



# 大直径灌注型嵌岩桩水平承载特征试验研究<sup>\*</sup>

俞梅欣，李小军，张 燕

(中船第九设计研究院工程有限公司，上海海洋工程和船厂水工特种工程技术研究中心，上海 200093)

**摘要：**大直径直桩型嵌岩桩在水文和船舶荷载等水平力作用下，会呈现出特有的受力特征，近年来有相关的室内缩尺模型试验，但鲜有现场实体试验。结合浙东沿海某在建全直桩码头工程，对大直径灌注型嵌岩桩实体进行水平静载试验，对试验过程和结果数据进行分析研究。结果表明，受水平外力作用的大直径灌注型嵌岩直桩的最大弯矩出现在海床面下、覆盖层内  $2D \sim 3D$  位置，桩基设计时应重点考虑此位置的抗弯承载力是否满足要求，并对全断面嵌岩段的受剪承载力进行独立分析计算。

**关键词：**灌注型嵌岩桩；全直桩码头；水平静载试验；水平承载性状

中图分类号：U 656.1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)06-0199-06

## Experiment of horizontal bearing characteristics of large-diameter cast-in-place rock-socketed pile

YU Meixin, LI Xiaojun, ZHANG Yan

(Shanghai Research Centre of Ocean & Shipbuilding Marine Engineering,  
China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Large-diameter vertical rock-socketed pile will present a unique force characteristic under the action of horizontal forces such as hydrology and ship load. In recent years, there are relevant indoor scale model tests, but few on-site physical tests. We analyze and study the test process and achievement data by combining a all-vertical pile wharf project under construction in the east coast of Zhejiang, and carry out the horizontal static load test of large-diameter cast-in-place rock-socketed pile solid. The results indicate that the maximum bending moment of large diameter cast-in-place vertical rock-socketed piles subjected to horizontal external forces occurs below the seabed and around  $2D$  to  $3D$  within the cover layer. When designing pile foundations, it is important to consider whether the bending bearing capacity at this location meets the requirements, and to independently analyze and calculate the shear bearing capacity of the full rock-socketed section.

**Keywords:** cast-in-place rock-socketed pile; all-vertical pile wharf; horizontal force static load test; horizontal bearing characteristics

随着港口、海岸及近海工程的不断发展，各型水工构筑物所坐落的海洋工程地质也日趋复杂。对于浅覆盖层或软弱土覆盖层的岩质海床地基，采用嵌岩桩是较好的选择。嵌岩桩根据主体桩的结构形式，可分为灌注型嵌岩桩、预制型嵌岩桩、

组合型嵌岩桩等；根据嵌岩端的具体类型，又可细分为全断面、缩小断面、锚杆、芯柱嵌岩型等<sup>[1]</sup>。全直桩码头是离岸码头的重要结构形式之一，因其平台承受荷载大，整体受波浪、海流等环境荷载以及靠船力、系缆力、挤靠力等作用，

收稿日期：2022-08-06

\*基金项目：中船九院前瞻性专项研究项目（573-E2001）

作者简介：俞梅欣（1984—），男，硕士，高级工程师，从事港口、海岸及近海工程科研、设计及项目管理。

对桩身弯矩、桩顶位移等都较为敏感<sup>[2]</sup>。国内外均有学者就此开展了相关数值模拟分析及实验室缩尺模型试验研究<sup>[3-4]</sup>，但开展大型现场实体试验的相对较少。

本文以浙江沿海某地大直径嵌岩桩全直桩码头工程为依托，开展海港工程大直径嵌岩桩水平承载力现场加载试验，并对相关结果数据进行分析和研究，验证所设计的嵌岩桩承载力及结构位移的合理性，为工程建设和使用提供依据，也为类似工程的设计提供经验和参考。

## 1 工程概况

码头工程位于浙江中东部沿海，平面采用连片式布置方案，码头平台离岸约 300 m，通过引桥与陆域相连。码头平台采用高桩码头结构形式，总长度为 545 m，宽度为 40 m，结构分段长度为 71 m，排架间距为 11 m；下部基础采用  $\phi 2\ 200\text{ mm}$  灌注型嵌岩桩，全直桩方案；上部结构为现浇横梁、预制纵梁、预制管沟梁组成的梁系，其上为预制钢筋混凝土面板和现浇钢筋混凝土面层，上覆现浇混凝土磨耗层。码头标准横断面见图 1。

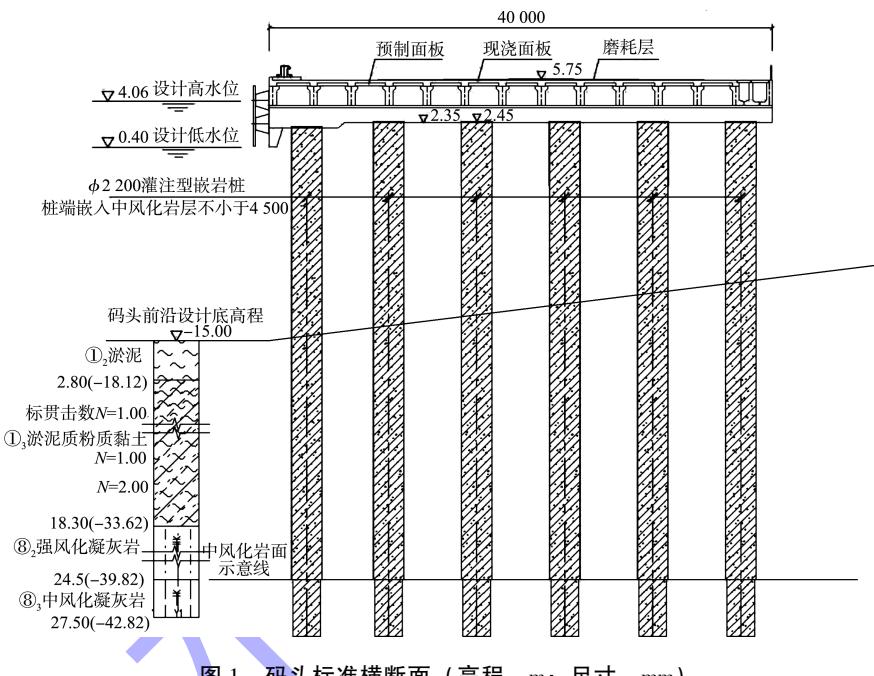


图 1 码头标准横断面 (高程: m; 尺寸: mm)

码头所用大直径嵌岩桩的桩身混凝土强度等级为 C40，桩端采用全断面嵌岩，进入中风化凝灰岩深度为 4.5 m，外为  $\phi 2\ 400\text{ mm}$  钢护筒，见图 2。嵌岩段施工采用大型 SR405 旋挖钻机，配备及锁钻杆，分层钻进。

## 2 地质条件

根据工程地质勘察报告，拟建码头区域场地地貌类型为浙东南沿海岛屿区，场地土层为海相沉积，海底坡度较缓，属水下浅滩地貌，大部分区域基岩覆盖层厚度较小，平均厚度为 3~8 m。地层自上而下依次为：①<sub>2</sub> 层淤泥，灰色，流塑，高压缩性，表层为浮泥，平均标贯击数为 0.4 击，修正击数为 0.3 击；①<sub>3</sub> 层淤泥质粉质黏土，灰色，流塑，高压塑性，平均标贯击数为 0.9 击，修正击数为 0.7 击；⑧<sub>2</sub> 层强风化凝灰岩，灰黄色，局部青灰、灰白色，裂隙很发育，岩芯呈碎块状、碎石状，锤击易碎，平均标贯击数大于 50 击；⑧<sub>3</sub> 层中风化凝灰岩，灰黄、青灰色，块

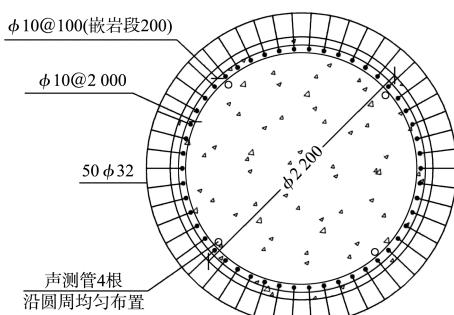


图 2 嵌岩桩标准横断面 (单位: mm)

状构造, 结构部分破坏, 主要矿物成分为石英、长石, 岩石质量指标(RQD)为50%~60%, 岩石饱和单轴抗压强度标准值为27.5 MPa, 属较软岩, 岩体结构较完整, 岩体基本质量级别属于Ⅳ级。

### 3 分析方法

#### 3.1 水平极限承载力分析方法

试验桩水平极限承载力根据 $F_H-Y$ 曲线(图3)第2折点前一级荷载确定<sup>[5]</sup>。当采用 $F_H-Y$ 曲线难以确定桩的水平极限承载力时, 采用水平荷载-位移梯度( $F_H-\Delta Y/\Delta F_H$ )曲线确定。桩身折断时, 水平极限承载力应取前一级荷载。

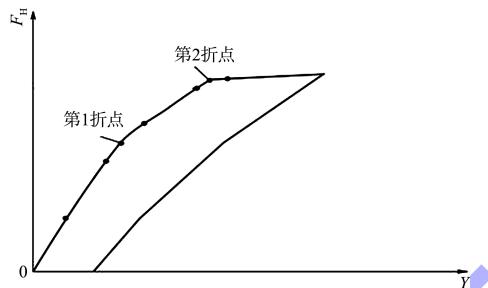


图3 水平荷载-力作用点水平位移( $F_H-Y$ )曲线

#### 3.2 桩身弯矩分析方法

桩身弯矩可按式(1)计算:

$$W = \frac{(F_r - F_e) \pi D^4}{64d} \cdot \frac{E_c}{E_s A_s} + \left( \sum_{i=1}^n F_{ri} X_{ri} - \sum_{i=1}^n F_{ei} X_{ei} \right) \left( 1 - \frac{E_c}{E_s} \right) \quad (1)$$

式中:  $W$  为桩的弯矩, kN·m;  $F_r$  为水平力施加侧钢筋距中性轴最远处钢筋轴力, kN, 受拉为正;  $F_e$  为水平力反方向侧钢筋距中性轴最远处钢筋轴力, kN, 受拉为正;  $E_c$  为桩体混凝土弹性模量, MPa;  $E_s$  为钢筋弹性模量, MPa;  $A_s$  为每根钢筋的截面面积,  $m^2$ ;  $D$  为桩的直径, m;  $d$  为  $F_r$  和  $F_e$  所对应的

2根钢筋在垂直于中性轴方向上的间距, m;  $F_{ri}$  为水平力施加侧钢筋  $i$  轴力, kN, 受拉为正;  $X_{ri}$  为水平力施加侧钢筋  $i$  与中性轴的距离, m;  $F_{ei}$  为水平力反方向侧钢筋  $i$  轴力, kN, 受拉为正;  $X_{ei}$  为水平力反方向侧钢筋  $i$  与中性轴的距离, m。

#### 3.3 桩身剪力分析方法

桩身剪力可按式(2)计算:

$$V_i = F_H - \sum_{i=1}^n (P_i D Z_i) \quad (2)$$

式中:  $V_i$  为桩身剪力, kN;  $F_H$  为水平推力, kN;  $P_i$  为地基土层  $i$  抵抗荷载, kPa;  $Z_i$  为计算土层  $i$  深度, m。

### 4 单桩水平静载试验

#### 4.1 试验方法

本工程选取3根 $\phi 2200$  mm灌注型嵌岩桩做单桩水平静载试验。试验前、后均须采用声波透射法进行桩身完整性检测。本文选取其中的P<sub>1</sub>桩进行分析。P<sub>1</sub>桩长35.2 m, 所处位置泥面高程为-12.46 m, 基岩面(强风化岩)层顶高程为-28.96 m, 中风化岩面层顶高程为-33.16 m, 桩顶、底高程分别为2.45、-37.66 m, 强风化、中风化岩层的入岩深度分别为4.2、4.5 m, 试验荷载250 kN, 水平位移的上限值为30 mm。

本工程桩基水平静载试验由相邻嵌岩桩作为反力桩, 平面布置如图4所示。加载设备采用卧式千斤顶, 千斤顶与试验桩接触部位设置铰支座, 试验桩的水平力作用点进行局部加强或增大受力面积。桩身深层水平位移采用移动式测斜仪进行检测, 测斜管为聚氯乙烯(PVC)材质, 将测斜管分段逐节在孔口对接放入孔中, 测斜管底部封闭, 要求对接时导向槽对正不许偏扭。

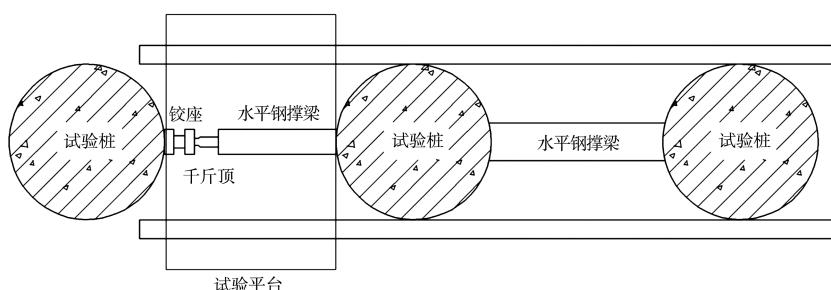


图4 水平静载试验装置平面布置

## 4.2 测点布置

水平荷载作用点高程取实际桩顶高程 2.45 m，水平加载力的方向通过试验桩截面中心。在水平力作用平面的受检桩两侧对称安装 2 个大量程百分表。

水平试验桩沿桩身对称布置埋设 2 个钢筋应力计，以及 1 根与桩通长的测斜管，钢筋应力计对称截面方向与水平静载试验加载方向一致，测斜管其中 1 组管槽方向与水平静载试验加载方向一致，布置见图 5。

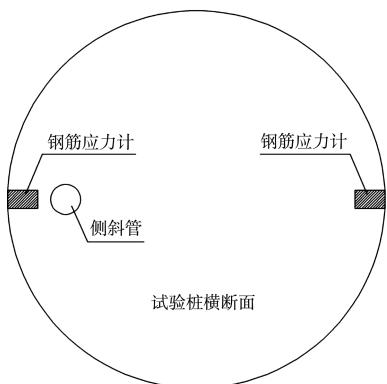


图 5 试验桩中设备埋设布置

试验桩钢筋笼制作过程中，根据工程地质勘察报告，测力传感器应埋设在 2 种不同性质地层的界面处(较厚土层传感器布设时在该土层相应增加)，并留出足够长度的线头与传感器读数仪连接，静载荷试验同时进行桩身内力测试。传感器在海床面以上按 2 m 间距埋设，进入海床后、至基岩面以上桩体区域加密至 1 m 间距埋设，进入基岩后再调整为 2 m 间距埋设。

## 4.3 加载工况

各试验桩的水平加载试验均在设计低水位 0.40 m 时进行。试验加载采用单向单循环水平维持荷载法，加载分级进行，采用逐级等量分级，每分级荷载为最大加载量的 1/10，第 1 级荷载取 2 倍的分级荷载；卸载分级进行，采用逐级等量分级，每级卸载量取分级荷载的 2 倍。加/卸载等级为：50、75、100、125、150、175、200、225、250、200、150、100、50、0 kN。加/卸载时确保

荷载传递平稳、持续、无冲击。加载时每级荷载应维持 20 min，测读时间间隔 5 min；卸载时每级荷载应维持 10 min，测读时间间隔为 5 min；卸载至零后应每隔 10 min 测读桩顶的残余位移量，测读 30 min。钢筋应力计、测斜管测试数据时间与水平位移的测读时间相同。

## 4.4 终止判别标准

结合相关规范以及本工程实际设计依据条件，经综合研判，确定当符合下列条件之一时，水平静载试验终止加载：1) 已加载至试验要求的最大荷载值或最大位移，码头平台桩加载至 250 kN 或最大位移量达到 40 mm；2) 在某级荷载作用下，桩顶的水平位移急剧增加、位移速率明显增大；3) 桩身断裂或地基土出现明显的斜裂缝。

## 4.5 结果分析

通过内力测试可以分析试桩在进行载荷试验过程中，桩身弯矩、剪力及位移等数据，为桩基设计提供有力依据。

根据桩身混凝土应变计测得的应变值，可推算得到桩身的弯矩值。经对试验数据进行分析整理后，计算得到的分级加载下的桩身弯矩值分布情况如图 6 所示。可以看出，随着水平加载力的不断增大，桩身弯矩也不断增大，其中弯矩极值从 856.4 kN·m 增大至 3 967.5 kN·m，但产生的高度降低了约 3 m。在不同加载值的水平荷载作用下，桩身弯矩的表现形式基本一致，均为先逐步增大，待在泥面以下一定范围达到极值后，开始逐步减少，直至趋近于 0，整体呈旋转的抛物线形。同一水平力加载值下，桩身弯矩由小到大再变小，但极值的位置几乎都在同一水平面附近，约为桩顶以下 20 m，即入泥面 4~5 m 范围，也就是  $2D \sim 3D$  处，基本不会改变。在具体工程设计时，须重点关注此区域的桩基截面配筋是否满足荷载要求。进入覆盖土层一定深度后，弯矩开始逐渐变小，至中风化岩面以下  $2D$  左右时，弯矩开始逐渐趋近于 0。

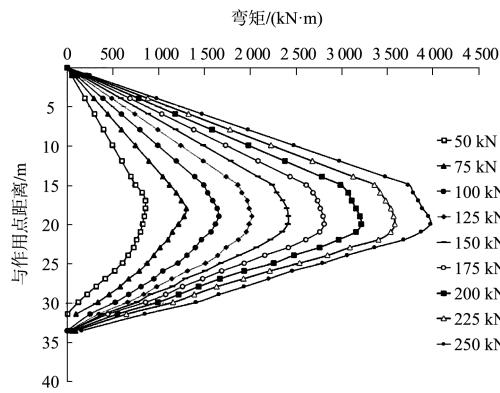


图6 分级加载下桩身弯矩分布

桩身剪力试验数据分析结果如图7所示。可以看出,进入海床面后,受土体抗力影响,剪力开始逐渐减小,至 $2D \sim 3D$ 区间时,减小至0,趋于平衡。随后土体的约束作用不断增强,剪力变为反方向且开始不断增大。至基岩面附近时,由于桩身嵌固效应,剪力基本维持不变。在入岩面一定深度后剪力有所减小,原因是钢护筒进入岩面约50 cm,范围为无护筒且全断面嵌岩段,施工时对周围岩体也有一定的程度的扰动,导致桩周约束条件有所减弱。

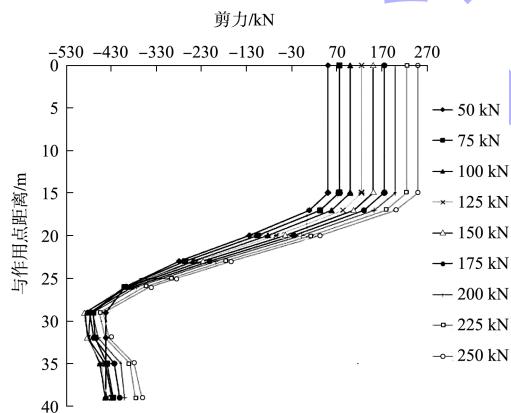


图7 分级加载下桩身剪力分布

桩顶位移试验数据分析结果如图8所示。可以看出,位移的整体趋势为随着水平加载外力的增大而增大,在最大水平加载力为250 kN时,水平位移为20.24 mm,试验后期残余变形为4.98 mm。在有覆盖层区域,位移增长幅度缓慢,至极软泥和桩周无约束时,开始大幅度增长。嵌岩桩嵌固端的深度、基岩覆盖层的厚度、桩顶合力作用点高程以及水平作用力的大小,是决定嵌岩全直桩

码头整体位移的重要因素。

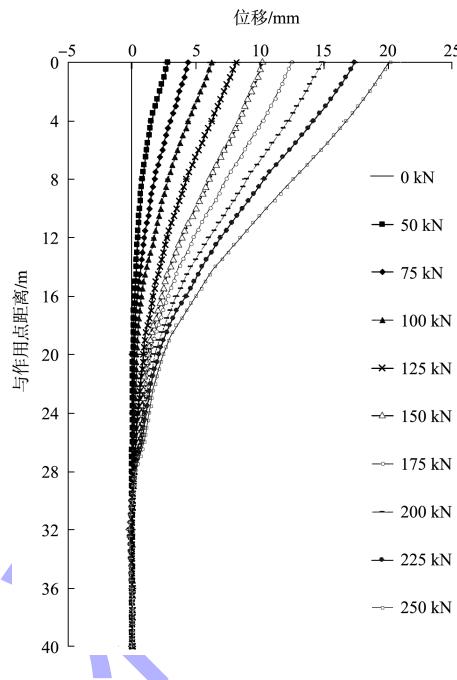


图8 分级加载下桩身位移分布

## 5 理论计算

根据JTS 167—2018《码头结构设计规范》的说明,嵌岩桩在水平力作用下的受力特性宜通过静荷载试验研究确定。覆盖层土对嵌岩桩的水平抗力,当覆盖层较薄且强度较低时,不宜考虑覆盖层土的作用。目前,尚无直接计算嵌岩桩位移的固定公式,参考JTS 240—2020《水运工程基桩试验检测技术规范》推荐的多层土地质中的m法公式:

$$Y_0 = 2.441 \cdot \frac{F_{H_0} T^3}{E_p I} + 1.621 \cdot \frac{M_0 T^2}{E_p I} \quad (3)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I}{mb_0}} \quad (4)$$

式中: $F_{H_0}$ 为泥面处水平荷载,取250 kN; $M_0$ 为泥面处弯矩,取3 727.5 kN·m; $E_p$ 为桩身材料的弹性模量,取32.5 GPa; $I$ 为桩截面的惯性矩,取 $1.15 \text{ m}^4$ ; $b_0$ 为桩的换算宽度,取4.4 m; $T$ 为桩的相对刚度系数; $m$ 为桩侧地基土水平抗力系数随深度增长的比例系数,根据岩土物理力学参数,按 $2.500 \text{ kN/m}^4$ 估算。根据式(4)计算得到 $T=4.9023 \text{ m}$ ,将其代入式(3),得到水平荷载作用下泥面变形引起在泥面高程处的水平位移 $Y_0=6.33 \text{ mm}$ 。按自泥面高程-12.46 m处考虑叠加悬臂荷载,根

据结构静力原理计算桩顶挠度的公式为<sup>[6]</sup>:

$$f_A = \frac{pl^3}{3E_p I} \quad (5)$$

式中:  $p$  为桩顶水平荷载, 取 250 kN;  $l$  为悬臂长度, 取 14.91 m。根据式(5)计算得到桩顶处悬臂位移结果为 7.39 mm。与  $Y_0$  叠加, 得桩顶理论位移计算值为 13.72 mm。

如不考虑岩层顶部软弱覆盖层作用, 悬臂底面分别按泥面下 2D 深度 (-16.86 m)、泥面下 3D 深度 (-19.06 m)、强风化岩面顶高程 (-28.96 m)、中风化岩面顶高程 (-33.16 m), 根据式(5)计算, 结果见表 1。

表 1 桩顶位移理论计算值对比

计算方法及条件	桩顶位移/mm
$m$ 法+自泥面始悬臂	13.72
$m$ 法+自泥面下 2D 始悬臂	22.38
$m$ 法+自泥面下 3D 始悬臂	28.52
静力法+自强风化岩层顶始悬臂	69.09
静力法+自中风化岩层顶始悬臂	100.69

结合现场水平静载试验数据分析, 对比多种方式的理论计算结果可知, 现场试验得到的桩顶位移为 25.22 mm, 介于表 1 中采用  $m$  法与自泥面下 2D~3D 范围的悬臂的理论计算相叠加的结果。这也说明, 在基岩面覆盖层土性较为软弱且厚度不大时, 采用  $m$  法+自泥面下 2D~3D 的方法, 与现场试验结果较为接近。

## 6 结论

1) 水平外力作用下, 码头大直径灌注型嵌岩直桩的弯矩呈现先增大后减小的抛物线形, 最大弯矩出现在海床面下、覆盖层内 2D~3D 的位置,

桩基础结构设计时应重点考虑此位置抗弯承载力是否满足要求。

2) 无钢护筒处的嵌岩段的剪力会发生较大变化, 设计过程中应对全断面嵌岩段进行独立分析计算。

3) 通过单桩水平静载试验结果得知, 桩顶水平位移较小, 最大位移为 20.24 mm, 残余变形为 4.98 mm。后续如以码头整体考虑, 在排架效应下, 预判位移趋势会更小, 可满足规范要求及本工程全直桩码头的使用要求。

## 参考文献:

- [1] 雍新, 史宏达. 我国码头新结构型式综述[J]. 海岸工程, 2013, 32(1): 35-43.
- [2] 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.
- [3] 朱斌, 朱瑞燕, 罗军, 等. 海洋高桩基础水平大变位性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 521-530.
- [4] ASHOUR M, NORRIS G. modeling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2000, 126(5): 420-428.
- [5] 中交四航工程研究院有限公司, 广州港湾工程质量检测有限公司. 水运工程基桩试验检测技术规范: JTS 240—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [6] 《建筑结构静力计算手册》编写组. 建筑结构静力计算手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

(本文编辑 王璁)

## 编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。