



海上超长大直径嵌岩钻孔灌注桩施工技术

江和明, 荣劲松

(中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510500)

摘要: 介绍槟城二桥主桥钻孔灌注桩施工技术。马来西亚槟城第二跨海大桥主桥是一座双塔斜拉桥。该桥索塔基础采用21根 $\phi 230$ cm/ $\phi 200$ cm变直径钻孔灌注桩, 其最大设计桩长为126.9 m, 桩端嵌入微风化基岩深度达8 m, 最大成孔深度达133.15 m。基于对槟城二桥主桥海上钻孔灌注桩的施工技术管理实践, 总结超长钻孔灌注桩的设备选型、成孔、成桩、桩基承载力试验等施工工艺, 为同类桩基的施工提供经验。

关键词: 钻孔灌注桩; 超长; 嵌岩; 大直径

中图分类号: U 655.55

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2015)02-0156-07

Construction technology of marine rock-socketed cast-in-situ bored pile with large diameter and super length

JIANG He-ming, RONG Jin-song

(The First Engineering Co. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510500, China)

Abstract: This paper focuses on the construction technology of cast-in-situ bored piles of the main bridge of the Second Penang Bridge of Malaysia. The main bridge of the Second Penang Bridge of Malaysia is a double-tower cable-stayed bridge. Each tower is supported by 21 pieces of $\phi 230 \sim 200$ cm bored piles with a maximum length of 126.9 m. The piles are designed to be socketed into the penetrating weathered rock layer of 8 m in depth, and with a maximum bored-hole layer of 133.15 m in length. From the construction management on marine bored pile of the Second Penang Bridge, we sum up construction techniques of the equipment selection, drilling, concreting, statistic test of bored pile and others, and accumulate valuable experience for similar pile construction.

Keywords: cast-in-situ bored pile; super-length; rock-socketed; large diameter

1 工程概况

马来西亚槟城第二跨海大桥连接马来西亚半岛西海岸和槟城岛, 全长约23 km, 其中陆上引桥长约6 km, 跨越Penang海峡桥长约16.5 km, 是目前东南亚最长的跨海公路大桥。

槟城二桥主通航孔桥位于距槟城岛海岸约2 km处, 为一座117.5 m+240 m+117.5 m的预应力混凝土双塔双索面斜拉桥, 全长475 m。主通航孔桥桥型布置见图1。

主通航孔桥索塔基础(P025、P026主墩)采用21根 $\phi 2.3$ m/ $\phi 2.0$ m变径钻孔灌注桩(桩基

上部41.5 m直径为 $\phi 2.3$ m, 其下为 $\phi 2.0$ m), 承台厚度6 m, 过渡墩(P024、P027墩)采用12根 $\phi 2.3$ m/ $\phi 2.0$ m的钻孔灌注桩, 承台厚度4 m。设计桩长104~126.9 m, P024~P027墩桩端入微风化花岗岩深度分别为2 m, 8 m, 6.5 m, 2 m。

1.1 工程地质

地质钻孔资料表明, 主桥区域地层由第四纪地层和花岗岩地层组成, 基岩埋深较深。桥位处上部为约厚20 m的淤泥质覆盖层, 该层含有海洋贝壳碎片和粉细砂, 为典型的海相沉积。该淤泥质层以下主要为灰色、灰褐色的中密实到密实粉

收稿日期: 2011-06-13

作者简介: 江和明(1967—), 男, 高级工程师, 从事港口及路桥工程施工管理。

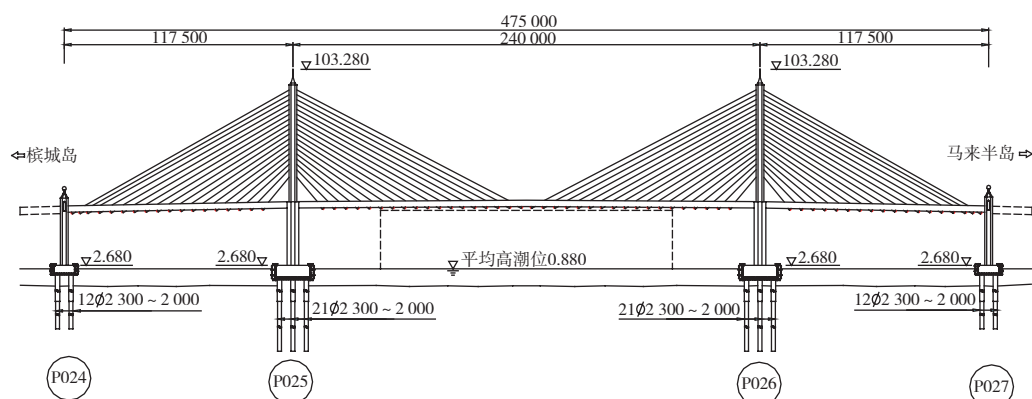


图1 槟城二桥主通航孔桥立面布置

质细到粗砂层和坚硬的砂性黏土层。基岩为坚硬的花岗岩, 强风化层的厚度在10 m左右。

P025、P026墩设计桩底高程处基岩为强度35~38 MPa的微风化花岗岩, P027墩设计桩底高程处基岩为强度77 MPa的微风化花岗岩。

1.2 水文

桥位处海域最高潮水位为1.18 m, 最低潮水位为-1.72 m, 大潮平均潮位变动范围为-1.12~0.88 m。在一个涨落潮周期内, 海峡内水流呈往复流态, 涨潮向南, 落潮向北。大潮期间最大流速为0.89 m/s, 小潮期间最大流速为0.75 m/s。

1.3 本工程钻孔桩施工特点及难点

1) 钻孔桩成孔难度大。本工程桩基直径 $\phi 2.3$ m/ $\phi 2.0$ m, 最大设计桩长为126.9 m, 成孔深度达133.15 m, 钻孔垂直度控制难度大; 地质资料显示, 覆盖层除部分土层为黏土层外, 大部分地层为砂层或粉砂层, 钻进及清孔过程中容易出现塌孔情况, 对泥浆性能要求高。

2) 桩基嵌岩深度大, 基岩强度高, 入岩钻进施工难度大、风险高。P24~P27墩桩基设计要求入微风化岩深度分别为2 m, 8 m, 6.5 m, 2 m, 且基岩强度高达77 MPa, 入岩钻进极易发生断钻杆事故, 故对钻头、钻杆以及钻机性能要求非常高。

3) 混凝土灌注施工难。每根桩混凝土方量大, 混凝土采用强度等级高(C40)且有耐久性要求的高性能海工混凝土, 相应造成混凝土黏度大, 灌注施工难。

2 海上施工平台

主桥施工钢平台主要由3部分组成: 钻孔桩施

工平台、混凝土拌和平台、连接主墩和过渡墩的钢栈桥。

P25、P26主墩桩基平台尺寸为23.1 m $\times$ 53.7 m, P24, P27过渡墩桩基平台尺寸为14.6 m $\times$ 46 m。平台面高程3.0 m, 比最高潮水位高1.8 m。桩基施工钢平台基础直接利用桩基钢护筒, 平台面层结构兼作为承台钢套箱底板进行设计, 钻孔灌注桩施工完成后直接在平台面拼装套箱侧模。桩基平台钢结构从下到上依次为 $\phi 2.3$ m钢护筒、I61工字钢、I35工字钢、 $\delta=10$ mm厚钢板。主墩桩基施工平台结构布置如图2所示。

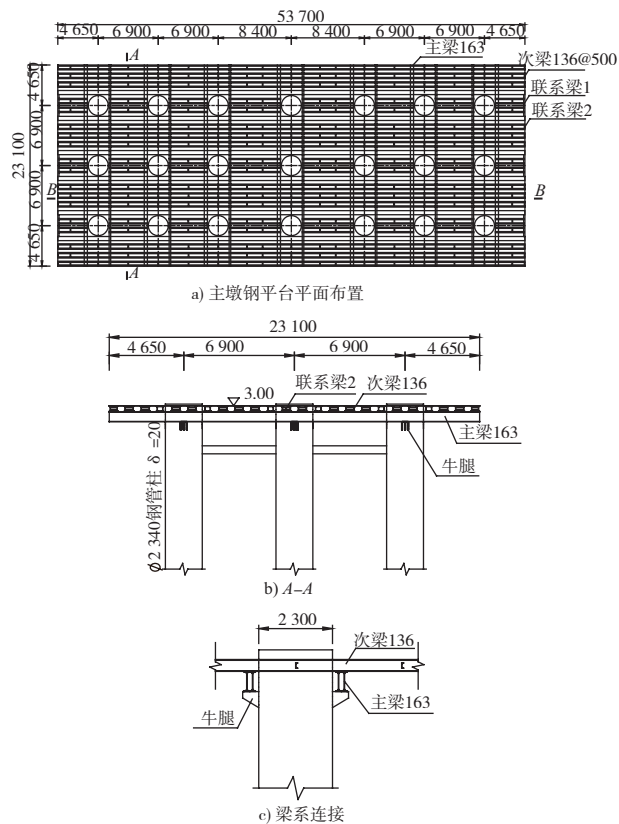


图2 主墩施工平台结构布置

在P25、P26主墩桩基施工平台北侧搭设混凝土拌和平台，拌和平台尺寸30 m×40 m，顶面高程3.5 m。每个拌和平台分为砂石料堆存区域和拌和系统布置区域。结构设计时，砂、石料按照平均堆载高度2 m考虑，水泥罐单独采用钢管桩作基础。拌和平台钢结构从下到上依次为φ 820 mm×10 mm钢管桩、I56工字钢、贝雷片、16#槽钢、δ=10 mm厚钢板。每个平台上布置2套120 m³/h混凝土拌和系统，见图4。

在P24~P25墩、P26~P27墩之间搭设连接钢栈桥，作为施工人员行走及布设混凝土泵管的通道，栈桥宽度2 m。栈桥钢结构工程从下到上依

次为φ 820 mm×10 mm钢管桩、I22工字钢、贝雷片、16#槽钢、δ=10 mm厚花纹钢板。边墩混凝土由布设在栈桥上混凝土输送管直接泵送。

3 钻孔灌注桩施工

3.1 钻机及主要配套设备

1) 钻机。槟城二桥主桥主墩桩基最大成孔深度超过130 m，嵌岩深度达8 m，故成孔施工对钻机性能要求高，经过比选，本工程采用ZJD3000/210型及KP3500/210型液压回旋钻机，共配置5台。ZJD3000/210型及KP3500/210钻机主要性能参数见表1。

表1 ZJD3000/210、KP3500/210型液压钻机主要性能参数

型号	机架			动力头				钻杆规格/mm	电源	总功率/kW	整机尺寸/m	整机质量(不含钻杆、配重)/t	排渣方式
	最大钻孔直径/m	最大钻孔深度/m	最大提升力/t	钻杆吊机/t	动力头行程/m	转速/(r·min ⁻¹)	扭矩/(t·m)						
ZJD3000/210	φ 3.0	150	150	1.5	3.6	0~24	0~21	φ 377×22×3 000	3相380 V 50 Hz	230	4.12×3.98×7.3	35	气举反循环
KP3500/210	φ 3.5	120	120			0~24	0~21	φ 377×22×3 000	3相380 V 50 Hz	198	7.1×6.4×8.7	47	

2) 钻头配置。根据地质情况，主要配备2种形式的钻头：刮刀钻头及滚刀钻头，分别用于覆盖层（黏土层、砂层）及岩层的钻进。另外配备一定数量的“菠萝头”钻头，主要用于高强度基岩（一般大于70 MPa）的钻进，以加快入岩钻进速度。

3) 泥浆净化器。泥浆净化器选用ZX-200型，总功率48 kW，泥浆处理能力200 m³/h，分率程度≥74 μm，除砂率≥90%，脱水率≥80%。

4) 空压机。空压机选用OG160F型，排气量19.5 m³/min，工作压力1.25 MPa，功率160 kW。

3.2 泥浆制备及泥浆循环

3.2.1 制浆材料

1) 膨润土：产地印度。膨润土泥浆具有相对密度低、黏度低、含砂量少、失水量少、泥皮薄、固壁性能好、钻具回转阻力小、钻进效率高、造浆能力大等优点^[1]。

2) 分散剂：采用纯碱（Na₂CO₃）。其作用可使pH值增大到10。泥浆pH值过小时，黏土颗

粒难于分解，黏度降低，失水量增加，流动性降低。pH值控制在8~10，可增加水化膜厚度，提高泥浆的胶体率和稳定性，降低失水量，改善泥浆的性能^[1]。

3) 增黏剂：选用PAC作为增黏剂。由于海水中阳离子和Cl⁻的大量存在会降低泥浆黏度，使用增黏剂可提高泥浆黏性，改善浆液的流变性能和悬浮钻渣的能力。本工程采用的PAC是羧甲基纤维素CMC的衍生物，是一种阴离子型线性高分子物质，能在海水中不降粘，具有增稠性、保水性、抗盐性及较好的薄膜成形性。

4) 水：采用淡水（根据马来西亚JKP标准）。

3.2.2 泥浆配合比及性能指标

本工程采用泥浆配合比及其性能指标见表2和3，桩基施工过程中各阶段泥浆性能指标控制标准需符合欧洲标准（EN1538：2000），结合本工程的特点及以往施工经验，实际施工时按照表4所列的控制标准进行控制。

表2 泥浆施工配合比					表3 新制泥浆实测性能指标					
材料名称	水	膨润土	Na ₂ CO ₃	PAC	性能指标	相对密度/(g·mL ⁻¹)	黏度/s	pH值	含砂率/%	泥皮厚度/mm
材料用量/kg	1 000	58	2	0.4	实测值	1.03	42	9	0.5	2.1

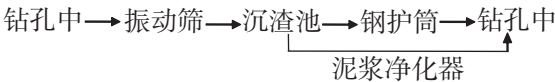
表4 泥浆性能指标控制标准 ^[2]						
泥浆性能	密度/(g·m ⁻³)	黏度/s	失水量/[mL·(30 min) ⁻¹]	泥皮厚/mm	pH值	含砂量/%
新制泥浆	≤1.05(1.10)	(32~50)	≤20(30)	≤3(3)	8~10(7~11)	≤4(n.a)
循环再生泥浆	≤1.15(1.25)	(32~60)	≤40(50)	≤3(6)	9~11(7~12)	≤4(n.a)
清孔后泥浆(混凝土灌注前)	≤1.1(1.15)	(32~50)	≤40(n.a)	≤3(n.a)	8~10(n.a)	≤1(4)

注: 括号内数值为欧洲标准(EN1538: 2000); n.a: 不可用。

3.2.3 泥浆循环

泥浆循环采用气举反循环方式。根据施工现场的实际情况, 钻孔时利用钢护筒形成泥浆循环池, 并配备泥浆净化器, 钻进过程中进行泥浆的净化处理。泥浆循环一定时间后, 由于地下海水污染泥浆, 泥浆性能下降, 因此在泥浆循环过程中, 要在泥浆中添加PAC等外加剂改善泥浆性能。

钻孔泥浆循环利用一个泥浆池和一个专用钢护筒作为沉渣池, 过滤器组成。泥浆循环过程为^[2]:



泥浆循环过程见图3。

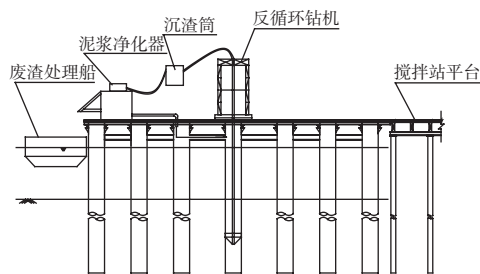


图3 泥浆循环系统

采用泥浆净化器进行处理后的泥浆, 满足指标要求的进行重复利用, 经多次重复使用, 如果泥浆指标降低, 应采取措施进行调整, 严重超标的应废弃更换。

3.3 钻进成孔

本工程桩基为变径桩, 钢护筒内桩径为 ϕ 2.3 m, 钢护筒以下部分桩径为 ϕ 2.0 m。钻进成孔施工主要分3个阶段: 护筒内钻进阶段、护筒外覆盖层钻进阶段及入岩钻进阶段。

根据本工程特点及墩位处地质情况, 采用优质淡水泥浆护壁、气举反循环、大配重减压钻进的施工工艺。不同地层采取不同的钻进参数, 见表5。

表5 不同地层钻进参数 ^[2]			
地层	钻压/kN	转数/(r·min ⁻¹)	进尺速度/(m·h ⁻¹)
护筒底口土层	≤100	5~10	0.5~1.0
黏土、粉质黏土	≤100	10~15	1.0~1.5
粉、细砂	100~150	5~10	1.5~2.5
中、粗砂层	100~150	5~10	1.5~2.0
岩层(弱风化花岗岩)	150~200	5~10	0.03~0.10

3.3.1 护筒内钻进

由于有护筒的防护, 护筒内地层采用高转速、清水护壁进行钻进施工, 在清水补充速度及风包沉没比能够满足要求的情况下, 可尽量加快进尺速度(2~3 m/h), 为缩短成孔周期争取时间^[3]。

护筒内钻进过程中, 每进尺3 m(一节钻杆长度)钻头要提升几次进行扫孔, 以确保 ϕ 2.0 m 三翼刮刀钻头挡圈外 ϕ 30 mm 钢丝绳清除掉护筒内壁的黏土, 以确保护筒内成桩直径。护筒内钻进完成后, 进行护筒内造浆。

3.3.2 护筒外覆盖层钻进

当护筒内泥浆的各项性能指标符合要求后, 才能开始正式进尺。在护筒底口附近地层采用慢速钻进, 以形成稳定孔壁, 每小时进尺控制在0.5~1 m。

当钻出护筒底口5 m后恢复正常钻进, 根据不同土层特点, 选择不同的钻速和进尺。砂层中采用大气量、中小钻压、中低转速钻进, 进尺控制在2 m/h左右; 黏土层中进行钻压控制, 中高转速

钻进,进尺1.0~1.5 m/h,并适当降低泥浆黏度,避免糊钻,且每钻进一个回次的单根钻杆要及时进行扫孔,以保证钻孔直径满足要求^[3]。

3.3.3 入岩钻进

当钻至基岩岩面时,提钻并将刮刀钻头更换为 $\phi 2.0$ m滚刀钻头(8T),加配重15 t。入岩钻进前先进行气举反循环清孔,把更换 $\phi 2.0$ m滚刀钻头过程中刮落的泥皮及沉渣吸干净。

由于基岩面可能倾斜或局部软硬不均,为了避免斜孔,入岩钻进开始时首先要轻压慢钻,待找平孔底岩面后再采用进入正常减压钻进(15~20 t稳压钻进),按每天进尺0.7~1.5 m控制钻进速度。入岩钻进过程中,若发生异常情况,如跳钻、钻杆扭距过大等,应立即停止进尺,待查明原因后再继续钻进。

3.3.4 清孔

1) 第一次清孔。

终孔后,及时进行清孔。清孔时将钻具提离孔底约15 cm,缓慢旋转钻头,通过气举反循环吸出孔底钻渣,同时补充稀释泥浆进行泥浆调整,通过反复循环使清孔的泥浆性能指标达到清孔泥浆指标。清孔过程中保持孔内水头,防止塌孔。经检测孔内泥浆指标符合要求后,再次复测孔深,然后停机拆除钻杆、移走钻机,尽快安排进行混凝土灌注。

2) 第二次清孔。

在钢筋笼和导管安装好,混凝土浇注之前,进行孔底沉渣的厚度的测量,若沉渣厚度超出设计规定值时,要进行二次清孔。二次清孔亦采用气举反循环法,在导管内接1根内径4 cm的送风钢管,风管入水深度约40 m,导管顶端密封,预留进风管及出浆管^[4]。清孔时吊机移动导管在孔底的位置,直到孔底沉渣厚度不超过设计规定值及规范要求方可进行混凝土浇筑。

3.3.5 钻进施工操作要点

1) 钻进及提升拆除钻杆的过程中始终维持护筒内外水头差不小于2 m,以保证孔壁稳定。

2) 加接钻杆时,先停止钻进,将钻具提离孔

底8~10 cm,维持泥浆循环5 min以上,以清除孔底沉渣并将管道内的钻渣排净,然后再加接钻杆。

3) 接长钻杆时,钻杆连接螺栓应拧紧上牢,并认真检查密封圈,以防钻杆接头漏水漏气,使反循环无法正常工作。

4) 在正常钻进过程中,为了保证钻孔的垂直度,采用减压钻进,始终让加在孔底的钻压小于钻具总质量(扣除泥浆浮力)的80%。

5) 钻进过程中定期对钻头和钻杆进行检查,防止由于螺栓的脱落或钻头的磨损严重造成钻进过程中的事故。

6) 钻进过程中保证孔口的安全,孔内不得掉入任何铁件以保证钻孔施工的顺利进行。

7) 钻孔过程应连续操作。详细、真实、准确地填写钻孔原始记录,钻进中发现异常情况及时上报处理。

8) 提钻时注意操作轻、稳,防止钻头拖刮孔壁或护筒刃脚。注意起重压力的变化,当钻头上升到护筒底口,如果负荷加大则可能发生卡钻,此时可转动钻头,轻轻上提或将钻头下放换一方向再上提,不可强拉,以致使护筒底口内卷甚至塌孔。

3.4 钢筋笼制作及下放

钢筋笼制作在槟城侧岸上后方钢筋加工场进行。为保证对接精度,钢筋笼采用镦粗直螺纹连接、同槽通长预制(长线法)、现场分节连接、下放施工工艺。钢筋笼长线法制作如图4所示。



图4 钢筋笼长线法制作

成型钢筋笼标准节段长度12 m, 用平板车运至码头, 用吊机装船, 再由驳船运往现场逐节吊装下放。边墩钢筋笼由300 t起重船直接起吊下放, 主墩钢筋笼由钻桩平台上的100 t履带吊起吊下放就位。在进行钢筋笼对接沉放施工时应注意: 声测管在分节接长时, 管道对接要顺直, 焊接要牢固可靠, 并用铁丝将管道绑扎在钢筋笼相应的位置, 同时需在声测管内注水检漏, 避免混凝土灌注时漏浆, 确保施工前后声测管的畅通。

3.5 水下混凝土灌注

3.5.1 混凝土生产及输送

P025、P026主墩各搭设面积40 m × 30 m的水上平台作为混凝土拌和平台, 每个拌和平台上安装2套120 m³/h的混凝土拌和系统。P24、P27边墩施工平台与主墩工平台之间搭设2 m宽栈桥相互连通, 栈桥上布设混凝土输送管。混凝土则直接由混凝土输送泵(拖泵)泵送至现场浇注(图5)。



图5 主墩施工平台与边墩施工平台之间由钢栈桥连接

3.5.2 混凝土配合比设计

本工程桩身混凝土采用C40海工耐久性混凝土, 单条桩混凝土最大方量为450 m³, 混凝土灌注时间控制在8 h内。

混凝土按海工耐久性混凝土进行配制, 配合比设计要符合设计及规范要求, 同时其工作性能要满足水下灌注施工需要: 1) 混凝土坍落度18~22 cm, 2 h后坍落度不小于18 cm, 流动度不小于50 cm。2) 混凝土初凝时间不小于16 h。3) 采用级配良好的中砂, 细度模数2.6~2.9。4) 采用级配良好的碎石, 粒径5~20 mm。5) 掺入粉

煤灰、矿粉、高效减水剂, 采用低水胶比, 混凝土耐久性满足要求, 且具有良好的和易性、流动性、可泵性。

3.5.3 混凝土灌注

混凝土灌注采用直径30 cm、壁厚7 mm的无缝钢管作导管, 导管采用丝扣连接。导管分节加工, 分节长段应便于拆装和搬运, 并小于提升设备的提升高度, 每节长度以2~4 m, 还需加工2节1 m长作为高度调节。

导管在使用前和使用一个时期后, 除应对其规格、外观质量和拼缝构造进行检查外, 还需做拼接、过球、承压及水密性试验。

经计算, 首批混凝土方量不小于9.5 m³, 故现场配备12 m³及2 m³料斗, 12 m³料斗用于首批混凝土灌注, 2 m³料斗用于剪球后的正常灌注。

混凝土首批封底灌注采用拔球法施工。首批混凝土灌注成功后, 随即转入正常灌注阶段。混凝土经泵送, 不断地通过集料斗、浇注料斗及导管灌注至水下, 直至完成整根桩的浇注。

4 结语

1) 对于桩长超过100 m的超长大直径嵌岩钻孔灌注桩, 施工的成败很大程度上取决于钻机的性能。钻机选型时, 要采取“杀鸡用牛刀”的思维, 选择性能优良的大功率钻机, 重点关注钻机的扭矩以及钻杆的强度、刚度等性能参数, 在满足施工需要的情况下, 还应当留有一定的余地。

2) 保证大直径超深钻孔桩成孔施工顺利进行的另一个关键是护壁泥浆的性能。特别是砂层, 造浆性能差, 易塌孔, 泥浆控制显得尤为重要。正式开钻之前应进行泥浆配比试验, 选用不同产地的膨润土, 按不同比例的水、膨润土、纯碱和PAC、PHP等泥浆外加剂进行试配, 选择泥浆各项指标最优的泥浆配比, 并在试桩施工中加以检验和调整用于正式钻孔桩施工中。

3) 为了保证成孔垂直度, 防止斜孔产生, 所有地层均应采取大配重、减压钻进, 严格控制钻压和进尺速度。不同地层(砂层、土层、岩层)应采用不同的钻进参数(钻压、转数、进尺速度), 钻进参数根据钻机性能、各地层的具体地质情况初步确定, 并在施工中进一步调整优化。

4) 大直径深孔入岩钻进时, 若控制不好很容易发生斜孔或断钻杆事故, 施工时应特别注意。首先, 要确保钻杆的质量, 并重点检查钻杆连接法兰是否符合要求; 其次, 入岩钻进开始时, 先轻压慢钻, 待孔底岩面找平后再正常钻进; 第

三, 要严格控制钻压和钻进速度, 避免钻杆承受过大扭矩。

参考文献:

- [1] JTJ 041—2000 公路桥涵施工技术规范[S].
- [2] 张鸿, 刘先鹏. 特大型桥梁深水高桩承台基础施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 杭州湾大桥工程指挥部. 杭州湾跨海大桥建设技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [4] 中国公路建设行业协会. 公路工程工法汇编(2008)[G]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

(本文编辑 郭雪珍)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

跨海建桥, 工程自然条件差, 施工技术难度大。马来西亚槟城第二跨海大桥目前是东南亚最长的跨海公路大桥。该桥钻孔灌注桩属海上超长大直径嵌岩钻孔灌注桩, 其施工难点主要有: 1) 钻孔桩成孔难度大; 2) 桩基嵌岩深度大, 基岩强度高, 入岩钻进施工难度大、风险高; 3) 混凝土灌注施工难。鉴于上述施工难点, 该文总结出超长大直径钻孔灌注桩设备选型、成孔、成桩、桩基承载力试验等施工关键技术, 为同类桩基的施工提供了经验, 对类似工程有较强的指导作用和较高的实用价值。

论文重点突出, 结构严谨, 语言简练, 文字通顺, 篇幅长短适宜, 是一篇值得学习借鉴的施工类优秀科技论文。

蔡大富

2014年12月

评委简历:



蔡大富, 教授级高工, 长江航道规划设计研究院副总工程师。“十五”期长江航道局先进科技工作者, 获长江航务管理局“十一五”杰出科技成就奖。

主持完成交通运输部重点建设项目“长江中游罗湖洲水道等多项航道整治工程”工可研究与设计、“戴家洲河段航道整治工程”二期结构设计以及国家行业标准的制定等。获国家级与省部级科学技术奖、咨询成果奖及设计奖6项。国内外发表科技论文20余篇。