



大直径钢管桩承载力影响因素及 现场试验分析

宋超¹, 李志豪¹, 孙益振², 白玉新²

(1. 盐田港东区国际集装箱码头有限公司, 广东 深圳 518083;
2. 大连理工现代工程检测有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对在工程应用中需要有效发挥开口钢管桩承载力的问题, 从钢管桩承载力机理出发, 结合承载力高应变检测数据, 系统分析桩侧桩端土层参数、钢管桩尺寸、入土深度、桩端承载力折减系数对开口钢管桩承载力的影响程度。结果表明, 对于端承为主的钢管桩打入桩, 应尽量控制终锤时的贯入度, 贯入度越小, 桩端土塞效应越明显, 利用桩端土塞效应可显著提高钢管桩的承载力。但是桩侧桩端土层参数和桩端承载力折减系数在施工因素和时间效应影响下也有可能变小, 需要提前预防受个别因素影响而导致承载力的降低。

关键词: 钢管桩; 承载力; 高应变试验; 桩端承载力折减系数

中图分类号: U655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0152-06

Influencing factors and field test of bearing capacity of large diameter steel pipe piles

SONG Chao¹, LI Zhihao¹, SUN Yizhen², BAI Yuxin²

(1. Yantian East Port International Container Terminals Co., Ltd., Shenzhen 518083, China;

2. Dalian University of Technology Modern Engineering Testing Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: Aiming at the problem that the bearing capacity of open-ended steel pipe piles is needed to enhance effective on site. On the basis of the bearing capacity mechanism of steel pipe piles and the data of high strain dynamic testing, we systematically analyze the impact of various factors on the bearing capacity of open-ended steel pipe piles, such as soil parameters of the pile around and the pile tip, dimensions of the steel pipe pile, depth of penetration, and the reduction coefficient of pile end resistance. The results show that it is essential to control the penetration during the final blows for primarily end-bearing driven pile. A lower penetration leads to a more pronounced effect of plugging, which in turn significantly increases the pile's bearing capacity. Conversely, the soil parameters and the bearing capacity reduction coefficient of the pile side and pile end may become smaller under the influence of construction factors and time effect, there is a need to prevent in advance the impairment of bearing capacity due to individual factors.

Keywords: steel pipe pile; bearing capacity; high strain test; reduction coefficient of pile tip bearing capacity

为在工程中充分利用大直径开口钢管桩的承载力, 其受力特性和承载力影响因素一直是工程技术人员分析研究的重点^[1-8]。影响钢管桩承载力

因素众多, 本文从钢管桩承载力机理出发, 结合高应变承载力检测数据, 系统分析开口钢管桩承载力的主要影响因素, 旨在为设计与施工提供参考。

收稿日期: 2024-09-27

作者简介: 宋超 (1966—), 男, 高级工程师, 从事港口工程管理。

1 机理分析

开口大直径钢管桩结构形式简单,因此其受力机理相对比较明确^[9],受力分析见图1。在打入过程中,桩端没有进入持力层或硬质土层前,桩端部未形成土塞,如不考虑自身重力和浮力,开口钢管桩的受力主要为:桩外侧土体作用在桩上的侧摩阻力 Q_{sk} 、桩内侧土体作用在桩上的侧摩阻力 Q_{rk} 、桩端土体作用在钢管桩桩体端部的端阻力 Q_{pk} ,这个阶段的开口钢管桩的总承载力 Q_{uk} 为

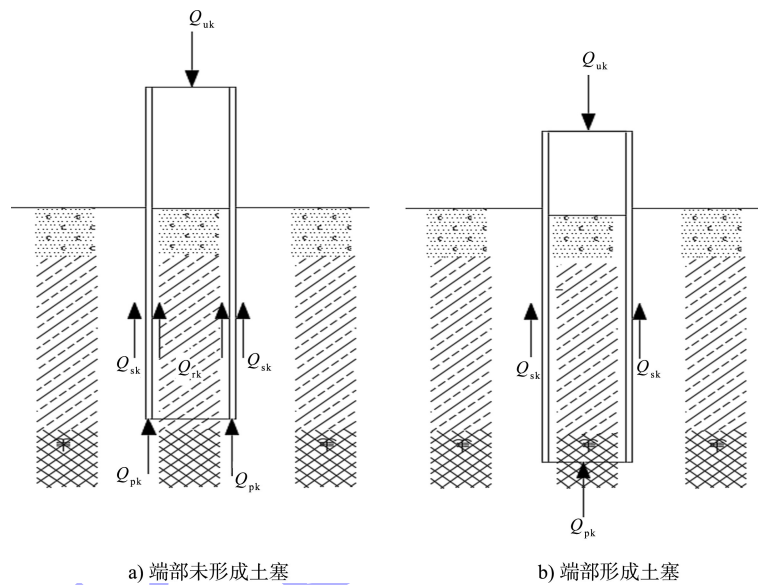
Q_{sk} 、 Q_{rk} 与 Q_{pk} 之和,这三者的计算公式为:

$$Q_{sk} = u_s \sum_{i=1}^n q_{sik} l_i \quad (1)$$

$$Q_{rk} = u_r \sum_{i=1}^n q_{rik} l_i \quad (2)$$

$$Q_{pk} = q_{pk} A_p \quad (3)$$

式中: u_s 为钢管桩外侧周长, u_r 为钢管桩内侧周长, l_i 为钢管桩在土层 i 中的长度, A_p 为钢管桩端断面积, q_{sik} 为桩侧土极限摩阻力, q_{pk} 为桩端土极限端阻力。



a) 端部未形成土塞

b) 端部形成土塞

图1 钢管桩受力分析

Fig.1 Force analysis of steel pipe piles

随着贯入深度增加,新进入桩内的土体被上部先进入桩内的土体和桩端以下土体反力的共同作用下会产生压缩变形,持力层土体一般为压缩性较低的硬质土,再加上桩内径尺寸效应影响,更容易被压缩挤密并形成土塞,此时桩内土体相对于钢管桩几乎没有相对位移,桩内侧土体作用在桩上的侧摩阻力 Q_{rk} 已不适宜用原来的公式计算,在这种情况下通常忽略桩内侧摩阻力,而将桩内侧摩阻力和钢管桩的端壁的端阻力综合在一起作为整体端阻力进行考虑,这个阶段的开口钢管桩总极限承载力 Q_{uk} 为 Q_{sk} 与 Q_{pk} 之和,此时 Q_{pk} 的计算公式为:

$$Q_{pk} = \lambda_p q_{pk} A_p \quad (4)$$

式中: A_p 为桩端外周范围内的断面总面积; λ_p 为系数,在JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》^[10]中定义为桩端承载力折减系数,而

在JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[11]中定义为桩端土塞效应系数,按地区经验取值,无当地经验值时按规范表进行确定,但表中给出的桩端承载力折减系数只适用于一些特定条件,不适用于全风化和强风化岩层,因此对于此类情况需要通过试验积累确定当地经验值,以便于更准确地了解和掌握钢管桩的承载能力。

2 测试方法

通过在桩身上安装传感器的静载试验可以获得桩端阻力、桩侧阻力以及总承载力极限值,但是在海上进行静载试验费时、费力且成本较高,仅在有条件的工程中可以采用,且试验桩数量有限。相对而言,高应变检测则是一种经济、实用的检测方法,CAPWAP软件拟合计算结果可提供

桩的桩端阻力、桩侧阻力、总承载力极限值和模拟静载试验的 $Q-s$ (荷载-沉降) 曲线等, 通过高应变检测可以在试桩阶段或施工前期通过打桩监测获得一定数量的检测数据, 进而获得与持力土层、入土深度、贯入度、桩长、桩径等因素匹配的承载力极限值和桩端持力层折减系数。

高应变测试时, 在桩身两侧沿桩轴线对称安装 2 个力传感器和 2 个加速度传感器, 在具备足够的锤击能量, 使桩土之间产生一定的相对位移条件下, 量测锤击过程中作用在桩上的力波 $F(t)$ 和加速度波 $a(t)$ (经积分后得速度波 $v(t)$), 由仪器进行信号采集、数据处理, 并显示计算结果, 在打桩现场进行实时分析, 立即得出桩的静阻力、锤击力、桩身损伤程度等。并可将实测信号在计算机上进行 CAPWAP 分析, 将桩分成若干单元, 用有限元法求解波动方程, 反算桩顶力波和速度波, 用计算的曲线拟合实测曲线, 如二者不吻合, 重新调整参数, 再次迭代运算, 直到计算和实测曲线达到拟合精度要求为止, 一旦达到最优化, 分析即完成。若对拟合结果不满意, 可改变土阻力参数重新迭代计算桩顶变量。CAPWAP 程序建立桩和土模型的数学算法, 允许逐步地计算沿桩长方向所有桩身变量随时间的变化。CAPWAP 结果是基于计算的桩顶变量和实测值之间的最佳可能拟合而得到的, 计算结果可提供桩的极限承载力、桩侧阻力、桩端阻力、截面变化和模拟静载试验的 $Q-s$ 曲线等。

3 影响因素分析

根据钢管桩总极限承载力的计算公式可知, 影响因素主要包括桩侧桩端土层参数、钢管桩尺寸参数、入土深度、桩端承载力折减系数。

其中桩侧桩端土层参数在项目选址进行地质勘查后已确定, 桩侧土极限摩阻力和桩端土极限阻力标准值依据场地岩土层分布特征、原位标准贯入试验和室内土工试验结果结合工程经验综合确定, 由于工程场地各土层差异较大, 各层厚和空间分布不均匀, 导致桩侧土摩阻力标准值取值

不精确或桩端土极限阻力标准值随深度增加而增大, 这些因素会影响钢管桩尺寸参数的选择。根据计算公式, 钢管桩尺寸的影响是比较清晰的, 小范围的变化对承载力的计算结果影响不大。

入土深度的增加会同时影响桩侧阻力和桩端阻力, 在容易贯入或有适宜的持力层时, 靠改变入土深度增加承载力也是一种常用的手段, 尤其是以摩擦为主的桩型。

对于以端承为主、持力层为全风化或强风化岩层、桩端容易形成土塞效应的开口钢管桩, 通过增加入土深度, 尤其是持力层深度, 形成桩端土塞并尽量发挥土塞效应, 提高桩端承载力折减系数则是一种有效的提高承载力的方式。

4 规律分析

深圳港盐田港区东作业区拟建码头钢管桩打入施工范围内的土层参数见表 1, 桩侧土体主要为 ③₂、③_{2a}、③₃、③₄ 和 ⑧₂, 桩端持力层为 ⑧₂。

表 1 盐田港区东作业区拟建码头钢管桩打入施工范围内的土层参数

Tab. 1 Soil layer parameters within construction range of driving steel pipe piles for proposed wharf in east operation area of Yantian port area

土层号	土层名称	一般埋深/ m	标贯 击数/ 击	桩侧单位面积 极限摩阻力 标准值/kPa
② ₂	灰黄-灰色砾砂	0.0~8.6	3~10	15
② ₃	灰色中细砂混淤泥	0.0~6.0	3~8	15
		6.0~10.6		25
③ ₁	灰色淤泥质粉质黏土	0.0~8.2	1~2	15
③ ₂	灰-褐黄色粉质黏土	1.0~6.0	7~16	15
		6.0~24.9		45
③ _{2a}	灰色粉质黏土	6.5~15.8	4~7	35
		24.9~27.0		45
③ _{2a}	灰-灰黄色中粗砂	7.5~18.6	20~39	70
③ ₃	灰黄色中粗砂	13.6~21.1	23~50	80
③ ₄	灰黄-褐红色粉质黏土	13.6~28.5	10~18	60
③ ₅	灰白色粗砾砂	22.2~29.1	31~49	85
⑤	褐黄色残积土	16.8~30.0	15~33	70
⑧ ₁	全风化角砾岩	14.6~26.8	37~48	80
⑧ ₂	强风化角砾岩	>20.3	≥50	160

注: ⑧₂ 层桩端单位面积极限阻力标准值为 8 MPa。

为了保证分析过程中桩侧阻力的计算结果相对准确,仅列出地勘钻孔附近的钢管桩施工数据、根据地勘土层参数桩侧阻力计算值和高应变检测

承载力拟合结果,不同直径、不同终锤贯入度的钢管桩计算结果及高应变检测结果见表2。

表2 不同直径和贯入度的钢管桩侧阻力计算结果及高应变检测结果
Tab. 2 Calculation results of side resistance and test results of high strain of steel pipe piles with different dimeters and different penetrations

直径/ m	贯入度/ mm	桩号	入持力 层深度/ m	入土 桩长/ m	地勘参数 计算侧阻力/ kN	高应变 贯入度/ mm	高应变拟 合侧阻力/ kN	高应变拟 合端阻力/ kN	高应变拟合 极限承载力/ kN	反算 桩端 系数
1.4	4.0~5.0	A22-15	3.10	20.50	5 713	4.0	4 131	4 888	9 019	0.27
		A23-7	4.25	19.89	6 566	5.0	3 906	6 004	9 910	0.27
		A13-9	2.73	22.06	5 844	4.0	3 803	5 807	9 609	0.31
		A8-9	4.11	13.40	5 011	5.0	3 756	5 384	9 140	0.34
1.4	1.4~2.5	A24-64	3.82	20.05	7 404	2.0	5 224	9 611	14 835	0.60
		A21-64	4.13	20.92	6 098	1.4	5 124	9 605	14 729	0.70
		A20-76	3.34	21.61	6 392	2.0	5 136	10 020	15 155	0.71
		A15-17	5.56	24.55	6 043	2.5	4 519	10 101	14 621	0.70
1.0	1.0~2.0	A19-37	2.85	23.86	4 803	1.0	3 867	5 296	9 163	0.69
		A21-37	3.21	21.18	4 030	1.5	3 582	4 947	8 528	0.72
		A22-37	4.10	20.66	3 851	2.0	3 779	4 680	8 459	0.73
		A24-32	4.03	18.31	5 058	1.5	3 717	6 171	9 888	0.77

表2列出的钢管桩基本都打入至⑧₂强风化角砾岩持力层,但入持力层深度变化较大,根据现场实际打桩情况和地勘报告中场地岩土层分布特征、标准贯入试验和土工试验结果可知,工程场地各土层差异较大,各层厚和空间分布不均匀,均匀性较差,应通过试验结果进行修正。高应变检测,一方面可验证现场打桩船的锤击系统是否与本地地质条件和承载力设计要求相匹配;另一方面通过高应变检测达到贯入度或入持力层深度控制标准时终锤钢管桩打入桩的承载力满足设计要求,并获得适用于该场地持力层的终锤贯入度和相关工程经验。

对于直径1.4 m的钢管桩,当贯入度达到2 mm时,高应变拟合极限承载力可以达到15 MN,相对于贯入度4~5 mm时的承载力提高超过50%,因为贯入度从4 mm减小到2 mm过程中钢管桩入土深度增加并不大。根据现场测量结果,多数桩入土深度增加0.5~1.0 m,相应的侧阻力增加350~700 kN,此时提高的承载力很大比例是由于

桩端土塞效应提供的。根据土层参数计算的侧阻力、桩端单位面积极限阻力标准值和高应变检测拟合极限承载力反算得到的桩端持力层折减系数由贯入度4~5 mm时的0.27~0.34提高至贯入度2 mm时的0.60~0.71。对于直径1.0 m的钢管桩,贯入度达到2 mm时,反算得到的桩端持力层折减系数也可以达到0.70左右。由此可见,利用桩端土塞效应可显著提高钢管桩的承载力,对于端承为主的钢管桩打入桩,应尽量控制终锤时的贯入度,贯入度越小,桩端土塞效应越明显。在应用桩端持力层折减系数计算桩端承载力时还需要注意这个值是否为固定值与多个因素相关,应能经过现场试验或通过验证获得。

充分理解并利用开口钢管桩承载力的影响因素可以有效提高承载力,也可以提前预防因个别因素影响而导致承载力的降低。钢管桩打入后,入土深度和尺寸参数不会发生变化,但是桩侧桩端土层参数和桩端承载力折减系数在施工因素和时间效应影响下有可能变小,继而导致开口钢管

桩承载力在打入后经过一段时间会变小。

为了增加钢管桩持力层深度，应避免在打入持力层过程中桩端卷边而影响后续钻孔施工，预先在桩端侧焊接上一层钢板进行加固处理。虽然在一定程度上改善了桩端打入过程中卷边的问题，但是却影响了桩侧桩端土层参数和桩端承载力折减系数，并且反映在钢管桩高应变复打承载力检测中。直径 1.4 m、在桩端外侧 0.5 m 范围加固的钢管桩的高应变初复打数据见表 3。可以看出，与正常高应变检测复打承载力相对初打承载力基本都会增大的规律相反，检测数据显示，这些桩的复打承载力明显降低，多数桩复打贯入度大于初打贯入度，主要原因为：

由于在桩端外侧增加了一层厚 20 mm 的钢板，在打入时会导致加固位置上部桩身与桩周土之间产生部分缝隙，如果是黏土为主的软土层，此缝隙会及时被填充，根据这几根桩附近的钻孔，仅在上部 2~3 m 深度范围是粉质黏土层，3 m 以下至桩端为粗砂层和强风化角砾岩，由于粗砂层的透水性和强风化角砾岩遇水软化的特性，会导致强风化角砾岩层的桩侧极限摩阻力和端阻力参数发生改变，从而导致桩侧、桩端阻力降低。为避免此类现象的发生，建议在桩内侧一定范围进行加固，或设计其他合理的加固方式，避免影响桩侧阻力和桩端阻力的发挥，又可以充分提高桩端土塞效应。

表 3 高应变复打承载力降低检测结果

Tab. 3 Test results of reduction in bearing capacity due to high-strain re-driving

桩号	阶段	平均贯入度/(mm·击 ⁻¹)	拟合桩侧阻力/kN	拟合桩端阻力/kN	拟合极限承载力/kN	初复打间隔/d	地基土恢复系数
A8-1	初打	6.0	3 938	7 465	11 403	1	0.89
	复打	5.0	4 922	5 215	10 137		
A6-1	初打	5.0	3 000	8 263	11 263	2	0.76
	复打	9.0	3 182	5 322	8 504		
A9-15	初打	2.0	3 616	7 047	10 663	2	0.88
	复打	2.5	3 728	5 707	9 435		
A8-9	初打	5.0	3 756	5 384	9 140	3	0.87
	复打	5.0	2 672	5 243	7 915		
A7-7	初打	5.0	3 257	5 639	9 166	3	0.76
	复打	10.0	3 251	3 743	6 994		
A6-19	初打	4.8	3 042	9 229	12 271	4	0.73
	复打	7.0	5 616	3 357	8 973		
A7-64	初打	5.0	3 653	6 934	10 586	5	0.85
	复打	4.0	3 073	5 936	9 009		
A7-60	初打	5.0	3 520	9 370	12 890	6	0.88
	复打	5.0	3 599	7 803	11 402		
A6-76	初打	3.6	3 867	9 212	13 079	7	0.70
	复打	4.0	3 952	5 210	9 162		
A6-78	初打	5.0	3 146	8 390	11 536	7	0.62
	复打	5.7	3 089	4 102	7 191		

5 结论

1) 根据钢管桩总极限承载力的计算公式可知，其主要影响因素包括桩侧桩端土层参数、钢管桩尺寸参数、入土深度、桩端承载力折减系数。

现场试验结果表明，利用桩端土塞效应可显著提高钢管桩的承载力，对于端承为主的钢管桩打入桩，应尽量控制终锤时的贯入度，贯入度越小，桩端土塞效应越明显。

2) 在应用桩端持力层折减系数计算桩端承载力时需要注意,折减系数不是一个固定值,与多个因素相关,应通过现场试验或验证获得。

3) 钢管桩打入后,桩侧桩端土层参数和桩端承载力折减系数在施工因素和时间效应影响下有可能变小,继而导致开口钢管桩承载力在打入后经过一段时间变小。在工程应用中需要提前预防受个别因素影响导致钢管桩承载力降低的问题。

参考文献:

- [1] 周厚林. 海上风电基础大直径钢管桩竖向承载特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHOU H L. Study on bearing properties of steel pipe piles with large-diameter of offshore wind farms foundations under vertical load[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [2] 胡利文, 贾德庆, 傅洁馨, 等. 开口钢管桩承载力影响因素[J]. 水运工程, 2005(9): 17-22.
HU L W, JIA D Q, FU J X, et al. Influential factors of bearing capacity of open-ended steel pipe pile [J]. Port & waterway engineering, 2005(9): 17-22.
- [3] 徐向阳, 卢普伟. 大直径钢管桩土体闭塞效应分析[J]. 中国水运(下半月), 2011(11): 248-249.
XU X Y, LU P W. Analysis of soil blocking effect of large diameter steel pipe pile [J]. China water transport(second half of month), 2011(11): 248-249.
- [4] 汪宏, 王林, 谌奇峰. 大直径钢管桩承载力的分析[J]. 港工技术, 2004(3): 13-15.
WANG H, WANG L, CHEN Q F. Analysis on the carrying capacity of a large-diameter steel-pile [J]. Port engineering technology, 2004(3): 13-15.
- [5] 贾德庆, 陈锋, 吕黄. 大直径开口钢管桩承载力特性的分析[J]. 水运工程, 2004(11): 22-24.
JIA D Q, CHEN F, LYU H. Characteristics of bearing capacity of large-diameter open steel pipe piles [J]. Port & waterway engineering, 2004(11): 22-24.
- [6] 孙艺, 孙英. 提高打入式大直径开口钢管桩桩基承载力的研究[J]. 港工技术, 2018, 55(3): 45-47.
SUN Y, SUN Y. Research on improvement of bearing capacity of driven open steel tubular pile in large-diameter [J]. Port engineering technology, 2018, 55(3): 45-47.
- [7] 项雨略, 孔庄. 上海地区提升大直径钢管桩承载力的措施研究[J]. 港工技术, 2020, 57(S1): 67-69.
XIANG Y L, KONG Z. Research on improvement of bearing capacity of large-diameter steel pile in Shanghai [J]. Port engineering technology, 2020, 57(S1): 67-69.
- [8] 何欢, 谭伦. 大直径开口钢管桩在强风化岩中的承载力分析[J]. 港工技术, 2018, 55(2): 33-35.
HE H, TAN L. Analysis of bearing capacity of open steel tubular piles with large-diameter driven into intensely weathered rock stratum [J]. Port engineering technology, 2018, 55(2): 33-35.
- [9] 刘长健. 洋山三期大型钢管桩试桩及大型钢管桩承载力研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
LIU C J. Pile testing of large steel pile of Yangshan Port and study on bearing capacity of large steel pile [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [10] 中交四航工程研究院有限公司, 广州港湾工程质量检测有限公司. 水运工程基桩试验检测技术规范: JTS 240—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou Harbour Engineering Quality Testing Co., Ltd. Technical code for testing and inspection of waterway engineering foundation piles: JTS 240-2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [11] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
China Academy of Building Research. Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

(本文编辑 王璁)