

不同桩端形式对钢管桩竖向承载力影响探究

肖苡辀^{1,2,3,4}, 姚腾龙^{1,2}, 谢德宽^{1,2}, 韩鹏鹏^{1,2,3,4}, 李振^{1,2,3,4}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 4. 中交公路长大桥建设
国家工程研究中心有限公司, 北京 100088)

摘要: 现有桩基竖向承载力计算方法大多基于规范, 存在一定局限性。文章依托杭州湾跨海铁路大桥工程, 通过对海床原位临时钢管桩进行了17组高应变法检测试验, 系统探究不同桩端结构(包括开口、半开口及闭口等形式)钢管桩在深厚软弱覆盖地层中的竖向承载特性。试验结果表明, 15组不同桩端形式钢管桩的实测轴向承载力检验值结果均大于抗压承载力设计值, 结构设计安全; 对比分析开口、半开口(十字隔板、桩内环板)、闭口(锥形闭口30°、45°)钢管桩, 可得设置桩内环板的钢管桩提升竖向承载能力幅度达到15%, 并被工程实施采用; 相较于十字隔板钢管桩, 设置桩内环板的钢管桩桩侧阻力提升更加明显; 随着桩长增加, 桩基竖向承载力实测值逐渐趋近于设计值; 并且基于现有规范桩基抗压承载力计算方法, 充分考虑桩端形式, 提出了一种改进的承载力计算方法。本研究为海洋工程临时结构的设计优化提供了参考依据。

关键词: 钢管桩竖向承载力; 桩端结构形式; 现场试验; 杭州湾跨海铁路大桥

中图分类号: U6; U652.74; TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)06-0043-06

doi: 10.7640/zggwjs202606006

Influence of different pile tip forms on vertical bearing capacity of steel pipe piles

XIAO Yi-zhou^{1,2,3,4}, YAO Teng-long^{1,2}, XIE De-kuan^{1,2}, HAN Peng-peng^{1,2,3,4}, LI Zhen^{1,2,3,4}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430040, China; 2. CCCC SHEC Fourth Engineering Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241000, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China; 4. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: Most of the existing methods for calculating the vertical bearing capacity of pile foundations are based on specifications, which have certain limitations. This paper, relying on the Hangzhou Bay Cross-sea Railway Bridge project, conducted 17 groups of high-strain tests on in-situ temporary steel pipe piles in the seabed, systematically exploring the vertical bearing characteristics of steel pipe piles with different pile tip structures (including open, semi-open and closed types) in deep and weakly covered strata. The test results show that the measured axial bearing capacity test values of the 15 groups of steel pipe piles with different pile tip types are all greater than the design values of compressive bearing capacity, indicating structural safety. By comparing and analyzing the open, semi-open (cross partition, inner ring plate in the pile) and closed (conical closed 30°, 45°) steel pipe piles, it can be concluded that the inner ring plate steel pipe pile can increase the vertical bearing capacity by 15%, and this method is recommended and adopted in the project. Compared with steel pipe piles with cross partition, the side resistance of steel pipe piles with internal ring plates is improved more significantly. As the pile length increases, the measured values of the vertical bearing capacity of pile foundations gradually approach the design values. Moreover, an improved bearing capacity calculation method is proposed based on the existing specification method for calculating the compressive bearing capacity of pile foundations, with full consideration of pile tip forms. This study provides a reference basis for the design optimization of temporary structures in marine engineering.

收稿日期: 2025-12-30 修回日期: 2026-01-25

基金项目: 中国博士后科学基金第61批面上资助(2017M612541)

作者简介: 肖苡辀(1991—), 女, 湖南湘潭人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水工水力学及深水基础。E-mail: xiao_yizhou@163.com

Key words: vertical bearing capacity of steel pipe piles; pile tip forms; field test; Hangzhou Bay Cross-sea Railway Bridge

0 引言

桩基作为跨海工程、港口工程及海上临时结构中的重要承载构件，其竖向承载力的准确预测直接关系到工程的安全性与经济性^[1]。目前，桩基设计主要依赖于现行规范 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[2]提供的计算公式，具有一定适用性，但也存在明显的局限性。例如，在钢管桩的设计中，规范将桩型区分为开口与半开口，并对半开口桩的建议较为模糊，仅指出“可参考同条件的开口钢管桩酌情增大”，缺乏明确的量化依据；同时，规范中对其他影响因素考虑不太全面，这在实际工程中可能带来承载力预测的偏差^[3-6]。

近年来，国内外学者对钢管桩承载性能研究主要围绕承载性能的预测计算方法、影响因素等展开^[7]。张明远等^[8]通过 FLAC^{3D} 对超长大直径开口钢管桩试桩的竖向承载性能进行了数值模拟分析，表明桩侧摩阻力随深度的变化很复杂，其变化与土性密切相关，桩身轴力向下传递的速度与桩侧摩阻力在不同土层中的发挥程度息息相关。秦裕超^[9]基于 MATLAB 建立了深度神经网络(DNN)预测模型，能够实现桩基承载力及沉降时效预测。陈志波等^[10]在大直径钢管桩竖向承载力计算方法研究中还考虑了土塞效应。

当地基的承载力和桩的变形不能满足要求时，加大桩长和增大直径是目前常用的方法，但从工程便捷性和经济性考虑，选择合适的桩端形式也是较好的选择。张晓健^[11]对开口桩和闭口桩采用有限元方法进行了分析，得出开口桩比等截面积的闭口桩有较小的沉降。

此外，由于现场试验受施工资源、经济成本及海洋环境复杂性的制约，相关海床原位试验数据严重匮乏。大多数研究依赖于物理模型试验或数值模拟，虽能提供一定参考，但其精确度受到模型简化、边界条件假设及土体参数不确定性的影响，难以完全反映实际地质与施工条件^[12]。因此，在缺乏足尺现场试验验证的情况下，规范方法的准确性及可靠性面临挑战，尤其对于临时结构设计而言，这种不确定性可能带来潜在的风险。

为建立更合理的钢管桩竖向承载力分析方法，本文通过试验获取不同桩端形式下的竖向承载力并分析影响因素，基于现有规范桩基抗压承载力计算方法，充分考虑桩端形式，提出一种改进的承载力计算方法，为海洋工程临时结构的设计优化提供参考依据。

1 工程概况

杭州湾跨海铁路大桥位于世界三大强潮海湾之一的杭州湾海域，桥梁全长 29.2 km，属超大铁路跨海桥梁集群工程。杭州湾海域具有大潮差、急流速、强风浪、易冲易淤、深厚淤泥层和浅层气多发等特点，施工环境恶劣，工程施工难度大、海上施工安全风险高。

为方便海上施工和材料运输，在海中引桥设置超长施工栈桥，栈桥下部结构采用 $\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 钢管桩桩基，栈桥服役结束后，将钢管桩拔出。根据地勘资料，海中引桥桥位处海相淤泥层较厚，达 40 m 左右，表层为 5~10 m 厚粉土层，易冲易淤，工程地质条件较差，选取典型钻孔地质参数如表 1 所示。

表 1 不同钻孔地质参数表

Table 1 Geological parameters for different boreholes

钻孔编号	地层编号	层顶高程/m	层底高程/m	层底深度/m	分层厚度/m	土层描述	地勘建议极限侧阻/kPa
DZ257			-5.66		0	水	
	2-3-1	-5.66	-14.97	9.31	9.31	粉土，稍密	20
	3-5-1	-14.97	-50.46	44.8	35.49	淤泥质土，流塑，局部夹薄层粉砂	20
DZ276			1.68		0	水	
	2-3-1	1.68	-14.02	16.60	16.60	粉土，稍密	20
	3-5-1	-14.02	-49.72	51.40	34.80	淤泥质土，流塑，局部夹薄层粉砂	20

2 试验方案

2.1 检测方法

施打钢管桩时在桩顶面 1.5~2 倍桩径以下管

桩外壁同一标高对称钻 2 组螺孔安装动测传感器，打桩时接近设计标高时进行测试，获得有关波曲线及相关数据；记录并显示桩在不断打入过程

中的桩身拉应力、压应力、静土阻力、锤击能量、锤跳高等相关数据,分析桩、锤、土之间的相互作用。由主机进行信号采集、CASE法数据处理、并显示初步计算结果,此外,现场采集信号可即时传送给计算机,利用CAPWAP软件进行进一步分析处理。

2.2 试验工况

高应变试桩共设置17组 $\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 钢管桩,其中:1)开口桩根据不同桩长(31~51 m)设置7组,对应表2的工况1、工况6、工况8、工况10、工况12、工况14、工况16;2)半开口

桩设置2种类型,一种是桩端十字隔板,见表2工况2,一种是桩内环板(桩底往上15 m桩内处),见表2工况5、工况7、工况9、工况11、工况13、工况15、工况17;3)闭口桩设置2组,2组闭口桩考虑不同倾角入泥的难易程度,桩底斜角设置不同,分别为锥形闭口 45° 和锥形闭口 30° ,桩长51 m,见表2工况3和工况4。钢管桩均需进行防腐处理,并在桩顶1 m范围内采用10 mm环板加强。各钢管桩结构参数和试验工况如表2所示,桩端结构形式如图1所示,其中 t 为厚度。

表2 试验工况
Table 2 Test conditions

工况编号	桩号	端口形式	桩基参数	桩长/m	入土深度/m	抗压承载力设计值/kN
工况1	SZ-1	开口	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	51	39.8	1 904.4
工况2	SZ-2	桩端十字隔板	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	51	39.8	1 904.4
工况3	SZ-3	锥形闭口(45°)	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	51		1 904.4
工况4	SZ-4	锥形闭口(30°)	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	51	3.0	1 904.4
工况5	SZ-5	桩内环板	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	51	39.8	1 904.4
工况6	SZ-6-1	开口	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	42	35.0	1 674.7
工况7	SZ-6-2	桩内环板	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	42	35.0	1 674.7
工况8	SZ-7-1	开口	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	36	29.0	1 387.6
工况9	SZ-7-2	桩内环板	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	36	29.0	1 387.6
工况10	SZ-8-1	开口	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	36	29.0	1 387.6
工况11	SZ-8-2	桩内环板	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	36	29.0	1 387.6
工况12	SZ-9-1	开口	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	36	29.0	1 387.6
工况13	SZ-9-2	桩内环板	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	36	29.0	1 387.6
工况14	SZ-10-1	开口	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	36	29.0	1 387.6
工况15	SZ-10-2	桩内环板	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	36	29.0	1 387.6
工况16	SZ-11-1	开口	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	31	24.0	1 148.4
工况17	SZ-11-2	桩内环板	$\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$	31	24.0	1 148.4

注:依据《码头结构设计规范》,单桩轴向抗压承载力设计值计算考虑了1.3倍系数。

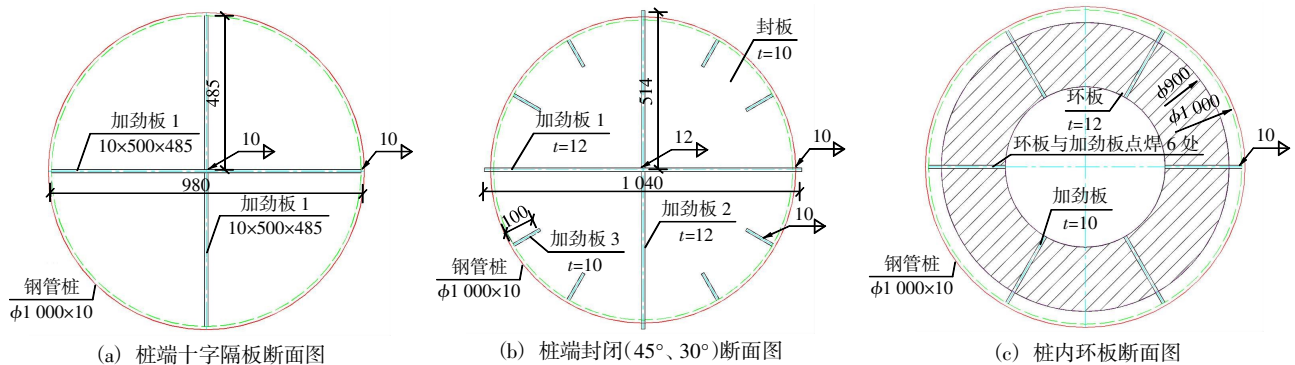


图1 桩端结构形式示意图(mm)
Fig. 1 Diagram of pile tip structural forms(mm)

2.3 试验方法

钢管桩单桩极限承载力试桩主要包括钢管桩施打和数据测试2个重要阶段。沉桩完成后,在

管壁上距桩顶约1.5~2倍桩径位置处布设加速度传感器和力的传感器,试桩时利用YC-8液压冲击锤打击桩顶,能量设置为64~96 kJ。

3 结果分析

3.1 试验结果

各工况钢管桩高应变检测试验结果如表 3 所示。沉桩施工过程中，2 组闭口桩(工况 3 和工况 4)由于挤土效应，在桩底入土 3 m 后难以继续沉桩，考虑到桩基入土较浅，在水流力作用下不能稳桩，采取稳桩措施后，利用液压冲击锤锤击桩

顶，并逐渐增大锤击能量，但是钢管桩贯入度仍不足 1.5 mm。考虑到沉桩困难，沉桩效率极低，遂放弃 45°倾角的闭口桩试桩。对表 3 数据进行分析可知，不同桩端形式钢管桩的实测轴向承载力检验值均大于抗压承载力设计值(除锥形闭口外)，这表明结构设计偏于保守，满足受力要求且有冗余，结构设计安全。

表 3 桩基竖向承载力实测检测结果

Table 3 Measured test results of the vertical bearing capacity of pile foundations

工况编号	桩号	桩端形式	桩基参数	桩长/m	入土深度/m	抗压承载力设计值/kN	轴向承载力检验值/kN	桩侧摩阻力/kN	桩端阻力/kN	休止时间/d
工况 1	SZ-1	开口	φ1 000 mm×10 mm	51	39.8	1 904.4	3 500.0	3 183.9	316.1	3
工况 2	SZ-2	桩端十字隔板	φ1 000 mm×10 mm	51	39.8	1 904.4	3 653.4	3 236.5	416.9	3
工况 3	SZ-3	锥形闭口(45°)	φ1 000 mm×10 mm	51		1 904.4				3
工况 4	SZ-4	锥形闭口(30°)	φ1 000 mm×10 mm	51	3.0	1 904.4	1 100.0			3
工况 5	SZ-5	桩内环板	φ1 000 mm×10 mm	51	39.8	1 904.4	4 032.6	3 693.3	339.3	3
工况 6	SZ-6-1	开口	φ1 000 mm×10 mm	42	35.0	1 674.7	3 580.3	3 257.9	322.4	7
工况 7	SZ-6-2	桩内环板	φ1 000 mm×10 mm	42	35.0	1 674.7	4 105.1	3 725.9	379.2	7
工况 8	SZ-7-1	开口	φ1 000 mm×10 mm	36	29.0	1 387.6	2 989.1	2 711.3	277.9	7
工况 9	SZ-7-2	桩内环板	φ1 000 mm×10 mm	36	29.0	1 387.6	3 666.3	3 331.6	334.7	7
工况 10	SZ-8-1	开口	φ1 000 mm×10 mm	36	29.0	1 387.6	3 019.0	2 765.8	253.2	7
工况 11	SZ-8-2	桩内环板	φ1 000 mm×10 mm	36	29.0	1 387.6	3 491.2	3 146.6	344.6	7
工况 12	SZ-9-1	开口	φ1 000 mm×10 mm	36	29.0	1 387.6	3 053.0	2 831.8	221.2	8
工况 13	SZ-9-2	桩内环板	φ1 000 mm×10 mm	36	29.0	1 387.6	3 551.6	3 194.4	357.2	8
工况 14	SZ-10-1	开口	φ1 000 mm×10 mm	36	29.0	1 387.6	3 106.0	2 820.5	285.5	8
工况 15	SZ-10-2	桩内环板	φ1 000 mm×10 mm	36	29.0	1 387.6	3 560.1	3 203.2	356.9	8
工况 16	SZ-11-1	开口	φ1 000 mm×10 mm	31	24.0	1 148.4	2 818.7	2 579.4	239.3	7
工况 17	SZ-11-2	桩内环板	φ1 000 mm×10 mm	31	24.0	1 148.4	3 399.2	3 150.0	249.2	7

3.2 桩端形式对桩基承载力的影响

3.2.1 桩端结构形式

桩端阻力在打入过程中受到闭塞效应的影响，桩端在不同入土深度下产生不同的闭塞效应，完全闭塞前的桩端阻力会一直变化，而桩端形式对桩端阻力甚至桩侧阻力的影响是值得探究，也是工程项目施工过程中较为便捷可实施的方法。根据工况 1—工况 5 的试验检测结果(见表 4)，可以得到在桩长等边界条件一致的情况下，在桩底焊接十字隔板、锥形闭口、环板等措施均可提升单桩竖向承载力，这是由于十字隔板/锥形闭口/环

板的设置可以有效增加桩底侧壁与土的接触面积，增强了钢管桩桩底土塞效应。对比工况 1、工况 2、工况 5，可以看出环板提升单桩竖向承载能力的幅度(15%)大于十字隔板的提升幅度(4%)；并且对比其他形式桩侧和桩端阻力与开口阻力的比值，发现设置桩内环板的钢管桩桩侧阻力提升占比更加明显；这可能是由于环板的设置使桩内土体受到竖向力后压缩变形，土体逐渐压实，土体受竖向力压缩达到一定状态后沿径向扩张并挤压钢管桩内壁，径向挤压力使桩土间的内摩阻力增大。

表 4 桩端形式对竖向承载力的影响

Table 4 Effect of pile tip forms on vertical bearing capacity

工况编号	桩号	桩端形式	桩长/m	入土深度/m	其他形式承载力/开口实测承载力	其他形式桩侧阻力/开口桩侧阻力	其他形式桩端阻力/开口桩端阻力
工况 1	SZ-1	开口	51	39.8	1.00	1.00	1.00
工况 2	SZ-2	桩端十字隔板	51	39.8	1.04	1.02	1.32
工况 3	SZ-3	锥形闭口(45°)	51				
工况 4	SZ-4	锥形闭口(30°)	51	3.0			
工况 5	SZ-5	桩内环板	51	39.8	1.15	1.16	1.07

3.2.2 设置桩内环板的桩基承载力

对于设置桩内环板的桩基竖向承载力提升幅度,本文对不同桩长(不同持力层)进行了试验,探究桩内环板提升竖向承载力的幅度。根据工况5、工况7、工况9、工况11、工况13、工况15、工况17试验结果,分析设置桩内环板的桩基竖向承载力与桩端开口竖向承载力的比值(见图2),可得到31~51 m桩长(入土深度24~39.8 m),该比值至少为1.15,这意味着桩内环板至少能够提升竖向承载力幅度为15%,此结果可作为临时结构(如栈桥、钢平台)桩长设计中的参考依据。

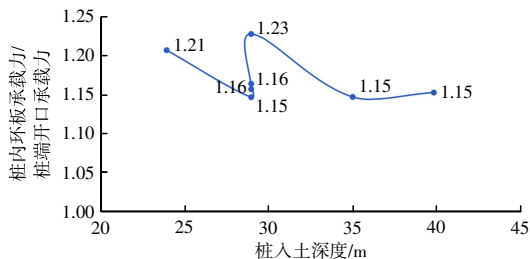


图2 设置桩内环板的桩基竖向承载力与桩端开口竖向承载力的比值

Fig. 2 Ratio of vertical bearing capacity of pile foundations with inner ring plates to that of open-ended pile tips

3.3 桩长对桩基承载力的影响

桩长对于竖向承载力的影响是显而易见,本文主要探究分析不同桩长实测轴向承载力检验值与《码头结构设计规范》公式计算抗压承载力设计值。图3是桩端开口和桩内环板在不同桩长条件下轴向承载力检验值(实测)与抗压承载力设计值(考虑1.3系数)的比值分布。由图3可知,实测轴向承载力检验值是抗压承载力设计值的1.84~2.96倍,桩内环板的比值大于桩端开口的比值,这表明结构设计安全(实测数据(1.84~2.96)>规范要求1.3),满足受力要求且有冗余。

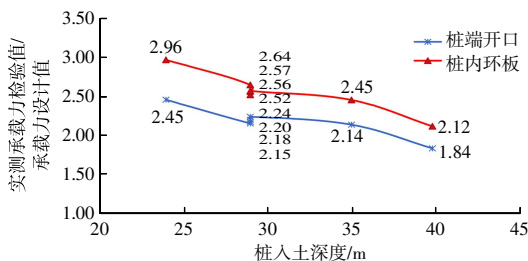


图3 不同工况实测轴向承载力检验值与抗压承载力设计值比值

Fig. 3 Ratio of measured axial bearing capacity values under different working conditions to the designed compressive bearing capacity values

另外,随着桩长的增加,桩基竖向承载力实测值逐渐趋近于设计值,可能因为桩身压缩与变形协调,当长桩受荷时,桩身自身压缩量大,意味着桩顶位移很大时桩底位移可能仍很小,导致下部桩侧阻力和桩端阻力无法充分发挥,而规范公式是强度叠加公式,忽略了这一变形协调机制,因此高估了长桩承载力,从而呈现出随着桩长增加,实测值与设计值比值减小的趋势。

3.4 考虑桩端形式的承载力经验公式

目前规范计算公式考虑桩长、桩径、土层地质参数等因素,本文在规范计算公式的基础上,结合本次试验的试桩桩长、桩径、土层地质、桩端形式(桩端开口、桩内环板)等因素,对单桩轴向抗压承载力实测值进行回归分析形成经验公式,作为工程项目施工过程的参考依据。

通过遗传算法回归分析各参数对单桩轴向抗压承载力预测值 Q_1 的影响及拟合结果,发现各因素影响呈一次线性关系,竖向承载力经验公式为:

$$Q_1 = \zeta (1.08 \times (1643.19 + 0.63 \times (\pi D \times \sum q_{ri} l_i))) + 44.78 \quad (1)$$

式中: Q_1 为单桩轴向抗压承载力预测值, kN; D 为钢管桩直径, m; q_{ri} 为单桩第 i 层土的极限侧摩阻力标准值, kPa; l_i 为桩身穿过第 i 层土的长度, m, i 为1, 2, 3; ζ 为桩端形式系数(桩端开口取1.0, 桩内环板取1.15)。

由于地勘建议桩端阻力为0,所以在此类深厚软弱覆盖地层里,式(1)未体现桩端阻力的计算公式。

式(1)计算结果与现场试验实测值的误差小于8%,见图4,可准确预测现场原位单桩轴向抗压承载力,为此类结构的设计提供参考。

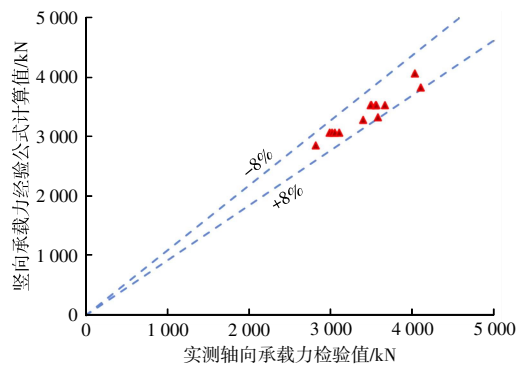


图4 竖向承载力预测值与现场实测值对比

Fig. 4 Comparison between predicted vertical bearing capacity values and on-site measured values

4 结语

本文依托杭州湾跨海铁路大桥工程,通过对海床原位临时钢管桩进行了17组高应变法检测试验,系统探究不同桩端结构(包括开口、半开口及闭口等形式)海中钢管桩在深厚软弱覆盖地层的竖向承载特性,主要结论如下:

1) 15组试验结果不同桩端形式钢管桩的实测轴向承载力检验值均大于抗压承载力设计值,这表明结构设计偏于保守,满足受力要求且有冗余,结构设计安全。

2) 对比桩端开口、半开口(十字隔板、桩内环板)、闭口(锥形闭口 30° 、 45°)钢管桩竖向承载力试验结果,可得闭口钢管桩难以施打、不推荐此法;半开口钢管桩竖向承载力大于开口钢管桩,而其中设置桩内环板的钢管桩提升竖向承载能力幅度达到15%,推荐此方法,并被工程实施采用,目前已正常运行3a。

3) 在半开口设置桩内环板的钢管桩试验过程中,发现相较于十字隔板钢管桩,设置桩内环板的钢管桩桩侧阻力提升更加明显,这可能是由于环板的设置使桩内土体压缩,压缩到一定状态后沿径向扩张并挤压钢管桩内壁,径向挤压力使桩土间内摩阻力增大。

4) 随着桩长的增加,桩基竖向承载力实测值逐渐趋近于设计值,这可能是由于桩身压缩与变形协调,而规范公式是强度叠加公式,忽略了这一变形协调机制,因此高估了长桩承载力。

5) 本文通过原位实测数据,基于现有规范桩基抗压承载力计算方法,充分考虑桩端形式,提出了一种改进的承载力计算方法。

本文探究了基于杭州湾跨海铁路大桥临时钢管桩不同桩端形式对钢管桩竖向承载性能的影响,现场实测数据与经验公式(规范)之间存在一定的差距,而且实际钢管桩受力工况更为复杂,今后对桩端形式的桩侧阻力增强效应、不同桩径壁厚的竖向承载性能系统试验尚需展开进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈平,袁孟全.提高高桩码头钢管桩桩基承载力的方法[J].中国港湾建设,2007,37(3):1-4,9.
CHEN Ping, YUAN Meng-quan. Methods to improve bearing capacity of steel tubular piles for piled wharfs[J]. China Harbour Engineering, 2007, 37(3): 1-4, 9.
- [2] JTS 167—2018, 码头结构设计规范[S].
JTS 167—2018, Design code for wharf structures[S].

- [3] DOHERTY P, GAVIN K. The shaft capacity of open-ended piles in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(7): 1150-1155.
- [4] 韩冉冉,乔小利,李明玉.海上风电大直径超长钢管桩竖向承载特性现场试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(增刊1):180-185.
HAN Ran-ran, QIAO Xiao-li, LI Ming-yu. Field tests on vertical bearing characteristics of large-diameter extra-long steel pipe piles in offshore wind power projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(S1): 180-185.
- [5] 李立辰,刘卓,刘浩,等.考虑土塞效应的开口管桩沉桩与承载全过程离散元分析[J].岩土工程学报,2024,46(7):1471-1480.
LI Li-chen, LIU Zhuo, LIU Hao, et al. DEM analysis of installation and bearing process of open-ended piles considering plugging effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1471-1480.
- [6] 胡中雄.土力学与环境土工学[M].上海:同济大学出版社,1997.
HU Zhong-xiong. Soil mechanics and environmental geotechnics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [7] 彭文韬.超长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.
PENG Wen-tao. Study on testing analysis and prediction methods for bearing properties of super-long and large-diameter steel pipe piles under vertical load[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [8] 张明远,黎生南,彭文韬,等.基于FLAC^{3D}的超长直径钢管桩竖向承载特性模拟[J].岩土力学,2011,32(9):2856-2860.
ZHANG Ming-yuan, LI Sheng-nan, PENG Wen-tao, et al. Simulation of vertical bearing features for large-diameter and super-long steel pipe pile based on FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2856-2860.
- [9] 秦裕超.基于大数据和神经网络的桩基承载力及沉降预测[D].桂林:桂林理工大学,2023.
QIN Yu-chao. Big data and neural network based pile bearing capacity and settlement prediction[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2023.
- [10] 陈志波,陈峰,翁洋,等.考虑土塞效应的大直径钢管桩竖向承载力计算方法[J].岩土力学,2025,46(7):2224-2236.
CHEN Zhi-bo, CHEN Feng, WENG Yang, et al. Calculation method for vertical bearing capacity of large-diameter steel pipe piles considering the soil plugging effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(7): 2224-2236.
- [11] 张晓健.开口桩和闭口桩性状研究与分析[J].工业建筑,2007,37(增刊1):883-885.
ZHANG Xiao-jian. Study on properties of open-ended and close-ended piles[J]. Industrial Construction, 2007, 37(S1): 883-885.
- [12] 柳丽香,傅赛,李俊龙.基于现场试验的分层土中钢管桩竖向承载性能研究[J].山西建筑,2026,52(1):6-10,19.
LIU Li-xiang, FU Sai, LI Jun-long. Research on the compressive bearing capacity of steel pipe piles in layered soil based on field tests[J]. Shanxi Architecture, 2026, 52(1): 6-10, 19.