



# 海上密实碎石土持力层钢管桩沉桩及承载特性试验研究

吴 浩<sup>1</sup>, 胡兴昊<sup>2,3</sup>, 赵刘群<sup>1</sup>, 娄学谦<sup>2,3</sup>

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510230; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;  
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

**摘要:** 由于缺乏海相密实碎石土持力层中钢管桩的工程实例及研究, 依托秘鲁某港口工程, 研究碎石土持力层中钢管桩的沉桩及承载特性。在国内开展模拟试验, 获得模拟沉桩参数后, 进行沉桩可打性分析及完善施工策划, 随后在现场进行试沉桩、高应变和静载试验并测试侧阻力与端阻力。结果表明: 开口钢管桩在进入密实碎石土持力层后, 其承载力、单位面积侧阻力和端阻力将随入土深度增加而增大, 但增大幅度会逐渐减小; 但在进入持力层 1 m 后沉桩变得困难, 此后碎石土的单位面积端阻力将逐渐稳定, 其单位面积极限端阻力不小于 10.5 MPa; 钢管桩的端阻力主要由桩端阻力提供, 土塞承载力提供的反力较小, 开口管桩土塞系数取相对低值。

**关键词:** 碎石土; 钢管桩; 模拟试验; 可打性分析; 静载试验

中图分类号: U655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0212-06

## Experiment on pile sinking and bearing characteristics of steel pipe piles in dense gravel soil bearing stratum at sea

WU Hao<sup>1</sup>, HU Xinghao<sup>2,3</sup>, ZHAO Liuqun<sup>1</sup>, LOU Xueqian<sup>2,3</sup>

(1. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;  
2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;  
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

**Abstract:** Due to the lack of engineering examples and research on steel pipe piles in marine dense gravelly soil bearing stratum, relying on a port project in Peru, we study the pile driving and bearing characteristics of steel pipe piles in gravelly soil bearing stratum. We carry out the model test in advance in China to obtain the parameters of simulated pile sinking, and conduct the drivability analysis of pile sinking to improve the construction plan work. Then, we carry out the pile sinking test, high strain test and static load tests on the site, and test the side resistance and end resistance at the same time. The results show that the bearing capacity, unit area side resistance and end resistance of open steel pipe pile increase with the increase of soil penetration after entering the dense gravel soil bearing layer, but the increase range gradually decreases. After entering the bearing layer for 1 m, the penetration of the pile will be difficult, and then the unit area end resistance will gradually stabilize. Limit unit area end resistance of gravelly soil is not less than 10.5 MPa. The end resistance of the steel pipe pile is mainly provided by the pile end resistance, the reaction force provided by the soil plug bearing capacity is small, the pile soil plug coefficient is relatively low.

**Keywords:** gravel soil; steel pipe pile; model test; drivability analysis; static load test

收稿日期: 2022-09-28

作者简介: 吴浩 (1990—), 男, 工程师, 从事港口工程施工管理。

钢管桩基础广泛应用于各类海洋工程中, 因而对钢管桩沉桩可打性及工作承载能力的研究也相对成熟<sup>[1-3]</sup>, 并已拓展至钙质砂<sup>[4]</sup>、千枚岩<sup>[5]</sup>和珊瑚礁灰岩<sup>[6]</sup>等特殊岩土。然而由于钢管桩在海洋环境碎石土地层中的施工实例较少, 目前对以海相碎石土为持力层的钢管桩沉桩规律及承载特性的工程实例及研究很少。

秘鲁某港口工程以钢管桩为基础, 根据地勘资料, 工程地质主要由密实砂层和密实碎石土层组成, 同时设计文件要求钢管桩须穿透砂层后进入碎石土层, 以碎石土为持力层, 设计入土深度较小, 在 15~22 m, 极限承载力要求最高达到 14 MN。但由于目前对海相环境中碎石土的承载能力尚存疑问, 《建筑桩基技术规范》<sup>[7]</sup>的推荐值仅适用于陆地条件, 在《水运工程岩土勘察规范》<sup>[8]</sup>、《码头结构设计规范》<sup>[9]</sup>中碎石土内容很少, 这使得在进行钢管桩设计时没有足够的依据; 同时, 对碎石土研究的欠缺也将影响对钢管桩在碎石土中沉桩特性的判断, 从而给确定桩底高程和选择桩锤等设计及施工策划工作带来困扰。因此有必要在项目策划及大规模沉桩前就对以密实碎石土作为持力层的钢管桩的沉桩穿透性与承载能力进行研究。

本文依托秘鲁某港口工程, 从现场勘查报告中得到原位土参数, 在项目策划阶段于国内预先开展现场模拟试验, 在获得模拟沉桩参数后, 利用 GRLWEAP 可打性软件进行沉桩可打性分析, 依据分析结果进行沉桩过程分析与桩锤选择。随后在现场进行试验桩的高应变和静载试验并测试侧阻力与端阻力供设计参考。如此形成对该项目钢管桩设计及施工的研究与应用闭环, 同时也增加了对海洋环境中密实碎石土持力层的了解, 可供类似工程参考。

## 1 工程及地质概况

该港口工程位于南美洲西海岸的秘鲁中部, 属地震高发区。工程新建 2 个集装箱码头、2 个多功能散货泊位及 1 个拖轮泊位, 均采用以直径 1 016 mm

和 1 200 mm 钢管桩为基础的高桩梁板结构, 其中 3#、4#泊位为专用集装箱泊位, 对钢管桩基础承载力要求高, 极限承载力最高要求达 14 MN。根据现场资料可知, 3#泊位部位地质由上至下主要土层为密实、极密实状态的含黏粒砂土和碎石土, 其中极密实状态表明砂土和碎石土层的标贯和动力触探击数分别大于 100 和 50 击, 其地质分布见表 1。在初步设计中均要求钢管桩以下部碎石土层作为持力层。

表 1 M<sub>22</sub> 和 M<sub>24</sub> 钻孔地质资料及参数

钻孔	岩土名称	状态	层顶高程/m	标贯或动力触探击数/击
M <sub>22</sub>	砂土	密实	-15.76	40~80
	砂土	极密实	-25.60	>100
	碎石土	极密实	-35.75	50~300
M <sub>24</sub>	砂土	密实	-10.38	43~59
	砂土	密实	-14.29	>100
	碎石土	密实	-27.39	50~300
	砂土	密实	-30.79	>100
	碎石土	密实	-34.94	50~300

## 2 模拟沉桩试验及分析

### 2.1 国内模拟试验

为直观判断钢管桩在碎石土中的穿透性以及提供类似地质钢管桩的侧阻、端阻参数。在项目筹备策划期于国内开展了钢管桩沉桩模拟试验。主要步骤包括: 1) 将直径 2 000 mm、长 20.0 m 的大直径钢护筒沉入泥面以下约 19.5 m。2) 将护筒内部泥土全部清除至护筒底高程, 并用混凝土将护筒底部全部封闭(厚度约 0.5 m)。3) 分层回填厚 3 m 且尺寸与现场尺寸相似的碎石和卵石土, 并分层夯击击实, 利用重型动力触探试验检测, 确保回填碎石土达到 30 击的密实状态。4) 随后回填并分层夯实砂土直至地面, 利用标贯试验检测, 确保回填砂土达到的密实状态与现场情况相似; 回填完成后, 向内注水模拟现场饱和状态。5) 使用振动锤和液压锤在钢护筒内对直径 1 000 mm、长 22 m 的模拟工程桩进行插桩和沉桩施工, 同时进行高应变全程动测和初复打检测。

对模拟桩进入碎石土后 0.6、1.1、1.6、2.1、

2.6 m 的高应变数据进行分析, 得到模拟桩不同深度动测和复打结果见表 2。可以看出: 1) 在整个沉桩过程中, 无异常情况发生; 沉桩贯入度、桩身应力均在合理范围内, 且未出现桩端卷边现象。2) 钢管桩进入碎石土后, 贯入度由 8.3 mm/击逐渐减小至 6.9 mm/击, 动测承载力、侧阻力和端阻力均随着入碎石土层深度增加而逐渐增大, 但增大幅度随入土增加而逐渐减小, 表明在进入碎石土一定深度( $>1$  m)后, 其贯入度和单位面积端阻力会逐渐趋于稳定, 因此钢管桩入密实碎石土持力层深度无需过大端承力即可完全发挥。3) 复打试验表明, 钢管桩承载力恢复系数约为 1.08, 承载

力恢复不明显, 原因可能为模拟试验环境过于封闭。在砂土中桩单位面积侧阻力在 20.8~88.6 kPa, 碎石土中为 140.2~159.8 kPa, 桩的单位面积端承力按闭口桩计算约为 7 MPa; 另考虑到模拟地层并未达到与项目现场相同的密实程度, 因此可适当将各土层试验所得的摩阻力及端阻力值按比例  $K$  扩大( $K$  为现场击数与模拟地层击数的比值), 作为现场侧阻端阻参考值在可打性分析中使用。同时, 经沉桩结束后测试得钢管桩内外泥面高差为 0.65 m, 可知沉桩形成的土塞现象并不明显, 将开口钢管桩闭塞系数按《码头结构设计规范》推荐范围取相对小值 0.35。

表 2 试打桩参数及动测结果

入土深度/m	动力触探击数/击	动测贯入度/(mm·击 <sup>-1</sup> )	动测承载力/kN	侧摩阻力/kN	砂土层侧阻力/kN	碎石土层侧阻力/kN	端阻力/kN
16.6	36	8.3	8533.9	3 648.1	3 416.3	231.7	4 885.8
17.1	42	7.6	8 843.2	3 848.1	3 406.0	442.1	4 995.1
17.6	40	7.3	9 156.3	4 062.2	3 394.0	668.2	5 094.1
18.1	44	7.1	9 398.6	4 277.7	3 385.0	892.7	5 120.9
18.6	47	6.9	9 646.9	4 500.4	3 380.0	1 120.4	5 146.5
18.6(复打)	47	4.9	10 473.3	5 018.0	3 785.6	1 232.4	5 455.3

## 2.2 可打性分析

为选择桩锤, 考察钢管桩是否能穿过  $M_{24}$  钻孔中的碎石土夹层, 了解钢管桩在碎石土持力层中沉桩贯入度及承载力, 采用 GRLWEAP 打桩分析软件, 分别对 3#泊位典型地质处(表 1), 直径为 1 016 和 1 200 mm 的钢管桩进行可打性分析。采用锤芯质量为 30、40 t 的 YC30 和 YC40 型桩

锤, 桩底高程暂定为 -37.5 m, 桩端须进入持力层 2 m。砂土层及碎石土层单位面积侧阻力和端阻力参考模拟试验结果, 并考虑模拟试验密实度与现场实际差距, 经系数扩大并结合规范和经验综合考虑, 分别取 200~220 kPa 和 22~30 MPa, 将开口钢管桩闭塞系数取 0.35。分析结果见表 3。

表 3 基于 GRLWEAP 的打桩分析结果

桩径/mm	钻孔	锤型	锤击跳高/m	总锤击数/击	停锤贯入度/(mm·击 <sup>-1</sup> )	初打承载力/kN	初打侧阻力/kN	初打端阻力/kN	入碎石土层深度/m	桩端高程/m
1 016	$M_{22}$	YC40	1.4	588	3.09	13 505.0	4 655.0	8 850.0	1.35	-37.10
1 200	$M_{22}$	YC40	1.4	756	1.73	15 972.7	5 544.6	10 428.0	1.05	-36.80
1 016	$M_{24}$	YC40	1.4	2 795	1.37	14 656.0	5 944.0	8 712.0	2.20	-37.10
1 200	$M_{24}$	YC40	1.4	3 647	1.16	17 161.2	6 441.2	10 720.0	1.50	-36.40
1 016	$M_{24}$	YC30	1.4	拒锤	-	-	-	-	0.50	-27.39
1 200	$M_{24}$	YC30	1.4	拒锤	-	-	-	-	0.50	-27.39

由表3可看出: 1)  $M_{24}$  钻孔地质时, 采用YC30锤在桩尖刚进入碎石土夹层后就发生拒锤, 无法在密实碎石土中沉桩; 而采用YC40锤, 2种直径的钢管桩均能穿过密实碎石土夹层, 但在碎石土夹层中最小贯入度仅为0.97 mm/击, 持续高跳高小贯入度沉桩将增加施工风险。2) 采用YC40锤能在密实碎石土中沉桩, 但钢管桩在进入碎石土中1 m后贯入度就已小于4 mm/击, 且此时初打承载力均已远大于设计承载力要求, 表明钢管桩在入密实碎石土持力层1 m后沉桩贯入度就已很小, 但已能提供较大的端承力。通过以上分析, 决定采用YC40锤进行钢管桩沉桩, 桩端进入

密实碎石土持力层大于1 m即可。同时建议D、E轴沉桩时在钢管桩进入密实碎石土夹层后进行承载力测试。若承载力满足可将此夹层作为持力层。

### 3 现场试桩试验

#### 3.1 试沉桩施工及高应变动测

在3#泊位开始施工时, 首先在靠近 $M_{22}$ 和 $M_{24}$ 钻孔位置对各轴不同规格的钢管桩进行试沉桩, 沉桩在港池开挖后进行, 泥面高程在-16~-10 m。采用YC40型液压冲击锤, 锤芯质量为40 t, 最大锤击能600 kJ。沉桩结束后进行高应变检测承载力。试沉桩及高应变检测结果见表4。

表4 现场试沉桩沉桩数据及动测分析结果

桩号	桩径/mm	终锤跳高/m	终锤贯入度/(mm·击 <sup>-1</sup> )	入土深度/m	桩底高程/m	入持力层深度/m	参考钻孔	动测承载力/kN	动测侧阻力/kN	动测端阻力/kN
TP-A	1 200	1.0	3.8	20.74	-37.09	1.34	$M_{22}$	15 226	5 063	10 163
TP-B	1 016	1.0	4.8	21.33	-36.80	1.05	$M_{22}$	10 671	4 344	6 327
TP-C	1 016	1.0	4.2	23.44	-37.07	1.32	$M_{22}$	10 880	4 420	6 460
TP-D	1 016	1.0	1.7	17.49	-29.02	1.63	$M_{24}$	10 781	3 763	7 018
TP-E	1 200	1.0	2.5	18.42	-28.74	1.35	$M_{24}$	14 518	4 687	9 831
S1	1 200	1.0	7.1	20.53	-36.30	0.55	$M_{22}$	14 814	5 161	9 653
		1.0(复打)	2.5	20.80	-36.57	0.82	$M_{22}$	18 441	6 876	11 565

由表4的不同桩位、桩径、地质情况、贯入度和承载力对比, 可知:

1) A、B、C轴钢管桩地质参考 $M_{22}$ 钻孔, 可知试沉桩桩端已进入下层碎石土中; D、E轴钢管桩地质参考 $M_{24}$ 钻孔, 钢管桩在进入中部密实碎石土夹层后进行动测, 结果显示承载力满足要求, 表明可将密实碎石土夹层作为持力层。

2) 在砂土层中锤芯跳高为0.4~0.8 m, 沉桩贯入度在10~20 mm/击。在进入碎石土层后, 钢管桩贯入度逐步减小至5 mm/击以内, 其贯入度变化规律与模拟试验和可打性分析相似。

3) 每根试沉桩进入碎石土持力层长度均在0.5~1.5 m, 初打承载力均已满足设计要求, 端阻力占承载力比例在60%~70%, 表明密实碎石土能提供的端阻力较大, 该项目钢管桩为端承摩擦桩。根据试验桩初复打试验可知钢管桩承载力恢复系数约为1.24, 其中侧阻力恢复系数为1.33, 端阻

力为1.18, 侧阻力恢复能力较强, 按桩端完全闭塞计算恢复后的碎石土持力层提供的单位面积端阻力不低于10 MPa。

4) 依据试沉桩记录及高应变试验综合分析, 确定了停锤标准: ①沉桩至设计高程, 在锤击能量不小于400 kJ时, 贯入度不大于8 mm/击; ②沉桩未达设计高程, 锤击能量不小于400 kJ时, 贯入度不大于5 mm/击。

#### 3.2 静载试验方法

为进一步确定钢管桩承载力和侧、端阻力, 对试验桩S1进行竖向抗压静载试验。抗压静载荷试验主要由反力系统、加载系统、位移测试系统和桩身应变测试系统等组成, 其中试验桩周边的4根锚桩, 连同1套30 MN级钢结构反力梁、上部600 t的重钢卷板共同组成锚堆联合反力系统, 如图1、2所示。加载系统由8只3.2 MN千斤顶、1套高压油泵和相应油路系统组成。桩身应变

测试采用表面式振弦应变计，在钢管桩全断面布置 2 组，每组沿桩轴向每 2 m 布置 1 个，最底部传感器安装在距离桩底 1 m 部位，安装好后利用锡纸、泡沫胶和角钢等进行保护。在钢管桩静载试验过程中对桩身应变情况进行连续监测。静载试验参考 ASTM D1143<sup>[10]</sup> 的快速维持荷载法，最大加载 18 MN。

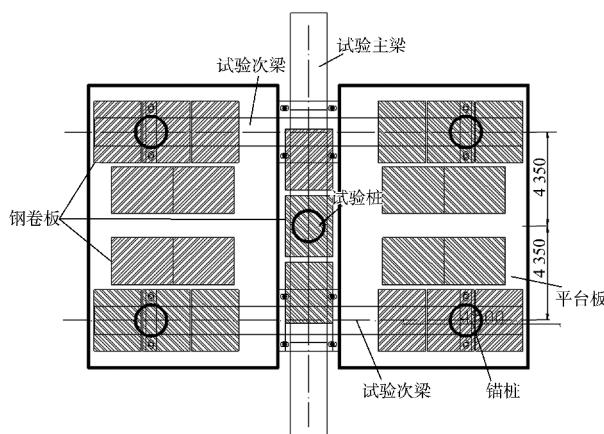


图 1 试桩平面布置 (单位: mm)



图 2 试桩静载试验反力系统

### 3.3 静载试验结果及分析

#### 3.3.1 $Q$ - $s$ 曲线

试验得到的  $Q$ - $s$  (荷载-沉降) 曲线见图 3。试验桩最大加载 18 MN，最大沉降量为 47.37 mm，残余沉降量为 5.93 mm，弹性变形占比为 87.5%；加卸载过程试桩的  $Q$ - $s$  曲线均近似直线，说明桩土间主要发生弹性变形，因桩端碎石土的密实程度很高，使因贯入所产生的塑性变形较小，桩土整体性较好。试验桩总沉降量未超规范规定。表明试验桩的单桩竖向极限抗压承载力均不小于 18 MN，满足 15.4 MN 的设计要求。

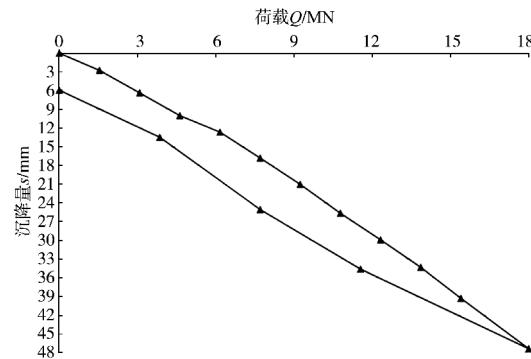


图 3 试验桩静载试验  $Q$ - $s$  曲线

#### 3.3.2 桩身轴力分布和侧阻力变化

试验桩在各级荷载下的桩身轴力分布和单位面积侧摩阻力变化见图 4、5，由于桩端进入碎石土层仅 0.8 m，所测试的均为砂土层部分的侧阻力。可以看出：1) 各级荷载轴力曲线沿深度的斜率变小，表明桩侧土层侧阻力随深度增加而增大；加载至最大荷载时，桩侧砂土层单位面积侧阻力从 16.7 增大至 129.8 kPa，总桩侧阻力约为 6 MN；2) 各级荷载作用下，桩身上部砂土层侧阻力的发挥均比下部快，但上下部砂土层侧阻力发挥规律相同，均是先随荷载和沉降增大逐级显著增长，在到达一定值后开始缓慢变化，近似接触面的双直线模型。

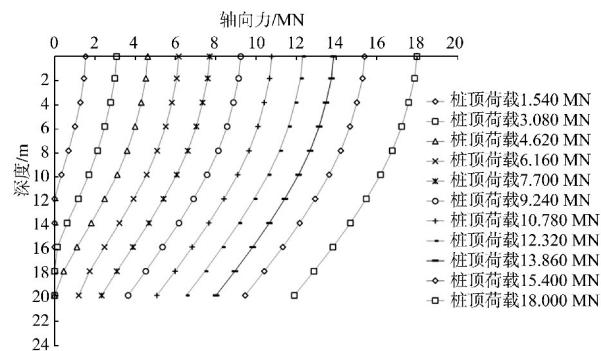


图 4 试验桩的桩身轴力分布

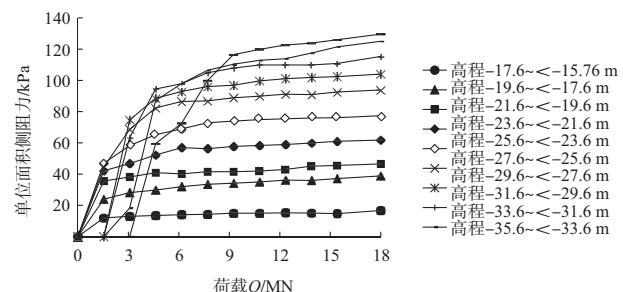


图 5 试验桩的桩身单位面积侧阻力变化

### 3.3.3 桩端阻力随桩顶荷载变化

桩端阻力随桩顶荷载变化的曲线见图6。可以看出: 1) 试验荷载在小于5 MN时, 上负荷载由桩侧摩阻力承担; 之后, 桩端阻力开始以接近线性的方式增大, 且其增大斜率与试验荷载增大相近, 表明加载后期钢管桩新增承载力主要由端阻力提供; 当加载至最大荷载时, 桩端阻力约12 MN, 占比66.7%, 表明试验桩为端承摩擦桩, 按闭口桩计算的碎石土层单位面积极限端阻力不小于10.5 MPa; 2) 沉桩后经测量知钢管桩内外泥面高差仅相差1 m, 表明大部分桩端土体已随桩的贯入进入桩内, 形成的土塞现象并不明显, 表明以密实碎石土为持力层的地质中, 开口钢管桩的端阻力主要由桩端阻力提供, 土塞承载力提供的反力较小, 开口管桩土塞系数可以取相对低值。

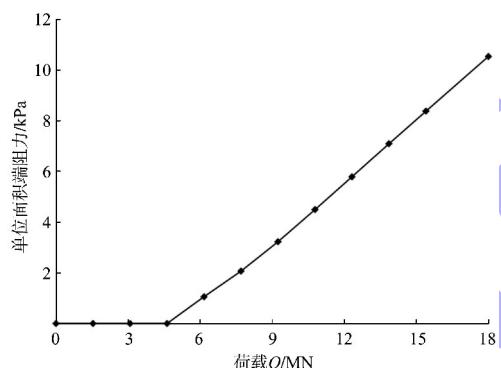


图6 试验桩的桩端单位面积受力随桩顶荷载变化

## 4 结论

1) 由于该工程地处南美洲, 周围无相关工程参考, 在国内开展打桩沉桩模拟试验, 有助于提前了解现场地质参数、打桩施工情况, 完善桩基设计和施工策划。虽在模拟试验中因模拟地质较难达到实际地质的密实程度而出现沉桩贯入度相对较大, 而承载力、端阻力及侧阻力较小的现象, 但经参数修正, 所得参数仍可有效应用于后续分析; 且模拟试验中钢管桩的贯入度及承载力变化规律与现场相似, 同样对设计及现场施工起到有益的指导作用。

2) 采用模拟试验结果进行可打性分析, 可预估现场沉桩时贯入度及承载力情况和确定打桩设备。经现场实践表明: 桩锤选择合理, 模拟沉桩过程

和承载力等成果均对现场顺利施工起到重要作用。

3) 从模拟试验、分析及现场实测可知, 打入钢管桩在桩尖进入密实碎石土持力层后, 沉桩贯入度逐渐减小, 单位面积侧阻力和端阻力会逐渐增大, 但增大幅度随入土增加而变小, 普遍在入持力层1 m后沉桩出现困难, 且此后碎石土提供的单位面积端阻力将逐渐稳定, 实测按闭口桩计算的单位面积极限端阻力不小于10.5 MPa。

4) 在密实碎石土为持力层的地质中, 开口钢管桩的端阻力主要由桩端阻力提供, 土塞承载力提供的反力较小, 开口管桩土塞系数可以取相对低值。

## 参考文献:

- [1] 韩亮, 姚爱军, 郭萍, 等. 深海水下导管架钢管桩可打性实例分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S2): 1872-1875, 1898.
- [2] 吴荣辉, 叶锦峰, 骆光杰, 等. 江苏海岸辐射沙洲地层中大直径钢管桩基础承载性能试验研究[J]. 海洋工程, 2021, 39(1): 121-132.
- [3] 汪明元, 单治钢, 饶锡保, 等. 基于近海钢管桩现场试验的海洋土参数反演[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 143-148.
- [4] 杨超, 江浩, 岳健, 等. 钙质砂中桩基承载性状的模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1): 87-90.
- [5] 刘修成, 徐杰, 游新鹏, 等. 珊瑚礁地质大直径钢管打入桩承载特性研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(6): 157-163.
- [6] 苏世定, 陈章宇, 桑登峰. 千枚岩上覆钙质砂层大直径钢管桩沉降特性分析[J]. 水运工程, 2021(2): 150-154, 165.
- [7] 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.
- [8] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 长江航道规划设计研究院. 水运工程岩土勘察规范: JTS 133—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [10] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for deep foundation elements under static axial compressive load: ASTM D1143/D1143M-20 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2020.

(本文编辑 王璁)