



## 珊瑚礁砂地层打入桩溜桩风险的判断方法

苏世定<sup>1,2</sup>, 徐雄<sup>3</sup>, 张博<sup>1,2</sup>, 吕述晖<sup>1,2</sup>

- 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
- 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
- 中交四航第二工程有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 珊瑚礁砂因其易破碎、高压缩性等异于常规砂土的特殊工程性质, 冲击动力沉桩过程中易引起桩侧珊瑚礁砂颗粒破碎、剪缩等复杂变化, 造成沉桩过程发生溜桩现象。溜桩未经预料且溜桩距离过长, 不仅增加沉桩控制难度, 且施工风险高, 因此亟需一种预测深厚珊瑚砂地层打入桩溜桩深度的分析方法, 用于指导沉桩控制, 从而降低施工风险。依托实际工程, 开展深厚珊瑚礁砂地层打入桩高应变试桩, 分析溜桩状态下珊瑚礁砂的土阻力取值, 提出并验证珊瑚礁砂地层打入桩溜桩深度预测方法, 同时提出降低溜桩风险的沉桩控制方法, 并应用于现场 602 根打入桩的施工溜桩风险预测及沉桩控制, 得出珊瑚礁砂地层打入桩溜桩规律。

**关键词:** 珊瑚礁砂; 冲击动力沉桩; 溜桩; 预测方法; 沉桩控制方法

中图分类号: U652; TU473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0197-06

### Judgement method of driven pile running risk in coral reef sand

SU Shiding<sup>1,2</sup>, XU Xiong<sup>3</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, LYU Shuhui<sup>1,2</sup>

- CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
- CCCC Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, Guangzhou 510230, China;
- The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** Coral reef sand, due to its special engineering properties such as fragility and high compressibility, differs from conventional sand. During impact pile driving, the process can easily cause complex changes in coral reef sand particles, such as breakage and shear, leading to pile running. Unanticipated pile running, especially over long distances, not only increases the difficulty of pile driving control but also poses high construction risks. Therefore, there is an urgent need for an analysis method to predict the depth of pile running in deep coral sand formations to guide pile driving control and reduce construction risks. In this paper, high strain pile tests are conducted in deep coral reef sand formations based on actual engineering scenarios. The analysis of soil resistance values in pile running conditions in coral reef sand is carried out, and a method for predicting the distance of pile running in coral reef sand formations is proposed. Furthermore, the pile driving control method that considers the risk reduction of pile running is proposed, and it is applied to 602 driven piles on-site for risk prediction of pile running and pile driving control, and the laws of pile diving in coral reef sand stratum are summarized.

**Keywords:** coral reef sand; impact pile driving; pile running; prediction method; pile driving control method

珊瑚礁岩土复杂性及不确定性给桩基设计和施工带来诸多挑战。多个动力沉桩工程的实践表明, 珊瑚礁砂打入桩存在影响桩基承载性能和

沉桩的桩侧摩阻力<sup>[1-5]</sup>, 其中珊瑚礁砂地层对沉桩的影响主要体现为溜桩。溜桩指沉桩过程中桩体发生自由下沉的现象, 轻则会冲断定位钢丝绳,

收稿日期: 2024-04-16

作者简介: 苏世定 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事桩基工程科研、设计及检测评估工作。

重则造成桩锤滑落大海,导致桩、桩锤和抱桩器损坏等重大事故<sup>[6]</sup>。目前,关于打入桩溜桩的问题主要聚焦于海洋平台大直径桩在软弱土地层中的施工<sup>[7]</sup>,而对于珊瑚礁砂地层的研究并不多。关于珊瑚礁砂地层溜桩问题最早记录于伊朗波斯湾海洋石油平台桩基工程,大直径钢管桩在穿过8 m的良好地层后进入珊瑚礁砂层,仅在自重力作用下就发生约15 m的自由下沉<sup>[8]</sup>。后续随着工程建设的愈加频繁,中东红海、印度西部海域、澳大利亚西北大陆架等区域陆续出现因珊瑚礁砂引起的工程问题。

近几年随着我国在珊瑚礁地质的工程建设增多,陆续在中东、东非印度洋、东南亚等区域遇到类似问题,包括溜桩、常规岩土设计经验不适用等。依托工程在试桩阶段发现钢管桩在珊瑚礁砂地层的溜桩问题,且该工程地质覆盖有深厚的珊瑚礁砂,含珊瑚、贝壳类碎片和珊瑚碎屑等,碳酸钙含量74.8%,平均厚度24.8 m,最大厚度可达40 m,发生长距离溜桩的风险极高。为了降低溜桩带来的施工风险,本文结合高应变试桩数据,提出一种预测深厚珊瑚礁砂地层打入桩溜桩深度的分析方法,应用于沉桩溜桩风险判断,并结合实际沉桩数据,形成珊瑚礁地层大直径钢管桩溜桩控制措施,以保障桩基的顺利施工。

### 1 珊瑚礁砂地层打入桩溜桩深度预测方法

当地基土的桩侧摩阻力和端阻力构成的沉桩阻力小于桩和桩锤的总重力时,就会发生自由下沉的现象。因此,沉桩阻力是影响打入桩溜桩的

最主要影响因素。沉桩阻力的确定对于判断溜桩产生的区间有着极为重要的作用。目前关于沉桩阻力的确定以经验计算方法为主,且主要在设计阶段完成,未考虑沉桩过程对土阻力弱化的影响,误差很大且偏于危险,特别是对于海洋特殊土。要获得较为准确的土阻力参数,现场原位测试方法是最直接、有效的方法。其中,通过高应变试桩方法和CAPWAP拟合分析可以获得较准确的土阻力参数,据此可建立应用珊瑚礁砂地层土阻力预测溜桩深度的分析方法。

试桩采用 $\phi 1\ 800$  mm的钢管桩,桩长48.5 m,变壁厚形式(壁厚20、22、32 mm),SG10-S1试验桩尺寸:桩靴长0.5 m,入土深度22.18 m,桩尖高程-42.48 m,单桩质量44.29 t。

试验桩所在位置的地质覆盖厚10.91 m的珊瑚礁砂以及8.8 m厚的中风化千枚岩,施工桩锤选用YC40液压锤,额定最大冲程1.50 m,最大冲击能量600 kJ,锤芯加替打等附属部件总质量为82.7 t。稳桩阶段,桩锤钢丝绳解套,桩锤质量开始由桩承担再传递至桩周土。最初选择0.1 m跳高锤击,但桩锤提升后尚未开始下落锤击即发生自由下沉12.25 m,桩底高程到达-32.55 m,钢管桩直接进入强风化千枚岩层1.64 m;随后小跳高正常施打确定稳桩后开始高应变打桩过程监控直至沉桩结束,沉桩结束后所测桩基初打承载力是沉桩引起土体扰动、土体强度降低后的土阻力,更能准确描述沉桩施工过程。因此针对沉桩后的高应变测试信号,通过CAPWAP分析珊瑚礁砂的摩阻力取值,见表1。

表1 3根桩所在地层摩阻力值  
Tab. 1 Values of soil side resistance at stratum where three test piles are located

桩号	岩土名称	性状	土层高程/m	单位侧摩阻力拟合值/kPa	总摩阻力/kN
SG10-S1	③ <sub>1a</sub> 珊瑚礁砂	松散-中密	-31.21 ~ -20.30	6.65	410.2
	⑥ <sub>1</sub> 强风化千枚岩	非常软-软	-33.61 ~ -31.21	68.09	631.5
	⑥ <sub>2</sub> 中风化千枚岩	软-中等强度	-42.48 ~ -33.60	301.65	15 130.4
SG01-S1	珊瑚礁砂③ <sub>1a</sub>	松散-中密	-25.87 ~ -20.96	13.80	383.2
	强风化千枚岩⑥ <sub>1b</sub>	非常软-软	-35.07 ~ -25.87	85.10	4 427.3
G1	珊瑚礁砂③ <sub>1a</sub>	松散-中密	-12.5 ~ -4.0	4.37	175.0
	强风化千枚岩⑥ <sub>1b</sub>	非常软-软	-18.5 ~ -12.5	83.20	2 352.4
	中风化千枚岩⑥ <sub>2</sub>	软-中等强度	-23.0 ~ -18.5	266.20	5 645.0

由表1可知, 10.91 m厚的珊瑚礁砂地层提供的总摩阻力为410.2 kN, 远小于桩锤和试验桩的总重力(1 269.9 kN)。即使增加端阻力, 仍不足以支撑桩和锤的总重力, 从而导致溜桩的发生。试验桩最终进入强风化千枚岩1.64 m, 该岩层可提供的总摩阻力为631.5 kN, 试验桩总计穿越土层所提供的摩阻力为1 041.7 kN, 仍小于桩和锤的总重力, 但强风化千枚岩层的端阻力发挥了作用, 最终使溜桩停止。

考虑上述3根桩所在土层的土阻力测试值, 依次预估试验桩的压桩自沉和锤击溜桩深度。其中压桩自沉表示由钢管桩自重力引起的下沉; 而锤击溜桩则是桩锤钢丝绳解套放置于桩顶, 除了

施加锤重力后还附加一个惯性力, 若此时不发生溜桩, 则将桩锤提升高度控制在0.03~0.05 m, 通过桩锤在桩顶施加惯性力, 此时考虑的荷载为桩锤和桩的总重力, 预测结果见表2。

将上述计算分析结果与3根桩的实测数据进行对比, 见表3。结果表明, 压桩可下沉深度的实测值与计算值有较大差异; 若将压桩自沉深度也计入溜桩区间, 预估的溜桩区间与实际溜桩区间基本一致, 且最后溜桩停止的高程也基本一致。因此可基本认为, 仅考虑珊瑚礁砂地层的摩阻力计算沉桩阻力、预估打入桩溜桩区间是可行的, 该方法可用于评估打入桩溜桩风险。

表2 3根试验桩溜桩过程参数预测分析

Tab. 2 Predicted parameters during pile running process of three test piles

桩号	桩长/ m	桩径/ mm	桩 质量/ t	桩锤 质量/ t	泥面 高程/ m	预估压桩 后桩底 高程/m	预估开始溜 桩的桩底 高程/m	预估溜桩 停止桩底 高程/m	最大预估 溜桩深度/ m	溜桩后 桩端所 在土层
SG10-S1	48.5	1 800	45.00	82.7	-20.30	-31.31	-31.31	-33.46	13.16	强风化 千枚岩 <sup>①b</sup>
SG01-S1	55.0	1 800	50.93	82.7	-20.96	-26.13	-26.13	-27.85	6.89	
G1	37.3	1 500	31.00	82.7	-4.00	-12.84	-12.84	-14.95	10.95	

表3 3根试验桩溜桩预测参数与实际参数对比

Tab. 3 Comparison between predicted and actual parameters during pile running of three test piles

桩号	泥面高程/m		预估压桩后 桩底高程/m		预估开始溜桩的 桩底高程/m		预估溜桩停止 桩底高程/m		最大溜桩深度/m		溜桩后桩端 所在土层
	计算值	实际值	计算值	实际值	计算值	实际值	计算值	实际值	计算值	实际值	
SG10-S1	-20.30	-20.30	-31.31	-32.55	-31.31	-20.30	-33.46	-32.55	13.16	12.25	强风化 千枚岩 <sup>①b</sup>
SG01-S1	-20.96	-20.96	-26.13	-21.07	-26.13	-21.75	-27.85	-28.35	6.89	6.60	
G1	-4.00	-4.00	-12.84	-6.04	-12.84	-6.04	-14.95	-15.86	10.95	9.82	

## 2 打入桩溜桩风险判断方法验证及控制措施

### 2.1 打入桩溜桩风险判断方法验证

为了进一步验证仅考虑摩阻力预估珊瑚礁砂地层打入桩溜桩区间的方法, 选取试验钻孔SG14进行6根钢管桩(SG14-J2、SG14-M1、SG14-M2、SG14-M3、SG14-M4、SG14-S1)进行试打桩试验, SG14-J2桩径为 $\phi 800$  mm, SG14-M1~SG14-M4桩径均为 $\phi 1 200$  mm, SG14-S1桩径为 $\phi 1 800$  mm。SG14钻孔的地质条件见表4, 其中除珊瑚礁砂地

层的单位侧摩阻力取值为实测外, 其他均为地质勘察参数推荐值。

表4 钻孔SG14土层参数

Tab. 4 Soil layers parameters in borehole SG14

岩土 名称	性状	土层 高程/m	单位侧 摩阻力/ kPa	单位 端阻力/ kPa
③ <sub>1a</sub> 珊瑚礁砂	松散-中密	-39.9~ $\leq$ -8.85	6.65	400
④ <sub>1</sub> 砾石土	-	-50.9~ $\leq$ -39.9	96.00	1 800
④ <sub>2b</sub> 角砾混黏土	-	-53.9~ $\leq$ -50.9	75.00	2 700
⑤ 圆砾混砂	-	-63.4~ $\leq$ -53.9	15.00	3 300

除了本文提出的仅考虑摩阻力实测值预估打入桩溜桩区间的方法外，另外选择 GRLWEAP 打桩分析软件和能量平衡法<sup>[9-11]</sup>。GRLWEAP 打桩分析软件考虑珊瑚礁砂地层的摩阻力和端阻力，能量平衡法主要根据桩身自重与锤重力所做功  $W_g$ 、溜桩过程中桩侧土所做功  $W_s$ 、桩端土所做功  $W_e$  和桩身下沉阶段能量耗散  $E_f$  之间的能量平衡，预估打入桩的溜桩区间。3 种方法的预测分析结果见图 1。

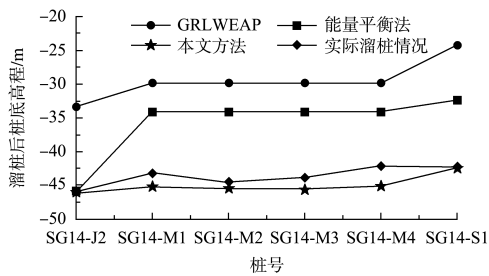


图 1 不同方法溜桩预测结果

Fig. 1 Predicted results of pile running by different methods

图 1 结果显示，本文所提出方法的预测结果最符合实际溜桩情况。无论是  $\phi 800$  mm、 $\phi 1\ 200$  mm 还是  $\phi 1\ 800$  mm 钢管桩，珊瑚礁砂 $\textcircled{3}_{1a}$ 层属于易发生溜桩的高风险区域，溜桩停止后均进入砾石土 $\textcircled{4}_1$ 层。

### 2.2 控制措施

针对珊瑚礁砂地层打入桩存在的溜桩风险，可采取缩短溜桩长度的方法控制溜桩带来的危害。溜桩区间均按预估的最不利溜桩区间考虑，分为 3 个阶段进行控制：1) 通过桩身自重自沉，再进行套锤压桩，并反复进行桩锤提升下放，直至桩身不再下沉；2) 选择手动方式控制桩锤工作，点动按钮，桩锤提升高度控制在 0.03~0.05 m，并迅速停止，观察 3~5 min，将长距离溜桩分为多段距离溜桩；3) 在溜桩穿越珊瑚礁砂层后，采用手动模式操控 0.1 m 跳高进行试打，待达到稳桩条件后，进入正常沉桩阶段。

### 3 珊瑚礁砂地层打入桩溜桩规律分析

整个码头区域计划施工钢管桩 602 根，按 7 排 86 轴布置，其中 A 和 E 排为  $\phi 1\ 800$  mm 的钢管

桩，共 172 根，其余 5 排为  $\phi 1\ 500$  mm 的钢管桩，共 430 根。根据岩面走势，1~30 轴和 75~86 轴为码头东西两侧的浅岩面区域，31~74 轴为深岩面的码头中部区域，以深厚珊瑚礁砂为主，最大厚度达 40 m，存在较大的溜桩施工风险。

经统计，3 个区域的溜桩区间如图 2 所示。其中：码头东侧区域(1~30 轴)，溜桩后钢管桩处于强风化千枚岩层 $\textcircled{6}_{1b}$ ；桩径  $\phi 1\ 500$  mm 的钢管桩溜桩区间分布于 4.08~36.34 m，平均 21.28 m； $\phi 1\ 800$  mm 的钢管桩溜桩区间为 10.57~32.45 m，平均 19.52 m。码头中间区域(31~74 轴)，溜桩后钢管桩处于黏质碎石土 $\textcircled{4}_1$ ； $\phi 1\ 500$  mm 的钢管桩溜桩区间分布于 23.72~39.04 m，平均 30.63 m； $\phi 1\ 800$  mm 的钢管桩溜桩区间为 22.16~33.57 m，平均 26.71 m。码头西侧区域(75~86 轴)，溜桩停止后钢管桩处于强风化千枚岩层 $\textcircled{6}_{1b}$ ； $\phi 1\ 500$  mm 的钢管桩溜桩区间分布于 12.52~36.46 m，平均 29.20 m； $\phi 1\ 800$  mm 的钢管桩溜桩区间为 8.88~33.3 m，平均 25.55 m。分析结果表明，直径较小的打入桩溜桩区间范围大于直径较大的打入桩，沉桩过程中控制溜桩的区段应尽量延长。

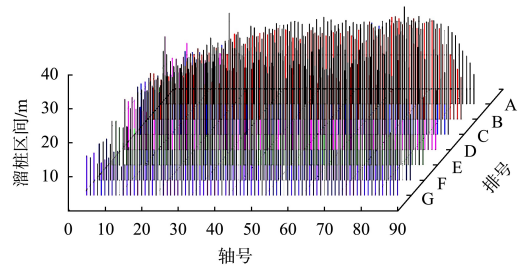


图 2 整个码头区域各排钢管桩溜桩区间

Fig. 2 Pile running range of steel pipe piles in each row within whole dock area

溜桩区间在实际沉桩施工过程中包含压桩自沉和点动溜桩 2 个过程的沉桩总深度，部分钢管桩通过压桩自沉即可穿透珊瑚礁砂层到达良好土层，大部分则需要通过点动锤击多段溜桩方可穿透溜桩区间，再到达良好土层。图 3 为不同桩径钢管桩的实际溜桩区间。经分析，430 根  $\phi 1\ 500$  mm 钢管桩中有 219 根压桩自沉只能穿过 20% 的溜桩区间，一半以上只能穿过 40%。而  $\phi 1\ 800$  mm 钢



管桩压桩自沉穿过 20% 的溜桩区间的桩基数量达到 92 根, 占比达 53%。相比之下桩径越大自沉越困难, 说明增大桩径提高每米珊瑚礁砂所能提供的总摩阻力反而增加了后续锤击溜桩的风险。统计分析数据表明, 珊瑚礁砂地层打入桩施工存在压桩困难的情况下, 仍具有较大的溜桩风险, 动荷载对珊瑚礁砂层的扰动对沉桩的影响显著, 应控制动荷载施加频率和幅值, 以避免发生长距离的溜桩。

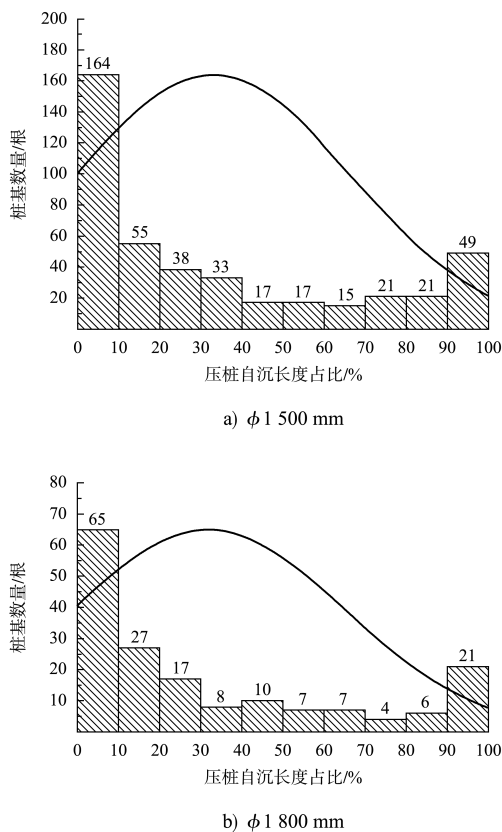


图3 不同桩径钢管桩压桩自沉占比

Fig. 3 Self-sinking proportion of steel pipe pile with different pile diameter

#### 4 结语

1) 基于珊瑚礁砂地层高应变试桩, 获取了珊瑚礁砂地层沉桩贯入过程土阻力取值, 提出一种珊瑚礁砂地层打入桩溜桩深度预测方法并进行试打桩验证, 可用于打入桩溜桩风险区域的分析判断, 为珊瑚礁砂地层打入桩施工提供指导。

2) 珊瑚礁砂地层打入桩因动荷载引起的长距离溜桩可通过跳高 0.03~0.05 m 的点动方式降低动荷载作用时间和频率, 控制基桩为多段的短距离溜桩, 然后操控 0.1 m 跳高进行试打, 待达到稳桩条件后, 方可进入正常沉桩阶段。

3) 珊瑚礁砂地层易发生打入桩溜桩, 但静荷载作用下桩基础下沉深度有限, 沉桩过程仍需通过施加动荷载以实现沉桩贯入, 但极小的动荷载作用即发生溜桩,  $\phi 1500$  mm 钢管桩静压下沉能力大于  $\phi 1800$  mm 钢管桩, 但动荷载作用引起的溜桩区间则是  $\phi 1500$  mm 的打入桩更长, 沉桩控制更难。

4) 采用珊瑚礁砂地层打入桩溜桩深度预测方法所预判的溜桩区间基本与实际沉桩发生的溜桩区间一致, 基于此提出的沉桩控制方法均实现码头区域桩基多次短距离溜桩到良好土层, 未发生长距离溜桩, 降低溜桩引起的施工风险。

#### 参考文献:

- [1] 刘修成, 徐杰, 游新鹏, 等. 珊瑚礁地质大直径钢管打入桩承载特性研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(6): 157-163.  
LIU X C, XU J, YOU X P, et al. Study on bearing behavior of large diameter driven steel pile in coral reef geology[J]. The ocean engineering, 2019, 37(6): 157-163.
- [2] 邓鑫. 循环荷载作用下珊瑚砂地基中单桩竖向承载特性试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.  
DENG X. Experimental study on vertical bearing capacity of single pile in coral sand foundation under cyclic loading[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [3] 彭宇彤. 珊瑚钙质砂锤击钢管桩贯入机理试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
PENG Y X. Experimental research on penetration mechanism of driving steel pipe pile in coral calcareous sand[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [4] 张衍林, 马小秋. 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[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(5): 725-729.

ZHANG Y L, MA X Q. Calculation and time effect of bearing capacity of large diameter driven steel pipe pile in coral reef[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural science edition), 2020, 52 (5): 725-729.

[5] 秦伟,戴国亮,马李志,等. 珊瑚礁地层中 PHC 桩原位静载试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 381-389.

QIN W, DAI G L, MA L Z, et al. In-situ static loading tests of prestressed high strength concrete (PHC) pile in coral strata[J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(S1): 381-389.

[6] 郭生昌,吴少霖. 沉桩施工溜桩问题分析及解决措施[J]. 水运工程, 2011(12): 163-166.

GUO S C, WU S L. Problems of rapid pile sinking during pile driving solutions [J]. Port & waterway engineering, 2011(12): 163-166.

[7] 李飒,王耀存,蒲玉成,等. 海洋平台打桩过程中溜桩对桩基影响的研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36 (1): 462-467.

LI S, WANG Y C, PU Y C, et al. Influence of pile sinking on pile capacity during pile driving on offshore platforms [J]. China earthquake engineering journal, 2014, 36 (1): 462-467.

[8] MCCLELAND B. Calcareous sediments: an engineering

enigma[C]//Proceedings of the first international conference on calcareous sediments. Perth: [s. n. ], 1988(2): 777-787.

[9] 贾沼霖. 海洋平台大直径超长桩动态沉桩阻力及溜桩机制研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.

JIA Z L. Study on the dynamic penetration resistance and mechanism of free-running of large diameter and super long ocean platform piles [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.

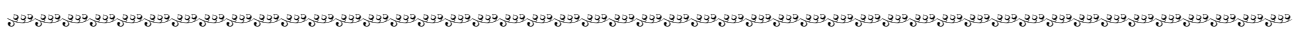
[10] 闫澍旺,陈浩,贾沼霖,等. 基于能量法的大直径超长钢管桩溜桩问题分析[J]. 海洋工程, 2016, 34(3): 63-71.

YAN S W, CHEN H, JIA Z L, et al. Research on the mechanism and calculation method for pile-running of long and large diameter piles based on energy conservation method [J]. The ocean engineering, 2016, 34(3): 63-71.

[11] 张驰,赖俊荣,阮芳伟,等. 海洋钢管桩发生溜桩的地层条件及桩侧动摩阻力计算方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 355-361, 391.

ZHANG C, LAI J R, RUAN F W, et al. Strata condition for steel pipe pile runs and calculation method of dynamic skin friction of pile in ocean engineering [J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43(S2): 355-361, 391.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 141 页)

[7] 张羽,杨朝辉,赵集云,等. 弯曲河段船闸引航道通航水流条件模拟[J]. 水运工程, 2022, (6): 132-138.

ZHANG Y, YANG Z H, ZHAO J Y, et al. Simulation of navigable flow conditions for approach channel of ship lock in curved reach [J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 132-138.

[8] 何飞飞,王晓刚,王彪,等. 基于等面积法的透空式隔流墙二维水流数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电: 2021(10): 86-91.

HE FF, WANG X G, WANG B, et al. Numerical simulation of two-dimensional water flow through a permeable bulkhead based on the equal area method [J]. China rural water and hydropower, 2021(10): 86-91.

[9] 王彪,何飞飞,王效远,等. 弯曲窄槽型河段多线船闸通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(4): 108-115.

WANG B, HE FF, WANG X Y, et al. Study on navigable flow conditions of multi-lane lock in curved narrow channel section [J]. Port & waterway engineering, 2021(4): 108-115.

[10] 张湛,刘洋,赵凯. 急弯河段新建船闸上游引航道通航条件研究[J]. 水运工程, 2024(7): 104-110, 116.

ZHANG Z, LIU Y, ZHAO K. Navigation conditions of approach channel upstream of newly built ship lock in sharp bend river section [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 104-110, 116.

(本文编辑 赵娟)