

珊瑚礁地层大直径打入式钢管桩承载力计算 及其时间效应

张衍林¹, 马小秋²

(1. 重庆水利电力职业技术学院 水利工程学院, 重庆 402160; 2. 吉林建筑大学 基础科学部, 吉林 长春 130000)

摘要: 某大桥是国家“一带一路”标志性项目, 其桩基础置于弱胶结、多孔隙及高脆性的珊瑚礁灰岩中, 传统的桩基设计与承载力评估标准并不适用, 急需展开研究。开展了大量打入式钢管桩高应变测试, 并将测试结果与规范计算结果进行了对比分析, 结果表明: (1) 钢管桩在打入过程中, 其侧壁的礁灰岩结构遭到破坏, 产生剪缩与软化现象, 无法提供有效的嵌固力, 只能以摩擦的方式提供较低的摩阻力, 导致钢管桩承载力实测值均远小于规范计算值; (2) 珊瑚礁具有结构性, 无法产生剪胀效应并持续提供侧摩阻力的增长, 致使钢管桩承载力的时间效应不明显, 承载力只增长了 16%; (3) 提出了适用于珊瑚礁地层嵌岩钢管桩的承载力计算方法, 建议选择强度相对较高的礁灰岩作为持力层, 以桩端受力为主, 避免盲目加大桩长或桩径。

关键词: 珊瑚礁; 钢管桩; 端阻力; 侧阻力; 时间效应

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)05-0725-05

Calculation and time effect of bearing capacity of large diameter driven steel pipe pile in coral reef

ZHANG Yanlin¹, MA Xiaoqiu²

(1. School of Hydraulic Engineering, ChongQing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China; 2. Department of Basic Science, Jilin Jianzhu University, Changchun 130000, China)

Abstract: The bridge is a landmark project of “one belt and one road” in the country. Its pile foundation is located in the coral reef limestone with weak cementation, porosity and high brittleness. The traditional pile foundation design method and the bearing capacity evaluation standard are not applicable, so there is an urgent need for research. A large number of high strain tests of driven steel pipe piles were carried out, and the test results were comparative analyzed with the calculated results of the code. In-situ static load tests of cast-in-place bored piles were carried out, which were verified by the mechanical tests and numerical simulation methods of coral reef limestone and pile foundation interface. Results show that: (1) During the driving process, the reef limestone structure of the side wall of the steel pipe pile to be damaged, resulting in the phenomenon of shear shrinkage and softening, which can't provide an effective embedment force, so it can only provide a lower friction resistance in the way of friction, resulting in the measured value of the bearing capacity of the steel pipe pile is far less than the calculated value in the code; (2) The coral reef is structural, which can't produce the shear expansion effect and continue to provide the increase of side friction resistance, so that the time effect of the bearing capacity of steel pipe pile is not obvious, and the bearing capacity only increased by 16%; (3) The bearing capacity calculation method for rock socketed steel pipe pile in coral reef is put forward. It is suggested that reef limestone with relatively high strength should be selected as the bearing layer, and the stress at the pile end should be taken as the main force to avoid blindly increasing the pile length or pile diameter.

Key words: coral reef; steel pipe pile; end resistance; side resistance; time effect

珊瑚礁主要分布于南纬 30°至北纬 30°之间的温热带海洋中^[1-2] (如图 1)。跨海大桥临时栈桥、海上石油与天然气平台等最常见的基础解决方案是用液压冲击锤将开口端钢管桩打入海床指定深度^[3-4]。在礁灰岩地层中, 打桩锤产生的冲击能量

会导致桩侧颗粒破碎和胶结体破坏, 破碎的颗粒进而被挤入礁灰岩裂隙与孔隙中, 使岩体体积收缩, 产生“剪缩”现象^[5-6]。工程实践证明, 从其他地基材料的桩基工程中获取的传统经验无法适用于礁灰岩地层^[7-10], 目前室内模型试验也仅在桩的

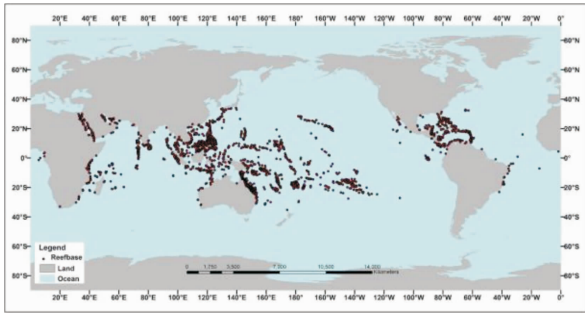


图 1 珊瑚礁分布图

Fig. 1 Distribution of coral reefs

承载力及变形特性等方面展开了研究^[11]。钢管桩在打入过程中, 颗粒破碎引起的体积收缩效应和

弱胶结体破坏引起的应变软化效应远比挤密作用严重, 导致桩周围的侧向土刚度降低, 侧阻力减小^[12-13]。鉴于此, 本文开展了大量打入式钢管桩试验, 并对其进行了高应变测试。将测试结果与规范计算结果进行了对比分析, 研究了钢管桩承载力的时间效应, 提出了适用于礁灰岩地层嵌岩钢管桩的承载力计算方法。

1 工程背景与地层特点

大桥项目位于马尔代夫北马累环礁(North Malé Atoll), 依据钻孔取样和室内物理力学试验得到的岩性特征及场地分层详见表 1。

表 1 各岩土层设计参数建议值

Tab. 1 Suggested values of design parameters for each rock and soil layer

| 地层编号及名称 | 标贯 击数 | 动探 击数 | 饱和密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 点荷载 强度指数/MPa | 单轴抗压 强度/MPa | 地基承载力 基本允许值/kPa | 侧摩阻力 标准值/kPa |
|---------------|----------|----------|---|-----------------|----------------|--------------------|-----------------|
| (1)填土 | | 7/4 | | | | 120~180 | 15~25 |
| (2)礁块石 | | | | | | | |
| (3)砾砂混砾块 | 21/13 | 12/3 | | | | 150~200 | 45~50 |
| (4-1)礁灰岩(中) | 76/1 | 69/2 | 2.21 | 3.45 | 10.73 | 450~500 | 100~120 |
| (4-2)礁灰岩(弱) | 25/4 | 26/3 | | 2.87 | | 350 | 80 |
| (4-3)礁灰岩(弱) | | | 2.31 | 2.8 | 10.1 | 300 | 70 |
| (5-1)a 礁灰岩(强) | | | 2.4 | 2.33 | 10.02 | 800 | 220~240 |
| (5-1)b 礁灰岩(中) | | | 2.22 | 2.47 | 7.5 | 550 | 150~180 |
| (5-1)c 礁灰岩(弱) | | | 2.29 | 1.91 | 5.93 | 400~450 | 80~120 |
| (5-2)a 砾砂混砾块 | 22/3 | | | | | 150~220 | 40~55 |
| (5-2)b 砾砂混砾块 | 37/2 | | | | | 230~250 | 58~65 |
| (5-3)礁灰岩 | 60/1 | 20/5 | 2.34 | 4.97 | 9.44 | 400~500 | 90~140 |
| (6-1)礁灰岩(强) | | | 2.26 | 3.26 | 10.55 | 650~700 | 180~200 |
| (6-2)礁灰岩(中) | | 31/2 | 2.25 | 2.83 | 8.42 | 450~550 | 110~170 |
| (6-3)礁灰岩(弱) | | 32/3 | 2.23 | 2.73 | 5.53 | 350~400 | 90~120 |
| (7-1)角砾混砾块 | 53/7 | | 2.2 | 2.4 | 5.18 | 400 | 90~100 |
| (7-2)礁灰岩 | | | 2.12 | 2.59 | 10.35 | 450~500 | 120~150 |

2 钢管桩竖向承载力计算方法

大桥主桥 19#~23#墩采用变截面钢管复合桩基础, 其中 19#、23#主墩钢管桩直径 3.2 m, 20#~22#主墩钢管桩直径 3.6 m; 护筒壁厚均为 32 mm, 距顶端 1 m、底端 3 m 范围内加厚至 50 mm, 护筒长度 57~73 m 不等, 材质选用 Q345; 采用 Menck MHU 550S/800S 液压冲击锤进行钢管桩施沉, 入土深度要求进入礁灰岩 9 m 以上,

且满足特定的设计承载力。桥梁平面示意图如图 2 所示, 桥墩桩基承台尺寸如图 3 所示。

根据现有的《公路桥涵地基基础设计规范》, 支撑在基岩上或嵌入基岩内的沉桩的单桩轴向受压承载力容许值由 3 个部分组成: 分别为嵌岩桩端阻力、嵌岩段侧阻力、非嵌岩段侧阻力。

$$[R_a] = c_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + \frac{1}{2} \zeta_s u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik} \quad (1)$$

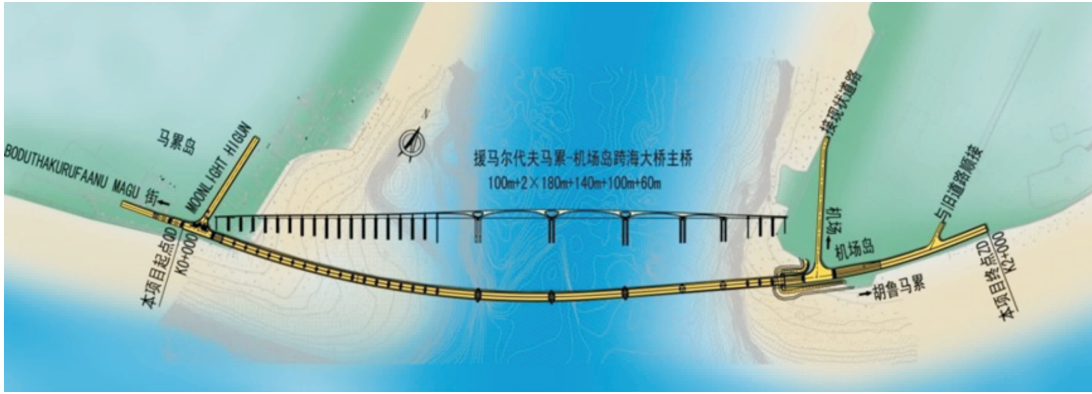


图 2 桥梁平面示意图

Fig. 2 Plane of the bridge

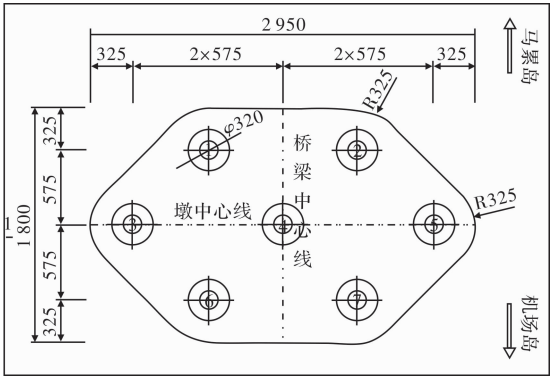


图 3 桥墩桩基承台尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Pile cap dimensions of piers (unit: mm)

式中: $[R_a]$ 为容许承载力; c_1 、 c_2 为修正系数, 取决于岩体破碎程度; A_p 为端面积; f_{rk} 为岩石单轴抗压强度; u 为桩周长; h 为嵌岩深度; ζ_s 侧阻力修正系数; l 为土层厚度; q_{ik} 为土层侧摩阻力标准值。

嵌岩桩端阻力和嵌岩段侧阻力计算指标均为岩石的饱和单轴抗压强度标准值 (f_{rk}), 非嵌岩段侧阻力计算指标则采用的是极限侧摩阻力标准值 (q_{ik})。

某大桥桩基工程中, 礁灰岩中的钢管桩属于嵌岩桩, 根据钢管桩的尺寸、打入深度, 参考最近的钻孔柱状图及珊瑚礁力学参数(表 1), 按照公式(1)计算得到钢管桩承载力容许值, 并将计算结果与高应变检测结果绘制于图 4 中。结果表明, 不同桩号钢管桩承载力实测值变化范围较小, 平均值为 12 852 kN。承载力规范计算值变化范围较大, 平均值为 51 733 kN, 最大值为 137 737 kN, 最小值为 17 214 kN, 均大于实测值, 且局部差异悬殊。

为此, 将钢管桩高应变检测结果中的端阻力和侧阻力单独列出来, 研究二者所占总承载力的比例(如图 5 所示), 可知端阻力占比 72.4%, 侧

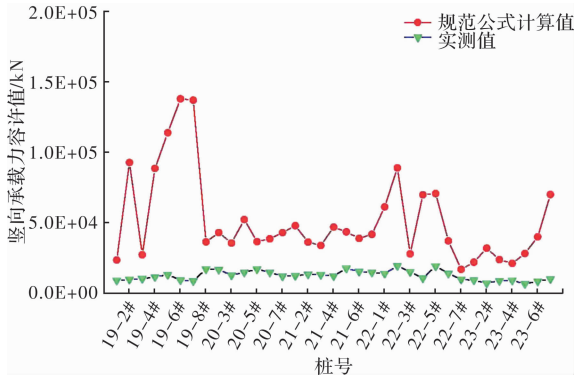


图 4 竖向承载力对比

Fig. 4 Comparison of vertical bearing capacity

阻力占比 27.6%。尽管钢管桩直径、贯入深度很大, 其侧阻力却不到总承载力的 1/3。反观钢管桩承载力规范计算结果, 发现侧阻力占比很大, 甚至出现侧阻力大于端阻力的情况。究其原因, 发现利用岩石单轴抗压强度计算嵌岩段侧阻力是导致计算结果偏大的主要原因。钢管桩嵌岩深度的不同, 导致其承载力出现大巨大变化。

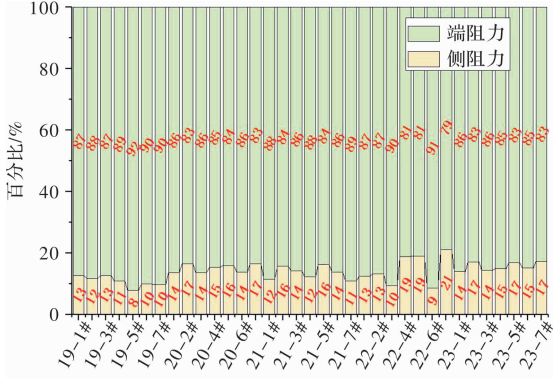


图 5 实测端阻力与侧阻力分摊比

Fig. 5 Distribution ratio of measured end resistance to side resistance

珊瑚礁灰岩是一种孔隙大、结构性强及脆性大的特殊性岩体, 钢管桩在打入过程中, 礁灰岩

胶结体结构遭到破坏, 钢管桩侧壁的胶结颗粒破碎、脱落, 脱落的颗粒被挤入空隙中, 产生剪缩与软化现象, 地表下沉(如图6所示), 导致侧壁无法提供有效的嵌固力, 只能以摩擦的方式提供较低的摩阻力, 欲通过加大桩长或桩径提升钢管桩承载力效果甚微、且不经济, 必须选择强度相对较高的礁灰岩作为持力层, 以桩端受力为主。

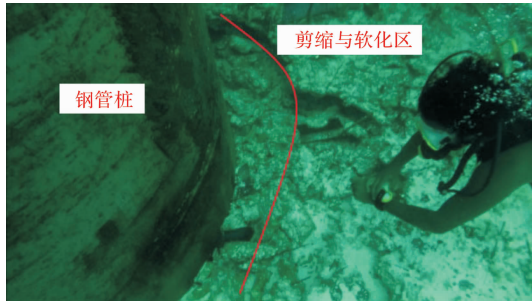


图6 海底钢管打入桩桩侧礁灰岩破坏

Fig. 6 Damage of reef limestone on the side of pile driven in submarine

鉴于此, 将规范公式进行修正, 与非嵌岩段一样, 把嵌岩段侧阻力以极限摩阻力标准值代替饱和单轴抗压强度标准值进行计算, 修正公式如下:

$$[R_a] = c_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m h_i q_{rk} + \frac{1}{2} \zeta u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik} \quad (1)$$

式中, q_{rk} 为嵌岩段岩石的侧阻力标准值。

将计算结果与实测值进行对比(如图7所示), 新公式计算值平均值为 12 654, 与实测值平均值 12 852 较接近, 总体吻合较好。

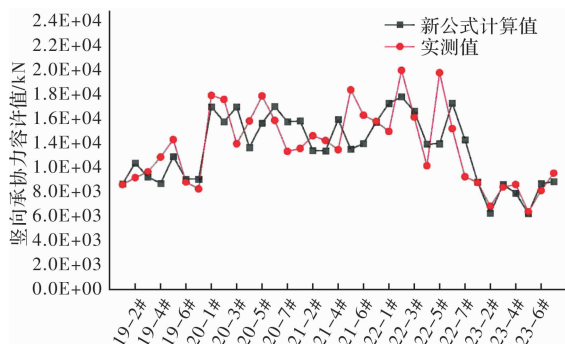


图7 钢管桩竖向承载力对比

Fig. 7 Comparison of vertical bearing capacity of steel pipes

3 钢管桩竖向承载力的时间效应

打入桩的时间效应是指桩的竖向承载力会随着休止时间(打桩结束时间与静载试验时间间隔)的增长而增大的现象。对编号为 GGZ1、P19-3、P19-4、Z5-1、Z5-2、Z5-3 的 5 根试验钢管桩进行初打, 休止 1 d、4 d、12 d、21 d、35 d 后共计进行 5 次动力测试, 基于 Capwarp 法得到试验钢管

桩竖向承载力随时间变化如图8所示。可知, 钢管桩承载力的增长速度随着时间的推移逐渐减慢, 休止 23 d 之后几乎停止了增长。其中前 4 天增长较快, 第 4 天桩基承载力平均值已占总承载力的 96.4%, 桩的早期时间效应要更加明显, 符合打入钢管桩承载力增长的一般规律^[14]。总体来说, 试验钢管桩承载力的时间效应不明显, 总承载力时间效应平均值为 1.16。

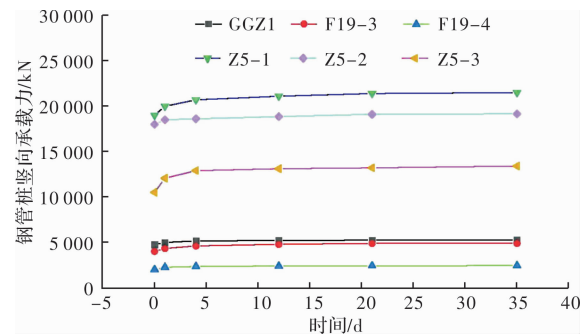


图8 钢管桩竖向承载力的时间效应

Fig. 8 Time effect of vertical bearing capacity of steel pipe piles

一般认为, 钢管桩承载力的增长主要表现为桩侧摩阻力随着时间的增长, 桩端阻力随着时间的变化并不大。在普通砂土中, 钢管桩承载力可以增长 30% ~ 70%, 有些情况下甚至可以达到数倍^[15-16]。桩侧土不断增强的剪胀效应是导致桩侧摩阻力随着休止时间的增长而增大的主要原因^[17-19]。本次试验中钢管桩承载力平均增长了 16%, 远低于常规砂土增长值, 这是因为打入钢管桩只破坏了桩侧珊瑚礁的结构, 破碎的珊瑚礁颗粒提供了前期侧摩阻力的增长, 但是离桩侧较远的珊瑚礁仍然保持其自稳性, 无法产生剪胀效应并持续提供侧摩阻力的增长。珊瑚礁地层打入钢管桩的时间效应从侧面验证了本文提出的珊瑚礁地层中钢管桩竖向承载力计算方法的合理性。

4 结论

(1) 钢管桩在打入过程中, 其侧壁的礁灰岩结构遭到破坏, 产生剪缩与软化现象, 无法提供有效的嵌固力, 只能以摩擦的方式提供较低的摩阻力, 导致钢管桩承载力实测值均远小于规范计算值。提出的规范公式修正方法能够很好地预测珊瑚礁地层打入式钢管桩承载力。

(2) 欲通过加大桩长或桩径提升钢管桩承载力效果甚微、且不经济, 必须选择强度相对较高的礁灰岩作为持力层, 以桩端受力为主。

(3) 珊瑚礁具有结构性, 无法产生剪胀效应并

持续提供侧摩阻力的增长,致使钢管桩承载力的时间效应不明显,承载力只增长了16%。

参考文献 References

- [1] 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.
MENG Qingshan, FAN Chao, ZENG Weixing, et al. Dynamic mechanical properties test of coral reef limestone in Nansha Islands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 183-190.
- [2] 贺迎喜,董志良,杨和平,等.吹填珊瑚礁砂(砾)用作海岸工程填料的压实性能研究[J].中外公路,2010,30(6):34-37.
HE Yingxi, DONG Zhiliang, YANG Heping, et al. Research on compaction performance of dredging coral reef sand (gravel) as a coastal engineering filler[J]. China & Foreign Highway, 2010, 30(6): 34-37.
- [3] 李宏刚.高原山区内陆湖泊、水库区域桥梁桩基、承台施工[J].公路,2017(10):134-136.
LI Honggang. Construction of pile foundations and caps of bridges in inland lakes and reservoirs in plateau mountainous areas[J]. Highway, 2017(10): 134-136.
- [4] 栾晓强,吕海军,韩薇薇.二道松花江特大桥临时栈桥设计与施工[J].公路,2016,61(6):164-169.
LUAN Xiaoqiang, LÜ Haijun, HAN Weiwei. Design and construction of temporary trestle bridge of erdao Songhua River Bridge[J]. Highway, 2016, 61(6): 164-169.
- [5] AKILI W. On design and installation of driven piles in coral deposits: a case study from the red sea coast of Saudi Arabia [J]. Geotechnical Special Publication, 2015, 35(12): 1036-1051.
- [6] 刘崇权,单华刚,汪稔.钙质土工程特性及其桩基工程[J].岩石力学与工程学报,1999,18(3):331-331.
LIU Chongquan, SHAN Huagang, WANG Ren. Engineering characteristics of calcareous soil and its pile foundation engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3): 331-331.
- [7] 王爱溪,林治平,冯光华.珊瑚礁灰岩中钢管桩动静承载力测试分析[J].施工技术,2018,47(19):87-89,97.
WANG Aixi, LIN Zhiping, FENG Guanghua. Test and analysis of dynamic and static bearing capacity of steel pipe piles in coral reef limestone[J]. Construction Technology, 2018, 47(19): 87-89, 97.
- [8] Akili W. On Design and Installation of Driven Piles in Coral Deposits; A Case Study from the Red Sea Coast of Saudi Arabia[J]. Geotechnical Special Publication, 2015(3): 1036-1051.
- [9] 许宁.浅谈珊瑚礁岩土的工程地质特性[J].岩土工程学报,1989,11(4):81-88.
XU Ning. On the engineering geological characteristics of coral reef rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 81-88.
- [10] 程新生.珊瑚岛礁跨海大桥的勘察实践及工程意义[J].水运工程,2018,545(8):183-188.
CHENG Xinsheng. Survey practice and engineering significance of the Coral Island Reef Cross-sea Bridge [J]. Water Transport Engineering, 2018, 545(8): 183-188.
- [11] 张家铭,邵晓泉,王霄龙,等.沉桩过程中钙质砂颗粒破碎特性模拟研究[J].岩土力学,2015,36(1):272-278.
ZHANG Jiaming, SHAO Xiaoquan, WANG Xiaolong et al. Simulation study on the crushing characteristics of calcareous sand particles during pile driving [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 272-278.
- [12] 祝敏杰.钻孔灌注桩在珊瑚礁地质条件下的施工工艺[J].中国港湾建设,2010,13(6):58-60.
ZHU Minjie. The construction technology of bored piles under the geological conditions of coral reefs[J]. China Harbor Construction, 2010, 13(6): 58-60.
- [13] 江浩.钙质砂中桩基工程承载性状研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2009.
JIANG Hao. Research on bearing behavior of pile foundation in calcareous sand[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [14] GAVIN K G, IGOE D J P, Kirwan L. The effect of ageing on the axial capacity of piles in sand[C]. Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering, 2013, 166(2): 122-130.
- [15] TAVENAS F, AUDY R. Limitations of the driving formulas for predicting the bearing capacities of piles in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1972, 9(1): 47-62.
- [16] RIMOY S P. Ageing and axial cyclic loading studies of displacement piles in sands[D]. London, UK: Imperial College, 2013.
- [17] RIMOY S P, SILVA R, JARDINE R J, et al. Field and model investigations into the influence of age on axial capacity of displacement piles in silica sands[J]. Geotechnique, 2015, 65(7): 576-589.
- [18] ZHANG C, YANG Z X, NGUYEN G D, et al. Theoretical breakage mechanics and experimental assessment of stresses surrounding piles penetrating into dense silica sand[J]. Geotechnique Letters, 2014, 4(1): 11-16.
- [19] CHOW F, JARDINE R J. Investigations into the behavior of displacement piles for offshore foundations. [D]. London: University of London, 1997.

(编辑 桂智刚)