



软弱地层钢管桩嵌岩深度及侧阻力特性

邱 敏^{1,2,3,4}, 胡睿杰^{1,2,3,4}, 王 超^{1,2,3,4}, 宋喜硕^{1,2,3,4}

- (1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;
2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;
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. 公路长大桥建设国家工程研究中心, 北京 100011)

摘要:对于软弱岩层中的打入桩, 目前尚无公认的方法评估桩侧阻力。针对巴拿马 Amador 邮轮码头航站楼嵌岩钢管桩基础, 开展了 9 组桩基动力测试, 采用波动方程分析方法获取桩侧阻力。研究了地层中桩侧阻力分布规律、岩层中桩侧阻力与单轴抗压强度的关系。得出如下结论: 1)侧阻力分布曲线均呈抛物线形式, 可以明显区分出软黏土、粉质砂土、强风化岩、中风化岩 4 个地层。将曲线跌落后的部分定义为嵌岩段, 据此得到桩 A-4 嵌岩深度为 6 m、其他桩嵌岩深度为 4 m, 均满足设计最小嵌岩深度 3 m 的要求。2)岩层桩侧阻力-抗压强度(UCS)曲线均呈指数分布, 而非线性分布。3)软弱岩层中, 侧阻力起主导作用。同一 UCS 值, 泥质粉砂岩中桩侧阻力明显大于玄武岩。4)随着 UCS 增大, 岩体的自稳能力逐渐增强, 摩擦系数逐渐转变为影响侧阻力的主导因素。UCS 增大到一定数值后, 桩侧阻力趋于稳定。5)获得了岩层桩侧阻力-抗压强度关系式, 为估算场地岩层中桩侧阻力提供了依据。

关键词:巴拿马; 嵌岩桩; 软弱岩层; 侧阻力; 波动方程

中图分类号: TU 433; U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0160-06

Rock socketed depth and lateral resistance characteristics of steel pipe in soft rock

QIU Min^{1,2,3,4}, HU Rui-jie^{1,2,3,4}, WANG Chao^{1,2,3,4}, SONG Xi-shuo^{1,2,3,4}

(1.CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2.Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China;

3.Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China; 4.CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 10011, China)

Abstract: For driven piles in the soft rock stratum, there is currently no accepted method to evaluate the side resistance. For the rock socketed steel pipe pile foundation of Panama Amador cruise terminal, nine groups of dynamic tests of pile foundation have been carried out, and the side resistance of pile has been obtained by wave equation analysis method. The distribution law of pile side resistance in stratum and the relationship between pile side resistance and uniaxial compressive strength in rock stratum has been studied. The conclusions are as follows: 1) The distribution curve of side resistance is in parabola form, and four strata can be distinguished obviously, which are soft clay, silty sand, strongly weathered rock, and moderately weathered rock. The part after the curve falls is defined as the rock socketed section. Based on this, the rock-socketing depth of pile A-4 is 6 m, and the rock-socketing depth of other piles is 4m, which meets the design minimum rock-socketing depth of 3m. 2) The pile side resistance compressive strength (UCS) curve of rock stratum is exponential distribution, and non-linear distribution. 3) In the soft rock stratum, the side resistance plays a leading role. With the same UCS value, the pile side resistance in

argillaceous siltstone is obviously larger than basalt. 4) With the increase of UCS, the self-stability of rock mass gradually enhances, and the friction coefficient gradually changes into the dominant factor affecting the side resistance. After UCS increases to a certain value, the pile side resistance tends to be stable. 5) The relationship between pile side resistance and compressive strength in the rock stratum is obtained, which can provide a basis for estimating pile side resistance in the rock stratum.

Keywords: Panama; rock socketed pile; soft rock stratum; side resistance; wave equation

软弱岩石是介于土体和岩石之间的过渡部分, 与土体相比, 软弱岩石更坚硬、更脆、更膨胀且不均匀; 与其他岩石相比, 它们更软、更可压缩、更易风化^[1]。在软岩中设置桩基础, 陆域建筑倾向于使用钻孔灌浆桩, 以保证桩基承载力并消除桩基在软弱岩石中的安装风险^[2]。然而, 考虑大直径海底钻井和灌浆作业的时间、成本和复杂性, 海洋工程仍然倾向于使用打入桩^[3]。

除了常规的码头、桥梁项目外, 随着近海可再生能源开发规模的不断扩大, 一些石油、天然气及近海风电开发项目在软弱岩石上进行^[4-6], 而且这些项目正在向更深的水域和比先前更具挑战性的地域进行。对于软弱岩石中打入桩基础的力学问题, 特别是桩基承载力和桩基可打性问题, 人们知之甚少^[7]。目前用于计算软弱岩石中桩侧摩擦和桩端阻力的设计方法存在显著差异, 没有公认的设计方法。通常由设计师决定采用最合适的设计方法、确定相关参数、并计划最适合其特定场地的勘察。这种情况往往会导致过度依赖特定的测试技术, 导致桩长设计过于保守、桩基贯入困难及施工期间出现打入桩拒锤现象^[8-9]。其中一个主要问题就是嵌岩桩段的承载力往往预测较低。如 Beake 和 Sutcliffe^[10]通过对打入阿拉伯湾弱碳酸盐粉砂岩 (UCS, 单轴抗压强度为 3.2~4.7 MPa) 中的钢管桩进行抗拔试验, 观察到了 170 kPa 和 300 kPa 的极限侧阻力; Rodway 和 Rowe^[11]在澳大利亚悉尼港研究了打入 UCS 达到 20 MPa 砂岩的两个 H 型钢桩的抗拉能力, 桩的贯入深度仅为 1.0~1.5 m, 桩产生了显著的抗拉能力, 桩侧摩阻力最保守(低)估计可达 230 kPa; Burt 等^[12]指出, 粗胶结砾石中的桩侧摩阻力占岩

石 UCS 的 10%~20%, 但未能揭示其变化规律。

本文依托巴拿马 Amador 邮轮码头项目, 开展了 9 组桩基动力测试, 采用波动方程分析方法获取桩侧阻力, 研究地层中桩侧阻力分布规律、岩层中桩侧阻力与单轴抗压强度的关系, 获得了岩层桩侧阻力-抗压强度关系式, 为估算场地岩层中桩侧阻力提供了依据。

1 工程概况与地质特性

Amador 邮轮码头项目位于巴拿马湾内, 紧邻巴拿马城南部的佩里科岛 (Perico Island) 东侧, 南接太平洋, 北连巴拿马运河南口。工程地理坐标 8°55'N, 79°31'W, 项目位置见图 1。



图 1 项目所在位置

钻孔 Y-1~Y-14(图 2)揭示航站楼区域海底表层分布海床面起伏较大、浅灰色-深灰色、高塑性状的深厚软黏土, 厚度在 6.30~13.90 m。中部为厚度为 6~12 m 的砂土, 灰黑色, 密实状。下伏强风化-中风化岩石, 其中▲点标记钻孔 (Y-3、Y-5、Y-8、Y-9、Y-11、Y-14) 揭示区域内岩体为泥质粉砂岩, 单轴抗压强度 5~15 MPa; ●点标记钻孔 (Y-1、Y-2、Y-4、Y-6、Y-7、Y-10、Y-12、Y-13) 揭示区域内岩体为玄武岩, 单轴抗压强度 5~35 MPa, 基本属于软岩。

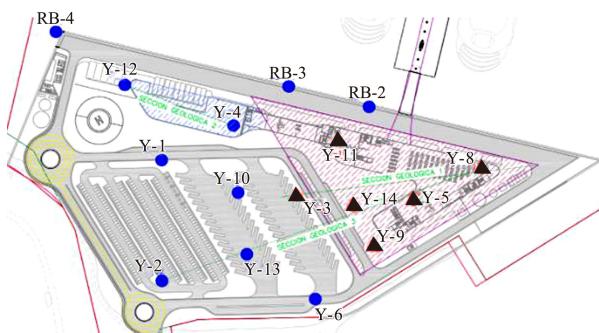


图 2 航站楼钻孔分布

航站楼采用钢管桩基础, 共布设 221 根钢管桩, 其中 48 根直径 1 219 mm 钢管桩、173 根直径 914 mm 钢管桩, 壁厚均为 20 mm。钢管桩设计顶高程 4.7 m, 桩端最低嵌入中风化岩 3 m, 设计桩长 20.2~35.4 m。

2 常规设计方法

对于软弱岩石中的打入桩, 没有公认的设计方法。桩身承载力是软弱岩石中桩基础的关键, 而在许多海洋导管架结构物中, 桩身承载力的临界荷载情况是受拉的, 因此研究桩侧阻力尤为重要。

2.1 有效应力法

对于软弱岩石中的嵌岩桩, 极限侧阻力 Q_s 可以使用美国石油协会 API^[13-14] 推荐的公式计算:

$$Q_s = K\sigma'_v \tan \delta \cdot A_s \leq f_t A_s \quad (1)$$

式中: K 为岩层压力系数; σ'_v 为有效上覆应力; δ 为岩石与桩壁之间的摩擦角, 一般取岩石内摩擦角的 0.75 倍; A_s 为桩身表面积; f_t 为极限侧摩阻力。

2.2 总应力法

对于泥岩中的打入桩, 极限侧阻力 Q_s 是黏着系数 α 和不排水抗剪强度 s_u 的函数:

$$Q_s = \alpha s_u A_s \quad (2)$$

黏着系数 α 与不排水抗剪强度、有效上覆压力和界面粗糙度有关。

采用 API(2014) 的推荐方法, 黏着系数可计算为:

$$\alpha = \min \left[0.5 \left(\frac{UCS}{2\sigma'_v} \right)^{-0.25}, 0.5 \left(\frac{UCS}{2\sigma'_v} \right)^{-0.5} \right] \quad (3)$$

式中: UCS 为岩石饱和单轴抗压强度(MPa)。

3 打入钢管桩

3.1 桩基动力测试

在施工航站楼钢管桩基础之前, 先要进行试打, 开展动力桩试验和相关数据分析, 以确定钢管桩可打性及承载能力。

桩基动力试验及分析过程如下: 1) 采用打桩分析仪(PDA)将应变和加速度信号转换为力和速度, 并进行数字存储; 2) 利用桩动力和速度数据, 应用桩-波分析程序(CAPWAP)计算土体阻力及其分布; 3) 应用精确模拟打桩过程软件(GRLWEAP)计算承载力、桩应力、锤击行程和锤击数之间的关系。本项目打桩波动方程分析基本流程见图 3, 典型桩基侧阻力分布见图 4。

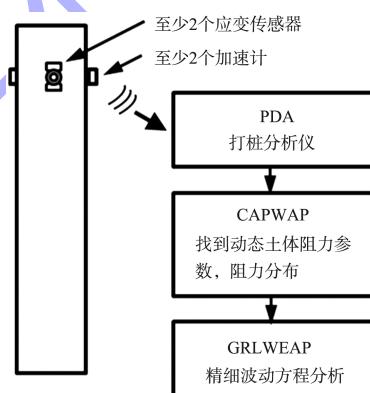


图 3 精简的波动方程分析流程

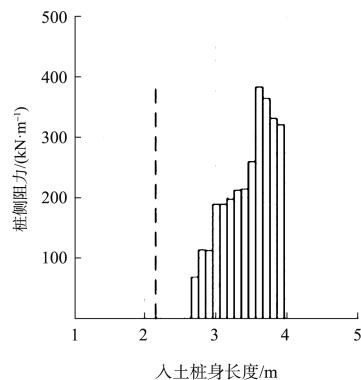


图 4 桩侧阻力分布

共开展 9 组桩基动力试验, 其中在泥质粉砂岩地层开展 4 组, 编号为 A-1~A-4; 在玄武岩地层开展 5 组, 编号为 B-1~B-5。钢管桩基本参数及成桩后桩侧阻力分布见表 1。

表1 钢管桩参数及桩端以上侧阻力

嵌岩地层	编号	直径/m	桩端以上侧阻力/kPa															
泥质粉砂岩	A-1	0.914	5.16	30.77	31.79	33.69	41.52	43.37	67.2	76.22	97.1	172.43	187.44	212.65	212.65	-	-	
	A-2	0.914	29.17	29.17	26.94	7.59	6.32	29.4	56.18	56.97	58.69	58.69	85.56	117.35	168.05	223.39	227.29	234.31
	A-3	1.219	11.54	32.1	29.82	19.49	24.13	29.98	29.98	19.36	18.03	25.98	33.88	40.5	113.68	180.21	200.3	186.35
	A-4	0.914	11.34	28.25	61.44	56.27	100.15	102.05	69.55	69.55	86.95	140.95	165.54	179.02	170.54	193.89	193.89	-
玄武岩	B-1	0.914	23.78	39.52	39.14	65.84	65.84	68.77	73.97	74.77	90.51	133.63	127.03	115.53	111.79	-	-	-
	B-2	1.219	13.13	22.45	16.03	19.8	27.7	33.64	43.23	50.15	50.15	62.96	51.92	75.14	109.45	178.67	178.99	176.66
	B-3	0.914	17.28	24.19	24.19	14.01	14.01	27.75	38.77	55.16	82.33	103.54	134.77	203.06	203.06	221.53	221.46	-
	B-4	1.219	13.94	29.52	22.96	22.96	22.96	16.73	17.92	12.24	91.61	219.93	241.28	241.28	254.62	13.94	29.52	22.96
	B-5	0.914	12.99	28.39	12.65	17.39	17.39	10.71	10.71	23.18	141.08	263.25	317.46	337.74	-	-	-	-

3.2 桩侧阻力分布规律及嵌岩深度判定

桩侧阻力在土体中的分布见图5, 填侧阻力分布曲线均呈现抛物线的形式。可以大致将土体侧阻力分为4个区段: 第1区段曲线较为平缓, 侧阻力在0~30 kPa, 属于软黏土, 对应土体高程-20~-8 m, 起伏变化较大; 第2区段是曲线的弯曲段, 侧阻力在30~80 kPa, 属于粉质砂土, 对应土体高程-27~-20 m; 第3区段侧阻力在80~150 kPa, 属于曲线的陡降段, 是粉质砂土空间上过渡到岩层的区段, 过渡段空间距离较短, 在1 m左右; 第4区段侧阻力总体在150~230 kPa, 属于嵌岩段, 深度3~4 m, 侧阻力沿深度变化不大。曲线B-3、B-4、B-5直接从平缓段跌落至嵌岩段, 都缺少明显的弯曲段, 表明3个桩位处地层中没有砂土层, 软黏土直接覆盖在玄武岩上; B-5曲线在跌落后侧阻力沿深度方向继续大幅增加, 可能是桩体从强风化玄武岩进入到中风化玄武岩。

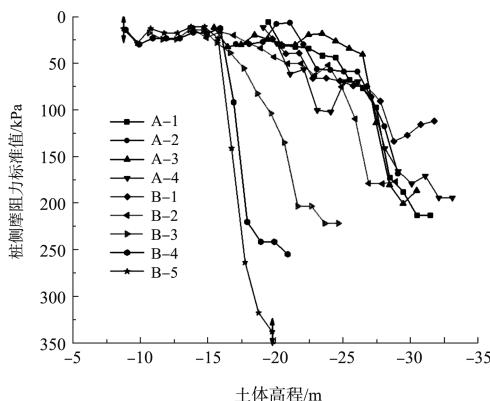


图5 桩侧阻力分布

根据曲线变化特点, 将跌落后的部分定义为嵌岩段, 具体做法是计算所有曲线相邻两个点之

间的侧阻力增量, 以最大增量之后的点作为嵌岩点, 据此得到A-4桩嵌岩深度为6 m, 其他桩嵌岩深度均为4 m, 满足设计最小嵌岩深度为3 m的要求。

3.3 嵌岩段桩侧阻力与岩石强度

对于软弱岩石中的打入桩, 目前没有公认的方法评估桩侧阻力, 2.1节的有效应力法计算公式中有一个关键参数岩石侧压力系数K。对于土体而言, 一般可用朗肯土压力公式计算K值, K值通常小于1。但在实际工程中, 由于土体应力历史的影响, 经常出现土体侧压力大于竖向应力的情况。

对于岩石而言, 由于其漫长的沉积历史与地质变迁, 加之岩体自身的结构性, 通过上覆土体竖向应力推算侧压力K是不正确的。一般可用旁压测试直接测量岩土侧压力系数K, 随着旁压仪的发展, 无论是软岩还是较硬岩, 都能够获取准确的测量结果。

总应力方法中, 一般无法直接测得软岩的不排水抗剪强度 s_u , 计算时取 s_u 为岩石饱和单轴抗压强度的一半(UCS/2), 因此该方法主要适用于泥岩, 特别是完全风化的泥岩。

打入桩桩侧阻力分布(图5)表明, 嵌岩段桩侧阻力远大于土体侧阻力, 是构成打入桩承载力的重要组成部分。航站楼共布设221根钢管桩, 无法为每一根桩开展打桩测试并评估承载力, 鉴于本项目钢管桩被嵌入强风化至中风化玄武岩和泥质粉砂岩, 无法直接采用上述两种方法估算桩侧阻力。因此如何在现有的打桩数据的基础上开

发出新的嵌岩钢管桩承载力计算方法是本文研究的重点。

为此,根据9个打入桩的分布位置,在其1 m范围内进行钻孔,取3组对应深度范围内的岩石开展单轴抗压强度试验,取3组试验平均值作为嵌岩段岩石强度。

绘制9个打入桩嵌岩段侧摩阻力平均值(f_s)-单轴抗压强度(UCS)平均值散点分布图(图6),可知在泥质粉砂岩与玄武岩中, f_s -UCS 散点均呈指数分布,而非线性分布。表现出随着UCS的增大, f_s 先快速增大、然后缓慢增大、最后可能趋于稳定的3个阶段。泥质粉砂岩中只有4组数据,且UCS值均较小, f_s -UCS 散点只呈现出上述第1阶段。玄武岩中有5组数据,UCS分布范围略广,主要呈现出第1、第2阶段,有进入第3阶段的趋势。

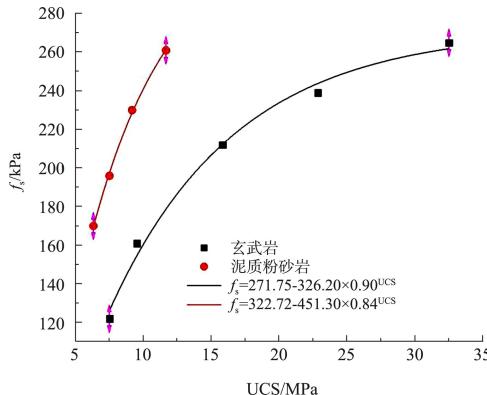


图6 岩层中桩侧阻力与单轴抗压强度关系

做两组散点的指数拟合曲线,其相关系数 R^2 分别为 0.99 和 0.98,相关性极高。曲线表明当岩石较软弱时,UCS 的变化会显著影响其侧阻力大小。当UCS大小相同时,泥质粉砂岩中桩侧阻力明显大于玄武岩,这可能是在较弱的岩石中,钢管桩的打入使岩体明显松弛,原位径向应力可能更高,进而产生更高的侧向应力;而玄武岩自稳性更强,侧向应力发挥更低。因此,为了解释高侧向应力的潜在影响,评估岩层的地应力非常重要。

随着UCS的继续增大,岩体的自稳能力逐渐增强,侧压力逐渐减弱,摩擦系数逐渐转变为影

响侧阻力的主导因素。UCS 增大到一定程度后,岩体完全自稳,摩擦系数不再增加,桩侧阻力趋于稳定。拟合方程揭示了 f_s 随 UCS 的变化规律,场地泥质粉砂岩中最大桩侧阻力为 322.72 kPa,玄武岩中最大桩侧阻力为 271.75 kPa。

4 结论

1)对于软弱岩石中的打入桩,目前没有公认的方法评估桩侧阻力,常规方法往往会导致桩长设计过于保守、桩基贯入困难及施工期间出现打入桩拒锤现象。

2)侧阻力分布曲线均呈抛物线形式,可以明显区分出软黏土、粉质砂土、强风化岩、中风化岩共 4 个地层。根据侧阻力分布曲线,提出了确定钢管桩嵌岩深度的判定方法,判定 9 个试验桩均满足设计最小嵌岩深度 3 m 的要求。

3)岩层桩侧阻力-抗压强度(UCS)曲线均呈指数分布,而非线性分布;软弱岩层中,侧阻力起主导作用,同一 UCS 值,泥质粉砂岩中桩侧阻力明显大于玄武岩;随着 UCS 增大,岩体的自稳能力逐渐增强,摩擦系数逐渐转变为影响侧阻力的主导因素。UCS 增大到一定数值后,桩侧阻力趋于稳定。

4)获得了岩层桩侧阻力-抗压强度关系式,为估算场地岩层中桩侧阻力提供了依据。

参考文献:

- [1] IRVINE J, TERENTE V, LEE L T, et al. Driven pile design in weak rock[J]. Frontiers in offshore geotechnics, 2015(3): 569-574.
- [2] 徐熙明.沿海复杂地质区嵌岩桩施工工艺[J].水运工程, 2017(S1): 53-56.
- [3] 曾华彬,桑登峰,苏世定,等.风化岩层中开口钢管桩沉桩性状[J].水运工程, 2019(4): 193-199.
- [4] 黄卫明,方州恩.大榭 45 万 t 原油码头锚岩桩施工技术[J].水运工程, 2012(9): 186-189.
- [5] 时闻生,孙言茂,黎双邵,等.海上风电大型钢管嵌岩桩基础施工和试验研究[J].中国港湾建设, 2016, 36(1): 32-36.

- [6] 黄炳南.海上风电基础大直径嵌岩桩施工技术[J].中国港湾建设, 2015, 35(8): 57-60.
- [7] 陈旭, 黄质宏, 陈旺, 等.加载过程中嵌岩桩承载特性数值模拟分析[J].中国水运(下半月), 2019(12): 113-116.
- [8] NISHIDA Y, SEKIGUCHI H, MATSUMOTO T. Drivability of steel pipe piles into diatomaceous mudstone in the construction of Notojima bridge [J]. Penetrability and drivability of piles, 1985(5): 187-190.
- [9] HOEK E, MARINOS V. The geological strength index: applications and limitations[J]. Bull Eng Geol Environ, 2005(64): 55-65.
- [10] BEAKE R H, SUTCLIFFE G. Pipe pile drivability in the carbonate rocks of the Southern Arabian Gulf[C] International conference on structural Foundation on rock. Sedney: [s.n.], 1980.
- [11] RODWAY R L, ROWE R K. The uplift capacity of steel piles driven into Hawkesbury Sandstone [C] // The 3rd Australian and New Zealand Conference on Geomechanics. Wellington: [s.n.], 1980.
- [12] BURT N J, HARRIS R P. Design, installation and testing of belled pile foundations[C]. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference. California: [s.n.], 1980.
- [13] API. Recommended practice RP 2A-WSD, recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S]. New York: American Petroleum Institute, 2000.
- [14] API. Errata and Supplement 3 to API RP 2A-WSD[S]. New York: American Petroleum Institute, 2007.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 154 页)

5 结论

1) 大直径钢管桩穿过较薄的钙质砂层, 进入较硬的强风化千枚岩层足够深度, Q - S 特性表现为端承型桩, 桩顶沉降主要由桩身压缩引起, 残余沉降量小, 无论高应变还是静载试验, 都较难充分激发土阻力, 在相同荷载作用下, 高应变拟合的桩顶沉降大于静载实测的桩顶沉降。

2) 超长大直径钢管桩穿过摩阻力偏低的深厚钙质砂层且桩端支承于偏软的强风化千枚岩层, Q - S 特性表现为摩擦型桩, 无论是静载试验还是高应变动力测试, 都能使土阻力充分发挥, 静载试验和高应变拟合的 Q - S 曲线在摩阻力充分发挥前较为一致, 在端阻力开始发挥时, 静载试验的沉降急速增加, 累计总沉降量和残余沉降量远大于高应变拟合沉降值。

3) 钙质砂层中打入桩摩阻力极低, 因此千枚岩层上覆钙质砂层厚度对大直径钢管桩的承载力影响微小, 大直径钢管桩的极限承载力主要取决于穿过钙质砂层后, 进入千枚岩层的深度以及持力层强弱。

参考文献:

- [1] 王新志.南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D].武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.
- [2] 吴京平, 褚瑶, 楼志刚.颗粒破碎对钙质砂变形及强度特性的影响[J].岩土工程学报, 1997, 19(5): 51-57.
- [3] 苏世定, 王幸, 桑登峰.珊瑚礁岩土地区打入式钢管桩沉桩规律[J].水运工程, 2019(10): 187-192.
- [4] 苏世定, 陈章宇, 胡兴昊.珊瑚礁灰岩中钢管桩持力层选择及试验研究[J].水运工程, 2019(4): 179-183.
- [5] 唐国艺, 夏玉云, 刘争宏.东帝汶帝力市珊瑚砂地基的工程性质[J].岩土工程技术, 2013, 27(5): 248-251.
- [6] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [7] 黄良机, 林奕禧, 蔡健, 等.超长 PHC 管桩桩顶沉降特性的动静对比分析[J].岩土力学, 2008(2): 507-511, 516.

(本文编辑 郭雪珍)