

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.

旋挖钻孔灌注桩的混凝土充盈系数控制与现场试验

金勤胜^{1,2}, 赵江^{2,3}, 姚院峰¹, 谭松成²

(1.中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071; 2.中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074;
3.广东省珠海工程勘察院, 广东 珠海 519002)

摘要:旋挖钻孔灌注桩在不稳定地层施工过程中因成孔质量差造成混凝土充盈系数过高,严重影响工程效益。基于此,分析了混凝土充盈系数的影响因素,在工程现场泥浆具有局限性的情况下,可以从控制最大允许提钻速度和改进钻头结构两方面开展研究工作。建立了最大允许提钻速度的理论计算模型,获得了环空比和泥浆密度对最大允许提钻速度的影响规律和显著性。针对具体工程地质条件,采用两瓣斗钻头结构,并从辅助排水孔和非光滑结构的合金球加强型截齿等方面进行改进设计,以提高旋挖钻进和排渣效率,从而降低成孔时间。现场试验结果表明,通过控制提钻速度和改进钻头结构,单桩旋挖成孔时间缩短 28.57%,旋挖钻孔的混凝土充盈系数降低 3.62%,显著节约了项目施工成本。

关键词:旋挖钻孔;灌注桩;混凝土;充盈系数;提钻速度;旋挖钻头

中图分类号:P634.2 文献标志码:A 文章编号:1000-7849(2019)03-0250-06

Control and Field Tests of the Concrete Filling Coefficient of Cast-in-Place Piles Dug by Rotary Drilling Rig

Jin Qinsheng^{1,2}, Zhao Jiang^{2,3}, Yao Yuanfeng¹, Tan Songcheng²

(1. Central South China Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China; 3. Guangdong Zhuhai Institute of Engineering Survey, Zhuhai Guangdong 519002, China)

Abstract: During the construction of cast-in-place piles by rotary drilling rig bit in the instable formation, low hole quality usually results in high concrete filling coefficient and more project costs. Aiming at this problem, this paper analyses influencing factors for the filling coefficient and suggests that controlling the maximum lifting velocity and optimizing rotary digging bit structure should be useful when drilling mud has some problems in the construction site. By establishing a theoretical model of the maximum lifting velocity, the effects and significances of annular ratio and mud density to the maximum lifting velocity are obtained. More importantly, ringent bit structure is employed according to a detailed engineering geology condition, and some specially designed characters, such as auxiliary drain holes, non-smooth cutter enhanced by tungsten carbide balls, are applied to improve rotary drilling rig and discharge efficiencies. Field test results indicate that, controlling the maximum lifting velocity and optimizing rotary digging bit structure can shorten the rotary digging time of a single pile by 28.57%, and reduce the concrete filling coefficient by 3.62%. The research results can save construction cost significantly and be helpful for the similar

收稿日期: 2019-01-02

编辑: 杨勇

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602373;41672364);中南电力设计院有限公司委托项目(KH176273)

作者简介: 金勤胜(1975—),男,高级工程师,主要从事岩土勘测与岩土设计相关工作。E-mail: jinqinsheng@csepi.com

通信作者: 谭松成(1986—),男,讲师,主要从事钻探技术与钻探工艺相关教学与研究工作。E-mail: wstansongcheng@cug.edu.cn

engineering.

Key words: rotary drilling; cast-in-place pile; concrete; filling coefficient; lifting velocity; rotary digging bit

随着国民经济的迅速发展,我国在交通、电力和市政工程等行业的施工领域存在巨大的市场需求,采用旋挖钻机进行环保型桩基工程施工也已经成为一门方兴未艾的施工技术^[1-3]。在实际旋挖成孔过程中,由于局部填土层、砂层和卵砾石层等扩径或坍塌严重,成孔质量低,造成混凝土充盈系数过大,严重影响工程效益^[4-7]。

混凝土充盈系数定义为钻孔灌注桩的实际混凝土用量与理论用量的比值,充盈系数越高,表明桩孔扩径越大。对于大型桩基工程项目而言,将充盈系数控制在合理范围之内,可显著节省混凝土的用量,降低施工成本。

混凝土充盈系数过高的直接原因是旋挖钻孔的成孔质量差。为提高旋挖钻孔灌注桩的成孔质量,多位研究者^[8-11]分别建立了孔壁稳定性的数学模型,并提出了相应的泥浆护壁措施;孔伟等^[12]分析了起下钻过程对孔壁稳定性的影响,提出了最佳提钻速度的理论计算方法;王俊利等^[13]对砂卵石层钻进用短螺旋钻头进行了优化设计,并采用泥浆护壁等方法来提高成孔质量;林伟等^[14]根据溶洞的洞高及充填物情况差异,针对性地提出了旋挖桩施工质量控制措施;卜贵贤等^[15]针对粉质黏土地基易缩径,而砂土地基易塌孔、沉渣等问题开展了旋挖桩孔施工工艺和质量控制研究,认为常规压水法和黄土浆液难以满足施工需求,应采用膨润土、护壁剂和纤维素等材料配置泥浆来保证钻孔质量。

上述研究成果在工程施工中都获得了一定的效果,也表明泥浆的使用及其性能对于旋挖钻孔灌注桩的成孔质量有着至关重要的作用。然而,受环境保护和工程成本等因素的影响,施工现场通常采用清水混合桩孔中的黏土矿物进行自然造浆,其性能指标难以满足施工要求。因此,有必要研究在泥浆性能不佳时,通过其他途径来降低旋挖钻孔灌注桩的混凝土充盈系数。

1 混凝土充盈系数的影响因素

混凝土充盈系数的主要影响因素包括泥浆性能、施工工艺、旋挖钻头与钻具等。旋挖钻孔灌注桩施工过程中,泥浆性能主要考虑密度、黏度和降失水量,针对不同地层应配置具有不同性能的泥浆。在松散、易垮塌的砂卵石层及破碎带地层中钻进时,通常泥浆密度大于 1.05 g/cm^3 ,漏斗黏度为 $25 \sim 50 \text{ s}$,失水量小于 10 mL/30 min ^[16-19];在强黏性的水敏性

地层中钻进时,通常泥浆密度大于 1.10 g/cm^3 ,漏斗黏度为 $20 \sim 40 \text{ s}$,失水量为 $3 \sim 5 \text{ mL/30 min}$ ^[17,20]。

旋挖钻进工艺主要包括转速、钻压、进尺速度,以及起下钻速度 4 个方面。转速过快会导致钻杆、钻头摆动过大,对孔壁造成冲刷,降低旋挖钻孔质量。钻压与进尺速度密切相关,进尺速度通常随着钻压的增大而提高。然而,大钻压会导致旋挖钻头切削齿的切削深度和回转扭矩增加,造成孔斜等孔内复杂事故,进而延长施工周期并影响桩孔质量^[21]。起下钻过程中,泥浆会对孔壁产生波动(抽汲或激动)压力,起下钻速度越快,波动压力的作用越明显。当泥浆黏度较大,或地层本身松散易坍塌时,提钻速度过快会导致旋挖钻头下方形成真空负压区域,引起孔壁垮塌。

旋挖钻头种类繁多,包括捞砂斗、两瓣斗、筒钻和螺旋钻等。钻头类型与所钻地层不适应时,不仅钻进效率低,还会增加钻头刮削孔壁的概率,导致孔壁坍塌和桩孔扩径的现象^[22-23]。因钻头与孔壁间的环状过流面积太小,钻头在提钻过程中容易形成“活塞”效应,使孔底产生真空负压区,造成孔壁坍塌。该现象在黏土含量高的地层钻进时表现尤为明显,裹附在钻头表面的黏土将进一步减小环状过流面积。

综上所述,在泥浆性能不能满足施工需求、旋挖钻进转速与钻压相对稳定,且不考虑钻机操作者熟练程度的前提下,只能从控制起下钻速度和改进旋挖钻头结构参数 2 个方面来降低旋挖钻孔灌注桩的混凝土充盈系数,从而节约施工成本。

2 起下钻速度的优化

在充满泥浆的桩孔中下放钻具时会产生附加激动压力,而上提钻具时会产生抽汲压力。激动压力会增大泥浆的有效液柱压力,而抽汲压力会降低泥浆的有效液柱压力。

在起下钻过程中,保持孔壁稳定的基本原则是,孔壁上任意位置处的有效液柱压力大于或等于其孔隙水压力^[12,24],即:

$$P_e = P_m + P_f \geq P_p \quad (1)$$

其中: $P_m = \rho_m g h_m$, $P_p = \rho_p g h_p$, $P_f = \frac{196 f \rho_m \bar{v}^2 L}{D - d}$ 。

式中: P_e 为孔内的有效液柱压力(kPa); P_m 为孔内的液柱压力(kPa); P_p 为地层孔隙压力(kPa); P_f 为起下钻过程中产生的波动压力(kPa),激动压力为

正,抽汲压力为负; ρ_m 为孔内泥浆密度(g/cm^3); ρ_p 为地层孔隙水密度(g/cm^3); h_m 为孔壁上某点至孔内泥浆液面的高度(m); h_p 为孔壁上某点至地层地下水线的高度(m); g 为重力加速度(m/s^2); f 为摩擦系数,无量纲; $\bar{v}$ 为钻具与孔壁间环空的泥浆平均流速(m/s); L 为泥浆中运动管柱的长度(m); D 为钻孔直径(cm); d 为运动管柱外径(cm),在旋挖钻进中为旋挖钻头筒体的外径。

由式(1)可知,抽汲压力受环空中的泥浆平均流速影响显著。而在正常提钻过程中,旋挖钻头被渣土充填,且旋挖钻孔过程中泥浆处于无循环状态,可得环空泥浆的平均流速 $\bar{v}$ 计算公式如下^[25]:

$$\bar{v} = \left(\frac{d^2}{D^2 - d^2} + K_c \right) v_p \quad (2)$$

式中: K_c 为流体黏滞系数(无量纲); v_p 为钻具运动速度(m/s)。

在提钻过程中,假设孔内泥浆处于连续状态,即提钻后旋挖钻头底部的空间立刻被环空中的泥浆所填充,则不会产生真空负压区。结合式(1),(2)可得最大允许提钻速度 $v_{p\max}$ 如下所示:

$$v_{p\max} = \frac{D^2 - d^2}{D^2 K_c + d^2(1 - K_c)} \cdot \sqrt{\frac{g(\rho_m h_m - \rho_p h_p)(D - d)}{196 f \rho_m L}} \quad (3)$$

设环空比 $a = d/D$,钻头刚提离孔底时所允许的提钻速度最小,此时有 $L = h_m$;设地层孔隙水密度 $\rho_p = 1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$,孔内泥浆液面地下水位线的关系为 $\Delta h = h_m - h_p$,则式(3)可表达为:

$$v_{p\max} = \frac{1 - a^2}{K_c + a^2(1 - K_c)} \cdot \sqrt{\frac{gD(1 - a) \left[1 - \frac{h_p}{\rho_m(h_p + \Delta h)} \right]}{196 f}} \quad (4)$$

由式(4)可知,在钻孔直径确定的情况下,最大允许提钻速度与钻具外径和泥浆摩阻系数成反比,与泥浆密度和泥浆超过地下水位线的高度成正比。

设钻孔直径 D 为 80 cm,摩阻系数 f 为 0.02,钻孔底部至地下水位线的高度 h_p 为 38 m, Δh 为 2 m,流体黏滞系数为 0.5。在分别假定泥浆密度为 1.05 g/cm^3 和环空比为 0.85 时,获得环空比和泥浆密度对最大许可提钻速度的影响规律(图 1)。

由图 1 可知,在环空比为 0.80~1.00 和泥浆密度为 1.0~1.2 g/cm^3 的分析区间内,环空比对最大允许提钻速度的影响更为显著。因此,为增加最大允许提钻速度,更为有效的途径是增大提钻过程中的环空过流面积,而增设排水孔则是最为直接的方式之一。当旋挖钻头底端面或侧面设计有排水孔

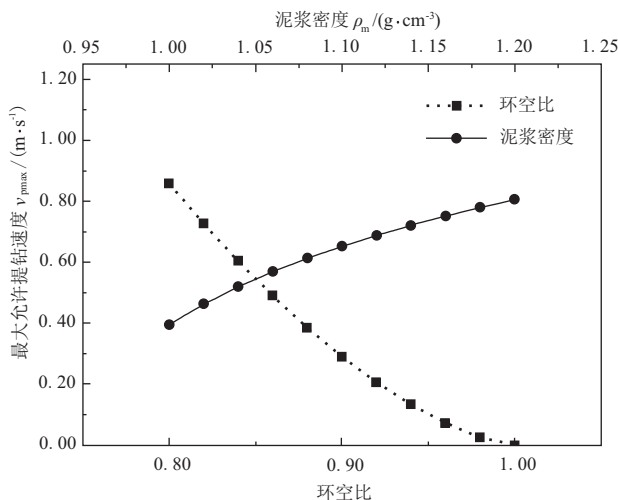


图 1 环空比和泥浆密度对最大许可提钻速度的影响规律

Fig.1 Effects of annular ratio and mud density on the maximum allowable lifting velocity

时,环空泥浆的平均流速和最大允许提钻速度分别如式(5),(6)所示:

$$\bar{v} = \left(\frac{d^2}{D^2 - d^2 + d_t^2} + K_c \right) v_p \quad (5)$$

$$v_{p\max} = \frac{D^2 - d^2 + d_t^2}{d^2 + K_c(D^2 - d^2 + d_t^2)} \cdot \sqrt{\frac{g(\rho_m h_m - \rho_p h_p)(D - d)}{196 f \rho_m L}} \quad (6)$$

其中: $d_t^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2$ 。

式中: d_t 为辅助排水孔的当量直径(cm), d_i 为第 i 个辅助排水口的直径(cm)。

3 旋挖钻头改进设计

3.1 施工地质条件

湖北某电厂工程位于长江南岸二级堆积阶地,地基土主要为人工堆积层、冲湖积层和冲洪积层,下伏基岩为风化的泥质砂岩和炭质页岩等。旋挖钻孔施工主要涉及素填土、粉质黏土、粉土、淤泥、含碎石黏性土、泥质砂岩和炭质页岩等,具体岩土力学性能如表 1 所示。施工难点主要表现为:① 素填土(Q^s)为近期人工堆积而成,含大量碎砖、碎混凝土块和建筑垃圾,土质松散;② 施工场地原为湖区,其冲湖积层粉质黏土(Q_4^{al+pl})呈软塑—可塑状态,且含有大量灰白色高岭土(Q_2^{al+pl}),而粉土层(Q_4^{al+pl})则处于饱和的松散—稍密状态,旋挖钻进过程中孔壁稳定性差。

表1 地基土力学性能指标

Table 1 Mechanical properties of foundation soils

岩土名称	代号	层厚/m	状态	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩系数 $a_{100-200}/\text{MPa}^{-1}$	地基承载力/kPa
杂(素)填土	Q^s	3.4~16.5	松散—稍密	23	13	0.44	80~100
粉质黏土	Q_4^{al+1}	2.3~35.6	软塑—硬塑	13~36	6~11	0.22~0.60	90~230
粉土	Q_4^{al+1}	1.10~5.8	稍密	10	10	0.40	70
粉质黏土	Q_3^{al+pl}	4.0~13.9	可塑—硬塑	24~41	12~22	0.14~0.26	170~260
粉质黏土	Q_2^{al+pl}	4.4~23.7	可塑—硬塑	27~39	14~16	0.20~0.24	190~330
黏土	Q_2^{al+pl}	2.4~34.6	软塑—硬塑	10~53	8~20	0.13~0.40	90~330
粉质黏土	Q_2^{al+pl}	1.9~19.7	可塑—硬塑	35~53	19~22	0.14~0.30	150~350
含碎石黏土	Q_2^{al+pl}	2.5~5.4	可塑—硬塑	42~67	14.7~19.5	0.12~0.25	230~320
泥质砂岩、炭质页岩	C_1	1.4~13.1	强—中风化	/	/	/	300~660

设计桩径为 800 mm, 桩深 35~40 m, 地下水位埋深较浅(距地表 1.2~2 m)。场地内混凝土充盈系数较大的原因是回填土和粉土层胶结强度低, 钻进过程中易产生孔壁坍塌; 场地内地基土的黏土矿物含量高, 清渣困难, 且淤泥层段极易发生缩径。

3.2 钻头结构改进设计

考虑到小口径(直径小于 1 m)旋挖钻进时, 如果钻遇强黏性地层, 则清渣时间所占比例会相对高很多^[26-27]。因此, 采用体开式两瓣斗钻头结构, 并对其关键结构特征进行优化设计, 如图 2 所示, 钻头两侧各有 2 个直径 80 mm 和 100 mm 圆形辅助排水孔。在正常旋挖钻进时, 辅助排水孔可加速钻头内部泥浆的排出, 平衡钻头内外液体压力, 因此有利于钻渣进入钻头内部。在提钻过程中, 钻头上部的泥浆可通过辅助排水孔排向环空, 一方面能减少钻头内部泥浆对钻渣的压持效应, 另一方面能增加环空泥浆的流速, 从而降低钻头底部产生真空负压的可能性。

当钻孔直径 D 为 80 cm, 钻头筒体外径 d 为 68 cm 时, 设摩阻系数为 0.02, Δh 为 2 m, 桩深 40 m (h_p 为 38 m, h_m 和 L 均为 40 m), 泥浆的自然造浆密度为 1.05 g/cm^3 。没有辅助排水孔时的最大允许

提钻速度为 0.54 m/s, 增加 4 个辅助排水孔后, 最大允许提钻速度可增大为 0.63 m/s。同理, 将钻头底端的水口设计成圆弧形, 在增大排水截面积的同时, 防止钻进过程中由于钻压和扭矩过大使得水口底部因应力集中而产生非正常破坏。

考虑到在强黏性地层中进行旋挖钻进时, 钻渣极易黏附在钻头和切削齿上, 造成钻进效率低下和清渣困难。参考土壤中动物非光滑体表结构(如蜣螂头部的非光滑凸包, 图 3-a)的降阻机理, 非光滑表面可使生物体表面的凸起部分与土壤之间存在一些空隙, 运动时有利于降低土壤压力对体表的作用, 从而降低摩擦阻力^[28-30]。改进后的两瓣斗钻头采用合金球加强型截齿(图 3-b), 其表面分布的凸出型合金球可减少切削齿与钻渣之间的接触面积, 使泥浆能更容易地侵入切削齿与钻渣之间的空隙中, 避免钻渣黏附在切削齿上, 从而提高钻头的钻进效率。同时, 将 2 个齿板上的多个截齿按照同心圆交错的方式进行布置, 增加切削齿在切削岩土时的切削自由面, 从而降低回转扭矩, 增加切削效率^[31-33]。

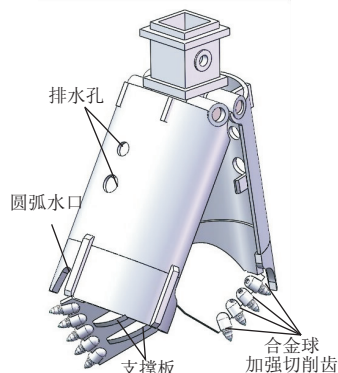


图2 旋挖钻头设计

Fig.2 Design sketches of the rotary digging bit

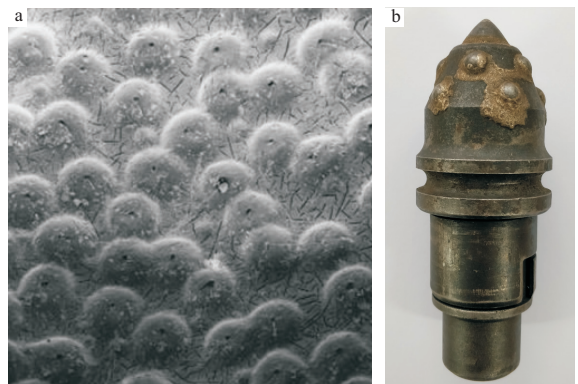
a.蜣螂头部的非光滑凸包结构^[20]; b.合金球加强型截齿

图3 非光滑结构的合金球加强型截齿

Fig.3 Nonsmooth structure cutter enhanced by tungsten carbide balls

此外, 将加强支撑板置于切削齿板的外侧, 使支

撑板在钻进时对锥形切削齿板起到推力支撑作用,同时也有利于钻渣进入和被甩出钻头,从而提高切削和排渣效率。

4 现场试验

采用改进后的两瓣斗在湖北某电厂工程项目进行旋挖钻孔施工时(图4),为避免提钻过程中钻头底部产生真空负压区,严格控制最大提钻速度不超过 0.5 m/s。

试验结果表明,采用改进后的两瓣斗钻进时都能实现满斗钻进和顺利排渣,且钻进过程中单趟回次进尺和排渣所花的时间均比改进前的常规两瓣斗少,证实改进后的钻头达到了提高切削进土和排渣效率的设计目的。常规两瓣斗的单桩钻孔时间约为 3.5 h,而改进后的两瓣斗单桩钻孔时间仅为 2.5 h 左右,钻进效率提高了 28.57%。此外,由于钻头两侧的排水孔设计和合金球加强型截齿设计,使被切削后的钻渣在钻头内处于松散堆积的状态。提钻过程中钻头上部的泥浆可以通过侧面排水孔和钻渣间的空隙流出,从而有效降低了钻头底部产生负压的可能性。



图4 旋挖钻头现场试验

Fig.4 Field tests of rotary digging bit

改进后的两瓣斗在湖北某电厂工程开展了 6 根灌注桩的钻进试验,其试验结果与该工地采用常规两瓣斗完成的 26 根灌注桩进行了施工质量对比分析,采用灌注桩孔径检测系统检测孔径,并对灌浆后的混凝土充盈系数进行比较,结果如图 5、6 所示。

如图 5 所示,常规两瓣斗施工完成的灌注桩直径为 850 mm 左右,而改进后的两瓣斗完成的灌注桩径基本维持在略大于 800 mm 的状态。2 种钻头施工情况下,均在桩深约 8 m 以浅部位存在扩径和

塌孔现象。其原因在于 5~8 m 深处的地基土为软塑—可塑状态的淤泥层,承载能力差,在长时间泥浆浸泡和起下钻引起的波动压力作用下,产生了显著的扩径坍塌现象。桩深 5 m 以浅部位扩径明显的原因,是由于护筒的高度为 4.8 m,且筒径大于 800 mm,起下钻引起的泥浆冲刷作用导致孔径扩大。

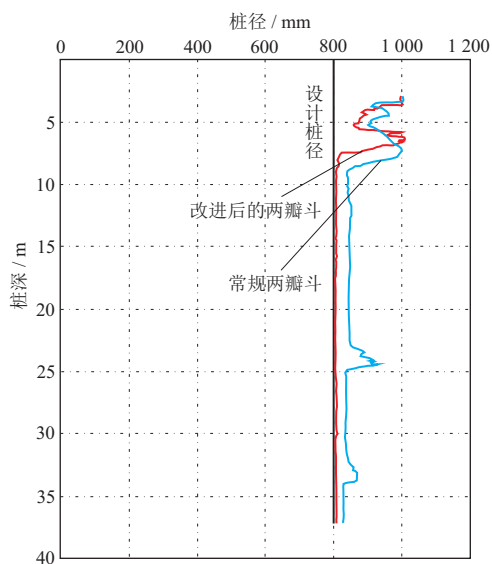


图5 灌注桩径对比

Fig.5 Comparison of cast-in-place pile diameters

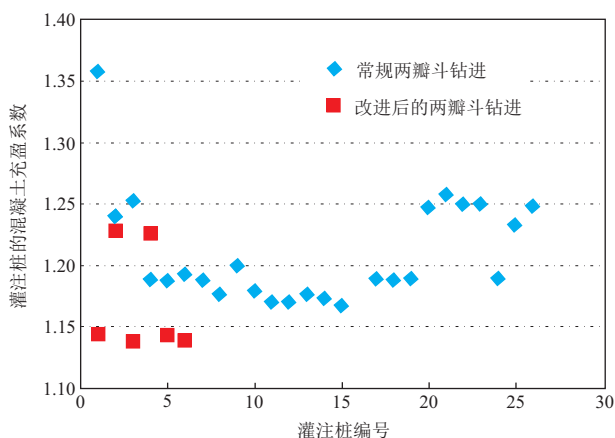


图6 混凝土充盈系数对比

Fig.6 Comparison of concrete filling coefficients

如图 6 所示,常规两瓣斗施工完成的灌注桩的混凝土充盈系数平均为 1.214,而采用改进后的两瓣斗进行施工时,灌注桩的混凝土充盈系数平均为 1.170。对比可知,改进两瓣斗的钻头结构后,灌注桩的混凝土充盈系数降低了 3.62%,对于大型桩基工程项目,这可显著提高经济效益。

5 结 论

(1)混凝土充盈系数的影响因素分析表明,在泥浆性能难以满足旋挖施工需求的条件下,可从控制提钻速度和改进旋挖钻头结构两方面进行研究。

(2)建立了最大允许提钻速度的理论计算模型,并分别获得环空比和泥浆密度对最大允许提钻速度的影响规律和显著性。

(3)针对具体工程地质条件,采用两瓣斗钻头结构,并从辅助排水孔、圆弧形水口、非光滑结构的合金球加强型截齿和外置支撑板等方面进行改进设计,从而提高旋挖钻进和排渣效率。

(4)采用改进后的钻头开展了6根桩的现场试验,并严格控制最大提钻速度不超过0.5 m/s,结果表明单桩旋挖成孔时间缩短了28.57%,旋挖钻孔的混凝土充盈系数降低3.62%,显著节约了项目施工成本,对类似工程施工具有借鉴与参考价值。

参考文献:

- [1] 张启君,张忠海,陈以田.旋挖钻机技术现状与市场前景[J].建筑机械化,2004,(6):13-16.
- [2] 刘三意.多工艺旋挖钻进技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
- [3] 冉灵杰,宋殿兰,刘家荣.30 m无循环取样钻机的研制[J].地质科技情报,2016,35(5):221-225.
- [4] 吕军斗,田文杰.旋挖钻机在无水砂卵石地层围护桩施工中的应用[J].建筑技术,2009,40(11):1010-1012.
- [5] 丁振明,廖秋林,单晓峰.大粒径漂石地层钻孔灌注桩施工技术[J].施工技术,2015,44(23):59-60,78.
- [6] 叶晓娟,祝晓东,吴昊.降低旋挖钻孔灌注桩混凝土充盈系数[J].水利建设与管理,2014,34(9):74-79.
- [7] 孙建胜.旋挖钻在复杂地质条件下充盈系数的控制与研究[J].铁道建筑,2012(11):101-103.
- [8] 李小青,郝行舟,朱宏平,等.大口径钻孔灌注桩的孔壁稳定研究分析[J].华中科技大学学报:城市科学版,2007,24(2):25-28.
- [9] 刘睦峰,彭振斌,王建军,等.砂卵石层泥浆护壁与旋挖钻进工艺[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(1):265-271.
- [10] Gill S A. Applications of slurry walls in civil engineering[J]. Journal of Construction Division, 1980, 106(2): 155-167.
- [11] 徐奋强,王旭.护壁泥浆与孔壁稳定性及极限孔深[J].兰州交通大学学报:自然科学版,2004,23(4):9-12.
- [12] 孔伟,段新胜,刘朝阳,等.旋挖钻机提钻速度对井壁稳定的影响分析[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2008,35(1):55-57.
- [13] 王俊利,刘会林.砂卵石地层中钻孔灌注桩成孔控制技术[J].施工技术,2011,40(13):75-76.
- [14] 林伟,阮永芬,高春钦,等.岩溶地区旋挖桩施工质量控制措施研究[J].施工技术,2018,47(增刊1):93-95.
- [15] 卜贵贤,蒿竹锋.粉黏土夹砂地基混凝土灌注桩的施工工艺与质量控制要点[J].水利与建筑工程学报,2010,8(6):90-93.
- [16] Stephens M P, Bruton J R. Fluid selection and planning for drilling unconsolidated formations[R] // Anon. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference, OTC-7021, 1992: 361-368.
- [17] 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新,等.钻井液与岩土工程浆液[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.
- [18] Al-Sammak I, Ahmed K, De S, et al. Coring unconsolidated formation-Lower fars: A case study[C] // Anon. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, MEOS, Proceedings, SPE-119918, 2009: 365-380.
- [19] 宋继伟,蒋国盛,李勇.南海珊瑚礁基底调查“琛科一井”钻探工艺[J].地质科技情报,2017,36(5):232-237.
- [20] Du H, Wang G, Deng G, et al. Modelling the effect of mudstone cuttings on rheological properties of KCl/Polymer water-based drilling fluid[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 170: 422-429.
- [21] Eshiet K I-I, Sheng Y. The performance of stochastic designs in wellbore drilling operations[J]. Petroleum Science, 2018(15): 335-365.
- [22] 黄玉文,冯美贵,翁炜,等.旋挖钻斗切削结构的优化改进及其应用[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2018,45(7):66-69.
- [23] 杨引娥.大口径旋挖钻具的研究及其应用[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2004,31(11):38-40.
- [24] 李天太.实用钻井水力学计算与应用[M].北京:石油工业出版社,2002.
- [25] 陈平.钻井与完井工程[M].北京:石油工业出版社,2005.
- [26] 刘家荣.复杂地层桩孔钻进工艺及机具研究[D].北京:中国地质大学(北京),2010.
- [27] 孙俊志.旋挖钻机钻头(泥斗)的改进[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2008,35(3):32-33.
- [28] 赵乐涛.仿生非光滑金刚石钻头的实验研究[D].长春:吉林大学,2007.
- [29] Wang Zhaozhi, Zhang Zhihui, Sun Youhong, et al. Wear behavior of bionic impregnated diamond bits[J]. Tribology International, 2016, 94: 217-222.
- [30] Wang Chuanliu. Experimental study on matrix wear resistance of bionic coupling bits[J]. Procedia Engineering, 2014, 73: 98-102.
- [31] 刘晓辉.镐型截齿与煤岩相互作用力学与磨损特性研究[D].北京:中国矿业大学,2016.
- [32] Li Xuefeng, Wang Shibo, Ge Shirong, et al. Numerical simulation of rock fragmentation during cutting by conical picks under confining pressure[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2017, 345: 890-902.
- [33] Kim E, Rostami J, Swope C, et al. Study of conical bit rotation using full-scale rotary cutting experiments[J]. Journal of Mining Sciences, 2012, 48(4): 717-731.