

超长钻孔灌注桩施工工艺

刘凤涛

(中交第一航务工程局有限公司)

摘要：为解决超长钻孔灌注桩的质量控制问题，对南浔申苏浙皖至练杭高速公路连接线工程窑墩角大桥五联承台超长钻孔灌注桩施工过程中成孔、泥浆沉渣控制、清孔及混凝土施工等重要环节的施工工艺进行研究，取得了超长钻孔灌注桩高质量成孔经验、成桩主要施工工艺及事故处理方法等成果。实践结果表明，采取质量控制方法和技术措施合理，检桩结果均为Ⅰ类桩。

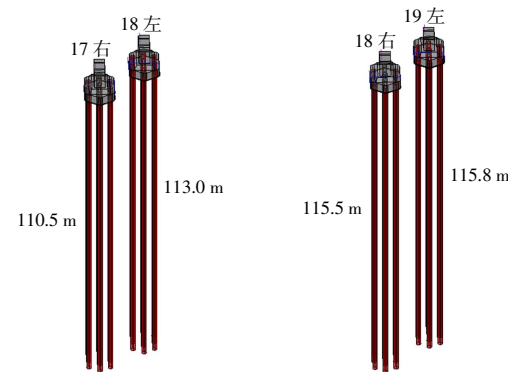
关键词：超长钻孔灌注桩；安全质量把关；钻机选型；混凝土施工

0 引言

钻孔灌注桩适用于基础较深的工程，在桥梁施工中比较常用。本工程采用了钻孔式灌注桩的设计，增加了桩的长度和直径，对施工质量也有了更高的要求。为了做好窑墩角大桥超长钻孔灌注桩的施工工作，文章研究分析了超长灌注桩在特定桩长、桩径、地质条件、施工环境以及施工机械等情况下的质量控制要点。结合相关文献的研究理论和结果，根据施工现场实际情况和图纸设计要求，在钻机选型、混凝土配比及特定地质条件下超长钻孔灌注桩质量控制做出最优施工控制，为完成窑墩角大桥超长钻孔灌注桩的施工奠定良好基础。

1 工程概况

窑墩角大桥全长 1 087.64 m，桥心桩号为 K11+800.7，右偏角为 90°，隶属南浔申苏浙皖与练杭高速公路连接线工程。下部结构为柱式墩台及钻孔灌注桩基础，其中第五联主桥墩灌注桩为超长钻孔灌注桩，桩基结构图见图 1。



(a) 17 号墩右幅和 18 号墩左幅 (b) 18 号墩右幅和 19 号墩左幅

图 1 桩基结构图

混凝土标号为 C25，桩长设计左幅 18 号墩 113 m，左幅 19 号墩 115.8 m，右幅 17 号墩 110.5 m，右幅 18 号墩 115.5 m，共 40 根，桩径均为 1.8 m。根据施工图纸，场区地层以粉质黏土、泥质黏土、砂质粉土及粉砂、黏土为主。桩端标高为 -112.5 m、-115.00 m、-117 m，分别位于粉质黏土层及粉土层。

2 质量要求与施工难点

2.1 质量要求

根据设计图，本工程对检查项目的规定值或允许偏差有严格的要求，如钢筋骨架的混凝土强度、桩位、孔深、孔径、钻孔倾斜度、沉渣厚度、高程等，具体内容见表 1^[1]。

表 1 钻孔灌注桩质量标准

项次	检查项目			规定值或允许偏差	检查方法	检查频率
1	混凝土强度/MPa			在合格标准内	按附录 D 检查	
2	桩位/ mm	群桩		100	全站仪或 经纬仪	每桩检查
		排架 桩	允许 极值	50		
			100			
3	孔深/m			不小于设计值	测绳量	每桩量测
4	孔径/mm			不小于设计值	探孔器	每桩量测
5	钻孔倾斜度/mm			1%桩长，且不大于 500	测墙仪 (斜面)或 钻杆垂线	每根桩都要进行校 验
6	沉淀 厚度/ mm	摩擦桩		不大于 5 cm	沉淀盒或 标准测锤	每桩检查
		端承桩		不大于设计规定		
7	钢筋骨架底面高 程/mm			±50	水准仪：测量各桩 骨架顶面标高后， 再进行计算	

2.2 施工工艺难点

本工程施工场地地层以粉砂、粉土和粉质黏土为主，灌注桩最深成孔深度达 115.8 m，图纸设

计要求桩底沉渣厚度 $f < 50 \text{ mm}$, 远远高于规范设计要求的 $f \leq 300 \text{ mm}$, 难度非常大; 钻孔持续时间长, 成孔质量要求高, 对泥浆性能提出较高要求。若泥浆性能不达标, 灌注桩成孔过程中不能形成有效护壁, 则存在塌孔风险。

此外, 灌注桩设计要求桩孔垂直度偏差小于 $1/100$, 对于超长钻孔桩, 很容易出现桩孔倾斜现象。一旦由于地质条件或者施工控制不当出现桩孔偏斜等质量事故, 很难处理, 从而影响到成桩的质量, 形成安全隐患, 造成的经济损失巨大。而且根据设计要求, 本工程采用 C25 水下混凝土进行浇筑, 混凝土工作性能可适应孔深达 115.8 m 灌注要求和狭小空间内超长混凝土导管施工风险是施工中应关注与控制的重点。

另外, 钻孔灌注桩的水下混凝土灌注是成桩的关键环节, 但往往由于施工工艺不当, 断桩、堵管、夹泥、蜂窝、少灌等质量问题时有发生。因此, 选用科学、实用的混凝土灌注工艺, 对确保工程质量极为重要。

1) 导管接头严重漏水造成断桩。发生这种故障的后果非常严重, 进水后使混凝土形成松散层或囊体, 出现浮浆夹层造成断桩, 严重影响混凝土质量, 导致废桩重做。

2) 导管轻微漏水、导管埋入混凝土太深、混凝土含砂率偏小、和易性欠佳等因素可能造成导管的堵塞, 导致浇筑中断, 若重新灌注, 则混凝土内存在浮浆夹层, 造成断桩。

3) 护筒外壁冒水。引起地基下沉、护筒倾斜和位移, 使桩孔偏斜, 无法施工。

4) 孔壁坍塌。各种钻孔方法都有可能发生孔壁坍塌事故, 施工中发生孔壁坍塌往往是有前兆的。例如: 孔内水位突然下降, 孔口冒细密的水泡, 出渣量显著增加而不见进尺, 钻机负荷显著增加等都是塌孔的迹象。

3 钻机的选型

根据超长桩基成孔特点, 对回旋钻机、冲击钻机、旋挖钻机 3 种钻机进行分析。回旋钻机除在卵、砾石层钻进较为困难外, 在其它各种常见地层均有良好的适用性。根据排渣方式不同分为正循环和反循环 2 种, 反循环又细分为泵吸、气举、孔底泵送(射流)3 种。在素土层、黏土层及砂土层常采用正循环; 在卵石层、砂卵石夹层、岩石层及孔底清渣常采用反循环。回旋钻机具有

应用范围广、护壁效果好、成孔质量高, 施工无振动、无噪音、机具操作方便、造价较低等特点。

冲击钻机是一种比较传统的钻进机具, 依靠冲击锤进行冲砸, 掏渣筒掏渣, 上下往复冲击将土石劈裂、砸碎, 部分被挤入孔壁之内, 普通泥浆护壁。适用于常见的所有填土层、黏土层、密实砂层、圆砾层及角砾复合夹层, 但在大漂石、卵石层及微风化地层中进尺缓慢, 且冲击锤容易损坏。而且, 在松散且厚度较大的砂层中钻进时容易塌孔, 主要原因是冲击钻进时孔内泥浆比重不均匀, 上部小下部大, 掏渣筒掏渣后孔内水位降低产生水位差造成塌孔。

旋挖钻机适用于各类黏土、粉土、密实砂土、淤泥质土、人工回填土及含有部分卵石、碎石的地层, 借钻具自重和钻机加压力, 耙齿切入土层, 在回转力矩的作用下钻斗同时回转配合不同钻具, 适用于干式(螺旋)、湿式(回转斗)的成孔作业, 具有施工质量可靠、成孔速度快、成孔效率高、适用性强等特点, 大大缩短了工期, 废浆少、低噪音、污染小, 保护了环境, 克服了机械成孔时孔底沉淤土多、桩侧摩阻力低、泥浆管理差的缺点, 极大地提高了施工质量。但其缺点是对于厚度较大的松散砂层在钻进时易塌孔, 在卵石含量较大的卵石层钻进时速度慢, 不适用于坚硬岩石层入岩施工。旋挖钻机施工速度快, 成孔质量高, 一次投入费用较大, 施工设备庞大, 移动困难, 施工成本高, 能耗大。

经上述分析, 结合施工图纸要求及工期安排, 确定本项目采用反循环回转钻机, 引进具有泵吸反循环施工经验的施工队伍, 采用 2 台 ZJD3500 打孔机, 配以 $\phi 245 \text{ mm}$ 打孔杆, 主要用于施工桩基, 桩径在 $1.8 \sim 2.0 \text{ m}$ 之间, 桩长为 $100 \sim 120 \text{ m}$ 。1 台 ZJD3500 全液压反循环钻机, 布置在每个主墩施工平台上进行施工。钻机的最大输出功率为 $T_{\max} = 320 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。钻杆的外径 $D = 245 \text{ mm}$, 内径 $d = 205 \text{ mm}$ 。钻机的钻杆极限扭矩 $I_p = \pi(D^4 - d^4)/32 = 1.8 \times 10^8 \text{ mm}^4$; 钻机的钻杆扭转接口系数 $W_p = I_p/R = 1.47 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 。钻机最大输出功率下的钻杆最大切应力 $\tau_{\max} = T_{\max}/W_p = 218 \text{ MPa}$ 。计算结果表明, 该钻杆与容许应力相比, 合成应力相对较小, 因此不存在钻杆受损的易发现象^[9]。

钻机选型对比分析如表 2 所示, ZJD3500 钻机整机主要技术参数如表 3 所示。

表 2 钻机选型对比分析

钻机类型		适用范围			成孔速度	经济性	优点	缺点
		土层	孔径/cm	孔深/m				
回转钻机	正循环	黏性土，含微量砾石和卵石土层，有粉砂、细砂、中砂、粗砂	80~250	30~100	较快	每延米造价较低	特别适合在冲积层较厚的内陆平原上进行摩擦桩的作业	建设占地面积大，复杂的机具装备和较差的应变能力
	反循环	土层为黏土、砂质土壤，含微量砾石、卵石	80~300	30~120				
冲击钻机		为黏土、沙质土、砾石、卵石、漂石、软岩、硬岩、冻土	60~200	50	较慢	每延米造价高	钻机的构造和作业规程更简单，岩层施工具有极大的优越性	易偏孔易落锤，施工需拓展孔径
旋挖钻机		黏土，沙质土壤，含微量砾石，卵石的土壤，软质岩石	50~300	30~90	快	每延米造价较高	自动化程度高、操作工人劳动强度小、移动方便、环境污染小、噪音小	受制于钻杆的长度，会受到很大的限制，不管是杆身的长度，还是杆身的直径

表 3 ZJD3500 钻机整机主要技术参数表

技术参数	参数值
最大钻孔口径/m	3
最大钻孔深度/m	300
最大输出扭矩/(kN·m)	320
最大提升能力/kN	6 000
动力头恒功率转速/rpm	0~16
尺寸(长×宽×高)/m	4.25×4.51×7.53
总功率/kW	165
泥浆流量/(m ³ ·h ⁻¹)	600

4 关键施工技术

采用反循环式进行钻进，主要施工工艺流程如图 2 所示。

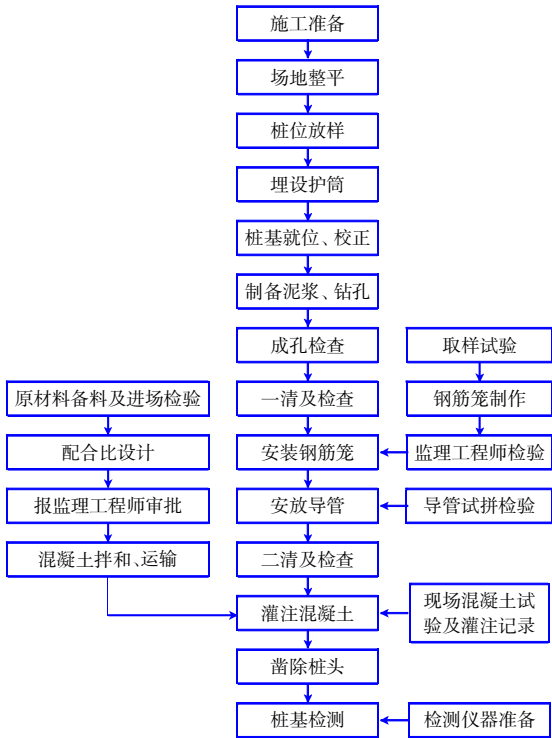


图 2 施工工艺流程图

4.1 孔口护筒埋设

护筒长 6 m，直径 2.2 m，材料为壁厚 5 mm 钢护筒。右幅 17 号墩、左幅 18 号墩桩基位于水中，水深 1.2 m，护筒埋设难度很大。采用振动锤打方法埋设护筒，首先利用吊机配合振动锤控制护筒中心点和护筒垂直度，确保其偏差不大于 50 mm，护筒在竖直方向的倾斜度不大于 1%，达到要求后再打设护筒，深度要求为钢质护筒必须穿过薄弱土层并沉入黏土层，这样护筒就可以牢固地埋设，防止护筒底部出现塌孔的现象。

4.2 孔底沉渣厚度控制

孔底沉渣厚度 $f < 50$ mm，需采用二次清孔工艺，按图纸设计要求施工。混凝土浇筑前，在一次清孔后，再进行一次清孔，此时泥浆性能指标符合要求。

钢筋笼和导管安装时间大概需要 4 h，孔内泥浆在此期间处于静止状态，泥浆中的泥土、碎石等会沉淀在孔内。并且在安装钢筋笼和导管的过程中，不可避免会摩擦到孔壁，使孔壁的泥沙滑入孔内。因此在导管安装完毕后进行二次清孔，泥浆的各项指标在孔底沉渣厚度达到设计和规范要求后进行调整。泥浆指标一般控制在以下范围：相对密度为 1.05~1.10 g/m³，黏度为 16~18 s，含沙率为 1%。水下浇筑混凝土的工作要在全部泥浆指标达到规范要求后立即进行。

4.3 超深水下混凝土灌注配合比设计

原料选用优质粗细骨料，质地坚硬，无碱活性，级配合理，粒形良好，以提高混凝土的流动性，防止堵管。一般混凝土初凝时间仅 3~5 h，只能满足浅孔小桩径灌注要求，而本项目深桩灌注时间约为 5~7 h，因此应加缓凝剂，使混凝土初凝时间大于 8 h。经连续试配，调整优化，选用优质

减水剂降低混凝土单位用水,混凝土施工配合比(单位为 kg/m^3)为水泥:砂:5~25 mm 碎石:水:粉煤灰:外加剂=277:744:1 071:166:92:4.428。

为使混凝土具有良好的保水性和流动性,按上述配合比将水泥、石子、砂子倒入料斗后,先开启搅拌机并加入 30%的水,然后与拌合料一起均匀加入 60%的水,最后再加入 10%的水最后加水到出料时间控制在 60~90 s 内。坍落度控制在 180~200 mm 内,以确保桩顶浮浆不过高。混凝土拌合物采用搅拌运输车运输。

4.4 灌注混凝土工艺

本工程采用计算机全自动控制配料拌和混凝土,混凝土各项性能指标由专职试验人员检测。在控制混凝土初凝时间的同时,必须合理地加快灌注速度,这对提高混凝土的灌注质量很重要。因此应做好灌注前的各项准备工作,以及灌注过程中各道工序的密切配合工作。灌注前,先安装好储料槽漏斗和导管,导管底口至孔底的距离控制在 30~40 cm,然后将混凝土从储料槽放入漏斗导管,待储料槽、漏斗灌满混凝土后进行首批混凝土灌注。

首批混凝土的灌注与泥浆至混凝土面高度、混凝土面至孔底高度、泥浆的密度、导管内径及桩孔直径有关。孔径越大,首批灌注的混凝土量较大,搅拌时间长,因此可能出现离析现象。首批混凝土在下落过程中,由于和易性变差,受的阻力变大,常出现导管中堵满混凝土,甚至漏斗内还有部分混凝土,此时应加大设备的起重能力,以便迅速向漏斗中加入混凝土,然后再稍提导管,这样能使混凝土顺利下滑至孔底,然后继续向漏斗中加入混凝土,进行后续灌注。首批混凝土灌

注后,孔口泥浆不再外溢时,立即测量检测埋管深度($\geq 1\text{ m}$)。

后续混凝土灌注要将混凝土填入储存槽,再由泵车进行反复灌注。当出现非连续性灌注时,漏斗中的混凝土下落后,应上下提动导管,并观察孔口返浆情况,直至孔口不再返浆,再向漏斗中加入混凝土。在混凝土灌注后期,由于孔内压力较小,上部混凝土不如下部混凝土密实,这时应稍提漏斗增大落差,以提高混凝土密实度。

最后浇筑桩顶高度高出桩顶设计标高 1.0 m 以上,形成保护层,灌注结束后立即清除高出部分的混凝土,确保桩头混凝土质量。

5 效益评估

采用常规工艺施工时,每根超长灌注桩施工需要 6 d 完成,采用反循环钻机施工工艺,每根超长灌注桩 4 d 就可以完成,本工程共计 40 根超长灌注桩,累计节省工期 80 d,单根超长灌注桩费用节省 21 440 元,累计节省 857 600 元。

6 结语

采用施工质量控制方法和措施后,窑墩角大桥 40 根大直径超长钻孔灌注桩顺利完工。第三方检测单位检桩结果均为 I 类桩,验证了所采用质量控制方法和措施的合理性。除此之外,在成孔时间上反循环钻机比正循环钻机更快,效率更高,此方法既保证工程的质量安全,又缩短了施工时间,为工程的增值创效奠定了基础。

参考文献:

- [1] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
- [2] 刘利民,舒翔,熊巨华. 桩基工程的理论进展与工程实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:62~63.
- [3] 张晓炜,黄生根. 钻孔灌注桩后压浆技术理论与应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2007:35~36.