

# 汉源大渡河大桥巨厚砂层大直径灌注桩施工技术

刘祥<sup>1,2</sup>, 兰沁<sup>2</sup>, 周春华<sup>2</sup>, 胡孝荣<sup>3</sup>, 谭启奎<sup>1</sup>

(1. 成都探矿机械厂, 四川成都 610083; 2. 四川省地矿局四〇三地质队, 四川峨眉山 614200;  
3. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川成都 610072)

**摘要:**汉源大树大渡河大桥2号桥墩12根钻孔灌注桩, 钻孔直径2500 mm, 钻孔深度为63~75 m不等, 桩径大, 桩孔深, 属于河水位以下的巨厚砂层桩基, 具有一定的施工难度。2号墩基岩上覆覆盖层存在多层砂土及卵石夹土(质土), 且砂层巨厚, 在11.5~49.4 m之间除厚5.5 m的卵石夹土外均为砂土, 对桩基成孔施工极为不利。采用冲击钻进成孔, 泥浆净化除渣系统, 通过对钻头直径的控制、内护筒的使用、灌注时导管理深的控制等措施, 确保了工程的顺利完工。相关技术措施可为其他类似工程提供借鉴。

**关键词:**大直径钻孔灌注桩; 巨厚砂层; 冲击钻进; 除渣系统

**中图分类号:** U445.55<sup>+1</sup> **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)07-0104-06

## Construction of large diameter bored piles in massive sand formation for a Dadu River Bridge

LIU Xiang<sup>1,2</sup>, LAN Qin<sup>2</sup>, ZHOU Chunhua<sup>2</sup>, HU Xiaorong<sup>3</sup>, TAN Qikui<sup>1</sup>

(1. Chengdu Prospecting Machinery Factory, Chengdu Sichuan 610083, China;

2. 403 Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Ermeishan Sichuan 614200, China;

3. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610072, China)

**Abstract:** The 12 bored piles for the 2<sup>nd</sup> pier of the Dashu Dadu River Bridge in Hanyuan county have a diameter of 2500mm and a depth of 63~75m, posing some construction difficulty due to large diameter and great depth and drilling in massive sandy gravel formation below the river water level. There are multiple layers of sand and pebble soil overlying the bedrock at the 2<sup>nd</sup> pier, and the sand layer is very thick. Sandy soil prevails between 11.5~49.4m except for a layer of 5.5m thick gravel cobble with soil inclusion, which is very disadvantageous to drilling of pile boreholes. Percussion drilling was used to sink the holes with the mud purification device to remove cuttings; meanwhile, some technical measures were adopted to ensure successful completion of the works, such as control of the bit diameter, use of the inner casing, control of the tremie pipe buried depth during concreting. The relevant technical measures can provide reference for other similar projects.

**Key words:** large diameter bored pile; massive sand layer; percussion drilling; cuttings removal system

### 1 工程概况

汉源大树大渡河大桥位于汉源县富林镇杨泗营村及桂贤乡银政村, 跨越大渡河, 距下游180~230 m为汉源吊桥, 可供小车通过, 下游260~280 m

处为汽车轮渡(载质量20 t), 距离汉源县城约3 km, 距离峨眉山市144 km, 经汉源、雅安距离成都273 km。大桥全长708.4 m, 共4个墩。主桥为133 m+255 m+133 m连续钢构, 共2个墩(2号墩、3号墩),

收稿日期: 2020-10-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.07.016

作者简介: 刘祥, 男, 汉族, 1969年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 主要从事钻探技术与管理工作, 四川省成都市金牛区兴川路369号, 378348487@qq.com。

引用格式: 刘祥, 兰沁, 周春华, 等. 汉源大渡河大桥巨厚砂层大直径灌注桩施工技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 104-109.

LIU Xiang, LAN Qin, ZHOU Chunhua, et al. Construction of large diameter bored piles in massive sand formation for a Dadu River Bridge[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 104-109.

主墩承台厚6 m,平面尺寸24.0 m×17.5 m,基础为12根 $\text{O}2500$  mm的钻孔灌注桩,桩长平均约67 m,桩间距为6.5 m;引桥共2个墩(1号墩、4号墩),为4孔43 m简支梁,北端连接省道S306线,南端连接新建的大树镇。主桥2号墩的12根钻孔灌注桩,钻孔直径2500 mm,钻孔深度63~75 m不等,按照钻孔间隔施工分2批进行(如图1所示),总进尺819.85 m,施工时长130 d。

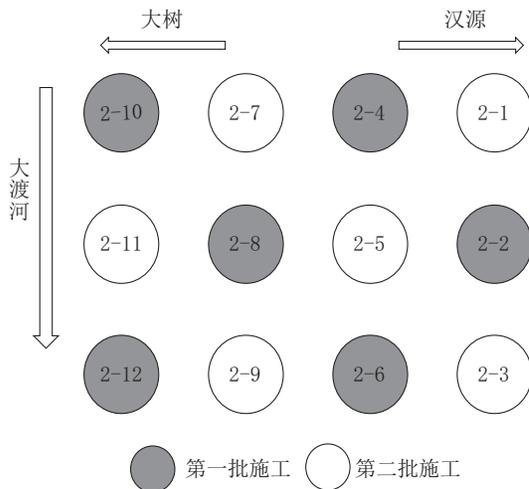


图1 钻孔施工顺序

Fig.1 Pile hole drilling sequence

## 2 地层情况

主桥2号墩位于大渡河主河床边缘,处于桥区左岸(北岸),冬季约1/3处于河漫滩上,约2/3处于水中,夏季全部处于河水中,采用砂砾石筑岛形成施工场地。

2号墩地层情况:0~11.50 m为中密—密实砂卵石、漂石层,卵石成分为花岗岩、石英岩、玄武岩、流纹岩等,质地坚硬;11.50~59.30 m为中密中砂层,局部密实,上部为细砂,中部夹粗砂,饱和,属非液化土;37.20~42.50 m为砂卵石层透镜体;59.30~70.20 m为密实砂卵石、漂石层;70.20 m以深为灰岩,弱风化。

2号墩基岩上伏覆盖层存在多层砂土及卵石夹土(质土),在11.5~49.4 m之间除厚5.5 m的卵石夹土外均为砂土,且砂层巨厚,这对桩基施工是不利的,应选择合理的成孔技术措施,确保成孔施工的安全。

## 3 施工设备及配套

根据该工程特点及公司设备情况,配置冲击钻孔设备7台套,1台备用,详见表1所示。

表1 主要施工设备

Table 1 Main construction equipment

设备名称	型号	单位	数量	备注
冲击钻机	GJK-8	台套	7	
冲击锤头	$\text{O}2500$ mm/8 t	个	7	
泥浆泵	3PNL	台	16	
泥浆净化装置	ZX-200	台套	1	
振动筛及泥浆池	自制	台套	3	2台钻机共用1台套
捞砂筒	$\text{O}600$ mm× 2000 mm	个	4	
空压机	WY-12/7-C1	台	1	

## 4 施工前的准备

### 4.1 筑岛

2号墩施工场地开阔,用挖掘机和装载机配合,采用砂卵石筑岛,填筑高度比现有水位高出1.5 m左右,考虑到钢筋笼的制作,筑岛面积为65 m×32 m。在筑岛过程中,为防止冲刷,在筑岛迎水面采用钢筋笼填装大卵石进行护岸<sup>[1]</sup>。

### 4.2 孔口护筒的埋设<sup>[2]</sup>

在筑岛完成后对场地进行平整,用全站仪精确测量出墩位和孔位,再用挖埋法安设孔口钢护筒,钢护筒尺寸为 $\text{O}2800$  mm×16 mm×3200 mm,钢护筒埋设深度为3 m,护筒口高出地面0.2 m,具体埋设方法如下:

(1)用挖掘机挖设 $\text{O}3500$  mm、深2.6~2.8 m基坑,基坑底部用锄头人工摊平。

(2)用25 t (250 kN)吊车将护筒四点吊起下放到基坑里,并用全站仪将护筒位置与桩位对正,桩位与护筒位置偏差 $<50$  mm,倾斜度 $<1\%$ 。

(3)用挖掘机填埋粘土,护筒底部之上1 m用粘土填埋夯实,防止护筒漏水和不均匀沉降,再往上用砂卵石填埋夯实,并用大量的水渗透回填部位,到饱和为止(水夯)。

(4)护筒埋置好后,将桩位引到护筒上,用锯条切割做好记号,以便安放钻机。

(5)护筒埋设过程中曾遇到孔底有大量的河流

浸水,采取的应对方法是装载机就近取材,向孔内倒入烧过的石灰石(一定程度上有固化效果),直接用挖掘机刨平,再用全站仪定位下放护筒。下放后用装载机向护筒周围填埋黄泥,人工刨平即可。从后期的钻进情况来看,只要孔口护筒足够长(3 m),周围填料被机械压实过,护筒就能很好地保护好孔口。

#### 4.3 钻机的安装

由25 t吊车吊放安装钻机,并将钻头的中心对准孔的中心,要求保证“四点一线”,即钻头中心、钻架顶部的起重滑轮外槽缘、护筒中心、基桩设计位置中心在同一条竖直线上,偏差 $\nless 20$  mm。

### 5 成桩施工技术

#### 5.1 冲击钻进

孔口护筒和钻机安装就位,经校核无误后开钻。开孔反复加泥和“人头”石,使用低冲程(1~2 m)冲击,挤密孔口护筒底口;在巨厚砂层、砂卵石层中钻进时,采用3~4 m的冲程,“人头”石与黄泥比例必须调整适当,确保孔壁有层50~100 mm“厚墙”,防止钻进、清孔及灌注过程中的孔内坍塌事故发生;在基岩层中钻进时,根据岩石强度和钻头本身状况,合理选择冲程,一般稍小些。

施工过程中随时观察设备的完好情况,特别是锁芯、钢绳等,以防止掉锤现象发生。要经常检查锤的尺寸,如磨损严重应进行补焊,在下内护筒前钻头直径应保持在2630 mm左右,最小不低于2600 mm(因为内护筒外径为2632 mm)。在施工期间随时对锤头直径和绳头进行抽查,通过抽查强化了机组人员对钻孔孔径严格要求的意识,为后续的内护筒和钢筋笼的顺利下放奠定了基础<sup>[3]</sup>。

#### 5.2 除渣工艺

在工程开工前设计准备了3套钻进除渣系统。

(1)利用2台3P型泵、振动筛(公司自制,且自带泥浆池)以及相关的泥浆管路等除渣,如图2所示。

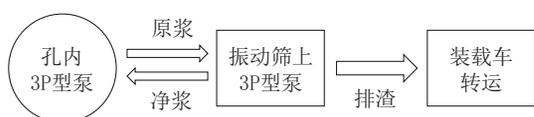


图2 振动筛循环系统示意

Fig.2 Schematic diagram of the vibrating screen circulation system

(2)利用2台3P型泵、ZX-200型泥浆净化装置以及相关的泥浆管路等构建的系统除渣,如图3所示,此系统需单独挖设一个泥浆池。

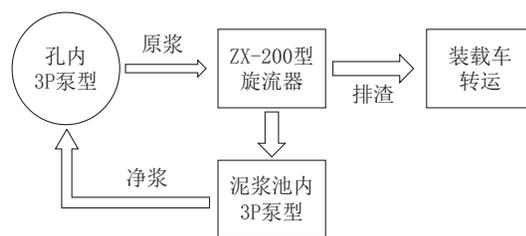


图3 旋流器循环系统示意

Fig.3 Schematic diagram of the hydrocyclone circulation system

(3)利用捞渣筒捞渣钻进,如图4所示。

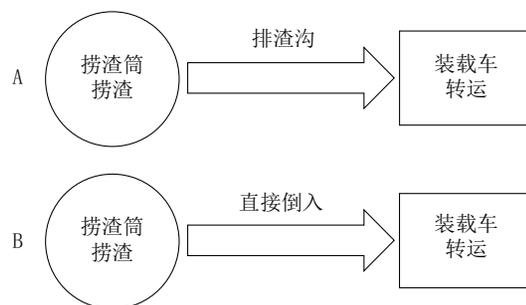


图4 捞渣筒除渣示意

Fig.4 Slag removal diagram of slag bailing drum

各工艺使用情况如下:

第一种除渣工艺对卵石层效果比较好,但对砂层却无能为力。第一批孔时,对振动筛各方面性能参数还在摸索,不断调节振动筛的倾斜度、筛网的网眼尺寸等,后逐渐完善,完善后的振动筛细筛网网眼为3 mm×3 mm,下面用粗筛网和横架支撑,振动泵为1.2 kW。

第一批孔在钻进到砂层且ZX-200型旋流器还未能正常使用时,试图采用细密的筛网除掉砂粒,但从当时的观察和事后钻孔失水情况来看,振动筛的使用具有一定的局限性。当把振动筛上的振动泵开启或者使用粗筛网时,砂粒漏到振动筛自带的泥浆池中再次被3P型泵抽回孔底,不能清除;当把振动泵关掉或使用细筛网时,砂粒随着大部分泥浆被排到泥浆池外,浪费严重,孔内泥浆不断地被稀释。可见,针对砂层,通过振动筛网除渣原理存在很大的局限性。

在遇砂层振动筛效果不佳时,开始探索ZX-200型旋流器的各种性能,ZX-200型旋流器在除渣原理上与振动筛有很大的区别,它是采取分级除渣的:先粗筛振动筛除粗颗粒,再渣浆泵抽入旋流装置中,细颗粒便通过旋流器沉渣嘴流到细筛网,振动去掉部分水后排出。使用中,对钻孔泥浆进行了测量,结果如表2所示。从表中可看出,ZX-200型旋流器比振动筛除渣更优越。旋流器泥浆净化装置经过第一批孔长时间运转后,新配置的旋流器部件(塑料件)磨损严重,其间也对其进行过胶焊,但始终不耐用,后经过设计,自己加工了钢质旋流器,效果显著<sup>[4-5]</sup>。

表2 除渣效果对比

Table 2 Comparison of cuttings removal performance

日期	孔号	密度/ (kg·L <sup>-1</sup> )	粘度/ s	含砂 率/%	备注
11.30	2-10	1.45	31.3	70	振动筛除渣
11.30	2-12	1.52	68.4	108	振动筛除渣
12.02	2-6	1.34	20.7	50	旋流器出口
12.02	2-6	1.36	22.5	60	旋流器储浆池
12.06	2-8(6)	1.39	32.8	44	旋流器出口
12.07	2-4(12)	1.34	24.2	6	旋流器出口
12.09	2-6	1.32	23.2	3	旋流器出口
12.11	2-8	1.36	29.5	6	旋流器出口
12.13	2-10	1.35	27.3	5	旋流器出口
12.21	2-12	1.34	27.1	5	旋流器出口

另外2-9号孔在下完护筒后(护筒长12.1 m,没有起到隔离砂层的效果),为使孔壁稳定又要得到较快的钻速,采用了孔内自循环加捞渣筒捞渣钻进相结合的方法,同时在捞渣前停泵2 h,使渣粒沉底一并捞出。

### 5.3 内护筒的加工与下放

内护筒主要作用是隔离砂层,内护筒每节长度为5.4 m,外径为2632 mm,孔底护筒采用厚度20 mm钢板、跟进护筒采用厚度16 mm钢板,卷板机卷制成形,采用坡口对焊连接。内护筒的加工质量符合《钢结构加工规范》要求,内护筒加工制作主要技术要求为:内径偏差 $< \pm 10$  mm;椭圆度(两垂直方向内径差) $< \pm 10$  mm;长度偏差 $< \pm 15$  mm;所有纵、环焊缝均须符合焊缝的二级要求,焊接评定按国家现行《建筑钢结构焊接规程》执行<sup>[6-7]</sup>。

内护筒的下放在砂层钻进结束后进行,过程如

下:把下放钢护筒的型钢井字架安放到位。利用25 t吊车把加工好的钢护筒吊运至型钢井字架内,利用型钢井字架横梁上的2组20 t(200 kN)链子滑车(每组2台)进行受力转换,待力全部传至型钢井字架上的2个吊点后,同时松2台链子滑车,靠内护筒本身自重往下沉,待沉到预定深度后、临时固定;再利用吊车吊运第二节内护筒,与已下放好的第一节内护筒进行焊接并加焊外环,确保对接质量,对接好后重复以上步骤。若内护筒靠自重不能下沉,则利用型钢在内护筒上口处加设十字内撑(以防止震动下沉过程中内护筒井口变形),用120 t(1200 kN)振动锤振动辅助下沉。开动振动锤使内护筒下沉时,若发现内护筒有倾斜,要及时用牵引器校正。每振动1~2 min要暂停一次,并校正内护筒一次<sup>[8-9]</sup>。

### 5.4 钢筋笼制作与吊放

钢筋笼采用分段制作,并进行编号,分段长度9 m,间隔2 m在加强箍位置设置“十”字支撑,避免钢筋笼变形。在钢筋笼主筋外缘每隔2.0 m设置“耳朵”保证钢筋保护层厚度,同一截面圆周均匀分布6个。钢筋笼加强箍与主筋之间以及箍筋与主筋之间均采用点焊连接,主筋接头用丝扣连接,螺母扣为M28×700 mm。

终孔后,开始下放钢筋笼。在吊放钢筋笼前先下放制作好的探孔器,规格为 $\text{O}2460 \text{ mm} \times 9000 \text{ mm}$ ,底部顶部口径为 $\text{O}2260 \text{ mm}$ ,探孔器主要起导向作用,以确保钢筋笼顺利下放。

钢筋笼用吊车放入孔内,吊点设置在加强箍筋处,并进行了加强。钢筋笼分节吊放,当前一节钢筋笼放入孔内后,即用型钢穿入钢筋笼加强箍下面,临时将钢筋笼搁置在孔口上,再下第二节,在孔口对接,对接时上下主筋位置应对正,保证钢筋笼上下轴线一致。吊放钢筋笼入孔时应对准孔位轻放、慢放,若遇阻应停止下放,查明原因进行处理。钢筋笼全部入孔后,用钢绳捆绑在钻机底座上或直接焊接到内护筒上进行固定。

### 5.5 清孔

钻孔深度达到设计标高后,应对孔深、孔位、孔径、孔斜进行检查,符合设计要求后方可清孔。根据该工程桩基础设计要求、现行规范规定及该区地层特点,采用“浑水孔”(即全孔泥浆护孔平衡地下水及地层压力)灌注水下混凝土。清孔是在钢筋笼下放完毕后进行的,采取空压机反循环清孔,气液混合室

保持在40 m左右位置,压力为0.7 MPa,被反循环上来的泥浆部分直接排出孔外,向孔内加清水补给,部分通过旋流器泥浆净化装置,除砂后再返回孔内,防止孔内泥浆过清造成孔壁不稳定和孔内渣粒沉淀太快。清孔时保持孔内水头,防止钻孔坍塌。

## 5.6 混凝土的灌注以及相关问题的<sup>[10-12]</sup>

### 5.6.1 水下混凝土灌注前准备

做好水下混凝土配合比设计报批。导管采用 $\phi 325\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 方扣螺纹连接,做好导管拼装、密封性实验,对浇筑混凝土设备进行检查,确保浇筑过程中机具状态良好,并预备一台输送泵和一台发电机组,防止突发情况影响灌注。储料斗采用剩余内护筒材料改造而成,容积可达到 $12\text{ m}^3$ 。开盘时使用的漏斗容积 $2\text{ m}^3$ ,正常灌注时为了便于操作采用小漏斗,容积 $0.5\text{ m}^3$ 。混凝土泵可将混凝土送到储料斗中,通过储料斗阀门调解混凝土流量大小,经梭槽流到漏斗中。导管、漏斗用吊车起吊安装,导管底部距孔底 $0.3\sim 0.5\text{ m}$ 。

灌注前进行空压机打泡,冲散、稀释孔底的沉渣浓浆,步骤为先在风管上加一配重,送入下放好的灌浆管,深度约30 m,此时浇注管距离孔底越近越好。

### 5.6.2 灌注水下混凝土

漏斗安装好后,底部用胶纸做隔水塞,用封口板压住,即可搅拌混凝土。第一盘混凝土要适当加大含砂率,第二盘开始正常配料,至漏斗、储料斗装满混凝土,起拔封口板,然后打开储料斗阀门,即完成了开球,进入正常灌注。初灌混凝土量应满足导管在拔球后埋深 $< 1.0\text{ m}$ ,即 $9.5\text{ m}^3$ 。开球后要检测导管埋深是否符合要求,导管内是否漏水。

在灌注过程中,导管埋深控制在 $2\sim 6\text{ m}$ ,混凝土灌注应连续进行。为确保桩顶质量,在桩顶设计标高以上加 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 混凝土浇筑高度,灌注结束后将此段及时清除。在即将灌注完毕前,应频繁地用竹竿插到浆液中,判断真正的混凝土面的高度,与后场做好交流配合,既可做到不浪费混凝土,又不至于在孔内还存留太多的砂浆。

### 5.6.3 导管埋深控制

导管埋深控制至关重要,埋管太深吊车起拔不动、混凝土堵管,埋管太浅易提出混凝土面、造成断桩等不良后果。实际灌注过程中,一个65 m左右的孔,灌注完毕基本上排出5 m左右的纯砂浆。另外,混凝土灌注过程中,测锤并不能达到真正的混凝土

面(仅可能测到砂浆面),因此导管埋深控制在 $2\sim 6\text{ m}$ 还需有一定的技巧,如果按测的混凝土高度来控制,那很有可能就把导管底口提出混凝土面,进入砂浆层了,可能会形成断桩或对桩有不利影响,实际操作中,导管埋深建议按高限控制在6 m左右(以测量高度计算),在保持混凝土不堵管的情况下,这种做法更为保守安全。

### 5.6.4 钻孔灌注报废原因分析

2-12号孔开球灌注3 m时堵管,造成了灌注报废。经过分析,其原因有以下几个方面:(1)混凝土本身质量存在问题,和易性不好,且在灌注开盘时没有设置隔水塞,混凝土在经过75 m的泥浆冲刷后方到孔底,其间离析严重。(2)浇注管距离底口2 m爆裂,部分泥浆混入下落的混凝土造成污染。(3)后场混凝土跟进不及时,没有对前面离析污染的混凝土进行有效的翻卷。(4)孔底泥浆密度没有达到规范要求的 $1.1\text{ kg/L}$ ,孔底泥浆在清孔打泡后密度最高 $1.3\text{ kg/L}$ 左右,但这不是主要原因,它并没有足够的力量阻挡密度 $2.4\text{ kg/L}$ 的混凝土的下落而造成堵管,只有混凝土本身才能造成混凝土堵管<sup>[8-9]</sup>。

## 5.7 孔口护筒的开挖

在浇注完成后,待混凝土初凝,用挖掘机对孔口护筒进行开挖。实际操作中只有对外护筒进行完全的切割,才能用吊车顺利地起拔上来。在割缝处进行焊接,以备下次使用。焊接后的护筒强度有限,例如2-9号孔护筒因挖掘机在埋设其它护筒时向孔内带入了大量的石头,冲击时护筒内壁存在很大的挤压力,而把护筒挤爆,后对孔内泥石混合物进行打捞,再补焊护筒方解决问题。

## 5.8 其它问题

### 5.8.1 钢绳缠绕

为了避免钢绳缠绕,停钻后孔底循环时,最好把钻头提到孔口。2-4号孔停钻后把钻头提离孔底1 m左右,泵头配重又放到离孔底不远处,开始因为孔底泥浆太浓,钻头没有在钢绳的带动下旋转,可随着循环的进行,孔底泥浆也相应被稀释,钻头开始旋转,钻头、主卷扬与放入孔内的泥浆管和副卷扬钢绳缠绕在一起,造成后续处理困难。

### 5.8.2 钢绳的使用

对于 $\phi 2500\text{ mm}$ 的灌注桩,孔深70 m左右,锤重钢绳磨损快,中途都有报废钢绳的情况,第一次割60 m左右的钢绳较好,如果第一次割得太短,钢绳

报废时剩下好的钢绳则因太短没有太大利用价值。

为节省钢绳使用量,节约施工成本,钢绳允许接头重复使用,但要求接头处不能过天车,最少保证好钢绳有 $L=4\text{ m}+7\text{ m}+(2+4)\times 1.5\text{ m}=20\text{ m}$ 的长度(4 m为天车向孔内第一个接头的距离,保证有4 m的冲程,7 m为天车到卷扬的距离,2为卷扬被绳的圈数,4为冲击时卷扬可以放绳的圈数,1.5 m为卷扬一圈上的钢绳长度),其孔内有多少接头并不重要,只是过天车时注意钢绳不要偏出轨道。

## 6 结语

汉源大树大渡河大桥2号桥墩基础钻孔灌注桩,桩径大,桩孔深,属于河水水位以下的砂卵石层,特别的巨厚砂层施工,具有一定的技术难度,冲击钻进是最为有效的施工方法,采用泥浆净化装置进行除渣可达到较为满意的效果,通过对钻头直径的控制、护筒的使用、灌注时导管埋深的控制等措施,较为顺利地完成了该项工程,相关技术措施可为其他类似工程施工提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] 李世忠. 钻探工艺学[M]. 北京:地质出版社,1992.  
LI Shizhong. Drilling technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [2] 李世京,陈宏儒. 澳门美高梅金殿工程大口径钻孔扩底灌注桩施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(12):5-8.  
LI Shijing, CHEN Hongru. Construction technique of large diameter under-reamed bored cast-in-place pile in Macao Meigao-mei Golden Palace[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006,33(12):5-8.
- [3] 杨联锋,刘成博. 跨江特大桥旋挖钻孔灌注桩入海口水上施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(9):89-92.  
YANG Lianfeng, LIU Chengbo. Over-water construction practice of rotary bored grouting pile at the estuary of Oujiang River [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(9):89-92.
- [4] 杨宗仁,袁洁,张鹏,等. 超大直径、巨厚漂卵石地层钻井泥浆护壁洗井工艺技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(4):50-53.  
YANG Zongren, YUAN Jie, ZHANG Peng, et al. Well flushing technology with drilling mud in super large diameter and great thick gravel-oulder formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(4):50-53.
- [5] 朱永刚,郑文龙,乌效鸣,等. 上海砂性软土地层水平定向钻进泥浆性能调控技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):58-62.  
ZHU Yonggang, ZHENG Wenlong, WU Xiaoming, et al. Drilling mud property control technology of HDD construction in sandy soft soil of Shanghai area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(5):58-62.
- [6] 杨联锋,彭志平,孙智杰. 汾河特大桥大直径超深旋挖钻孔灌注桩施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):89-93.  
YANG Lianfeng, PENG Zhiping, SUN Zhijie. Construction technology of large diameter ultra-deep rotary bored piles at Feh-he Bridge [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):89-93.
- [7] 聂金玲. 天津高新区117大厦超长桩钻孔施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(6):64-67.  
NIE Jinling. Construction technology of borehole for super-long pile of 117 Mansion in Tianjin [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(6):64-67.
- [8] 张志刚. 福州江滨地区超高层建筑灌注桩成孔工艺分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):84-87.  
ZHANG Zhigang. Borehole completion process of cast-in-place pile for super high-rise buildings in Fuzhou Riverside area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(6):84-87.
- [9] 朱芝同,张化民,宋志彬,等. 西成高铁卵石地层全套管跟管钻进施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):50-52,56.  
ZHU Zhitong, ZHANG Huamin, SONG Zhibin, et al. Application of drilling with full casing (benote method) in cobble-boulder stratum in Xi'an-Chengdu high-speed rail [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(5):50-52,56.
- [10] 张伟靖,张伟琴,王格平. 钻孔灌注桩施工技术及常见质量问题防治措施[J]. 山西建筑,2016,42(27):61-63.  
ZHANG Weijing, ZHANG Weiqin, WANG Geping. On construction technique of bored piles and prevention measures for common quality problems [J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(27):61-63.
- [11] 包其龙. 钻孔灌注桩施工技术实践探析[J]. 西部交通科技,2019(1):85-87.  
BAO Qilong. Analysis on the practice of bored pile construction technology [J]. Western China Communications Science & Technology, 2019(1):85-87.
- [12] 吉晓朋,江九龙. 钻孔灌注桩施工中的常见问题及预防措施[J]. 山西建筑,2015,41(32):67-68.  
JI Xiaopeng, JIANG Jiulong. On common problems in construction of bored piles and its prevention measures [J]. Shanxi Architecture, 2015,41(32):67-68.

(编辑 周红军)