

钻孔灌注桩沉渣控制技术研究与应用

曹涯温

(中交一航局西南工程有限公司)

摘 要:为解决水下灌注桩成孔灌注过程孔底沉渣厚度的控制问题,研究出新的清孔方法,针对常见的清孔工艺进行实际应用对比分析,通过理论推算结合实操验证,总结出正、反循环清孔工艺适宜的工况,设计研究出新的便捷有效沉渣控制工艺。该工艺利用气举反循环原理,将发电机、空压机与泥浆净化装置组装成成套清孔设备,采用泥沙分离的沉渣清除方式取代常规的沉淀工艺,能够高效地解决水下灌注桩清孔难题,实现对孔底沉渣的厚度控制,桩基施工提质增效效果明显。

关键词:地基处理;灌注桩沉渣控制;气举反循环;清孔装置;泥沙分离;绿色环保

0 引言

水下灌注桩作为一种常见的地基处理方式,所涉及的钻孔方式、泥浆护壁、沉渣控制、灌注混凝土质量等都会影响最终的成桩效果,而灌注混凝土前的孔底沉渣处理即二次清孔尤为重要。目前现有可参考的清孔原理有正、反循环两种,清孔工艺也从正循环返浆发展至利用泵吸和气举的反循环清孔,但现有所有的清孔工艺分离沉渣的方式都是采用沉淀池沉淀分离,沉渣分离耗时长且孔底保持效果不稳定。本文提出的流动式气举反循环泥沙分离清孔新工艺利用反循环原理,创新性地利用泥浆净化装置采用沉渣泥沙分离取代沉淀分离,组装流动式成套清孔装置,操作高效便捷,并且该装置利用管道实现设备与桩孔之间的泥浆循环,不再开挖常规清孔工艺所需的孔外泥浆沉淀池及回流池,绿色环保,提质增效的同时实现环境的无污染。

1 工程概况

中交一航局承建的杭州余杭区崇贤至老余杭连接线高架工程,起点位于余杭区东南部崇贤街道与杭州主城区衔接部,终点位于余杭区余杭街道,是余杭区城市道路建设的重要组成部分,建设区间里程 K4 + 031—K13 + 662.5,正线全长 9.63 km。项目整体结构形式属高架桥,基础部分为承台桩基础,共含桩基 918 根,桩位分布均匀且纵向施工路线较长,桩基施工设备需机动性强,移位方便。

2 沉渣产生原因及控制方法

水下灌注桩施工过程中孔底沉渣产生原因有很多种,主要可归结为孔壁坍塌、泥浆沉淀及钻具残留等。

1) 孔壁坍塌

桩基钻孔施工中,地表孔口附近地质常为杂质或回填土层,土质松软易塌落,因此需要在孔口埋设钢护筒,钢护筒的长度视地层条件而定,必要时可采用钢护筒焊接跟进的方式保护孔壁。除此以外,通过调节泥浆黏度、密度提高泥浆护壁效果,钻具提放及钢筋笼下放保持对中等措施都可以减少孔壁坍塌现象^[1]。

2) 泥浆沉淀

水下灌注桩采用泥浆护壁的方式保持钻进,泥浆在钻具搅动过程中容易裹挟土层中的砂砾碎石,最后沉淀到孔底形成沉渣颗粒。通过添加膨润土等方式配制泥浆,调整泥浆密度以提高泥浆携渣能力,并且定期利用泥浆净化装置筛除浆中砂砾,可以在很大程度上减少泥浆沉淀。

3) 钻具残留

为便于钻斗钻进,下部钻头刀刃是倾斜的,且钻齿之间有间隙,因此钻斗提钻后仍会在孔底残留部分钻渣。通常可采用调节钻齿布置高度及齿座倾斜度的方式提高钻斗清渣的效果。

孔底沉渣形成后,首先采用钻斗捞渣的方式清孔,灌注前还需对仍残留的孔底沉渣进行二次清孔,二次清孔可以根据工况选用正、反循环清

孔工艺清理孔底沉渣。

3 清孔工艺对比

3.1 正循环清孔

正循环清孔是在孔内钢筋笼下放安装完成后，利用灌浆导管通过换流泥浆将沉渣携带出的清孔方式。正循环清孔时，利用电机泵将泥浆池内的泥浆从放置好的导管上方注入导管内，泥浆从导管冲到孔底，通过搅动将孔底沉渣携带到地面。上泛的泥浆经护筒溢流口流入沉淀池沉淀，沉淀后的泥浆流入泥浆池重新注入导管完成泥浆循环。通过泥浆循环将孔底沉渣不断携带至沉淀池，即可完成桩底沉渣清理。正循环返浆清孔示意图见图 1。

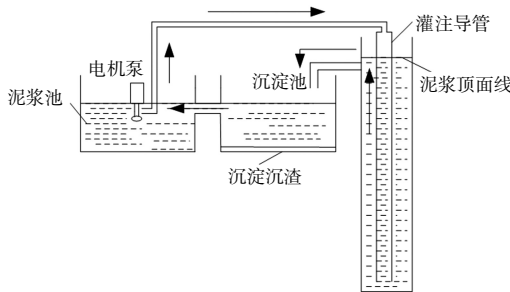


图 1 正循环清孔示意图

3.2 泵吸反循环清孔

泵吸反循环是利用潜水电泵将孔底泥浆抽吸至地面泥浆沉淀池沉淀，再将沉淀后的泥浆经返浆池注入孔内的循环方式。清孔时将潜水电泵利用接头与灌注导管相接，然后将电泵与导管一起置于孔内泥浆液面以下，导管底端需伸至沉渣面附近，启动电泵将泥浆从孔底通过导管吸至地面注入沉淀池内沉淀，沉淀后的泥浆再经返浆池流入孔内，泥浆利用潜水电泵泵吸的方式即可将孔底沉渣带出至沉淀池。泵吸反循环清孔示意图见图 2。

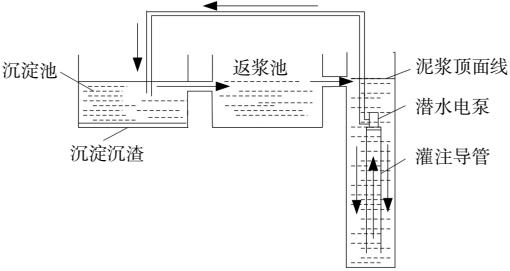


图 2 泵吸反循环清孔示意图

3.3 气举反循环清孔

气举反循环是利用空压机将空气压缩后注入

到已经在孔内安装好的镀锌管底部，通过气流上涌带动孔底泥浆泛至地面进行泥浆沉淀循环的循环方式。清孔时镀锌管安装延伸至孔底沉渣面附近，空气从镀锌管底部注入后上涌，孔底的泥浆由于压力差随之通过镀锌管上涌至地面后再注入沉淀池中进行沉淀，沉淀后的泥浆经过返浆池后重新流入孔内完成循环。气举反循环清孔示意图见图 3。

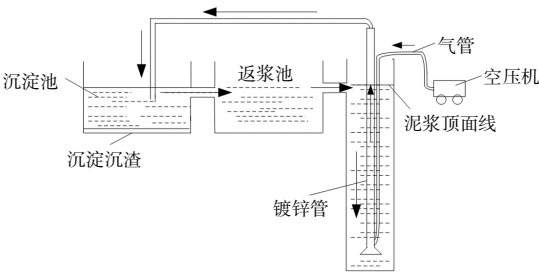


图 3 气举反循环清孔示意图

3.4 流动式气举反循环泥沙分离清孔新工艺

流动式气举反循环泥沙分离清孔新工艺结合了泵吸反循环利用灌注导管的便捷优势及镀锌管气举反循环效率高的优势，在原有的导管接头上改造出了带有 2 个法兰接头的导管接头，上部的法兰接头连接空压机气管，侧面的法兰接头直接连接泥浆净化装置的进浆口，这样清孔时通过气举经导管上涌的泥浆就会通过泥浆净化筛砂机直接进行沉渣清理。并且新的反循环清孔工艺采用将发电机、空压机及筛砂机 3 台设备置于板车上的形式，可实现在各桩基间流动性的清孔工作。流动式气举反循环泥沙分离清孔工艺示意图见图 4 所示。

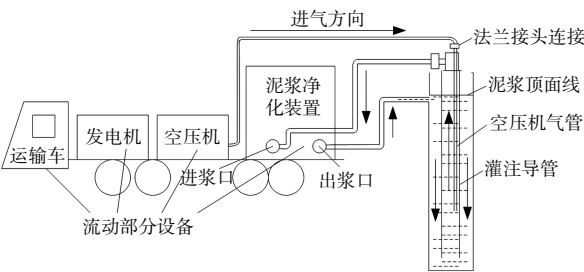


图 4 流动式气举反循环泥沙分离清孔示意图

4 理论计算

4.1 空压机压力的选择计算

气举反循环清孔空压机利用气管将压缩空气注入孔底，孔底沉渣在气体的搅动作用下悬浮

起来,形成孔内泥浆、沉渣及空气的混合流,导管或镀锌管内外的流体相应也会产生密度差^[2]。进气管及孔内液面示意图见图 5。

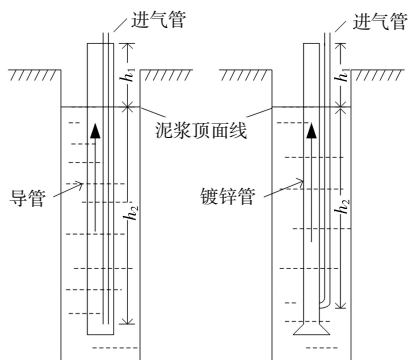


图 5 进气管及孔内液面示意图

图中, h_1 为孔内泥浆顶面到导管或镀锌管内泥浆顶面的高度差, h_2 为进气管底部到孔内泥浆顶面的高度差, 作用于气管底部液面的内外流体压力差计算公式如式(1)所示。

$$\Delta P = \rho_w \times h_2 - \rho_n (h_1 + h_2) = (\rho_w - \rho_n) \times h_2 - \rho_n \times h_1 \quad (1)$$

式中: ρ_w 为导管或镀锌管外流体密度, kg/m^3 ; ρ_n 为导管或镀锌管内混合流体密度, kg/m^3 。

由式(1)得, 驱动气举反循环的压力差在管外泥浆密度 ρ_w 相对稳定的情况下, 主要与高度差 h_1 、 h_2 及管内混合泥浆密度 ρ_n 有关。相对而言, h_2 越大, h_1 越小则压力差越大。在选择合适的泥浆液面高差后, 减小混合泥浆密度 ρ_n 的值, 一定程度上也可以增大压力差值。实际应用中, 通常可以通过调节空压机送气流量和压力改变管内混合泥浆的密度。

空压机作用空气压力的计算公式如式(2)所示。

$$P = \rho_n \times \frac{h_2}{k} + P_s \quad (2)$$

式中: k 为泥浆比重相对密度, 根据实际情况一般在 1.02~1.10 之间; P_s 为供气管道压力损失, 一般取 0.05~0.10 MPa。

由式(2)得, 空气压力值 P 主要与参数 h_2 及 ρ_n 有关。实际应用中, 孔底附近泥浆比重相对密度越大, 需要的空气压力就越大, 同时应尽量减少供气管道压力的损失。

通过空气压力值 P 可以确定空压机的选型, 根据实际施工中参数 h_2 及 ρ_n 总结计算可得: 孔深 50~70 m 时宜选用 0.5~0.8 MPa; 孔深 70 m 以

上时宜选用 0.8 MPa。

4.2 潜水电泵流量选择理论计算

孔底沉淀沉渣的主要组成部分是沉渣颗粒, 假定沉渣颗粒为球形, 重力为 G , 颗粒在浆液中的浮力为 F , 设球形颗粒在浆液中的沉降阻力为 R 。当 $G > F$, 颗粒下降沉淀, 速度逐渐增大, 阻力 R 值也随之增大, 最终达到 $G = R + F$ 的状态, 沉渣颗粒将会以恒速 v_0 下降^[3]。根据雷廷格尔公式可得沉降速度 v_0 的计算式如式(3)所示。

$$v_0 = \sqrt{\frac{4g\delta(\rho_s - \rho)}{3c\rho}} = k\sqrt{\frac{\delta(\rho_s - \rho)}{\rho}} \quad (3)$$

式中: δ 为球形颗粒直径, m; ρ_s 为沉渣颗粒密度, kg/m^3 ; ρ 为泥浆密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; c 为固体颗粒阻力系数, 无因次; k 为颗粒形状系数, 球形颗粒 k 值 4~4.5, 不规则形状颗粒 k 值 2.5~4。

钻孔灌注桩沉渣颗粒的尺寸与钻具和地质条件有关, 根据颗粒直径计算沉降恒速, 进而可以求出清孔时需要的泥浆流量。流量计算公式如式(4)所示。

$$Q = v \times S \quad (4)$$

式中: v 为流体流速, m/s ; S 为管道截面积, m^2 。

假设泥浆中沉渣颗粒直径 $\delta = 0.01 \text{ m}$, $\rho_s = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, k 值取 4, 计算可得: $v_0 = 0.42 \text{ m/s}$ 。

灌注导管直径 300 mm, 计算可得 $Q = 107 \text{ m}^3/\text{h}$, 即实际流速 $v > 0.42 \text{ m/s}$ 时沉渣不下降能随泥浆携带而出, 需要泵满足的流量也需大于 $107 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

实际应用中潜水电泵的流量也受其实际扬程影响, 实际扬程 H 如式(5)所示。

$$H = H_x - S_x Q^2 \quad (5)$$

式中: H_x 为电泵理论扬程, m; Q 为实际流量, m^3/h ; S_x 为泵的内部摩阻。

由式(5)可得, 实际流量 Q 计算式如式(6)所示。

$$Q = \sqrt{[(H_x - H)/S_x]} \quad (6)$$

在潜水电泵 H_x 及 S_x 皆不变的情况下, 实际流量 Q 的值由实际扬程 H 确定, 因此实际操作选择电泵型号时, 可以根据泵下放深度确定实际扬程, 进而选择流量合适能够满足清孔的潜水电泵。

5 施工工艺应用

5.1 正循环清孔工艺应用

正循环清孔实际工艺应用时, 直接利用已经

在孔内安装好的灌注导管，将泥浆循环从导管口注下冲到孔底，采用泥浆正循环的换流方式从孔顶排浆口将沉渣不断带出，由沉淀池进行沉渣沉淀分离后，注回孔内。

5.2 泵吸反循环清孔工艺应用

泵吸反循环清孔实际工艺应用时，选用了200WQ180-15-15污水污物潜水电泵，利用改造的接头将电泵与导管连接起来，最后将电泵与导管置于孔内泥浆液面下部，利用电泵吸取泥浆至地面沉淀池进行沉渣沉淀分离。

5.3 气举反循环清孔工艺应用

气举反循环清孔实际工艺应用时，选用了11 kW 双缸空气压缩机，利用特制的安装平台，采用法兰连接的方式将6 m/节的 $\phi 110$ mm 镀锌管顺次安装拼接至沉渣面附近，镀锌管下部端头焊接方形喇叭口，喇叭口上部焊接空压机进气管接口，使用时空压机气管随镀锌管一起下放。待镀锌管下放至孔底附近后，启动空压机，利用上涌气体形成镀锌管内外液体压力差将裹挟沉渣的泥浆上涌至地面，进行沉渣沉淀分离。

5.4 流动式气举反循环泥沙分离新清孔工艺应用

气举反循环泥沙分离清孔新工艺实际应用时，利用已经安装好的灌注导管取缔原有气举法中的镀锌管，专用的导管接头上带2个法兰接头，通过上部的接头向导管内伸入空压机气管，通过侧面接头直接将上涌泥浆注入泥浆净化装置，利用泥浆净化筛沙机直接将沉渣清理出来，比沉淀池沉淀沉渣效率高很多。

流动式气举反循环泥沙分离清孔装置应用效果图见图6。



(a) 机组设备拼装图



(b) 机组管道连接图

图6 流动式气举反循环泥沙分离清孔装置应用效果图

5.5 工艺应用对比

根据实际施工应用中对4种清孔工艺的使用对比，可以总结出不同工艺各自适宜的施工工况及优缺点，见表1。

表1 正、反循环清孔工艺对比

工艺类型	优点	缺点	工效	造价	适宜选择的工况
正循环清孔	利用导管及电机泵清孔，操作简单便捷，清孔后能快速转换成灌注状态	清孔时间长，泥块、石砾等块状沉渣无法有效清理，局限性大	以桩径1.8 m、桩长60 m 桩孔泥浆量约150 m ³ 描述：正循环清孔循浆一次约3.5 h	材料费3 500 元；加工费700 元；合计4 200 元	适用于桩底有粉砂状沉渣且沉渣较少时使用
泵吸反循环清孔	清孔时间较短，选择合适功率电泵可短时间达到清孔效果	潜水电泵安放操作较为复杂，清孔效率与泵功率有关	以桩孔150 m ³ 泥浆量描述：泵吸反循环循浆一次约2.9 h	材料费12 000 元；加工费700 元；合计12 700 元	适用于桩底有粉砂状沉渣、小块碎石及沉积泥块时使用
气举反循环清孔	清孔时间短，效率高，孔底碎石及泥块皆可清理干净	安拆镀锌管操作复杂，且杂物易造成管道堵塞	以桩孔150 m ³ 泥浆量描述：气举反循环循浆一次约2.6 h	材料费15 000 元；加工费1 000 元；合计16 000 元	适用于桩底沉渣较多且含碎石泥块时使用
流动式气举反循环泥沙分离清孔	利用货车实现在各桩基间的流动清孔，筛沙机直接清理泥浆效率高，用时少，且清孔后能快速恢复至灌注状态	使用设备较多	以桩孔150 m ³ 泥浆量描述：流动式气举反循环泥沙分离清孔循浆一次约1 h	设备月租15 000 元；材料费1 500 元；加工费700 元；合计17 200 元	适用于桩底沉渣多且含较大块碎石及沉积泥块时使用，可在全线多桩基施工中流动使用

6 应用效果

通过对正、反循环各清孔工艺实际应用的总结对比,得出各自较为适宜的工况,可为以后的施工提供参考。

1) 设计研究出的流动式气举反循环泥沙分离清孔新工艺清孔效率极高,利用泥浆净化装置筛沙机设备直接筛除沉渣比通过沉淀分离沉渣更高效,泥浆净化装置循环泥浆量为 $200 \text{ m}^3/\text{h}$,通常 60 m 深桩孔泥浆循环一次仅需 1 h 即可清除孔底沉渣,比同类型清孔工艺至少提效 160% 以上,且在清孔的同时也降低钻孔循环使用泥浆的含砂率。经后期成桩质量检测,利用新工艺气举清孔后的桩皆为 I 类桩。

2) 新工艺利用管道实现各组设备与桩孔之间的泥浆循环清渣,不需单独开挖供返浆沉淀的泥浆池,过程绿色环保无污染。

3) 新工艺将清孔设备集中放置在专用运输车上,满足机组设备装置在各桩基间的流动清孔,

在群桩施工中提质增效成果尤为显著。

7 结语

本文从水下灌注桩现有清孔工艺着手,通过实际应用效果比对,设计研究出泥沙分离式的孔底沉渣控制清孔新工艺,衍生出了成套设备连接组装及相应的操作方法。新工艺清孔效果稳定,操作简便快捷,施工过程摒除孔外所需清孔泥浆池,绿色环保,对桩基施工的二次清孔,提供了新的思路和方法。后续研究中,从设备组合选型及桩孔孔深泥浆量匹配方面开展更深阶段的研究,继续从经济高效环保方面考虑,推出更好的清孔工艺,进一步解决各类型水下灌注桩孔底沉渣控制难题。

参考文献:

- [1] JTG/T 3650—2020, 公路桥涵施工技术规范[S].
- [2] 程兵,韩荣祥. 气举反循环工艺在旋挖灌注桩清孔中的应用[J]. 工程技术研究, 2020(20):67-69.
- [3] 张滔. 浅谈反循环清孔工艺在旋挖桩中的使用[J]. 建筑界, 2013(20):125-126.