}} \quad (4)$$

ここで、 p_{max} :最大地盤反力、 k_{h1} :初期剛性である。そこで、3 で求めた逆算 k_h -地表面変位量 y 関係から $1/k_h$ - y 関係を

Coefficient of horizontal subgrade reaction of single piles based on horizontal loading tests in the past
(Part I. Literature review and modeling of subgrade reaction-displacement relationship)

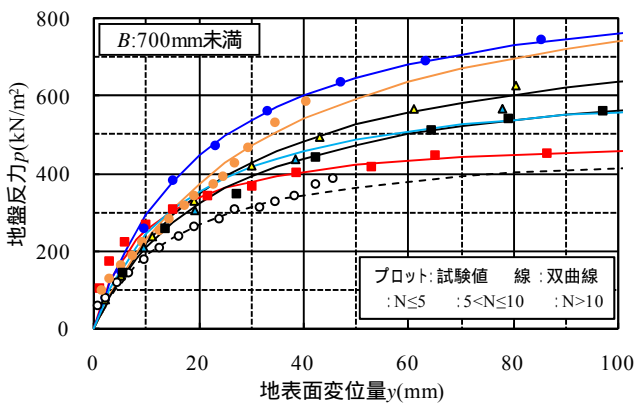
KOBAYASHI Koichi, YOSHIKAWA Nao, SUZUKI Yasutsugu, KANAI Shigeo, ABE Yukio and KISHISHITA Takahiro

作成し、最小自乗法を用いて切片と勾配求め、それらの逆数をとって p_{max} , k_{hl} 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、双曲線と各載荷試験の 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、地盤反力 p が減少している範囲のデータが主である。

同様の作業を全ての試験結果で行い、それぞれ k_{hl} と p_{max} の値を求めた。それらを用いて求めた双曲線と、試験結果から求めた p - y 関係を比較した結果を、杭径 700 以上と未満に分けて図 1(杭頭部砂質土)、図 2(杭頭部粘性土)に示す。砂質土の地表面変位量 y が小さい部分を除けば、両土質ともに双曲線でよく近似していることがわかる。また、同一地表面変位量時の地盤反力は、砂質土では小径($B < 700\text{mm}$)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が、粘性土ではこの傾向は認められない。

5. まとめ

水平載荷試験結果から求まる地盤反力 p -地表面変位量 y 関係について、地盤条件や杭種・杭径にかかわらず双曲線でよく近似できることが分かった。初期剛性 k_{hl} 、最大地盤反力 p_{max} 等については(その 2)で報告する。



【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) 茶谷文雄: 地盤反力係数について, 基礎工, pp.17-24, 1985
- 4) 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
- 5) 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
- 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) 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
- 8) HYSC 杭: 一般土木工法・技術審査証明報告書, pp.49-54, 2000
- 9) NS エコパイル工法: 建設技術審査証明事業報告書, 2004
- 10) つばさ杭: 建設技術審査証明報告書, 2001
- 11) 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
- 12) 川端規之ら: 線路上空利用建物の杭基礎の大変形交番水平載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1325-1330, 1989
- 13) 森山陽一ら: 鋼管ソイルセメント杭の元日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
- 14) 轟丈詩ら: 鋼管杭の水平載荷試験, 基礎工, pp.68-73, 1987

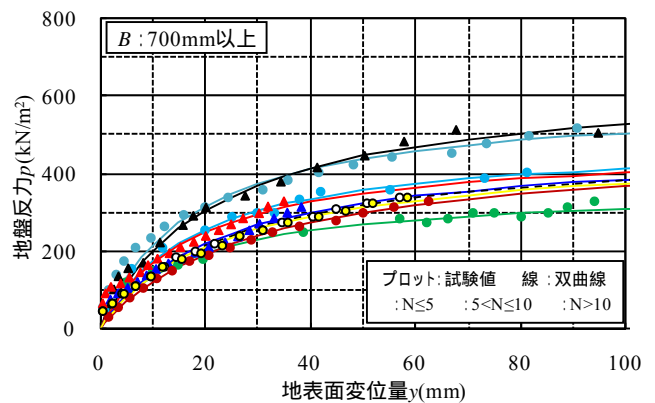


図 1 p - y 関係の実測値と双曲線近似値(砂質地盤)

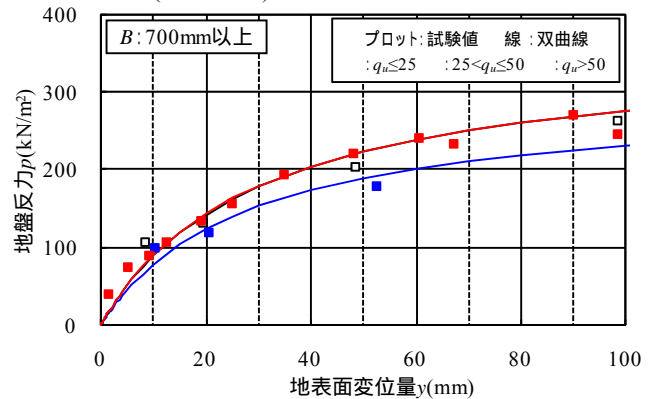
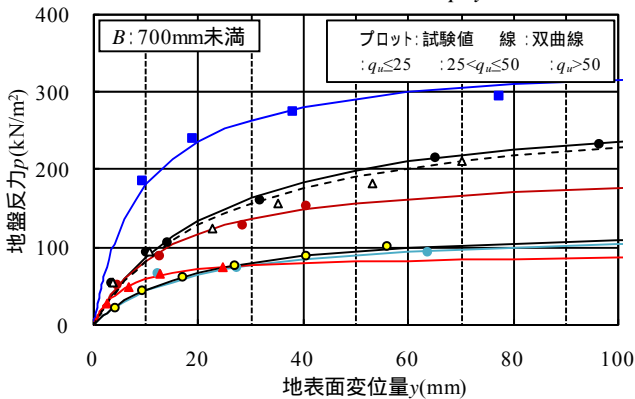


図 2 p - y 関係の実測値と双曲線近似値(粘性土地盤)

*1 (独)原子力安全基盤機構・博士(工学)
 *2 ジャパンパイル(株)
 *3 鹿島建設(株)・博士(工学)
 *4 千代田工営(株)・博士(工学)
 *5 鋼管杭・鋼矢板技術協会
 *6 (株)フジタ・博士(工学)

Japan Nuclear Energy Safety Organization
 Japan Pile Corporation
 Kajima Corporation
 Chiyoda Geotech Co., Ltd.
 Japanese Technical Association for Steel Pipe Piles and Sheet Piles
 Fujita Corporation