



东非珊瑚砾砂岩地区 PHC 桩工程性状分析

冯光华¹, 焦绪学², 张青松¹

(1. 中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510310; 2. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011)

摘要: 东非坦桑尼亚达累斯萨拉姆港口项目地处珊瑚礁砾砂岩地区, 采用 PHC 桩作为桩基础, 桩径分别为 800 mm 和 1 000 mm。通过珊瑚礁砾砂岩的土工试验和不同桩径 PHC 桩沉桩规律研究, 得到珊瑚礁砾砂岩碎屑的 PHC 桩-土界面峰值摩擦角和残余摩擦角值。通过总结 2 种桩径各 200 根基桩的沉桩规律, 得到桩靴长度为 1.5 m 的 $\phi 800$ mm 和 $\phi 1\,000$ mm PHC 桩进入强风化珊瑚礁砾砂岩深度及沉桩规律; 珊瑚礁砾砂岩地区 $\phi 1\,000$ mm PHC 桩比 $\phi 800$ mm PHC 桩穿透能力强, $\phi 1\,000$ mm PHC 桩宜采用高程控制为主、贯入度为辅的终锤标准, 而 $\phi 800$ mm PHC 桩可采用高程和贯入度双控进行沉桩施工。研究结果可为该地质条件下 PHC 沉桩施工及理论研究提供指导。

关键词: 珊瑚礁砾砂岩; PHC 桩; 终锤标准; 工程性状

中图分类号: U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0215-05

Engineering characteristics of PHC piles in coral gravel sandstone area of East Africa

FENG Guang-hua¹, JIAO Xu-xue², ZHANG Qing-song¹

(1. The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510310, China;

2. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: The Dares Salaam project in Tanzania locates in the coral gravel sandstone area. PHC piles with diameter of 800 mm and 1 000 mm are used as pile foundation. Carrying out the geotechnical test on coral gravel sandstone and studying on the law of pile sinking with difference diameter of PHC pile, we obtain the peak friction angle of PHC pile-soil interface of coral gravel sandstone debris and the residual friction angle. Summarizing the law of piling of 200 foundation piles with 1.5m long pile shoe and with diameter of 800 mm and 1 000 mm respectively, we get to know the depth of piles into the strongly weathered coral reef limestone and law for pile sinking. The penetration ability of the 1 000 mm-diameter pile is stronger, and its elevation control shall be taken as the main criterion, while penetration shall be the complementary for sinking stopping. But both are main criteria for 800 mm-diameter piles. The research results provide a guidance for PHC sinking and theoretical research under similar geologic conditions.

Keywords: coral gravel sandstone; PHC pile; stopping criteria; engineering characteristics

PHC 桩单桩承载力高, 沉桩施工方便, 造价较同长、同径的钢管桩低, 因而被用作基建项目的常用桩型。根据 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[1], 桩径大于 800 mm 均属于大直径桩。国内外学者对于 PHC 桩的沉桩性能研究较多: 母金祥等^[2]以潍坊渔港码头工程为实例, 分析大直径

PHC 桩沉桩施工难度; 欧阳小华等^[3]结合马来西亚跨海大桥的施工, 分析水上大直径 PHC 管桩施工质量影响因素; 朱合华等^[4]分析上海软土地基 PHC 桩承压水层对土塞、闭塞效应的影响以及桩的竖向承载力性状; 黄良机等^[5]探讨深厚软土中的超长 PHC 管桩在动静测试时的荷载与沉降特

性; 胡东等^[6]总结出 PHC 桩直径越大、锤型越重时产生纵向裂缝的几率越大; 张国祥等^[7]探讨马来西亚槟城二桥超长 PHC 桩沉桩施工技术。以上对于 PHC 桩沉桩性状研究均为基于不同地质情况及施工情况下的基桩承载力特性和沉桩规律研究, 而对于东非坦桑尼亚珊瑚礁砾砂岩大直径 PHC 桩承载力特性的研究较少。

1 工程概况

工程位于印度洋西海岸的达累斯萨拉姆港,共扩建 7 个泊位以及新建 1 个滚装泊位,单个码头岸线长度为 191 m。采用 $\phi 800$ mm 及 $\phi 1\,000$ mm PHC 桩作为桩基础,共 1 014 根,含直桩以及 8:1、6:1、3:1 倾角的斜桩,PHC 桩钢桩靴长度为 1.5、4.0、5.0 和 7.0 m (图 1)。2 种基桩壁厚均为 130 mm。桩靴的长度主要是根据不同钻孔特性确定,PHC 桩端部停留在黏土、密实砂层或浅层强风化礁砾砂岩等土层中,而钢桩靴底部停留在较深强风化珊瑚礁砾砂岩层或高程值较大的硬黏土层中。

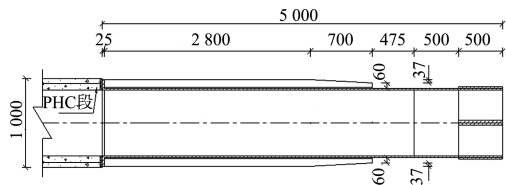


图 1 5.0 m 桩靴结构 (单位: mm)

单个结构段内部平行于码头岸线方向轴之间的 PHC 桩间距为 8 m, 垂直于码头岸线方向, 直桩排架之间间距为 5.8 m, 仰俯桩之间间距为 1.8 m, 斜桩与直桩排架间间距为 5.6 m, 共 7 排, 设计泥面高程为 -14.3 ~ -12.9 m, 基桩入土深度为 17.66 ~ 21.56 m。项目为该国近 50 年来首个港口工程项目、首次采用 PHC 桩作为桩基础, 并无可供参考的工程案例。项目 PHC 桩基情况见表 1, 单个结构段平面布置见图 2。

表 1 PHC 桩统计

桩径/mm	数量/根	桩长/m	单桩极限承载力 标准值/kN	桩尖设计 高程/m
800	320	33.0~44.5	8 000	-31.96
1 000	694	31.0~40.0	10 000	-34.46

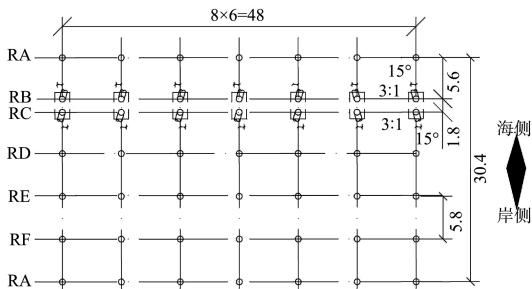


图2 桩位平面布置 (单位: m)

设计要求不同管径以及不同桩靴长度的 PHC 桩均沉桩至设计高程或者达到终锤标准，不能达到设计高程以及收锤标准的基桩，采用高低应变检测的方法，检测其承载力值以及桩身的完整性。

2 珊瑚礁砾砂岩地区 PHC 桩沉桩试验

2.1 珊瑚礁砾砂岩土工试验

几乎所有地质钻孔都显示存在珊瑚礁砾砂岩,以全风化和强风化较多,偶尔夹杂中风化,全风化岩层标贯击数在 30~50 击之间,强风化珊瑚礁砾砂岩的标贯值在 50 击/30 cm~50 击/12 cm 之间,成多孔状态,其分布区域较广,礁砾砂岩层埋深的顶高程从-45.3~-5.6 m 不等,其单层厚度在 0.5~15.3 m,开挖出的强风化珊瑚礁砾砂岩孔隙率较高(图 3),珊瑚礁砾砂岩的土工试验以及桩土关系研究对于项目沉桩工作开展至关重要。代表性的 SGC06 孔土层参数见 2 表。



图 3 强风化珊瑚礁砾砂岩样

表 2 SGC06 孔土层参数

土层名称	标贯值/击	层底高程/m	层厚/m
砂性黏土	1	-13.22	2.30
松散粉细砂	7	-15.92	2.70
中密粉细砂	16	-17.02	1.10
黏土	22	-19.72	2.70
硬黏土	35~50/150	-26.82	7.10
强风化珊瑚砾砂岩	50/140~50/100	-38.52	11.70

世界上不同区域的珊瑚礁砾砂岩土工特性各有特性。孟庆山等^[8]分析某珊瑚礁砾砂岩的动态力学性能,认为单轴冲击荷载下礁砾砂岩主要发生沿轴向的张拉破坏;贺迎喜等^[9]探讨红海地区珊瑚礁吹填料的压实效果研究与分析;唐国艺等^[10]总结东南亚礁砾砂岩的工程特性,礁砾砂岩属于典型的软岩,其标贯锤击数不符合正态分布的特点,离散性很大。

达累斯萨拉姆珊瑚礁具有脆性、易碎性,为保持岩样的完整性,通过人工开挖的方式,取出强风化珊瑚礁砾砂岩块,碾碎研磨成砂砾状,通过筛分仪保留颗粒粒径小于 2 mm 的部分,共制备 3 组。将制备好的试样置于剪切盒内,分别选择 50、100 和 200 kPa 的竖向应力作用于剪切盒,并以 0.8 mm/min 的剪切速度进行这 3 组试件的饱和排水剪切试验。试验采用的环剪仪是经对国内外广泛使用 Bishop 环剪仪进行升级改造后而得,能在连续位移条件下进行定界面的大变形剪切,准确评估打桩后的桩-土界面剪切特性,环剪仪的详细构造组成如图 4 所示。

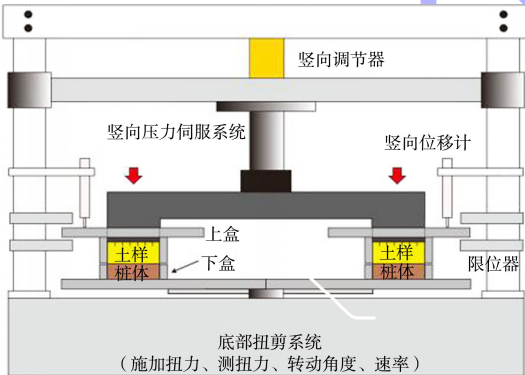
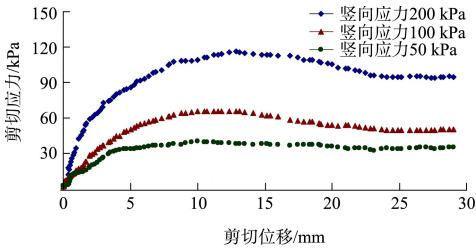
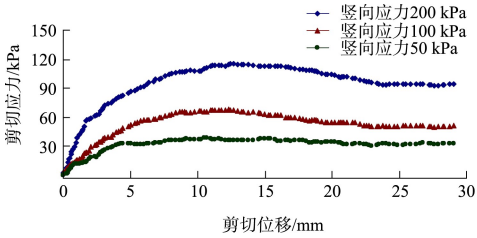


图 4 环剪仪构造

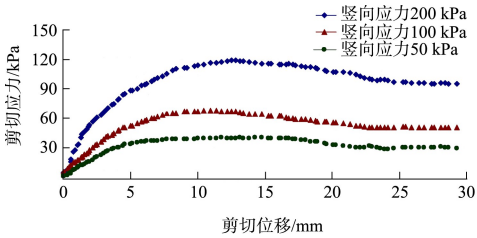
3 组试件分别在 50、100 和 200 kPa 竖向应力作用下的剪切应力-剪切位移曲线如图 5 所示。



a) 第1组



b) 第2组



c) 第3组

图 5 3 组试件剪切应力-位移曲线

从图 5 可知,在 100 和 200 kPa 竖向应力作用下,当剪切位移再增加时,剪切应力却逐渐减小,最后在一个稳定值上波动,这个稳定值即为试件的残余剪切应力。通过比较 3 组试件的剪切应力的峰值与残余值之差可知,在 50 kPa 竖向压力作用下,试件剪切强度下降较少,说明在低压条件下礁砾砂岩碎屑颗粒破碎现象并不明显,而当压力增大时,颗粒破碎现象越来越严重,导致试件剪切特性发生变化。3 组试件剪切应力峰值和残余值见表 3。

表 3 3 组试件环剪试验结果

试件 编号	法向 应力/ kPa	峰值剪 切应力/ kPa	残余剪 切应力/ kPa	PHC 桩-土界面 摩擦角/(°)	
				峰值	残余
1 组	50	39.6	35.0	38.4	35.0
	100	65.0	50.0	33.0	26.6
	200	116.1	95.0	30.1	25.4
2 组	50	41.0	40.2	39.4	31.0
	100	67.9	50.0	34.2	26.6
	200	115.9	95.2	30.1	25.5
3 组	50	43.0	34.8	40.7	34.8
	100	66.7	48.6	33.7	25.9
	200	117.1	94.2	30.3	25.2

PHC 桩-土界面摩擦角 δ_f 由公式(1)计算得到:

$$\tau_f = \sigma_f \tan \delta_f \tag{1}$$

式中: τ_f 为钢-土试件剪切面所受到的剪应力, σ_f 为试验中施加于钢-土剪切面的竖向应力。

由表 3 试验结果可知, 礁砾砂岩碎屑(钙质砂为主) 的 PHC 桩-土界面峰值摩擦角为 $30.1^{\circ}\sim40.7^{\circ}$, 残余摩擦角为 $25.2^{\circ}\sim35.0^{\circ}$ 。根据钙质砂关于界面摩擦特性的已有研究成果, 珊瑚礁砾砂岩所制岩土样在整个剪切过程的剪切特性变化主要是由土颗粒破碎引起的。

2.2 沉桩收锤标准

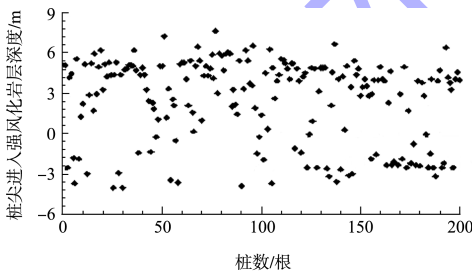
沉桩施工采用永安 YC-30 锤, 锤芯质量为 30 t, 额定打击能力为 $450\text{ kN}\cdot\text{m}$, 终锤锤芯跳高为 0.3 m, 终锤标准采用设计桩尖高程和贯入度双控的标准。

1) 最后 3 阵, 每阵 10 击, 平均贯入度 $\leq 5\text{ mm/击}$, 且达到设计高程, 可以停锤; 如果达到设计高程贯入度仍大于 5 mm/击 , 应继续锤击直至贯入度小于 5 mm/击 (简称终锤标准①)。

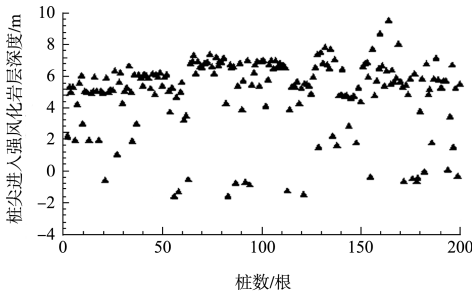
2) 未达到设计高程, 平均贯入度 $\leq 3\text{ mm/击}$ (最后 3 阵, 每阵 10 击), 且桩尖距设计高程 $\leq 1.0\text{ m}$, 可以停锤(简称终锤标准②)。

2.3 珊瑚礁砾砂岩 PHC 桩成桩规律

对于不同桩径基桩持力层进行分析, 其钢桩靴长度均为 1.5 m。 $\phi 800\text{ mm}$ 和 $\phi 1\,000\text{ mm}$ PHC 桩进入强风化珊瑚礁砾砂岩深度见图 6。



a) $\phi 800\text{ mm}$ 桩



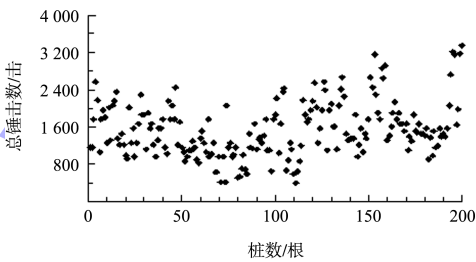
b) $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩

注: 负值为桩尖至强风化珊瑚礁砾砂岩层顶面距离。

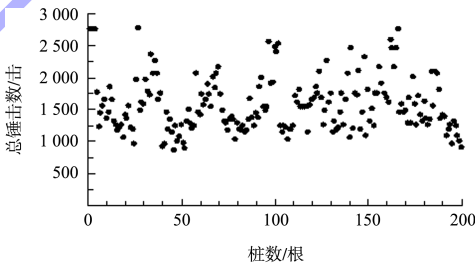
图 6 桩进入强风化珊瑚礁砾砂岩的深度

从图 6 可知, 持力层为强风化珊瑚礁砾砂岩总数分别为 152 和 183 根, 分别占比 76.0% 和 91.5%, 2 种基桩进入强风化珊瑚礁砾砂岩深度均值分别为 2.81 和 4.97 m, 相当于 3.5 倍和 5.0 倍桩径, $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩基进入强风化岩层深度均值为 2.16 m, 其余的基桩持力层均为硬黏土, 其标贯击数大于 35 击。

从图 7 可知, 2 种基桩的总锤击数大部分在 800~2 500 击, $\phi 800\text{ mm}$ 和 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩总锤击数均值分别为 2 308 和 1 569 击, $\phi 800\text{ mm}$ 桩的总锤击数较 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩多 47.1%。



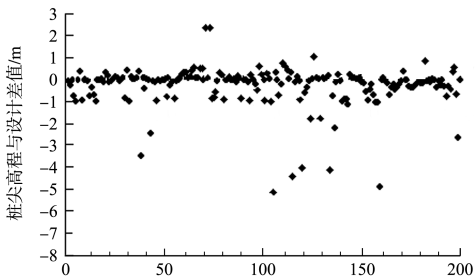
a) $\phi 800\text{ mm}$ 桩



b) $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩

图 7 总锤击数统计

从图 8 可知, $\phi 800\text{ mm}$ 桩实际高程均值比设计高程均值少 0.8 m, 而 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩有 135 根基桩实际桩尖高程比设计高程大, 当桩尖大于设计值时, 继续沉桩至贯入度为 5 mm/击 , 此时桩尖高程比设计值深约 3.5 m。



a) $\phi 800\text{ mm}$ 桩

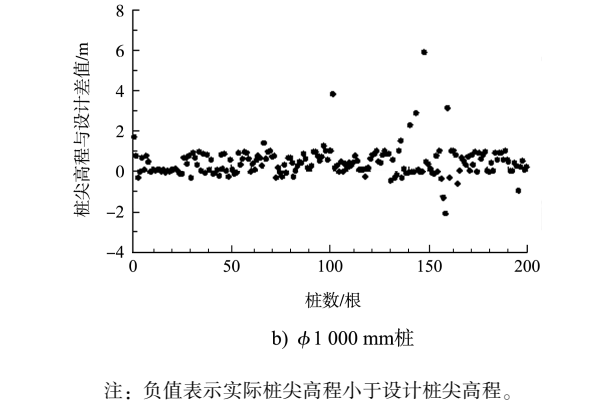


图 8 桩尖高程和设计高程对比

2.4 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩终锤贯入度的优化

从表 4 可知, $\phi 800\text{ mm}$ 桩满足终锤标准①和终锤标准②的基桩分别为 95 根及 106 根, 相差不大, 而 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩采用终锤标准①进行终锤的比例为 93.5%, 且有 135 根基桩桩长比设计值大, 因此对 3 根达到设计桩尖高程而贯入度大于 5 mm/击 的基桩进行高应变检测, 如表 5 所示。

表 4 $\phi 800\text{ mm}$ 和 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩终锤统计				根
沉桩标准	$\phi 800\text{ mm}$ 桩	$\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩		
终锤标准①	95	186		
终锤标准②	106	14		

表 5 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩达到设计高程时参数				
桩号	达到设计高程 时贯入度/ ($\text{mm}\cdot\text{击}^{-1}$)	单桩承载力值/ kN		进入强风化 珊瑚礁砂 岩层深度/ m
		初打	复打	
S1	8.6	9 201.8	11 053.7	4.6
S2	9.7	9 564.4	11 408.3	5.5
S3	9.2	9 115.2	10 869.7	3.8

由表 5 可知, 达到设计桩尖高程时, 其贯入度值在 $8.6\sim 9.7\text{ mm/击}$, 均无法满足 5 mm/击 的收锤标准, 但其复打单桩承载力均满足 10 MN 的要求, 复打高应变检测的端阻力分别为 $6\,947.8$ 、 $6\,869.7$ 及 $6\,551.3\text{ kN}$, 占总承载力的 $60.3\%\sim 62.9\%$ 。其高应变速度和力曲线见图 9。从图 9 可知, 3 根基桩的速度曲线桩底反射区均位于 0 轴以下, 力曲线和速度曲线分离明显, 入岩反应强烈。因此将 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩收锤标准优化如下: 1) 最后 3 阵, 每阵 10 击, 平均贯入度 $\leq 10\text{ mm}$, 且达到设计高程, 可以停锤; 如果达到设计高程贯入度仍大于 10 mm , 应继续

锤击直至贯入度小于 10 mm ; 2) 未达到设计高程, 平均贯入度 $\leq 3\text{ mm}$ (最后 3 阵, 每阵 10 击), 且桩尖距设计高程 $\leq 1.0\text{ m}$, 可以停锤。

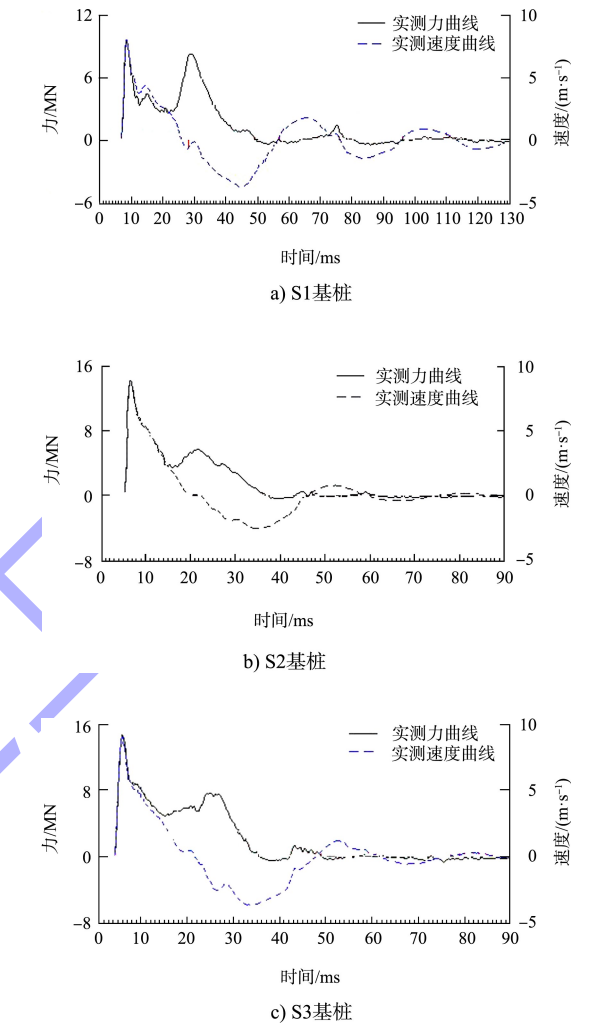


图 9 基桩高应变复打曲线

3 结语

- 1) 礁砾砂岩碎屑的 PHC 桩-土界面峰值摩擦角为 $30.1^{\circ}\sim 40.7^{\circ}$, 残余摩擦角为 $25.2^{\circ}\sim 35.0^{\circ}$ 。
- 2) 坦桑尼亚珊瑚礁砾砂岩地区 PHC 桩宜采用标贯击数大于 35 击的硬黏土或强风化岩作为持力层。
- 3) 坦桑尼亚珊瑚礁砾砂岩地区 $\phi 800\text{ mm}$ 桩比 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩总锤击数多 47.1%, 项目收锤标准情况下, 后者进入强风化岩层深 2.16 m 。
- 4) 坦桑尼亚珊瑚礁砾砂岩地区 PHC 桩沉桩施工中, $\phi 1\,000\text{ mm}$ 桩宜采用高程控制为主, 而贯入度为辅的终锤标准; 而 $\phi 800\text{ mm}$ 桩可采用高程和贯入度双控进行沉桩施工。

参考文献：

[1] 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出版, 2008.

[2] 母金祥, 徐纪超. 小间距大直径 PHC 管桩在排桩式结构码头中的应用[J]. 水运工程, 2015(11): 166-169.

[3] 欧阳小华, 邓会元. 水上大直径 PHC 管桩施工质量影响因素研究[J]. 施工技术, 2017, 46(13): 81-84.

[4] 朱合华, 谢永健, 王怀忠. 上海软土地基超长打入 PHC 桩工程性状研究[J]. 岩土工程学报, 2004(6): 745-749.

[5] 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.

[6] 胡东, 黄松涛. PHC 桩在沉桩过程中出现纵向裂缝的原因分析及相应对策[J]. 水运工程, 2011(5): 141-146.

[7] 张国祥, 王奎元. 马来西亚槟城二桥超长 PHC 桩沉桩施工技术[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(2): 61-64.

[8] 孟庆山, 范超, 曾卫星, 等. 南沙群岛珊瑚礁灰岩的动态力学性能试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 183-190.

[9] 贺迎喜, 王伟智, 邱青长, 等. 红海地区珊瑚礁吹填料的压实效果研究与分析[J]. 水运工程, 2010(10): 82-87, 92.

[10] 唐国艺, 郑建国. 东南亚礁灰岩的工程特性[J]. 工程勘察, 2015, 43(6): 6-10.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

长江干线货物通过量突破 30 亿 t

2020 年，面对新冠肺炎疫情、百年一遇大洪水等多重考验，交通运输部长江航务管理局（简称长航局）带领长江航运全行业克难攻坚、艰苦奋斗，长江航运生产逆市上扬，实现货物通过量 30.6 亿 t，同比增幅超过 4.4%，再创历史新高。

2020 年，长江航运供给能力进一步提升。长江口南槽一期工程交工试运行，长江口在现有 12.5 m 深水主航道的基础上，再添一条长 86 km、水深 6 m 的优质辅助航道。武汉至安庆段 6 m 水深航道整治工程主体即将完工，6 m 水深通达武汉指日可待。福姜沙中水道等 4 个河段的航道维护尺度得到提高，长江电子航道图实现与汉江、赣江的互联互通，长江干线航道维护水深达标率 100%，航标正常率 100%。

2020 年，长航局还持续推进绿色航运发展，助力长江生态保护发生转折性变化。长江干线船舶水污染物联合监管与服务信息系统建成运行，并在长江经济带所有港口全面推广，形成了数字监管、线上服务和多部门共建共治共享的新格局；长江干线港口船舶水污染物接收设施实现了全覆盖，长江干线 8 处水上综合服务区、12 个水上洗舱站、30 余座污染物转岸码头基本建成；生态航道建设全面展开，疏浚土综合利用规模持续扩大，荆州、鄂州、九江等地试点取得积极成效；三峡坝区客运码头、三峡旅游客船的岸电设施完成建设改造，船舶使用岸电纳入三峡过闸诚信考核；纯电动、LNG 动力等一批新能源船型研发投用。

此外，长航局严格执行客船、液货危险品船运输市场宏观调控政策，深入推进船型标准化，长江干线货船平均吨位由去年的 1 880 t 提升至 1 960 t，其中三峡过闸船舶平均吨位达 4 680 t，长江航运运输结构不断优化。