

桩基中性点深度估算方法对比分析

胡 昕，张希宏，刘厚健，刘志伟

(中国电力工程顾问集团西北电力设计院, 陕西 西安 710032)

摘要: 通过对现有桩基中性点估算方法的总结分析, 探讨了它们各自的特点及其适用范围, 并结合工程实例对实测值和估算值进行了比较, 对各种估算方法进行了评价。研究表明: 经验取值法最为简便易行, 但估算结果偏大; 渐次趋近法适用范围最广, 但估算过程较为繁琐, 估算结果准确度较差; 日本规范法和理论近似解法涉及参数较多, 但估算结果较为贴近实际。

关键词: 桩基础; 负摩阻力; 中性点; 荷载传递

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0184-04

作者简介: 胡 昕(1979-), 男, 新疆阿勒泰人, 博士, 工程师, 主要从事特殊土工程特性、地基基础工程及边坡工程等方面的研究与设计工作。E-mail: moyuan@126.com。

Comparison and analysis of estimation methods for depth of neutral point of pile foundation

HU Xin, ZHANG Xi-hong, LIU Hou-jian, LIU Zhi-wei

(Northwest Electric Power Design Institution, China Power Engineering Consulting Group Corporation, Xi'an 710032, China)

Abstract: By analyzing of the existing methods for the neutral point of piling foundation, their features and applications are studied. The measured and predicted values are compared, and the various means are evaluated with engineering illustrations. The results indicate that the method of empirical value is the simplest and easiest one, but its predicted value is large. The gradually approaching method can be used under most conditions, but its forecasting process is complicated. The Japanese standard method and the theoretical approximation method involve more parameters, but their predicted values are more close to the measured ones.

Key words: pile foundation; negative skin friction; neutral point; load transfer

0 引言

当桩周土因自身固结、浸水湿陷、场地填土、地面堆载、地下水位下降等原因而产生的沉降大于桩体沉降时, 桩侧将产生负摩阻力。负摩阻力不仅不能为桩基承担上部荷载做贡献, 反而对桩基产生下拉作用, 严重时甚至会导致基础破坏。因此, 桩基设计应高度重视负摩阻力问题。

自1948年Terzaghi和Peck^[1]提出桩基负摩阻力问题以来, 大量学者对桩基负摩阻力进行了室内外试验研究、理论研究以及数值模拟方面的研究, 得到了许多有价值的结论^[2-7]。但是由于桩基负摩阻力的产生受多个因素影响, 是一个十分复杂的力学体系, 其工程设计计算方法仍是半理论半经验的, 尚需提高其与工程实际的切合度。

对于工程应用而言, 负摩阻力计算主要在于如何

确定作用于桩基上由负摩阻力引起的下拉荷载。这涉及两方面的问题, 如何计算负摩阻力强度及如何确定负摩阻力沿桩身分布规律。关于负摩阻力强度已有较为成熟的计算方法, 这点在各国桩基规范和手册中均有体现^[8-11]。但对于负摩阻力沿桩身的分布规律主要根据已有的桩基试验结果分析得出了一些经验性结论, 研究尚待进一步加强。为了明确负摩阻力的分布规律, 以便计算考虑负摩阻力影响的桩基极限承载力和桩基沉降, 必须要知道中性点的位置^[12]。

由于中性点的位置受桩周附加荷载、桩周土层性质、桩顶荷载、桩体特征及桩端持力层性质等众多因素的影响^[13-15], 不同学者、不同规范采用不同的估算

方法。各种方法由于考虑的影响因素不同, 估算结果差异很大, 有必要进行对比分析, 探索各自的适用范围, 及适宜于设计使用的中性点估算方法。

1 中性点的定义

众所周知, 桩顶荷载主要通过桩侧摩阻力和桩端阻力作用到地基土上。桩侧摩阻力的大小和方向均取决于桩与桩周土的相对位移。当桩周土相对于桩侧的位移与桩体位移方向相反时, 桩周土对桩产生正摩阻力; 当桩周土相对于桩侧的位移与桩体位移方向一致时, 桩周土对桩产生负摩阻力。在同一根桩上由负摩阻力过渡到正摩阻力, 存在一个桩土位移相等、摩阻力等于零的分界点, 该点是摩阻力、桩土相对位移和轴向压力沿桩身变化的特征点, 通常称之为中性点^[14, 16]。中性点以上轴向压力随深度递增, 中性点以下轴向压力随深度递减。在中性点处桩身轴力达到最大值。

2 中性点估算方法

进行现场试验是最可靠的中性点估算方法, 但由于其费时费工, 不具备普适性。人们在工程实践中, 不断探索简便易行的估算方法。目前, 中性点的估算方法主要有经验取值法、渐次趋近法、理论近似解法等。

2.1 经验取值法

中性点深度 l_n 应按桩周土层沉降与桩沉降相等的条件计算确定, 也可按下式确定:

$$l_n = \beta l_0 \quad (1)$$

式中 l_n 为自桩顶算起的中性点深度, m ; l_0 为桩周软弱土层下限深度, m ; β 为中性点深度系数。

根据桩端持力层性质的不同, JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》规定, 中性点深度系数 β 按表 1 取值。当桩穿过湿陷性黄土层时, β 应按表 1 值增大 10% (持力层为基岩除外); 当桩周土层固结与桩基固结同时完成时, 取 l_n 等于 0; 当桩周土层计算沉降量小于 20 mm 时, β 应按表 1 值乘以 0.4~0.8 折减。

表 1 中性点深度系数

Table 1 Depth factor of neutral point

持力层 性质	黏性土、 粉土	中密以上 砂	砾石、卵 石	基岩
中性点深 度比 β	0.5~0.6	0.7~0.8	0.9	1.0

根据桩基工作性状的不同, 中性点深度系数 β 可按表 2 取值。

表 2 中性点深度系数^[16]

Table 2 Depth factor of neutral point

α	$0 \leq \alpha$	$0.05 \leq \alpha$	$0.05 \leq \alpha$	$\alpha \geq 0.9$
----------	-----------------	--------------------	--------------------	-------------------

	≤ 0.05	≤ 0.5	≤ 0.9	
β	1.0	0.9	0.8	0.7

注: α 为桩侧部阻力与桩极限承载力之比, β 为中性点深度比。

2.2 渐次趋近法

根据中性点的定义, 中性点位置可通过计算绘制桩土相对位移曲线而确定。具体步骤如下:

(1) 采用分层总和法计算桩周土的沉降量, 并作出桩长范围内桩周土的竖向位移曲线。

(2) 根据经验取值法, 假定一个中性点; 参考 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》, 可得到桩侧摩阻力 q_s 、桩侧负摩阻力 q_s^n 及桩端阻力 q_p 的取值, 确定桩身轴力和桩端阻力值。

(3) 采用杆件压缩公式及分层总和法分别计算桩身压缩量和桩底下卧层沉降量, 作出桩的竖向位移曲线。

(4) 桩周土竖向位移曲线与桩竖向位移曲线的交点, 即为中性点的计算位置。将其与假设的中性点位置进行比较, 若二者接近即可取为实际中性点位置, 若差异较大, 取二者平均值为中性点位置, 重复步骤(2)和(3), 直至二者基本吻合为止。

2.3 日本规范法

为反映附加荷载引起的地表沉降、桩顶荷载、桩径、土层压缩性、桩侧摩阻力以及桩端持力层等因素对中性点深度的影响, 中性点深度 l_n 可按下式进行计算^[17]:

$$l_n = \frac{K_v S_0 + \bar{\tau} U l_0 - P}{(K_v S_0)/l_0 + 2\bar{\tau} U} \quad (2)$$

式中 K_v 为桩端土层垂直弹簧系数; S_0 为地基表面沉降; $\bar{\tau}$ 为桩侧平均单位摩阻力; U 为桩周长; l_0 为桩周压缩层下限深度; P 为桩顶荷载。

2.4 理论近似解法

根据桩体的受力平衡, 可得

$$P_a + P_{nf} = P_s + P_s^n + P_{np} \quad (3)$$

式中 P_a 为桩顶荷载; P_{nf} 为桩身重力; P_s 为中性点以下土层提供的正摩阻力; P_s^n 为中性点以上土层提供的负摩阻力; P_{np} 为桩端阻力。

假设侧摩阻力与上覆土层的有效压力 \bar{q} 成正比例关系, 运用 β 法^[18], 可得

$$P_{ns} = \int_0^{l_n} U \beta_1 \bar{q} dz = \int_0^{l_n} U \beta_1 \gamma' z dz = \frac{1}{2} U \beta_1 \gamma' l_n^2, \quad (4)$$

$$P_s = \int_{l_n}^l U \beta_2 \gamma' a dz = \frac{1}{2} U \beta_2 \gamma' (l^2 - l_n^2). \quad (5)$$

式中 l 为桩长; γ' 为土层的重度, 地下水位以下取浮重度; 桩端阻力 P_{np} 宜按下列式估算:

$$P_{np} = p_{np} A_p \quad (6)$$

式中 p_{np} 为极限端阻力标准值, 可按文献[8]表

5.3.5-2 取值; A_p 为桩端面积。

联立式(3)~(6)可得

$$P_a + P_{nf} = \frac{1}{2}U\beta_2\gamma'(l^2 - l_n^2) + \frac{1}{2}U\beta_1\gamma'l_n^2 + p_{np}A_p \quad (7)$$

通过将不同的 P_a , β_2 , β_1 , p_{nf} , p_{np} 及 A_p 代入式(7), 即可求得不同工况下中性点的位置。

3 中性点估算方法的特点及对比分析

3.1 中性点估算方法的特点

(1) 经验取值法简单易行, 但仅考虑了桩端持力层的性质或桩基工作性状, 没考虑桩周土层性质、桩周附加荷载大小、桩顶荷载大小及桩体特征等影响, 得出的是最大中性点深度, 是偏于安全的。

(2) 渐次趋近法是基于桩基沉降与桩周土沉降同时完成的假设进行的, 未考虑中性点位置的时间效应。通过渐次趋近法确定的中性点位置只是一个近似值。

(3) 日本规范方法考虑了桩周附加荷载、桩顶荷载、桩周及桩端土层性质、桩径等因素对负摩阻力沿桩身分布的影响, 估算结果较为贴近实际, 但参数较多, 可操作性较差。

(4) 理论近似解法也能考虑桩周附加荷载、桩顶荷载、桩周及桩端土层性质、桩身特征等因素对负摩阻力沿桩身分布的影响, 其计算参数较为常规, 易于获取, 且能根据具体情况进行取舍, 估算结果较为贴近实际。

3.2 中性点估算方法的对比分析

4 种方法在估算过程中均进行了一定程度的简化, 其结果均是近似值。但由于依据的方法和理论不同, 结果与实际的切合度差异较大。

根据 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》, 计算桩基承载力需计入桩侧负摩力的情形主要有: ①桩穿越较厚松散填土、自重湿陷性黄土、欠固结土、液化土层, 桩周土产生的沉降大于桩基沉降时; ②桩周存在软弱土层且地面承受局部较大的长期荷载或大面积堆载, 导致桩周土产生的沉降大于桩基沉降时; ③地下水位下降引起桩周土层产生显著固结变形, 导致桩周土产生的沉降大于桩基沉降时。以上 3 种情形均可采用渐次趋近法估算桩基中性点深度; 经验取值法适用于估算情形①和情形②的桩基中性点深度; 理论近似解法和日本规范方法仅能用于估算情形②的桩基中性点深度。

4 工程实例分析

文献[13]对在填土荷载作用下某高速公路桥台桩基的负摩阻力进行了现场测试, 获得了宝贵的实测资料。本文结合文献[13]工程实例, 对 4 种中性点估算

方法的实用性和适用性进行了比较分析。

4.1 工程概况

桥台桩基: 桩径 1.50 m, 桩长约 26.00 m, 进入持力层强风化二长花岗岩 2.50 m, 填土高度 4.5 m。岩土层分布情况如下: ①亚黏土厚约 1.68 m; ②淤泥厚约 7.20 m; ③淤泥夹砂厚约 2.50 m; ④淤泥厚约 3.20 m; ⑤中砂厚约 3.48 m; ⑥砾砂及粗砂厚约 3.00 m; ⑦砂质黏性土厚约 1.95 m; ⑧强风化二长花岗岩厚约 2.70 m。各岩土层物理力学参数见表 3。

表 3 岩土层物理力学参数^[13]

Table 3 Physico-mechanical parameters of soil and rock mass

类 型	天然重度 (g m ⁻³)	标贯 击数	静力触 探/kPa	弹性模量 /MPa
①亚黏土	1.93	24	40	—
②淤泥	1.57	1	6	—
③淤泥 夹 砂	1.74	8	18	—
④淤泥	1.57	1	12	—
⑤中砂	1.82	8	17	—
⑥砾砂	1.82	18	20	—
⑦砂质 黏性土	1.95	26	80	—
⑧强风化 二长花岗 岩	2.49	150	—	1.4×10^4

4.2 估算值与实测值比较

4 种方法估算的中性点深度列于表 4。从表 4 可以看出, 由于经验取值法只考虑了桩端持力层的性质或桩基工作性状, 估算的中性点深度大于实测值, 同时也大于其他 3 种方法的估算值, 偏于安全。日本规范计算结果受参数取值影响较大^[13]。渐次趋近法由于未考虑桩周土沉降与桩基沉降的不同步性, 估算中性点深度也偏大。理论近似解法和日本规范法估算结果与实测值较为接近, 但二者估算结果受参数取值影响较大。

渐次趋近法、日本规范法及理论近似法估算中性点深度均涉及一定数量的土工参数, 估算结果受参数取值影响较大。因此, 在前期岩土工程勘察阶段, 应根据选定的估算方法进行针对性土工试验, 以确保估算结果真实可靠。

表 4 中性点深度估算值与实测值比较

Table 4 Comparison between predicted and measured neutral points

实测值	经验 取值	渐次 趋近	日本 规范	理论近 似解	(m)
16.0 ^[13]	23.0	19.2	16.7~17.7 ^[13]	16.8	

5 结语

目前, 桩基中性点深度估算方法主要有经验取值

法、渐次趋近法、日本规范法及理论近似解法。本文结合工程实例对以上 4 种估算方法进行了对比分析, 得到以下几点结论。

(1) 经验取值法已列入 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》, 但其估算值远大于实测值, 在设计中需通过加大桩长来平衡多考虑的负摩阻力, 造成材料浪费。

(2) 日本规范法和理论近似解法的估算值均较为接近实际情况, 但在参数选取上存在一定误差, 需进一步明确各参数对估算结果影响的大小。

(3) 桩基作用负摩阻力的所有情形均可采用渐次趋近法估算中性点深度, 但其估算结果偏大。

参考文献:

- [1] TERZAGHI Karl, PECK Ralph B, MESRI Gholamreza. Soil mechanics in engineering practice[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996: 419 - 423.
- [2] JOHANNESSEN I J, BJERRUM L. Measurement of the compression of a steel pile to rock due to settlement of the surrounding clay[C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 1965, 2: 261 - 264.
- [3] FELLENIUS B H, BROMS B B. Negative skin friction for long piles driven in clay[C]// Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969, 2: 93 - 98.
- [4] POULOS H G, DAVIS E H. Prediction of downdrag force in end-bearing piles[J]. ASCE, 1975, **101**(GT2): 189 - 204.
- [5] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1980: 265 - 293.
- [6] EMILIOS M COMODROMOS, SPYRIDOULA V BAREKA. Evaluation of negative skin friction effects in pile foundation using 3D nonlinear analysis[J]. Computer and Geotechnics, 2005, **32**: 210 - 221.
- [7] LEE C J, BOLTON M D, AL-TABBA A. Numerical modeling of group effects on distribution of drag-loads in pile foundations[J]. Geotechnique, 2002, **52**(5): 325 - 335.
- [8] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 43 - 46. (JGJ 94—2008 Technical Code for Building Pile Foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 43 - 46. (in Chinese))
- [9] FLEMING Ken, WELTMAN Austin, RANOLPH Mark, et al. Piling engineering[M]. 3rd ed. New York: Taylor & Francis, 2009: 168 - 173.
- [10] Canadian Geotechnical Society. Canadian foundation engineering manual[M]. 4th ed. Richmond, BC: Bitech Publishers Ltd, 2006: 273 - 276.
- [11] Buildings Department. Code of practice for foundations[S]. Hong Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2004: 27-28.
- [12] 肖俊华, 袁聚云, 赵锡宏. 桩基负摩阻力的试验模拟和计算应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 92 - 94. (XIAO Jun-hua, YUAN Ju-yun, ZHAO Xi-hong. Experimental stimulation and computing application of negative skin friction of pile foundation[M]. Beijing: Science Press, 2009: 92 - 94. (in Chinese))
- [13] 马时冬. 桩身负摩阻力的现场测试与研究[J]. 岩土力学, 1997, **18**(1): 8 - 15, 24. (MA Shi-dong. Study on the field measurement of negative friction of piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, **18**(1): 8 - 15, 24. (in Chinese))
- [14] 丁翠红. 高层建筑基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009, 6: 122 - 126. (DING Cui-hong. Foundation engineering of high-rise building[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009, 6: 122 - 126. (in Chinese))
- [15] 张 雁, 刘金波. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009, 11: 54 - 59. (ZHANG Yan, LIU Jin-bo. Pile foundation handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009, 11: 54 - 59. (in Chinese))
- [16] 刘金砾. 桩基础设计与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 248 - 259. (LIU Jin-li. Design and calculation of pile foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990: 248 - 259. (in Chinese))
- [17] 日本建築学会. 建築基礎構造設計指針[S]. 第 2 版. 東京都: 丸善出版株式会社, 2001: 250 - 262. (Architectural Institute of Japan. Recommendations for design of building foundations[S]. 2nd ed. TOUKYOU-TO: Maruzen Publishing Co Ltd, 2001: 250 - 262. (in Japanese))
- [18] JOSEPH E, BOWLES P E. Foundation analysis and design [M]. 5th ed. Singapore: McGraw-Hill Book Companies, 1997: 1029 - 1035.

(本文责编 孙振远)