

# 大直径嵌岩斜桩冲击成孔速度的影响因素分析

胡培强<sup>1</sup>, 王志明<sup>2</sup>, 周伏萍<sup>1</sup>, 谭松成<sup>\*2</sup>, 尧在雨<sup>1</sup>, 段隆臣<sup>2</sup>

(1. 江西省地质工程(集团)公司, 江西南昌 330029; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:**随着工程建设向外海、深水区域不断发展,大直径嵌岩灌注斜桩因具有更好的承受水平荷载能力,在港口、码头等构筑物基础施工中得到了广泛的应用。受工程场地和桩孔设计参数等的影响,该类嵌岩桩多采用冲击成孔的施工方式,且其持力层的成孔速度相对其他灌注桩施工方法仍然非常低(0.1~0.3 m/h)。基于此,本文建立了大直径嵌岩斜桩冲击成孔过程中的冲锤下落受力模型,并通过单因素分析和双因素耦合分析的方式研究了冲锤质量、冲击行程、桩孔斜度,以及冲锤与钢护筒之间的摩擦系数等因素对冲击成孔速度的影响规律。分析认为,在桩孔斜度确定的情况下,冲锤质量和冲击行程是影响冲击成孔效率的主要因素,而摩擦系数的影响可以不作具体要求。

**关键词:**嵌岩桩;斜桩;冲击成孔;成孔速度

**中图分类号:**TU473.1<sup>+</sup>4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)02-0104-06

## Influencing factors analysis of the rate of penetration during the percussion drilling of large diameter rock-socketed inclined pile

HU Peiqiang<sup>1</sup>, WANG Zhiming<sup>2</sup>, ZHOU Fuping<sup>1</sup>, TAN Songcheng<sup>\*2</sup>, YAO Zaiyu<sup>1</sup>, DUAN Longchen<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Geo-engineering (Group) Corporation, Nanchang Jiangxi 330029, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Nowadays, engineering construction tends to offshore and deep-water areas. As a result, large diameter rock-socketed inclined (RSI) pile has been widely applied in structures foundation in port and dock areas due to its better ability to withstand horizontal loads. However, because of limited construction sites and designed piles parameters etc., the RSI piles construction is usually carried out by percussion drilling, with its rate of penetration (ROP, 0.1~0.3m/h) much lower than that of cast-in-place piles by other construction methods. Based on this, a force model of punch hammer was established in this paper, to study its forced state of dropping process when it is applied to drill a large diameter RSI pile. The influence laws of hammer weight, stroke, pile inclination, and friction coefficient between the punch and steel guard were studied by single-factor and two-factor analyses respectively. According to the analyses, it is found that the hammer weight and stroke are the key factors affecting the ROP of RSI piles when the pile inclination is constant, and the influence of friction coefficient can be ignored to a certain degree.

**Key words:** rock-socketed pile; inclined pile; percussion drilling; speed of piles completion

## 0 引言

近年来,工程建设逐渐向外海、深水区域发展,

跨海、跨江大桥也朝着大型化迈进,而桩基础因具有承载力强、穿透土层性能好、施工效率高等诸多

收稿日期:2020-10-21; 修回日期:2020-12-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.02.015

基金项目:国家自然科学基金项目“液动冲击回转作用下热压 WC-Cu 基孕镶金刚石钻头的磨损行为研究”(编号:41972327);江西省地质工程(集团)公司地基与基础新技术集成研究项目“嵌岩斜桩冲击钻进成孔关键技术研究”(编号:2020056101)

作者简介:胡培强,男,汉族,1979年生,总工程师,主要从事地基与基础工程施工、地质勘查、页岩气调查开发等工作,江西省南昌市京山南路23号。

通信作者:谭松成,男,汉族,1986年生,副教授,主要从事岩土钻掘材料和机具与岩土体的相互作用过程研究工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,wstansongcheng@cug.edu.cn。

引用格式:胡培强,王志明,周伏萍,等.大直径嵌岩斜桩冲击成孔速度的影响因素分析[J].钻探工程,2021,48(2):104-109.

HU Peiqiang, WANG Zhiming, ZHOU Fuping, et al. Influencing factors analysis of the rate of penetration during the percussion drilling of large diameter rock-socketed inclined pile[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 104-109.

优点,被普遍应用于跨海(河)桥梁工程、港口工程,以及海上作业平台等工程中<sup>[1-3]</sup>。其中,嵌岩斜桩可以通过轴向受压和受拉来承受部分水平载荷,而不是像直桩一样仅能通过受剪和受弯来承载,因此相比同尺寸与埋深的直桩而言具有更大的刚度和承载能力<sup>[4-7]</sup>。在需要承受波浪、大风等较高水平载荷的建(构)筑物(如桥梁码头、大型运动场馆、输电线塔架基础等)施工中,大直径嵌岩斜桩已经得到了广泛的应用与推广<sup>[8-12]</sup>。

国内外学者针对大直径嵌岩斜桩的设计理论、室内模型试验和承载特性等方面已经开展了大量的理论与实践研究,然而跟施工技术有关的研究仍以结合具体施工案例进行经验总结为主。目前,大直径嵌岩斜桩主要采用冲击成孔钻进施工,然而该方式的成孔效率相较于其他施工方法仍存在较大差距<sup>[13-16]</sup>。基于此,本文针对大直径嵌岩斜桩的冲击成孔过程进行研究,从而为改进冲击成孔工艺和提高成孔效率提供理论依据。

### 1 大直径嵌岩斜桩成孔难点分析

大直径嵌岩斜桩对施工设备、施工工艺的要求比较高,技术风险较大。在该类桩型的应用初期阶段,其常用的施工工艺为传统钻孔灌注成孔法,或带有导向装置的改型回转钻机钻进成孔<sup>[17-21]</sup>。然而,采用传统的钻孔灌注桩施工技术进行大直径嵌岩斜桩施工时,存在诸如设备繁琐笨重、造价高、成孔速度慢、钻头损耗大,以及钻进事故多发等问题,难以满足项目高工效、低成本的综合要求。同时,大直径嵌岩斜桩施工,尤其是在河流或海港码头上进行施工时,其施工平台往往是简易搭设的钢平台,此时普通回转钻机难以倾斜安装,造成斜桩成孔困难大;若采用可调节大角度成孔的旋挖钻机施工,则受旋挖钻机自重太大的影响,普通钢结构平台难以满足施工要求;而选择采用冲击钻机配合普通的十字冲击钻头成孔,则钻头频繁上下运动容易挂到钢护筒底口,且冲击钻进效率低。

生产实践表明,为解决上述大直径嵌岩斜桩施工难题,采用冲击钻机配合圆筒形冲锤钻进成孔是一种较优的解决方案,且其成孔效率与桩径、斜率、入岩深度、基岩强度等因素密切相关,而冲锤的单次冲击破岩效率则主要由冲击工艺参数和冲锤的结构特征决定。为此,需要对冲锤在单次下行(冲

击)运动中的受力状态进行理论分析,从而为冲击工艺和冲锤结构优化提供理论依据。

### 2 冲锤轴向运动分析

嵌岩斜桩冲击钻进成孔过程中,冲锤的受力示意图如图 1 所示。因冲击成孔过程中孔内灌满了泥浆,且泥浆的液面高度大于地下水位线,因此冲锤整个行程都位于液面以下,全程受到浮力的作用。

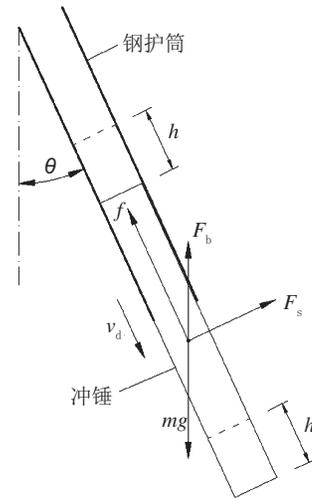


图 1 冲锤下落受力示意

Fig.1 Forced state of hammer during its dropping process

如图 1 所示,对冲锤的受力沿平行于成孔方向和垂直于成孔方向进行分解,可得受力方程组如式(1)所示:

$$\begin{cases} (\cos\theta - f) = ma_d \\ (mg - F_b)\sin\theta = F_s \\ f = \mu F_s \\ F_b = \rho_l g V \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m$ ——冲锤质量,kg; $g$ ——重力加速度,9.81 m/s<sup>2</sup>; $a_d$ ——不考虑泥浆阻力时,冲锤下落的加速度,m/s<sup>2</sup>; $F_b$ ——孔内液体对冲锤的浮力,N; $F_s$ ——钢护筒对冲锤的支撑力,N; $\theta$ ——斜孔与竖直方向的夹角,(°); $f$ ——钢护筒对冲锤的摩擦阻力,N; $\mu$ ——钢护筒与冲锤之间的摩擦系数; $\rho_l$ ——孔内液体的密度,kg/m<sup>3</sup>; $V$ ——冲锤体积,m<sup>3</sup>。

由式(1)可得冲锤下落时的加速度表达式(2):

$$a_d = g(1 - \frac{\rho_l}{\rho_s})(\cos\theta - \mu \sin\theta) \quad (2)$$

设冲锤的冲击行程为  $h$ ,则冲锤的下落时间  $t_d$ 和

冲锤落底时的冲击速度  $v_d$  分别如式(3)、(4)所示:

$$t_d = \sqrt{2h/a_d} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_d &= \sqrt{2a_d h} \\ &= \sqrt{2gh(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s})(\cos\theta - \mu \sin\theta)} \end{aligned} \quad (4)$$

根据能量守恒原理,则冲锤对孔底岩石的单次冲击功  $W_1$  如式(5)所示:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{1}{2} m v_d^2 = m a_d h \\ &= mgh(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s})(\cos\theta - \mu \sin\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

设岩石的单位体积破碎功为  $W_0$ , 则:

$$W_0 = \frac{60 W_1 n_1}{V_r} \quad (6)$$

式中:  $n_1$ ——单位时间内的冲击次数,次/min;  $V_r$ ——单位时间内(每小时)的破岩体积,  $V_r = \frac{1}{4} \pi D_1^2 v_p$ ,  $m^3/h$ ;  $D_1$ ——冲锤的外径,  $m$ ;  $v_p$ ——冲锤成孔速度,  $m/h$ ;

单位时间内的冲击次数与单次的冲程密切相关,可对现场冲击结果进行回归分析,建立两者之间的对应关系。根据现场实践的经验公式<sup>[20]</sup>可知:

$$n_1 = 20.82e^{-0.38h}$$

式中:  $n_1$ ——冲锤的冲击频率,次/min。

则嵌岩斜桩的冲击成孔效率  $v_p$  可表示为:

$$v_p = \frac{240mgh}{\pi D_1^2 W_0} (1 - \frac{\rho_1}{\rho_s})(\cos\theta - \mu \sin\theta)(20.82e^{-0.38h}) \quad (7)$$

由式(7)可知,冲锤的破岩效率与钻头的质量和冲程呈正比,与桩孔直径、地层的破岩比功和桩孔的倾角呈反比。

根据在温州港状元港区化工码头的实践经验可知,在桩孔斜度  $1/6$ 、桩径  $1400 \text{ mm}$  时,采用特定结构的筒状冲击钻头在中风化花岗斑岩中进行施工时,其冲锤质量  $m$  为  $8 \text{ t}$ ,冲程  $h$  为  $1.0 \text{ m}$ ,成孔速度为  $0.1 \sim 0.3 \text{ m/h}$ <sup>[17]</sup>。其他相关参数包括桩孔内泥浆密度为  $1.4 \text{ g/cm}^3$ ,筒状钻头的钢材密度为  $7.85 \text{ g/cm}^3$ ,筒状钻头与钢护筒之间的摩擦系数为  $0.075$ 。根据式(5)和(6),可得该工程场地的基岩单位体积破岩比功约为  $3.48 \times 10^8 \text{ J/m}^3$ 。

值得说明的是,本文所采用的基岩单位体积破岩比功计算模型除了与基岩物理力学性能有关之

外,还与冲击钻头的结构密切相关。因此,即使在基岩类型相同时,由于冲击钻头结构和冲击工艺不同,其破岩比功会在一定范围内发生变化。

### 3 成孔效率影响因素分析

#### 3.1 单因素分析

以上述计算结果为例,在桩径  $1400 \text{ mm}$ 、单位体积破岩比功为  $3.48 \times 10^8 \text{ J/m}^3$  时,采用单因素的方式分析冲锤质量、冲程高度、桩孔斜度,冲锤与钢护筒的摩擦系数对大直径嵌岩斜桩成孔速度的影响,结果如图2所示。

由图2可知,在单因素作用下,冲锤质量( $6 \sim 15 \text{ t}$ )和冲锤与钢护筒之间的摩擦系数( $0.05 \sim 0.15$ )对冲击成孔效率的影响呈线性关系(见图2a、c),而冲击行程( $0.6 \sim 1.5 \text{ m}$ )和桩孔斜度( $0 \sim 1$ )对冲击成孔速度的影响呈非线性关系(见图2b、d)。在上述变量范围内,随着冲锤质量和冲击行程的增加,冲击成孔速度分别提高了  $150\%$  和  $77.59\%$ ;随着摩擦系数和桩孔斜度的增加,冲击成孔速度分别降低了  $1.68\%$  和  $34.59\%$ ,其中当桩孔斜度由  $0$  增加到  $1/3$  时,成孔速度降低了  $7.50\%$ 。

对比可知,单因素条件下,冲锤质量、冲击行程、桩孔斜度,以及冲锤与钢护筒间的摩擦系数对大直径嵌岩斜桩的成孔速度影响依次降低,其中冲锤质量和冲击行程的影响非常显著,而摩擦系数的影响非常低。分析认为,冲锤质量和冲击行程直接影响冲锤的势能,但因冲程增大会相应降低冲锤的冲击频率,因此其对冲击成孔速度的影响显著性会逐渐降低。

#### 3.2 双因素关联分析

为研究上述4个因素在双因素协同作用下对大直径嵌岩斜桩成孔速度的影响,依据式(7)中的理论模型,采用MATLAB对其进行数据分析,获得不同因素耦合条件下对大直径嵌岩斜桩成孔速度的影响如图3所示。为便于分析桩孔斜度和其他因素的耦合作用对成孔速度的影响,采用桩孔斜角的方式进行表述。桩孔斜角即为斜度的反正切函数角,其中桩孔斜角为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  时,对应的桩孔斜度分别约为  $1/11.43$ 、 $1/5.67$  和  $1/3.73$ 。

由图3(a)可知,冲锤质量和冲击行程对嵌岩斜桩成孔速度的影响较为相似,且二者的协同作用效果明显,具体表现为当冲锤质量和(或)冲击行程太

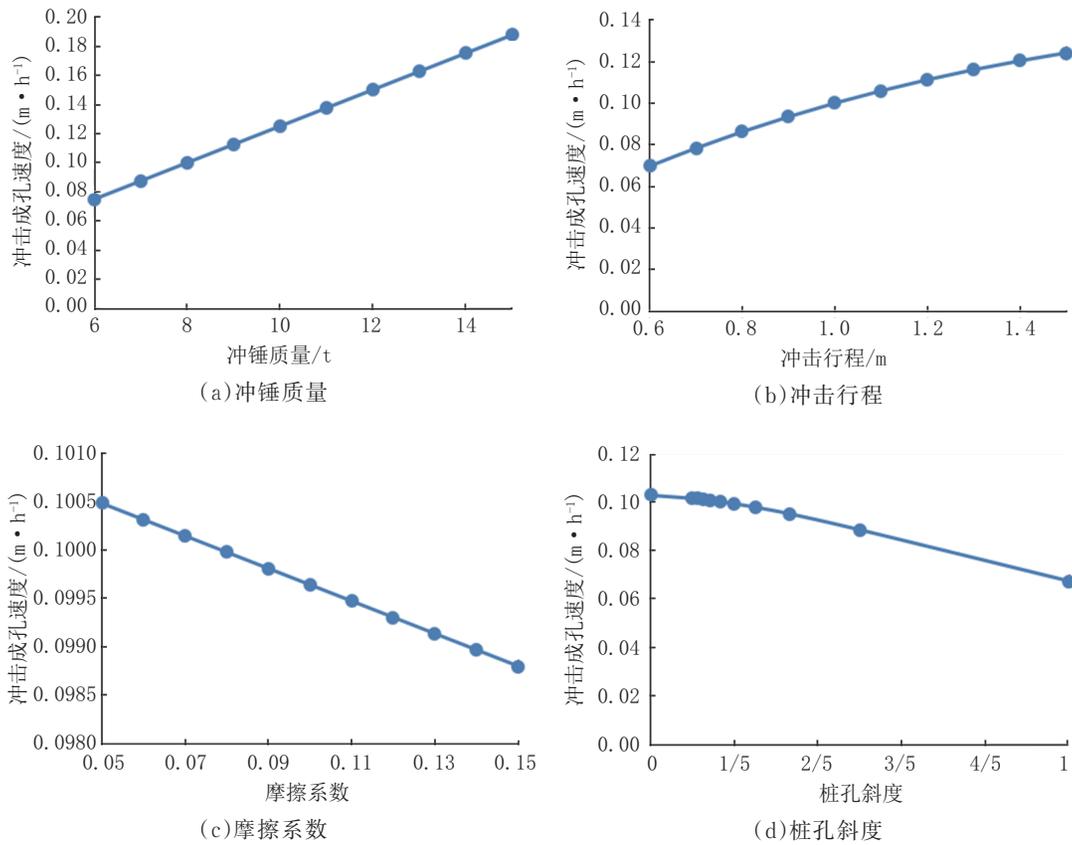


图2 各单因素对嵌岩斜桩冲击成孔效率的影响

Fig.2 Influences of single factors on the ROP of rock-socketed inclined pile by percussion drilling

小时,成孔速度也会受到极大的限制;随着冲锤质量和冲击行程的增大,成孔速度显著提高。图3(b)和(c)则再次表明,在桩孔斜角为0°~15°范围内的嵌岩斜桩冲击成孔施工中,冲击行程和冲锤质量对成孔速度的影响均会大于桩孔斜角的影响。随着冲击行程的增大,成孔速度会相应增加,但其影响的显著性会逐渐降低,且冲击行程的影响效果会随着桩孔斜角的增大有略微减小的趋势。图3(d)表明,在嵌岩斜桩的桩孔斜角为0°~15°之间时,摩擦系数在0~0.15之间进行变化时对冲击成孔效率的影响非常小。因此,冲击成孔施工时,孔内液体介质需要实现的主要功能是满足悬浮岩屑和保持孔壁稳定的作用,而液体的润滑性能可以不作具体要求。

#### 4 结论与建议

(1)在大直径嵌岩斜桩冲击成孔施工过程中,各因素对冲击成孔速度的影响显著性由大到小分

别为:冲锤质量、冲击行程(或冲击频率)、桩孔斜度,以及冲锤与钢护筒间的摩擦系数;

(2)双因素耦合作用效果表明,在冲锤质量和冲击行程恒定的条件下,桩孔斜角对冲击成孔速度的影响相对较小,且冲锤质量应大于5 t,冲击行程应大于0.8 m,具体工艺参数应根据施工现场条件来确定;

(3)冲击成孔速度理论模型中的基岩破岩比功,以及冲程与冲击频率之间的相互关系是通过生产实践数据进行统计和拟合而成,在实际应用过程中应进行相应修正;

(4)基岩的破岩比功除与本文理论模型中的冲击工艺和桩孔尺寸参数有关之外,还与冲锤的破岩结构单元密切相关,实际施工中应根据施工场地特征进行冲锤破岩结构单元优化设计,从而提高施工效率。

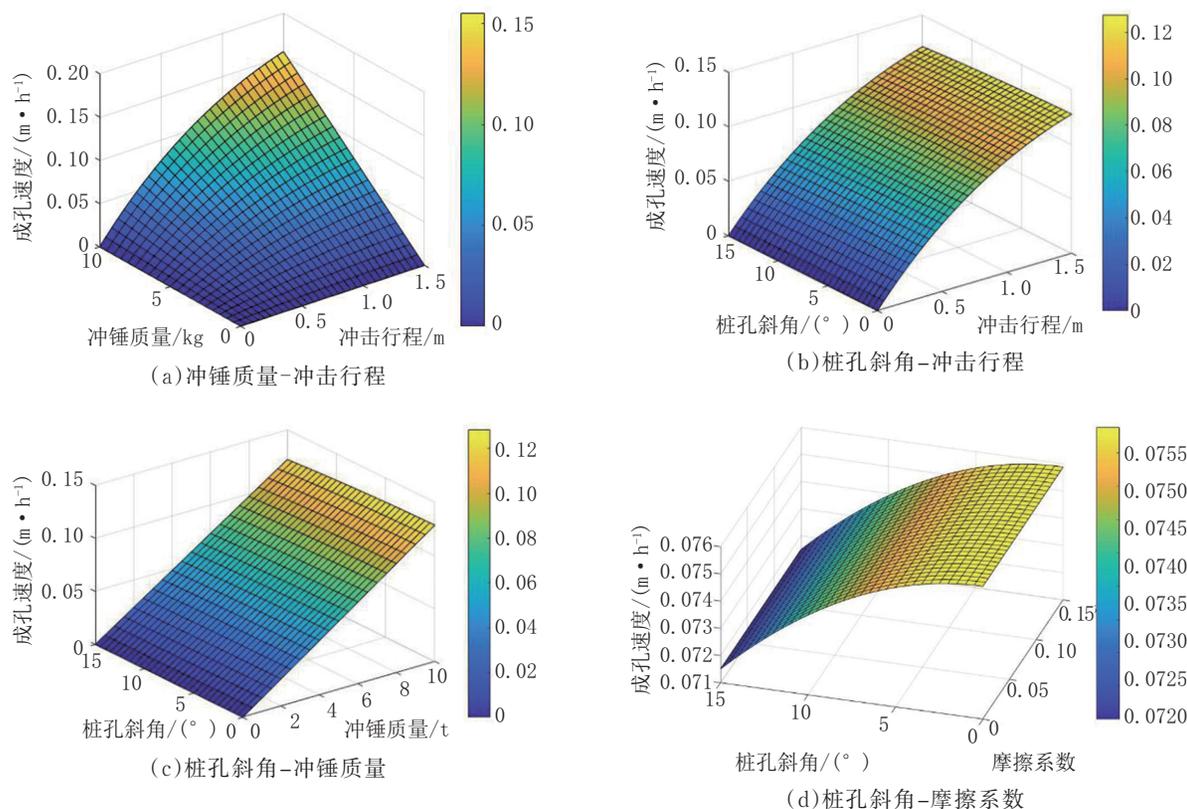


图3 双因素耦合作用对嵌岩斜桩成孔速度的影响

Fig.3 Coupling influences of two-factors on the ROP of rock-socketed inclined pile by percussion drilling

### 参考文献(References):

- [1] Poulos H.G. Raked piles-virtues and drawbacks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6): 795-803.
- [2] 王良中. 武隆羊角乌江大桥4号桥墩桩基斜桩开挖施工[J]. 山西建筑, 2009, 35(26): 324-325.  
WANG Liangzhong. Pile foundation inclined pile excavation construction of the No. 4 bridge pier of Wulongyangjiao Wujiang large bridge [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(26): 324-325.
- [3] Álamo G.M., Martínez-Castro A.E., Padrón L.A., et al. Efficient numerical model for the computation of impedance functions of inclined pile groups in layered soils [J]. Engineering Structure, 2016(126): 379-390.
- [4] 张利强. 薄壁桥台嵌岩桩基础斜桩与直桩设计方案的比较[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(11): 75-77.  
ZHANG Liqiang. Comparison of design schemes of inclined pile and vertical pile in embedded rock pile of thin walled abutment [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(11): 75-77.
- [5] Berrill J.B., Christensen S.A., Keenan R.P., et al. Case study of lateral spreading forces on a piled foundation [J]. Geotechnique, 2001, 51(6): 501-517.
- [6] 徐江, 龚维明, 张琦, 等. 大口径钢管斜桩竖向承载特性数值模拟与现场试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2434-2440, 2447.  
XU Jiang, GONG Weiming, ZHANG Qi, et al. Numerical simulation and field test study on vertical bearing behavior of large diameter steel of inclined piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2434-2440, 2447.
- [7] 高树飞, 贡金鑫, 冯云芬. 国内外高桩码头抗震性能和设计方法研究进展 III: 斜桩和桩-上部结构连接的抗震性能[J]. 水利水电工程学报, 2017, 7(2): 16-28.  
GAO Shufei, GONG Jinxin, FENG Yunfen. Advances in research on seismic performance and design methods for pile-supported wharves Part III: Seismic performance of batter piles and pile-superstructure connections [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017, 7(2): 16-28.
- [8] 左明福. 深水大直径钻孔灌注桩若干问题当议[J]. 中国港湾建设, 2006(5): 33-35.  
ZUO Mingfu. Discussion on large diameter bored piles in deep waters [J]. China Harbour Engineering, 2006(5): 33-35.
- [9] Pang Y.T., Yuan W.C., Wei K., et al. Numerical simulation in dynamic analysis of deepwater group pile foundation of bridges

- [C]//International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, ICETCE 2011-Proceedings, 2011:492-495.
- [10] 梁昆,张禹,陈冬宇.海上钢管嵌岩桩斜桩施工技术[J].中国港湾建设,2014(11):55-57.  
LIANG Kun, ZHANG Yu, CHEN Dongyu. Offshore construction of batter pile of steel pile rock-socketed pile[J]. China Harbour Engineering, 2014(11):55-57.
- [11] Yin Y., Cai W. Analysis of hydraulic hammer capacity under different inclination[C]//Proceedings-2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing, WCMEIM, 2019: 164-168.
- [12] González F., Carbonari S., Padrón L.A., et al. Benefits of inclined pile foundations in earthquake resistant design of bridges [J]. Engineering Structure, 2020(203):109873.
- [13] 金勤胜,赵江,姚院峰,等.旋挖钻孔灌注桩的混凝土充盈系数控制与现场试验[J].地质科技情报,2019,38(3):250-255.  
JIN Qinsheng, ZHAO Jiang, YAO Yuanfeng, et al. Control and field tests of the concrete filling coefficient of cast-in-place piles dug by rotary drilling rig[J]. Geological Science and Technology Information, 2019,38(3):250-255.
- [14] Wang S., Orense R.P. Modelling of raked pile foundations in liquefiable ground[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014(64):11-23.
- [15] 刘忠友,王振红.冲击钻在斜孔嵌岩钻孔中的开发利用[J].水运工程,2007(12):131-134.  
LIU Zhongyou, WANG Zhenhong. Exploitation and application of cable drilling in rock-embedding borehole of inclined hole [J]. Port & Waterway Engineering, 2007(12):131-134.
- [16] 彭卫东.冲击式钻机在钢管嵌岩斜桩施工中的应用[J].水运工程,2009(6):140-143.  
PENG Weidong. Application of impact drilling in rock-embedding oblique steel pipe piles[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(6):140-143.
- [17] 尧在雨,周伏萍,胡培强,等.嵌岩斜桩冲击钻进成桩施工工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):84-88.  
YAO Zaiyu, ZHOU Fuping, HU Peiqiang, et al. Construction technology for slant rock-socketed piles[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(10):84-88.
- [18] 雷斌,李波,王晶,等.海上平台嵌岩灌注斜桩成桩综合技术研究[J].施工技术,2015,44(S1):155-160.  
LEI Bin, LI Bo, WANG Jing, et al. Research on comprehensive technology of embedded rock and inclined piles on offshore platform[J]. Construction Technology, 2015,44(S1):155-160.
- [19] 刘辉.海上平台大斜率整桩嵌岩施工成孔办法及应用[J].中小企业管理与科技,2018(7):189-191.  
LIU Hui. Construction method and application of large slope and whole pile rock socketed construction on offshore platform [J]. Management & Technology of SME, 2018(7):189-191.
- [20] 赵多苍,纪尊众,白玉川,等.跨海桥梁大直径钻孔桩冲击钻进参数研究[J].施工技术,2018,47(19):89-92.  
ZHAO Duocang, JI Zunzhong, BAI Yuchuan, et al. Study on percussion drilling technology parameters of large diameter bored piles of sea crossing bridge [J]. Construction Technology, 2018,47(19):89-92.
- [21] 唐爱国.YCJF-30型全液压冲击反循环钻机的研制与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(10):13-19.  
TANG Aiguo. Development and application of YCJF-30 full hydraulic percussive reverse circulation drill rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(10):13-19.

(编辑 周红军)