



后注浆技术在港口工程中的应用及 桩基承载力研究

戈浩波, 龙俞辰, 邓涛

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 后注浆技术在国内土建领域应用广泛,但在港口工程尤其是海外港口工程中少有应用先例,对后注浆的适应条件和技术参数也缺乏经验参考。结合西非某码头工程,介绍泻湖水域复杂地质条件下的灌注桩后注浆技术的施工工艺和技术参数,探讨后注浆的适应条件和加固效果。结合静载试验,对注浆前后的桩侧、桩端承载力进行研究,并与理论计算值进行对比。结果表明,采用后注浆技术可有效提高桩基承载力但具有一定的适应条件,可为类似港口工程的桩基设计提供参考。

关键词: 后注浆; 灌注桩; 桩基承载力; 静载试验

中图分类号: U656.1; U655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0270-06

Application of post-grouting in port project and research on bearing capacity of pile foundation

GE Haobo, LONG Yuchen, DENG Tao

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Post-grouting technology is widely used in the domestic civil engineering field, but there are few precedents in port, especially overseas port projects. There is also a lack of experience and reference for the adaptation conditions and technical parameters of post-grouting. Combining with a wharf project in West Africa, we introduce the construction process and technical parameters of post-grouting technology for cast-in-place piles under complex geological conditions in lagoon waters, and discuss adaptive conditions and consolidation effect of post-grouting. Combining with static load tests, we study the bearing capacity of the pile side and pile end before and after grouting, and compare test values with theoretical calculation values. The results show that the use of post-grouting technology can effectively improve the bearing capacity of pile foundation, but it has certain adaptability conditions, which can provide references for pile foundation design in similar port projects.

Keywords: post-grouting; cast-in-situ pile; bearing capacity of pile foundation; static load test

后注浆技术是一种通过加压注浆强化桩端和桩侧土体,从而提高灌注桩承载力的地基加固技术^[1],在陆上的土建领域已有很多的应用成果,但在港口工程尤其是海外港口工程中少有应用先例,在泻湖复杂地质条件下的适用条件、工艺参数、加固效果也没有经验可供参考。

本文针对此问题,结合西非某泻湖水域复杂地质条件下码头工程,介绍后注浆技术的施工工艺,探讨后注浆的技术参数、适应条件和加固效果。结合现场静载试验,对注浆前后的桩侧、桩端承载力及沉降进行研究,与理论计算值对比分析,并总结特殊地质条件下后注浆灌注桩

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 戈浩波(1993—),男,硕士,工程师,从事港口海工结构设计。

的设计要点, 对类似港口工程的后注浆技术应用具有较好的指导意义。

1 工程概况

西非某集装箱码头工程采用灌注桩作为岸桥后轨道梁的支撑, 本文选取其中一段轨道梁进行分析。该段轨道梁长度 750 m, 分 5 个结构段, 每个结构段长 150 m。基础为钻孔灌注桩, 采用 C40 混凝土, 桩基直径 1 m、桩间距 5 m, 本工程采用欧标进行设计。此灌注桩为竖向抗压控制, 单桩压桩力标准值为 5.3 MN。轨道梁端部为沉箱码头

折角区域, 该区域有大量的抛石棱体, 有 6 根灌注桩穿过该部分抛石棱体。

本工程位于泻湖水域, 地质情况复杂, 各钻孔之间差异明显, 另外表层回填有厚 20 m 左右的中粗砂层。深度方向上, 砂、粉砂、黏土交错出现, 随着深度增加反而时有出现标贯击数较低的软土、砂层, 规律难寻, 部分区域深层仍然存在软弱夹层。沿着后轨道梁长度方向也无普遍规律可寻, 相邻钻孔之间也有明显差别, 土层不连续, 对于土质分层和土参推导都有一定难度。选取其中 4 个相邻钻孔 BH01~04, 地质剖面见图 1。

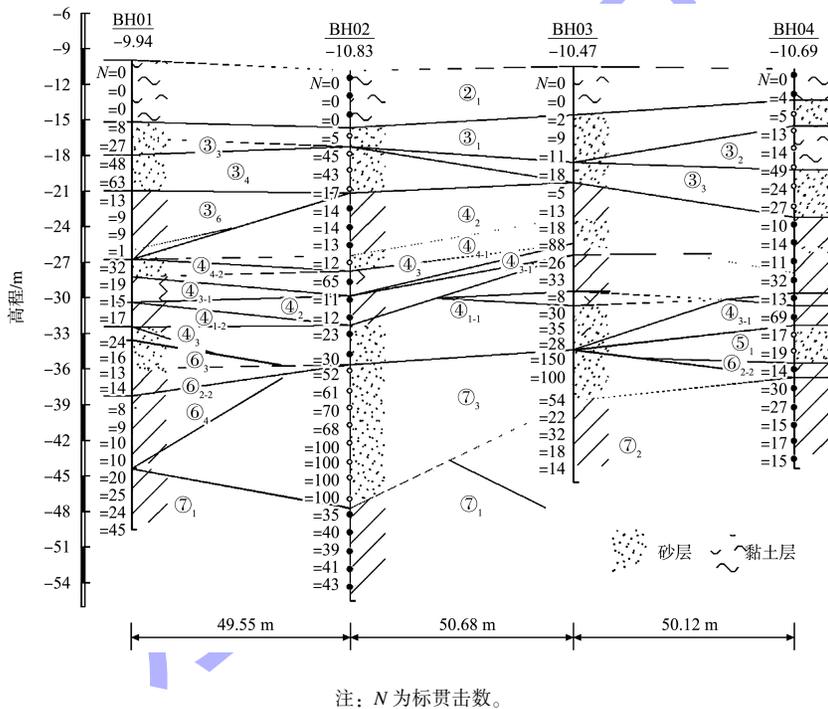


图 1 部分钻孔剖面

由图 1 可以看出, 地层在深度方向软硬相间, 在平面方向强弱混杂, 部分区域深层夹杂软弱夹层。初步评估, 若采用常规灌注桩方案桩端需要在 -42 m 以下, 但是难以选取连续出现的坚硬土层作为灌注桩持力层, 比如 BH01 孔 -42 m 处为 ⑥₄ 黏土层, 标贯击数仅 10 击左右, 而相邻钻孔并未出现此层。BH02 孔 -47 ~ -35 m 为密实砂层, 可以作为有效持力层。而 BH03、BH04 孔又不同, 黏土与砂交错出现, 标贯击数沿着深度方向大小变化不一, 缺少规律性, 且 -40 m 以下为 ⑦₂ 黏土层, 随着深度增加标贯击数反而有降低的趋势, 而

且终孔高程不足, 无法判断终孔高程以下的土质。

2 桩基方案分析

2.1 灌注桩桩基承载力计算

本文基于欧洲标准采用文献[2]中公式计算灌注桩桩基承载力标准值, 方法如下。

黏土层桩基侧阻的计算公式为:

$$R_s = F \sum A_s \alpha_p C_u \quad (1)$$

式中: R_s 为桩基侧阻, kN; F 为长度因子, 和土层深度与桩径之比有关; A_s 为桩侧面积, m^2 ; C_u 为

黏土的不排水抗剪强度,MPa; α_p 为峰值黏滞系数,按文献[2]推荐取值,和黏聚力与上覆应力之比有关。

黏土层桩基端阻的计算公式为:

$$R_b = A_b N_c C_u \quad (2)$$

式中: R_b 为桩基端阻,kN; N_c 为承载力系数,一般取 9; A_b 为桩端面积, m^2 。

砂土层桩基侧阻的计算公式为:

$$R_s = \sum A_s K_s \sigma'_{v0} \tan \delta_f \quad (3)$$

式中: K_s 为水平土压力系数; σ'_{v0} 为上覆土自重应力,MPa; δ_f 为桩土间摩擦角, ($^\circ$)。

砂土层桩基端阻的计算公式为:

$$R_b = A_b N_q \sigma_{v0} \quad (4)$$

式中: N_q 为承载力系数,与深度和桩端土层内摩擦角有关; A_b 为桩端面积, m^2 ; σ_{v0} 为上覆土自重应力,MPa。

桩基总承载力为桩端阻力与桩侧阻力之和。使用以上方法计算的桩基承载力结果见表 1。

表 1 桩基承载力计算结果

钻孔	桩底高程/m	桩基侧阻力标准值/MN	桩基端阻力标准值/MN	桩基承载力标准值/MN
BH01	-52	9.042	1.735	10.777
BH02	-40	6.240	5.105	11.345
BH03	-48	9.582	1.200	10.782
BH04	-48	9.630	1.200	10.730

若采用常规灌注桩,除了桩较长导致工程量较大外,还可能存在 3 个问题: 1) 桩端不在同一水平面上,这不利于群桩基础的整体性,易产生不均匀沉降,引起轨道梁、钢轨附加应力^[3]。2) 由于钻孔之间差别较大,桩端土层不连续,钻孔之间过渡区域的桩长如何衔接也难以确定。若过渡区域均采用较长的桩将导致过于保守,若采用线性过渡也可能导致桩端落在某软土层之上。3) 桩普遍较长,最长的桩近 60 m,桩端黏土强度不够,易出现桩底沉渣、塌孔或扩孔的现象,削弱桩端阻力。

因此,拟对部分桩采用后注浆技术提高桩基承载力,缩短桩长,但须尤其注意桩端下的地质

分布情况。

2.2 后注浆原理

后注浆技术包括桩侧注浆和桩端注浆。桩端后注浆通过改善沉渣和桩端土的性质,增加土体强度从而提高桩端阻力。另一方面,水泥浆和桩端持力层一定范围内的原状土固结后形成一个扩大头,起到扩底的作用,见图 2。桩侧注浆时,高压后注浆液劈裂了桩身混凝土和桩侧土的交界面,水泥浆压入地基土的缝隙中向低压区扩散。水泥浆凝固后,形成许多齿状的水泥浆脉,使桩身与周围的土嵌固在一起,形成咬合作用,提高桩侧承载力。

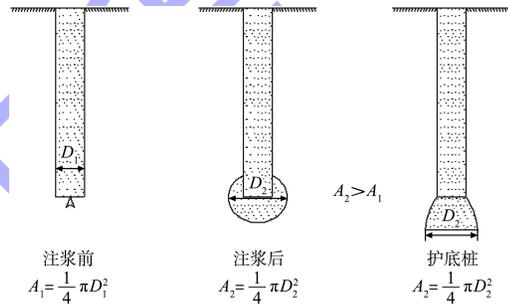


图 2 后注浆灌注桩的扩底作用

2.3 后注浆工艺及参数确定

本工程采用桩底桩侧联合注浆,根据地质条件,设置桩端、桩侧各 2 道注浆阀,桩侧注浆阀分别位于桩顶下 10 和 20 m 左右处。施工步骤为:制作钢筋笼及注浆管→钻进成孔→注入泥浆→清孔→吊放钢筋笼安装阀门→下放导管→安放球胆测导管埋深→水下混凝土灌注→成桩 2 d 后压浆。

主要注浆参数为: 1) 注浆顺序。首先自上而下依次进行桩侧后注浆,桩侧注浆后进行桩端注浆的间隔时间为 2 h 以上。2) 水泥浆水灰比。由土的饱和度、渗透性确定,饱和土水灰比宜为 0.45~0.65;非饱和土水灰比宜为 0.7~0.9。根据此码头工程的地质条件,按 0.5~0.6 控制,对于饱和黏土且无直接排水通道宜取小值。水泥浆的搅拌时间不小于 5 min。3) 注浆终止的控制指标。采用注浆压力和注浆量双控,桩侧注浆终止压力为 1.0~2.0 MPa,桩端注浆终止压力为 1.2~4.0 MPa。4) 注浆量。单桩注浆量不小于 4.5 t。

注浆过程中应根据注浆压力、注浆量、地面冒浆等情况, 对水泥浆水灰比、注浆流量、注浆顺序等参数进行实时调整。

3 桩基承载力研究

3.1 桩基承载力计算对比

本工程采用欧标设计, 但欧标对后注浆灌注桩的桩基承载力计算没有相关规定, 而 JST 167—2018《码头结构设计规范》^[4](简称“国标”)针对后注浆的侧阻增强系数和端阻增强系数有指定范围。国标与欧标的桩基承载力的计算方法和参数取值有一定区别^[5], 若采用国标计算桩基承载力难以与欧标结果匹配。因此, 桩基承载力计算方法仍采用欧标方法, 但后注浆的侧阻、端阻增强系数参照国标范围取下限, 并最终通过静载试桩验证。国标给出的桩侧及桩端后注浆增强系数见表 2。此处以 BH03 孔为例, 对比同样桩底高程下, 注浆前后的桩基承载力标准值计算结果见表 3。可以看出, 通过后注浆可以显著提高桩基承载力, 桩底高程提高至 -31 m, 此时持力层为 ⑦₃ 砂层, 砂层的桩端阻力本来就较强, 通过后注浆加固后, 桩端阻力明显增强, 因此可有效降低桩基长度; 后注浆侧阻、端阻、承载力增强系数分别为 1.59、1.80、1.71。

表 2 后注浆侧阻及端阻增强系数

土层名称	侧阻增强系数 β_{si}	端阻增强系数 β_p
黏性土、粉土	1.3~1.4	1.5~1.8
粉砂	1.5~1.6	1.8~2.0
细砂	1.5~1.7	1.8~2.1
中砂	1.6~1.8	2.0~2.3
粗砂	1.5~1.8	2.2~2.4
砾砂	1.6~2.0	2.2~2.4

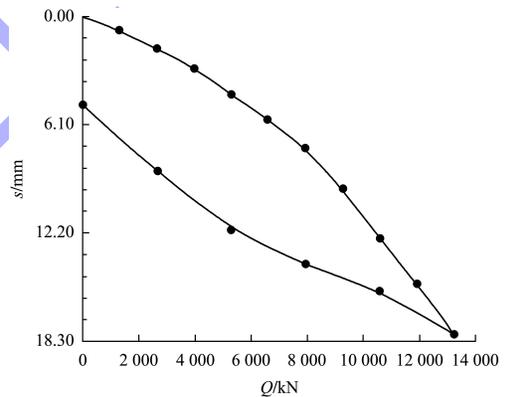
表 3 注浆前后桩基承载力结果对比

类别	桩底高程/m	桩基侧阻力标准值/MN	桩基端阻力标准值/MN	桩基承载力标准值/MN
常规灌注桩	-31	2.827	3.828	6.655
后注浆灌注桩	-31	4.495	6.891	11.386

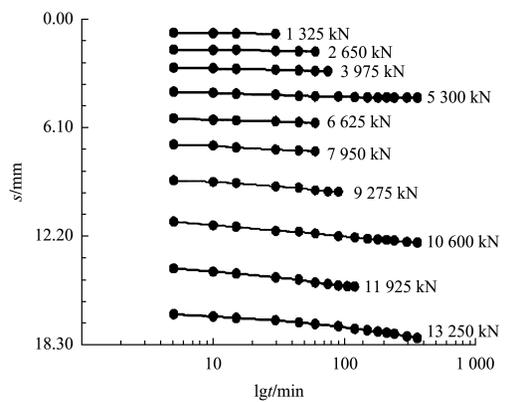
3.2 静载试验

本工程共进行 4 根试桩, 其中后注浆灌注桩、常规灌注桩各 2 根, 其中 1 根后注浆试桩距离

BH03 较近, 故以此试桩分析后注浆灌注桩的桩基承载力。此静载试验的桩径、桩距与后注浆设计桩一样。试验荷载按 2.5 倍压桩力标准值, 采用单循环加载、慢速维持荷载方式, 每次加载 1 325 kN, 直到试桩荷载-沉降($Q-s$)曲线出现陡降或达到最大试验荷载。静载试验的 $Q-s$ 曲线见图 3a), 桩顶沉降随时间变化的 $s-lgt$ 曲线见图 3b)。静载桩基极限承载力按如下原则取值: 1) $Q-s$ 曲线出现明显的陡降时, 取陡降起点对应的荷载作为抗压承载力。2) 也可根据 $s-lgt$ 曲线斜率明显变化的前一级荷载作为抗压承载力。3) 若 $Q-s$ 曲线没有明显的陡降拐点, 按照 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[6]可取桩顶沉降达到 40 mm 对应的荷载作为抗压承载力近似值; 本工程业主要求试桩最大沉降为 20 mm, 因此选用 20 mm 对应的荷载。



a) $Q-s$ 曲线



b) $s-lgt$ 曲线

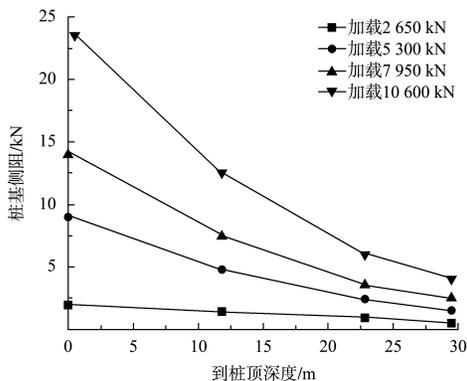
图 3 静载试验曲线

根据图 3 可知, $Q-s$ 曲线并未出现明显拐点, $s-lgt$ 曲线斜率未出现明显变化, 桩身沉降也未达

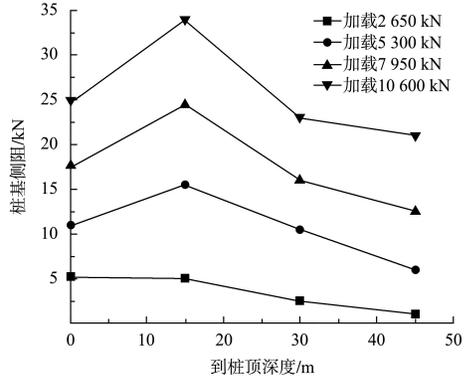
20 mm，因此桩基承载力大于最大试桩荷载 13.250 MN，也大于依据国标推荐的后注浆增强系数下限计算的桩基承载力 11.386 MN。

由图 3a) 可看出，后注浆灌注桩卸载后桩顶的残余沉降为 5.82 mm，回弹率为 68.2%，另外 2 根常规灌注桩的回弹率仅为 35.5% 和 42.2%。这说明后注浆后桩周土体变为水泥土，强度增强，试桩时土体变形多为弹性变形，桩基承载力还有一定的安全富余。而普通灌注桩的试桩后回弹率为 35% 左右，说明已产生很多的塑性变形，桩基承载力快达到临界值。

沿着桩身设置了 4 道应变计，分别在接近桩头、桩端和桩身 2 个三等分点附近，通过桩基应变可以计算出桩基的侧阻分布。该后注浆试桩和普通试桩的桩基侧阻沿桩长分布见图 4。桩顶荷载沿桩径、桩长方向扩散与桩侧土的性质相关，桩侧上层土越硬(土的模量越高)，则桩顶荷载更多地通过桩侧扩散于大范围的浅层土体，相应地，桩端则分担较少部分的桩顶荷载。因此，后注浆灌注桩的桩侧阻力更多集中在桩身上半部分，而普通灌注桩的则没有此趋势。另外，本工程表层 20 m 为回填中粗砂，下方为典型的泻湖地质，由图 4a) 可看出上层中粗砂土的桩侧承载力提高明显，注浆效果较好，使荷载更多分担在浅层土体，从而减小土体差异性的不利作用。



a) 后注浆灌注桩基



b) 常规灌注桩基

图 4 后注浆灌注桩和常规灌注桩基侧阻延伸度分布

3.3 软弱下卧层分析

JST 167—2018《码头结构设计规范》规定，当桩端以下 4 倍桩径范围内存在软弱土层时，应考虑冲剪破坏的可能性，JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》给出的桩端下卧软弱层的承载力计算公式为：

$$\sigma_z + \rho_m g z \leq f_{az} \tag{5}$$

式中： σ_z 为作用在软弱下卧层顶面的附加应力, MPa; ρ_m 为密度, t/m^3 ; z 为深度, m; f_{az} 为下卧软弱层顶经深度修正后的地基承载力特征值, MPa。

以钻孔 BH01 为例，若采用后注浆灌注桩方案，桩底高程为 -33 m，以⑥₃ 砂层为持力层，而 -36 m 以下为⑥_{2,2} 及⑥₄ 软土层，标贯击数为 10 击左右，有剪切破坏的风险。考虑后轨道梁为单排桩，不同于常规的建筑桩基础，故按单桩计算下卧层的承载力。经过计算，工作荷载下，⑥_{2,2} 层附加应力及自重应力之和为 625 kPa，接近地基承载力深度修正值 680 kPa。

使用有限元软件对该钻孔进行沉降分析，分别建立后注浆灌注桩方案和传统灌注桩方案模型，其中后注浆方案不穿过⑥_{2,2} 及⑥₄ 软土层，桩底高程为 -33 m，传统灌注桩方案穿过⑥_{2,2} 及⑥₄ 层，以⑦₁ 层硬黏土为持力层，桩底高程为 -52 m，沉降计算结果见表 4。可以看出，若不穿过软土层，桩端的附加应力将引起底下软弱层的变形从而导致更大的桩基沉降，达到 30 mm，超过业主允许

的 20 mm 限值。因此,此类地质条件下应充分分析桩底软弱下卧层的承载力及沉降,进行综合评估,以判断桩基方案。最终本工程 BH01 钻孔附近桩基仍采用穿过软弱土层的长桩基方案。

表 4 常规灌注桩与后注浆灌注桩沉降计算结果对比

类别	桩顶沉降/mm	桩底沉降/mm
常规灌注桩	18	10
后注浆灌注桩	30	23

3.4 后注浆方案适用性分析

经过以上分析,在此泻湖区域的复杂地质条件下,后注浆技术具有一定的适用性,可有效加固桩周土体,使桩基和水泥土共同作用。通过后注浆技术,可把桩底高程抬高到某一密实砂层,充分利用砂层端阻大、后注浆效果好的特点,可明显增强桩基承载力。此外,对于地质变化剧烈的情况下,可以通过采用后注浆,使得桩周土体同步加固,减少不同钻孔、不同土层之间的土质差异性,进而使桩底高程在同一水平面上,减小不均匀沉降,增强整体性。

但对于一些特殊情况,后注浆灌注桩的适用条件需要进一步分析,比如:1) 桩底 4 倍桩径范围内存在软土的情况下,需要综合评估。除了需要分析软弱下卧层的冲切破坏风险外,还需要考虑此软弱层在附加应力下是否会产生较大沉降。如果冲切承载力不满足,或者软弱下卧层会产生较大的沉降,即便通过后注浆技术使得桩基承载力满足要求,也需要增加桩长穿过此软弱层。2) 对于重力式码头,转角区域经常出现大范围抛石棱体,由于后注浆施工对该棱石间空隙填充加固效果目前尚不能确定,且注浆量与注浆辐射范围难以控制,故抛石区域内不建议采用后注浆技术进行加固。

4 结论

1) 后注浆技术适用于泻湖水域复杂地质条件,通过调整合理的后注浆布置和技术参数,可有效提高桩侧、桩端摩阻,减小桩长。通过后注

浆技术,此工程后注浆灌注桩平均抗压承载力为普通灌注桩的 1.7 倍,平均桩长减少 14 m。后注浆灌注桩试桩的荷载-沉降曲线未出现明显陡降,且沉降回弹率超过 68%,说明桩周土体强度增强,试桩时土体变形多为弹性变形,利于桩基承载力发挥。

2) 本工程表层有厚 20 m 的中粗砂回填层,下方为典型的泻湖地质,变化剧烈,难以找到良好的连续持力层。后注浆技术在中粗砂的桩侧加固效果较好,使用荷载更多分担在浅层土体从而减小土体差异性的不利作用,起到均匀化地基的作用,也减小了轨道梁桩基的不均匀沉降,提高整体性,对类似条件下的后注浆技术应用有较好的指导意义。

3) 后注浆技术在港口领域还需要考虑一些特殊性。在重力式码头后方抛石棱体区域,因为棱体间空隙较大,注浆压力和注浆量难以确定,不适合后注浆技术。另外,当泻湖区地质沉积复杂时,通过后注浆技术抬高桩底高程同时应关注桩端以下是否有软弱下卧层,需要进行下卧层承载力及沉降分析。

参考文献:

- [1] 张忠苗,吴世明,包风. 钻孔灌注桩桩底后注浆机理与应用研究[J]. 岩土工程学报, 1999(6): 681-686.
- [2] TOMLINSON M J, WOODWARD J. Pile design and construction practice [M]. 6th ed. London: Taylor & Francis Group, 2015.
- [3] 邓涛,戈浩波,陈章楷. 桩基支撑轨道梁结构设计影响因素分析[J]. 水运工程, 2022(8): 161-166, 200.
- [4] 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: JST 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [5] 陈凯,曹虎麒,胡振明. 中外规范桩基承载力计算对比[J]. 水运工程, 2020(5): 229-234.
- [6] 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.

(本文编辑 王璁)