



管桩桩身总侧阻力分配函数的研究*

蒋建平, 张子怡

(上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 为研究管桩的承载性状, 基于管桩的现场试桩资料, 对管桩桩身的总侧阻力分配函数进行研究, 建立了管桩桩身总侧阻力分配函数的方程式, 并对函数中各参数的取值进行了说明。研究发现, 对各桩长及对各长径比的管桩, 桩身总侧阻力占比-桩顶沉降曲线大部分呈现程度不等的线性关系, 且这种线性关系与桩顶荷载、桩身总侧阻力是否达到了极限状态无关; 基于该侧阻力分配函数计算了3根桩的桩身总侧阻力, 并将计算值与实测值进行了对比, 发现误差绝对值在15%以内。对只有桩顶荷载、桩顶沉降的桩, 可以通过该方法建立桩身总侧阻力分配函数, 从而获得桩身总侧阻力和端阻力, 进而可分析管桩的承载性状。但因桩身侧阻力分配问题的复杂性, 研究还是初步的, 有待积累更多的现场实测资料, 从而完善和深化该分配函数。

关键词: 管桩; 桩身总侧阻力; 分配函数; 现场试验; 承载性状

中图分类号: TU 473; U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0143-06

Investigation on the distribution function of pile total skin friction for pipe piles

JIANG Jian-ping, ZHANG Zi-yi

(College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to study the bearing capacity of pipe piles, this paper investigates on the distribution function of pile total skin friction for pipe piles based on the field test data of pipe piles. Meanwhile, the equation of distribution function of pipe pile total skin friction is established, and the parameters in the equation are illustrated. It is found that most of the curves of the distribution of pile total skin friction and versus pile head settlement present linear relationship for all types of pile length and length diameter ratio, and there's no relation between the linear correlativity and that pile head load, pile total skin friction reach ultimate state or not. The pipe pile total skin frictions are calculated based on the distribution function, and the results are compared with the measured values, the error is within 15%. The equation of distribution function of pipe pile total skin friction can be established for pipe piles which have only pile head load values and pile head settlement values, and the pile total skin friction and pile tip resistance can be obtained, then the bearing behaviors of pipe piles can be analyzed and acquired. However, the investigation is still preliminary because of the complexity, more field test data are required to improve and deepen the distribution function of pile total skin friction for pipe piles.

Keywords: pipe pile; pile total skin friction; distribution function; field test; bearing capacity

桩是一种重要的地基基础形式, 它在各类工程中得到了广泛的应用, 按桩的截面形状主要有方桩、管桩及其他截面形状的桩^[1-2]。管桩(如PHC管桩、钢管桩等)是典型的打入或静压入桩^[3-5]。竖向沉入地基地层中的管桩在桩顶竖向荷

载作用下, 在加荷的起始阶段, 土对桩的阻力主要由桩上部侧摩阻力提供, 随着荷载的继续增加, 桩身位移量增大, 上部桩侧土体逐步达到极限状态, 桩身下部的桩侧摩阻力也随之产生并逐渐增大, 这样将桩顶荷载向桩端传递, 桩端土层受到

收稿日期: 2016-07-03

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41372319)

作者简介: 蒋建平 (1966—), 男, 博士, 教授, 从事桩基础、岩土力学研究。

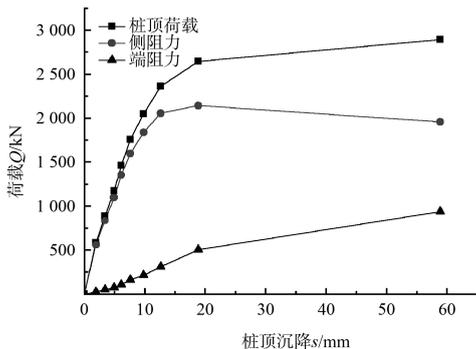
压缩而产生桩端阻力。

桩侧摩阻力和桩端阻力逐步发挥出来的过程就是桩-土体系的荷载传递过程。在桩达到极限状态情况下，承载力等于桩侧摩阻力极限值与桩端阻力极限值之和，在一般受力状态下桩侧摩阻力与桩端阻力往往不能同时达到极限值，因为它们发挥程度与桩土间的变形性状有关，各自达到极限值时所需要的位移量并不相同。

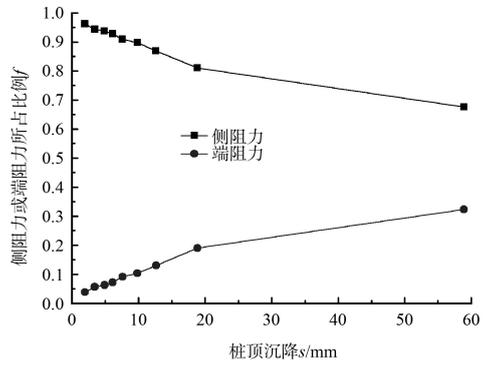
桩身侧阻力研究是桩承载性状研究的重要内容，目前对桩身侧阻力的研究主要是桩身单位面积侧阻力(kPa)的传递模型，而较少研究桩身总侧阻力(kN)的发挥、分布和自组织等^[6]。各桩型的承载性状不同，本文仅基于管桩的现场试验，对管桩桩身总侧阻力占桩顶荷载的比例与桩顶沉降的关系函数即分配函数进行了研究。该分配函数的研究对管桩顶荷载的划分、对管桩荷载传递性状机理的研究具有重要意义。

1 管桩桩身总侧阻力占比-桩顶沉降关系曲线总体上呈现线性关系

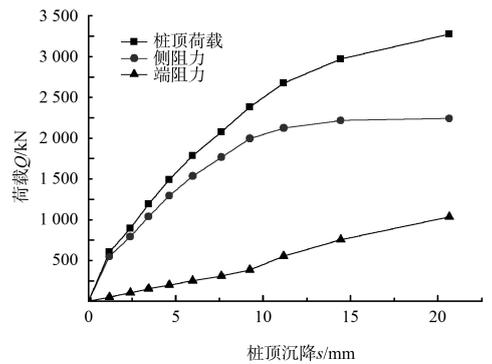
笔者从国内外文献中收集了管桩的现场试验资料。共收集现场试验管桩 95 根，其中有完整的桩顶荷载、桩顶沉降、桩身总侧阻力(单位 kN，下同)、端阻力(单位 kN，下同)资料的有 38 根^[7-15]。对这 38 根现场试验管桩的桩身总侧阻力占桩顶荷载的比例与桩顶沉降的关系进行了分析，发现大部分桩的桩身总侧阻力占比-桩顶沉降曲线呈现程度不等的线性关系。代表性的 3 根桩的曲线见图 1。



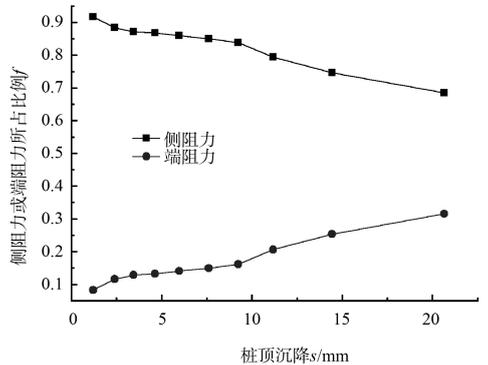
a) 沈阳某工程s1桩
桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线



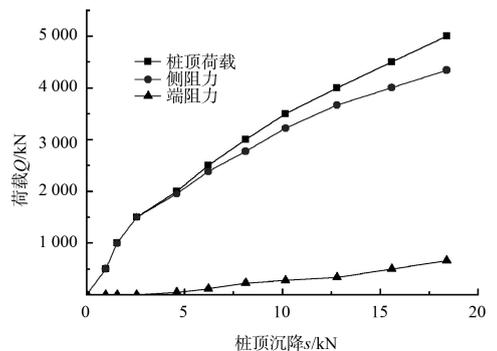
b) 沈阳某工程s1桩
桩侧阻占比、端阻占比-桩顶沉降曲线



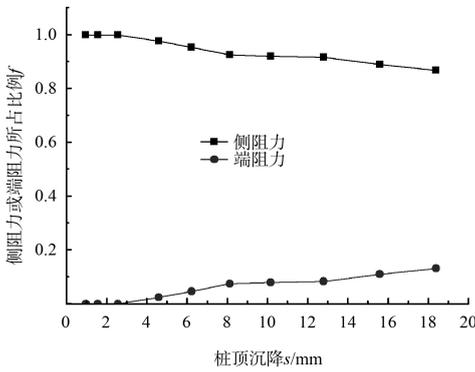
c) 沈阳某工程s3桩
桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线



d) 沈阳某工程s3桩
桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线



e) 福建某工程s2桩
桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线



f) 福建某工程s2桩
桩侧阻占比、端阻占比-桩顶沉降曲线

图 1 桩侧阻占比-桩顶沉降的大体线性关系

图 1 中的 a)、c)、e) 为各桩的桩顶荷载、侧阻力、端阻力与桩顶沉降的关系曲线, b)、d)、f) 分别为与 a)、c)、e) 对应的桩身总侧阻力占桩顶荷载比例、端阻力占桩顶荷载比例与桩顶沉降的关系曲线。

从图 1 的 b)、d)、f) 可发现, 对桩长 17.8、18.4、42 m 及对长径比 44.5、46、84 的各管桩, 桩身总侧阻力占比-桩顶沉降曲线总体呈现线性关系。图 1a) 中的桩顶荷载-桩顶沉降曲线、桩身总侧阻力-桩顶沉降曲线都呈陡降型, 表明桩顶荷载、桩身总侧阻力都已达到了极限状态; 图 1c) 中桩身总侧阻力-桩顶沉降末段也呈陡降型, 表明桩身总侧阻力也达到了极限状态; 而图 1e) 中, 不论桩顶荷载-桩顶沉降曲线还是桩身总侧阻力-桩顶沉降曲线都呈缓变型, 说明桩顶荷载、桩身总侧阻力都没有达到极限状态。

所以还可发现, 桩身总侧阻力占比-桩顶沉降曲线总体上呈现线性关系的现象与桩顶荷载、桩身总侧阻力是否达到了极限状态无关。

2 管桩桩身总侧阻力分配函数的建立

根据前面的分析, 本文建立的线性的管桩桩身总侧阻力分配函数如下:

$$f = p_2 - p_1 s \quad (1)$$

式中: f 为桩身总侧阻力占桩顶荷载的比例; p_1 、 p_2 为待确定的参数; s 为桩顶沉降。

$0 < f < 1$, 对短桩(桩长 l 小于 50 m)的最小值为

0.4~0.6, 对超长桩(桩长 l 大于等于 50 m)的最小值为 0.7~0.9。

p_2 : 同时满足桩长 l 大于 50 m、长径比 λ 大于 40 时取大于 1, 一般取 1.01~1.03, 桩长 l 、长径比 λ 大者取大值, 小者取小值。不能同时满足桩长 l 大于 50 m、长径比 λ 大于 40 时取小于 1, 一般取 0.90~0.99, 桩长 l 、长径比 λ 大者取大值, 小者取小值, 具体的取值见表 1。

$$p_1: \quad p_1 = \frac{Q_j - Q}{\alpha Q_j (s_j - s)} \quad (2)$$

式中: $\frac{(Q_j - Q)}{(s_j - s)}$ 为曲线末段的斜率; $\alpha = \frac{\lambda \xi \rho \eta}{20}$, λ 为长径比, 桩身带肋, ξ 取 1.1~1.9, 不带肋, ξ 取 1.0, $\rho = 0.03l$, l 为桩长; Q 为桩顶荷载。

η : 持力层为硬实的, $\eta \leq 1$, 一般取 0.1~1.0, 越硬实 η 值越小(如各类粗砂取 0.6~0.8, 各类砾石取 0.4~0.59); 持力层为松软的, $\eta > 1$, 一般取 1.1~2.0, 越松软 η 值越大(如各类黏土取 1.4~1.7)。

η 的取值还应考虑桩端土与桩周土的刚度比 m , 刚度比越小, η 值越大。如果 $m > 1$, η 则要减小一些, 减小部分的值按 0.01 m 计算; 如果 $m < 1$, η 则要增大一些, 增大部分的按 0.01 m 计算。土的刚度可用土的弹性模量来进行计算, 桩周土的刚度可取考虑各土层厚度的加权平均刚度。

表 1 p_2 的取值

λ	p_2	λ	p_2
$\lambda < 500$	0.90	$3\ 000 \leq \lambda < 3\ 500$	0.95
$500 \leq \lambda < 700$	0.91	$3\ 500 \leq \lambda < 4\ 000$	0.96
$700 \leq \lambda < 1\ 500$	0.92	$4\ 000 \leq \lambda < 4\ 500$	0.97
$1\ 500 \leq \lambda < 2\ 200$	0.93	$4\ 500 \leq \lambda < 5\ 000$	0.98
$2\ 200 \leq \lambda < 3\ 000$	0.94	$5\ 000 \leq \lambda < 5\ 500$	0.99

3 管桩桩身总侧阻力分配函数的应用

3.1 管桩桩身总侧阻力分配函数的验证

1) 实例 1 验证。

杭甬客运专线的高铁地基采用增强型管桩^[11], 其中现场试验桩 1 由实测数据获得, 桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线及侧阻占比、端阻

占比-桩顶沉降曲线见图 2。从图 2 同样可发现桩身总侧阻力占比-桩顶沉降曲线总体上呈线性关系。下面通过本文的方法建立桩身总侧阻力占比的计算式, 并将由其计算的桩身总侧阻力结果与实测进行对比。

试验桩 1 长径比为 $43/0.5 = 86$, 桩身带肋, ξ 取 1.5; 桩长 43 m, ρ 取 1.29。桩身土层主要为软塑粉质黏土、稍密粉土、砂土, 持力层为密实

圆砾土, η 取 0.5; 桩长 43 m, p_2 取 0.96。则依据式(1)可得:

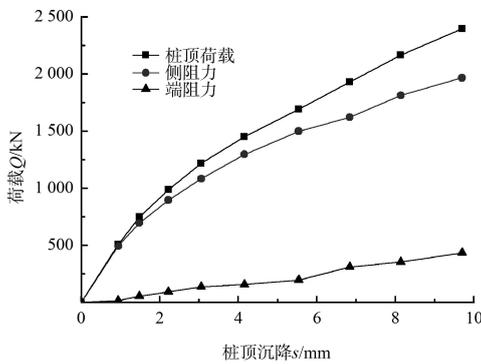
$$f = 0.96 - 0.015 s \tag{3}$$

$$Q_{s\text{计算}} = fQ = Q(0.96 - 0.015 s) \tag{4}$$

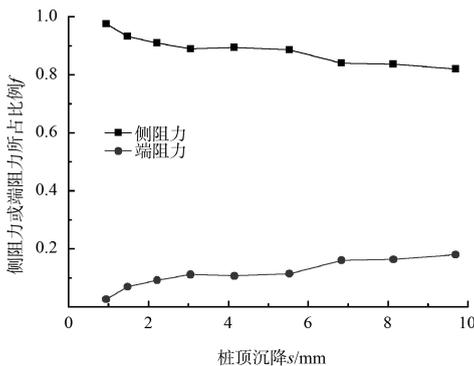
据式(3)可得到桩身总侧阻力占比, 从而可据式(4)可得到桩身总侧阻力(kN), 计算结果见表 2, 从表 2 可发现, 计算值与实测值的误差的绝对值在 0.177%~2.941%。

表 2 浙江某工程试桩 1 的桩身总侧阻力实测值与计算值对比

实测 桩顶荷载/kN	实测 桩顶沉降/mm	实测 桩身总侧阻力/kN	$Q_{s\text{计算}}$ 桩身总侧阻力/kN	误差/%
505.51	0.940 91	492.640	478.154 101	-2.940 542 267
746.42	1.475 42	694.947	700.044 893	0.733 638 190
984.48	2.214 57	894.404	912.401 509	2.012 280 476
1 216.67	3.056 09	1 081.549	1 112.229 405	2.836 709 635
1 449.00	4.153 36	1 294.576	1 300.766 720	0.478 204 478
1 690.41	5.531 86	1 497.381	1 482.526 928	-0.992 003 501
1 928.81	6.833 67	1 619.963	1 653.944 835	2.097 692 016
2 164.24	8.135 50	1 810.353	1 813.562 782	0.177 301 454
2 396.85	9.693 13	1 965.751	1 952.481 320	-0.675 043 767



a) 桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线



b) 桩侧阻占比、端阻占比-桩顶沉降曲线

图 2 浙江某工程试桩 1 的曲线

2) 实例 2 验证。

沈阳地区某图书馆采用 PHC 管桩^[7], 其中现场试验桩 s1 桩由实测数据获得的桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线及侧阻占比、端阻占比-桩顶沉降曲线见图 1a)、b)。

s1 桩长径比为 $17.8/0.4 = 44.5$, 桩身不带肋, ξ 取 1.0; 桩长 17.8 m, ρ 取 0.534。桩身土层主要为粉质黏土, 持力层为中粗砂, η 取 0.7。桩长 17.8 m, p_2 取 0.92。则依据式(1)可得:

$$f = 0.92 - 0.002 59 s \tag{5}$$

$$Q_{s\text{计算}} = fQ = Q(0.92 - 0.002 59 s) \tag{6}$$

据式(5)可得到桩身总侧阻力占比, 从而据式(6)可得到桩身总侧阻力(kN), 计算结果与实测值比较, 计算值与实测值的误差的绝对值在 0.236%~13.462%。

3) 实例 3 验证。

在浙江某滩涂进行管桩现场试验^[12], 试验桩 D3 桩长径比 $54/1.2 = 45$, 桩身不带肋, ξ 取 1.0; 桩长 54 m, ρ 取 1.62。桩身土层主要为淤泥、砂

质粉土、粉质黏土、砂质黏土、粉细砂、中细砂等, 持力层为砂质黏土, η 取 1.6。桩长 54 m, p_2 取 1.015。则依据式(1)可得:

$$f = 1.015 - 0.00266s \quad (7)$$

$$Q_{\text{计算}} = fQ = Q(1.015 - 0.00266s) \quad (8)$$

据式(7)可得到桩身总侧阻力占比, 从而据式(8)可得到桩身总侧阻力(kN), 计算值与实测值误差的绝对值在 0.075%~1.060%。

3.2 管桩桩身总侧阻力分配函数的应用

有很多现场试验管桩只获得了桩顶荷载、桩顶沉降的实测数据, 无桩身总侧阻力(kN)、端阻力(kN)实测数据, 对这种情形, 则可以通过本文的方法建立桩身总侧阻力分配函数, 从而获得桩身总侧阻力和端阻力, 进而可分析桩的承载性状。

1) 应用实例 1。

广清高速公路银盏至北江二桥段位于广东省清远境内, 采用预应力混凝土管桩。现场试验桩 2# 桩桩长 35 m、直径 500 mm。桩身地层主要为粉质黏土、粉砂、细砂、含黏性土砾砂、全风化页岩、全风化含砾粗砂岩, 持力层为全风化页岩^[4]。

现场试验后得到了试桩 2# 的桩顶荷载、桩顶沉降数据。依据前面的方法可得桩身总侧阻力占比的计算为

$$f = 0.945 - 0.0021s \quad (9)$$

据此式可得出桩身总侧阻力占比, 然后就可得到桩身总侧阻力、端阻力、端阻力占比等。这样就可得出图 3a) 的侧阻占比、端阻占比-桩顶沉降曲线, 及图 3b) 的桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线, 据此可分析该桩的承载传递性状。

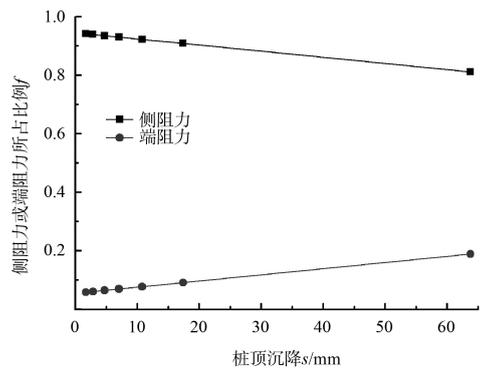
2) 应用实例 2。

辽沈地区大石桥某高层住宅分为主楼和裙房两部分, 主楼 20 层, 裙房 3 层。地层由上往下为 ①杂填土、②粉质黏土、③粉土、④粉质黏土、中粗砂、⑤黏土、⑥粉质黏土、⑦中粗砂。现场试桩的 4# 桩, 桩长 31 m、直径 600 mm, 持力层为中粗砂^[15]。现场试验后得到了试桩的桩顶荷载、桩顶沉降数据。依据前面的方法可得 4# 试桩桩身

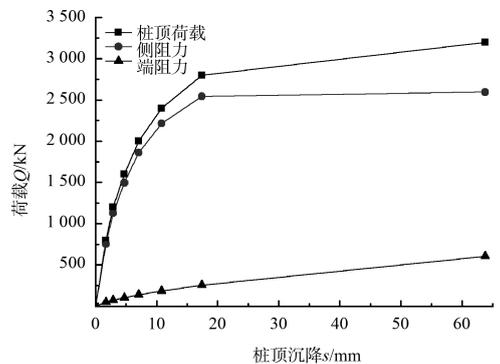
总侧阻力占比的计算式为

$$f = 0.93 - 0.010847s \quad (10)$$

据此式可得出该试桩的桩身总侧阻力占比, 然后就可得到桩身总侧阻力、端阻力、端阻力占比等。这样就可得出图 4a) 的侧阻占比、端阻占比-桩顶沉降曲线, 及图 4b) 的桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线, 据此可分析两桩的承载传递性状。

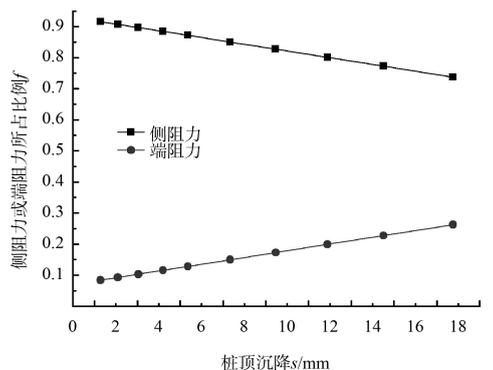


a) 桩侧阻占比、端阻占比-桩顶沉降曲线

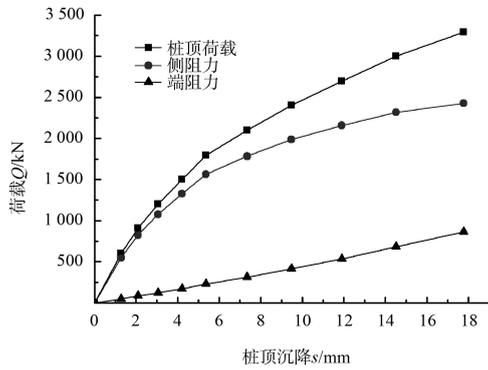


b) 桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线

图 3 广东某桥 2# 桩



a) 桩侧阻占比、端阻占比-桩顶沉降曲线



b) 桩顶荷载、侧阻力、端阻力-桩顶沉降曲线

图4 辽沈地区大石桥某高层住宅

4 结论

1) 研究各桩长及各长径比的管桩,发现大部分桩的桩身总侧阻力占比-桩顶沉降关系呈现程度不等的线性关系,且桩身总侧阻力占比-桩顶沉降曲线总体上呈现线性关系的现象与桩顶荷载、桩身总侧阻力是否达到了极限状态无关。

2) 选取有代表性的含有桩顶荷载、桩顶沉降、桩身总侧阻力、端阻力的3根现场试验管桩,用本文建立的桩身总侧阻力分配函数计算的桩身总侧阻力与实测的桩身总侧阻力进行对比,发现误差绝对值在15%以内。

3) 有很多现场试验管桩,只获得了桩顶荷载、桩顶沉降的实测数据,无桩身总侧阻力(kN)、端阻力(kN)实测数据,对这种情形,则可以通过本文的方法建立桩身总侧阻力分配函数,从而获得桩身总侧阻力和端阻力,进而可分析桩的承载性状。当然对其他途径获得的桩顶荷载、桩顶沉降数据,也可以通过本文的方法建立桩身总侧阻力分配函数,从而获得桩身总侧阻力和端阻力,进而可分析桩的承载性状。尽管如此,因桩身侧阻力分配问题的复杂性,本文的研究还是初步的,有待积累更多的现场实测资料,从而完善和深化本文建立的分配函数。

参考文献:

- [1] 袁谱,应宗权,苏林王.桩土作用下缺陷大管桩单桩极限承载力理论计算[J].水运工程,2016(5):121-124.
- [2] 陈新奎,戴国亮,龚维明.开口钢管桩竖向承载力计算方法[J].水运工程,2016(3):137-144.
- [3] DAEHYEON K, ADRIANO V D B, RODRIGO S. Load testing of a closed-ended pipe pile driven in multilayered soil [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009(4): 463-473.
- [4] DONGWOOK K, JUNHWAN L. Resistance factor contour plot analyses of load and resistance factor design of axially-loaded driven piles in clays [J]. Computers and geotechnics, 2012(2): 9-19.
- [5] 赵俭斌,王志斌,史永强.静压PHC管桩群桩效应的数值模拟分析[J].工程力学,2014(S1):139-144.
- [6] 蒋建平,高广运,章杨松.桩端岩土强度提高对超长桩桩身总侧阻力的强化效应研究[J].岩土力学,2009(9): 2609-2615.
- [7] 阮翔.静压PHC管桩承载特性的试验研究[J].昆明理工大学学报:自然科学版,2011(4):33-37.
- [8] 陈焰明,马燕燕,徐艳萍,等.软土地区防洪堤工程中预制方桩和PHC管桩的对比试验研究[J].岩土工程学报,2013(S2):986-989.
- [9] 施峰.PHC管桩荷载传递的试验研究[J].岩土工程学报,2004(1):95-99.
- [10] 彭文韬.超长大直径钢管桩竖向承载特性试验分析与预测方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [11] 付贵海,魏丽敏,郭志广.深厚软土地基增强型管桩受力性状试验研究[J].土木建筑与环境工程,2012(1):60-65.
- [12] 蔡伟忠,叶俊能.海洋工程中大直径管桩垂直水平荷载试验研究[J].上海国土资源,2011(3):81-86.
- [13] 朱勇.预应力管桩承载力现场试验及数值研究[D].合肥:合肥工业大学,2007.
- [14] 李国凯,陈新宇.大燕河大桥预应力混凝土管桩承载力试验[J].广东公路交通,2004(S1):30-34.
- [15] 赵俭斌,陈勇,马剑秋.静压管桩单桩承载力试验与桩基优化设计[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006(6):903-906.