

# 变截面大直径钻孔灌注桩在城市桥梁中的应用

贾红雨

(中铁大桥局 武汉桥梁特种技术有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 概括了变截面大直径钻孔灌注桩的技术特点;通过宁波市灵桥基础加固工程,分析了城市桥梁采用变截面大直径钻孔灌注桩的优缺点,介绍了其关键施工技术及质量控制措施。

**关键词:** 桥梁;变截面大直径钻孔灌注桩;单桩承载力;桩侧阻力

**中图分类号:** U443.15

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2017)01-0152-05

相对于等截面钻孔灌注桩,变截面钻孔灌注桩是指横截面尺寸及形状沿着桩身轴向变化的桩。直径 $\geq 2.5$  m 时,称为变截面大直径钻孔灌注桩。其具有以下技术特点:1) 单桩承载力大,常可一桩一柱,群桩效应小。2) 属于非挤土桩,施工基本无噪音、无振动、无地面隆起或侧移,也无浓烟排放,因而对环境的影响小,对周围建筑物、路面或地下设施等危害小。3) 桩身刚度大,除能承受较大竖向荷载外,还能承受较大水平荷载,能有效充当坡地抗滑桩及建筑物基坑开挖的支护桩。4) 可采取扩大底部的形式,更好地发挥桩端土的作用,也可采用凹凸桩、阶梯形桩、竹节桩等,这是其他桩型所不能做到的。5) 影响成桩质量的人为因素较多,质量不稳定,因其承载力高,进行常规的静荷载试验常难以测定其极限荷载,对在各种工艺条件下形成的桩受力、变形和破坏机理至今未完全弄清,并且当用泥浆护壁施工时,尤其是在城市内施工,排污问题令人困扰。

变截面大直径钻孔桩在大江、大海桥梁中应用广泛,在城市中则主要应用于建筑物,且直径多为 $\phi 600 \sim \phi 2\,000$  mm 钻孔灌注群桩,在城市桥梁建设中应用极少。该文以宁波市灵桥基础加固为例,探讨变截面大直径钻孔桩在城市桥梁中的应用。

## 1 工程概况

灵桥为单跨中承式三铰拱结构钢桥,跨径为 97.536 m,桥宽 25 m。主拱圈采用帽形断面,矢跨比为 1/6.5,竖曲线为半径 88.201 m 的圆弧线。全桥共设等间距布置的 H 形截面吊杆 12 对,吊杆中心距为 7.925 m。

下部结构采用空箱式桥台和松木斜桩。空箱式桥台长 13.8 m,宽 22.1 m,桥台内部划分为宽 1.68 m 的条状空间。松木斜桩长 30 m,向桥梁外侧下方

斜插入地面,与平面的夹角分别为  $75^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $17^\circ$ ,每个桥台桩基由 102 根桩组成(见图 1)。

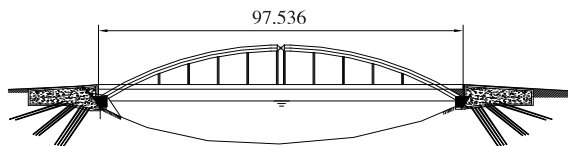


图 1 桥梁立面布置示意图(单位:m)

## 2 基础加固方案比选

在确定选用变截面大直径钻孔桩之前,有关方面提出了两侧加桩+转换梁的加固方案,即在桥台两侧增设群桩基础和转换梁。在老桥台两侧新建钻孔灌注桩基础和承台,每个桥台单侧各设置 12 根 $\phi 1.5$  m 钻孔桩,桩长 45 m。拱座下设大转换梁将拱座传下来的荷载传递到承台,转换梁顺桥向宽 5.5 m,横桥向长 20.7 m,高度 4 m。拱座顺桥向宽 2.5 m,横桥向长 3 m,高 1.75 m,承台及拱座采用钢筋混凝土结构。两种方案的优缺点见表 1。

此外,灵桥两岸边空箱基础存在向江中方向滑移的风险,大直径钻孔桩因其桩身刚度大,除能承受较大的竖向荷载外,还能承受较大的水平荷载,能有效充当空箱基础抗滑移桩的作用,并为上部结构拱肋的水平推力提供支反力。综合考虑,确定选用变截面大直径钻孔桩加固方案。

具体方案如下:在老桥台前方与拱肋对应处新建 2 根超大直径钻孔灌注桩,采用直径 $\phi 3.6 \sim \phi 3.2$  m 变截面桩,桩长 45 m,桩顶设置横向系梁连接 2 根桩基。桩基施工过程中设置的钢护筒参与作用。通过在老桥台上植筋将新建基础的桩帽与老桥台浇筑成整体共同受力。为方便与老桥台的植筋连接,桩帽在连接老桥台一侧设置为矩形,在临水面一侧设置为圆弧形(见图 2)。

表 1 基础加固方案比选

基础加固方案	优点	缺点
变截面大直径钻孔桩	对周边环境及排污口、便桥、中信酒店地下车库等既有构造物影响较小;对老基础扰动较小,开挖面小;不需要拆除既有龙门吊机栈桥轨道	钢护筒直径 4 m,壁厚 32 mm,加工难度大,为超高超宽件运输,加工厂及运输条件有待考察;孔径大,选用的钻孔设备较大,相应的吊装、插打等辅助设备、泥浆池也较大,对地基承载力、场地布置要求高;承台系梁施工时由于潮差作用且不能环形封闭,围堰止水较困难
两侧加桩+转换梁	采用常规直径钻孔桩	对周边环境及排污口、便桥、中信酒店地下车库等既有构造物影响非常大;需拆除基础范围内龙门吊机栈桥轨道,并在安装上部结构前恢复;承台系梁施工时由于潮差作用且不能环形封闭,围堰止水较困难,围堰横桥向较宽,中间有空箱结构,内支撑设置困难;地质勘探时空箱外侧多次钻出木桩,横向斜木桩存在的可能性非常大,基坑开挖时可能破坏斜木桩;对老基础扰动较大,开挖面大,场地布置困难;施工周期较长

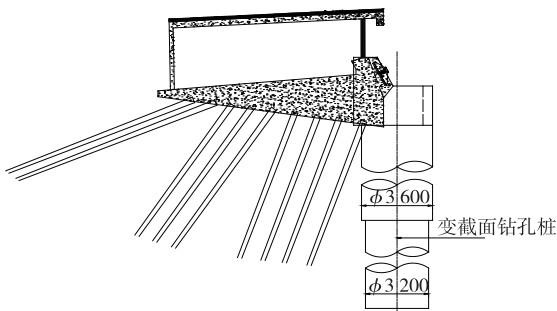


图 2 桥台立面布置示意图(单位:mm)

3 变截面大直径钻孔灌注桩关键施工工艺

3.1 钻孔平台

3.1.1 施工

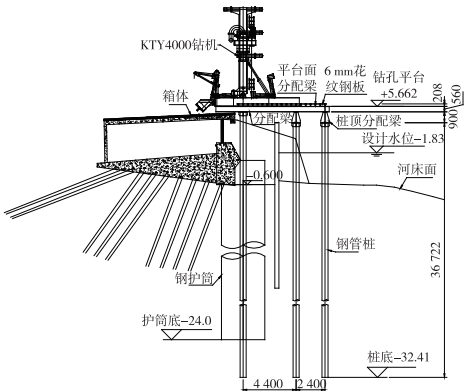
桩基采用钻孔平台施工。海曙侧钻孔平台尺寸如下:顺桥向长 10.995 m,横桥向宽 22.100 m,平台高程为+6.820 m。江东侧钻孔平台尺寸如下:顺桥向长 12.025 m,横桥向宽 22.100 m,平台高程为+6.420 m。海曙侧及江东侧钻孔平台上均布置 2 台 KTY4000B 型液压力头钻机。

将栈桥龙门吊轨道接长,利用 100 t 龙门吊进行钻孔平台钢管桩打设、钢管桩连接系吊装焊接。

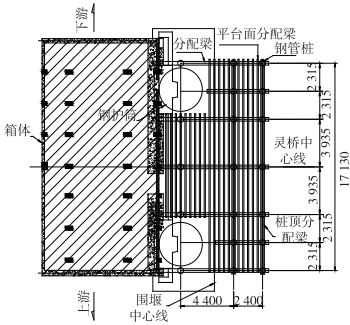
3.1.2 计算

钻孔平台为钻孔作业的主要承载结构,需确保钢管桩、纵梁、钻机分配梁、平台面等的稳定性。加上甬江潮差大,江水对钢管桩的冲刷较强,需通过计算确保钻孔平台的安全。其中江东侧钻孔平台受力较为不利,以该侧钻孔平台为例进行计算。江东侧钻孔平台布置见图 3,钻孔平台处地质参数(杂填土

无桩侧摩阻数据,故不考虑杂填土)见表 2。



(a) 立面图



(b) 平面图

图 3 江东侧钻孔平台布置示意图(单位:标高为 m, 其他为 mm)

表 2 江东侧钻孔平台处地质参数

岩土名称	地层顶 标高/m	地层厚 度/m	桩周土摩阻 力标准值/kPa
淤泥质粉质黏土	-4.28	8.0	16
粉土夹粉质黏土	-12.28	3.2	20
粉质黏土	-15.48	7.0	65

### 3.1.2.1 材料规格

钢管桩采用  $\phi 500 \times 8$ 、 $\phi 630 \times 10$  mm 钢管。纵梁采用 HN900  $\times$  300 mm、I56b。钻机分配梁采用 2I45b。平台面,平台面板为 6 mm 花纹钢板,平台分配梁为 I20b 型钢,间距 400 mm。

### 3.1.2.2 荷载参数

(1) KTY4000B 型液压动力头钻机主机自重 50.216 t, 钻具系统 24.784 t, 考虑冲击系数 1.3, 则总重为 97.5 t。

(2) 平台面堆载。沉渣筒为  $40 \text{ kN/m}^2$ , 泥浆分离器为  $5 \text{ kN/m}^2$ , 动力柜为  $10 \text{ kN/m}^2$ , 空压机为  $5 \text{ kN/m}^2$ , 钻杆堆放区为  $10 \text{ kN/m}^2$ , 其他  $5 \text{ kN/m}^2$ 。

(3) 水流力。水流流速取  $1.04 \text{ m/s}$ , 水流力为  $R = K\gamma v^2 A / (2g)$  (其中:  $K$  为水流阻力系数, 桩为圆形, 取 0.73;  $\gamma$  为水容重, 取  $10 \text{ kN/m}^3$ ;  $v$  为水流速度;  $A$  为单桩入水部分在垂直于水流方向的投影面积)。钢管桩入水长度为 3.2 m,  $\phi 500$  钢管水流力  $F_{w1} = (0.73 \times 10 \times 1.04^2 \times 3.2 \times 0.5) / (2 \times 9.8) = 0.62 \text{ kN}$ , 遮流系数为 0.76, 后排桩水流力为  $0.62 \times 0.76 = 0.47 \text{ kN}$ ;  $\phi 630$  钢管水流力  $F_{w2} = (0.73 \times 10 \times 1.04^2 \times 3.2 \times 0.63) / (2 \times 9.8) = 0.81 \text{ kN}$ , 遮流系数为 0.82, 后排桩水流力为  $0.81 \times 0.82 = 0.66 \text{ kN}$ 。

(4) 结构自重。

### 3.1.2.3 结构计算

计算工况为钻孔平台自重+平台面堆载+水流力+KTY4000B 型液压动力头钻机工作荷载。建立空间模型进行计算, KTY4000B 型液压动力头钻机工作荷载按点荷载作用于钻机分配梁相应位置(见图 4)。

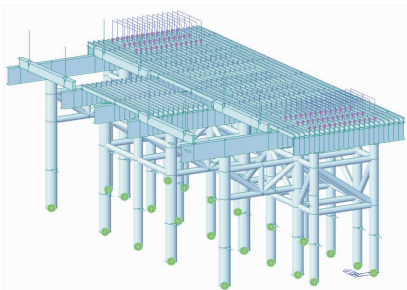


图 4 江东侧钻孔平台计算模型

(1) 纵梁。纵梁最大正应力为  $51.2 \text{ MPa} < 170 \text{ MPa}$ , 最大剪应力为  $20.3 \text{ MPa} < 100 \text{ MPa}$ , 变形为  $4.2 \text{ mm} < L/400 = 11.2 \text{ mm}$ , 满足要求。

(2) 钻机分配梁。钻机分配梁最大正应力为  $79.9 \text{ MPa} < 170 \text{ MPa}$ , 最大剪应力为  $27.5 \text{ MPa} <$

$100 \text{ MPa}$ , 变形为  $7.1 \text{ mm} < L/400 = 14.0 \text{ mm}$ , 满足要求。

(3) 平台分配梁。平台分配梁最大正应力为  $24.4 \text{ MPa} < 170 \text{ MPa}$ , 最大剪应力为  $9.9 \text{ MPa} < 100 \text{ MPa}$ , 变形为  $2.6 \text{ mm} < L/400 = 8.6 \text{ mm}$ , 满足要求。

(4) 钢管桩。 $\phi 500 \times 8$ 、 $\phi 630 \times 10$  mm 钢管桩内力分别见图 5、图 6, 反力分别见图 7、图 8。1) 钢管桩稳定性计算。 $\phi 500 \times 8$  mm 钢管桩自由长度  $l = 7 \text{ m}$ , 最大轴力  $N_{\max} = 186 \text{ kN}$ , 长细比  $\lambda_x = l/i = 7000/174 = 40.2$ 。按照 b 类截面, 稳定系数  $\phi = 0.768$ ,  $\sigma = N/(\phi A) = 186 \times 10^3 / (0.768 \times 12365) = 19.6 \text{ MPa} < [\sigma] = 170 \text{ MPa}$ 。 $\phi 630 \times 10$  mm 钢管桩自由长度  $l = 7 \text{ m}$ , 最大轴力  $N_{\max} = 489.3 \text{ kN}$ , 长细比  $\lambda_x = 7000/219 = 32$ 。按照 b 类截面, 稳定系数  $\phi = 0.852$ ,  $\sigma = 489.3 \times 10^3 / (0.852 \times 19478) = 29.5 \text{ MPa} < [\sigma] = 170 \text{ MPa}$ 。钢管桩受力满足要求。2) 钢管桩竖向承载力计算。钢管桩所受竖向力  $F$  = 钢管桩反力+钢管桩其余自重(模型未建部分)。其余  $\phi 630 \times 10$  mm 钢管桩桩长 19.3 m, 其余  $\phi 500 \times 8$  mm 钢管桩桩长 17.0 m。计算钢管桩承载力时不考虑桩端承载力。 $\phi 500 \times 8$  mm 钢管桩所受竖向力  $F_1 = 174.4 + 17 \times 0.0124 \times 7.85 \times 10 = 190.0 \text{ kN}$ ,

$F_{\text{反}1} = 190.0 \text{ kN}$ ,  $R_{n1} = 1/2u \sum_{i=1}^n q_{ik} l_i = 1/2 \times 3.14 \times 0.5 \times (8.4 \times 16 + 2.5 \times 20 + 2.5 \times 65) = 272.3 \text{ kN} > F_{\text{反}1}$ , 满足要求。 $\phi 630 \times 10$  mm 钢管桩所受竖向力  $F_2 = 489.3 + 19.3 \times 0.0195 \times 7.85 \times 10 = 518.8 \text{ kN}$ ,  $F_{\text{反}2} = 518.8 \text{ kN}$ ,  $R_{n2} = 1/2 \times 3.14 \times 0.63 \times (8.4 \times 16 + 2.5 \times 20 + 7.2 \times 65) = 645.3 \text{ kN} > F_{\text{反}2}$ , 满足要求。

根据以上计算结果, 钻孔平台各构件的强度及刚度均满足施工要求。

## 3.2 钢护筒施工

### 3.2.1 钢护筒制造

钢护筒规格为内径 3.6 m, 壁厚 30 mm, 综合考

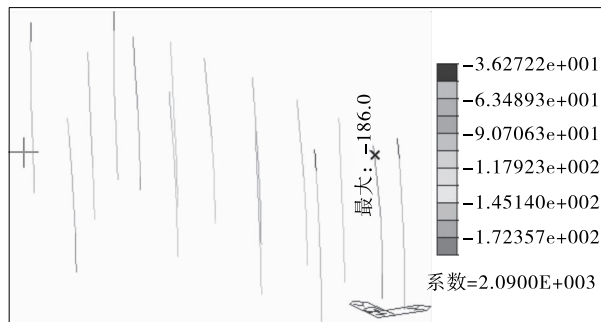
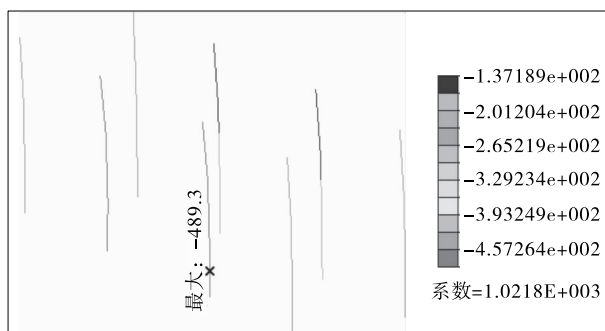
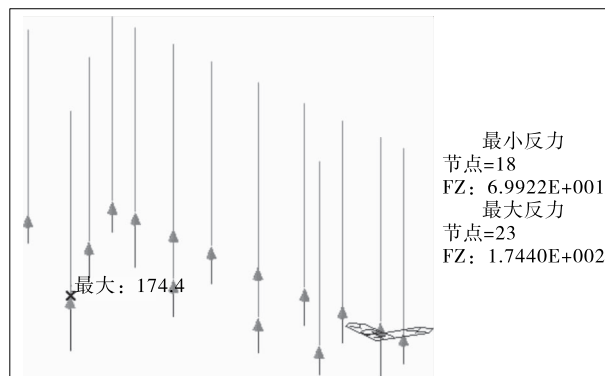
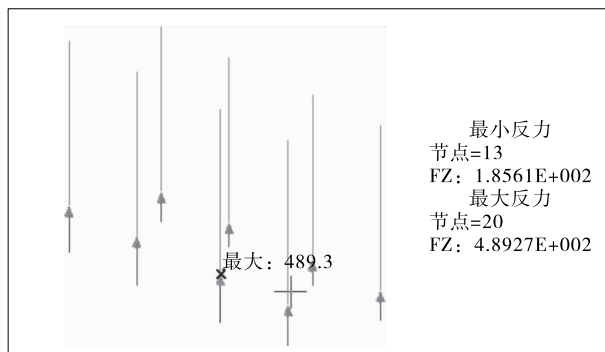


图 5  $\phi 500 \times 8$  mm 钢管桩内力(单位: kN)

图 6  $\phi 630 \times 10$  mm 钢管桩内力 (单位: kN)图 7  $\phi 500 \times 8$  mm 钢管桩反力 (单位: kN)图 8  $\phi 630 \times 10$  mm 钢管桩反力 (单位: kN)

考虑永久结构和施工临时结构需要,护筒长度暂按 24 m 计算。综合考虑吊装和运输,在附近专业工厂分 12、6、6 m 三节制作,现场设 2 个焊接接头。由于钢护筒直径达 3.6 m,对卷制工艺提出了严格要求:板料位置对中后,采用多次循环进给法,先调节上轮的位置,使钢板发生初步变形,然后来回滚动直至弯曲。当板料移至边缘时,检查所划检验线的位置是否正确,然后逐步压下上滚轮并来回滚动,使板料的曲率半径逐渐减小,直至达到规定要求。

### 3.2.2 钢护筒运输

采用大型平板车运输。由于护筒直径大,为防止钢护筒在运输过程中出现失圆,在钢护筒的上、下口及中间位置焊接十字或米字支撑。为确保钢护筒

在运输过程中的稳固,平板车上设置圆弧形底托,并用钢丝绳固定。

钢护筒运至现场,利用 250 t 履带吊机和 100 t 汽车吊机同时起吊,250 t 履带吊机吊住钢护筒顶口,100 t 汽车吊机吊住钢护筒底口。将钢护筒竖起后,松下 100 t 汽车吊机,通过 250 t 履带吊机将钢护筒竖直吊起。

### 3.2.3 钢护筒打设

为保证钢护筒的准确定位及竖直度,在施工平台顶、底各设置一层定位导向架。上层由焊接在钻孔平台上的钢框架组成;下层由焊接在钻孔平台纵向型钢上的钢框架组成,下层导向架设在平台面以上 5 m 高型钢支撑架上。采用 250 t 履带吊机配合 APE400B(并联)振动锤插打钢护筒,激振力通过夹持器传至护筒,将护筒下沉至设计标高。下沉过程中应用全站仪实时监控垂直情况并及时纠正偏差。

## 3.3 泥浆护壁及排渣

### 3.3.1 泥浆循环系统

泥浆循环系统由制浆系统、钻机、泥浆管道、钢护筒和泥浆净化器组成,其工作流程见图 9。

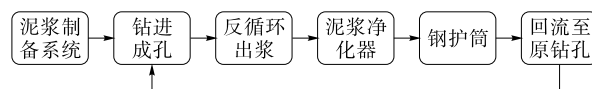


图 9 泥浆循环系统的工作流程

在东西两侧桥头各设一个由 1 个泥浆池和 2 条泥浆船组成的循环系统,东侧泥浆池设在便桥与栈桥之间,西侧泥浆池设在江夏公园,泥浆池中分别设置制浆区、储浆区和回浆区,制浆区内设置泥浆搅拌机,将拌制好的泥浆储存至储浆区内存放,储浆区内设置泥浆泵,将拌制好的泥浆送入护筒内,钻孔泥浆采用孔位护筒与回浆区之间的循环方式进行循环。

该桥地处闹市中心,需妥善做好泥浆排放。钻孔施工过程中,在压风机高压空气作用下,泥浆顺着钻杆从孔底抽出,沿出浆管进入泥浆分离器,将砂石筛分排除,处理后的泥浆沿回浆管流入桩孔内循环,分离出的钻渣通过溜槽排放到泥浆船上。

### 3.3.2 泥浆指标控制

在钻孔过程中,每 2 h 检测一次泥浆的性能指标,当土层变化时增加检测次数,并对各项指标作出调整。泥浆各项指标应符合表 3 的要求。

## 3.4 钻孔工艺控制

在  $\phi 3.2$  m 刮刀钻头腰带上焊接翼板和钢丝刷,达到  $\phi 3.6$  m 的直径效果。在  $\phi 3.6$  m 段钢护筒内采



表 3 泥浆性能指标要求

岩土名称	粘度/ (Pa · s)	容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )	含砂 率/%	pH 值	胶体 率/%	失水量/ [mL · (30 min) <sup>-1</sup> ]	泥皮厚度/ mm
淤泥质粉质黏土	19~22	1.12~1.23	≤2.5	8~9	≥95	≤20	≤3
粉土夹粉质黏土	19~22	1.12~1.23	≤3.5	9~10	≥95	≤20	≤3
粉质黏土	19~22	1.12~1.23	≤2.0	9~10	≥95	≤20	≤3

用 KTY4000 型钻机钻进,在扩径段采用  $\phi 3.2$  m 刮刀钻头钻至设计标高,用气举反循环排渣钻进成孔。

在护筒内选用优质泥浆平稳转动;在护筒底口小气量、轻压、慢转钻进,待钻头整体钻出护筒 2 m 左右时再正常钻进成孔;钻头出护筒后,根据各地层情况选择钻机参数,特别是在各地层交接层部位控制进尺。清孔时将钻头提离孔底 20 cm 左右,钻机慢速空转,保持泥浆正常循环,同时置换泥浆。

### 3.5 钢筋笼制作下放

钢筋笼在江东侧施工场地内搭设胎架,长线法制作,单根长 47 m,分 4 段,每段长约 12 m,加焊加强钢筋和六边形内撑,吊装采用专门设计的吊具设备,分段吊装入孔对接,每段间设螺纹套筒连接。

钢筋笼对接采用专门设计的钢筋笼悬挂环,解决钢筋笼的支撑及悬挂定位。钢筋笼悬挂环由卡板和支撑圆环组成,支撑圆环由 2 个半圆环通过螺栓连接成一个完整的圆环,卡板可在支撑圆环内前后抽动。安装钢筋笼时,先将钢筋笼悬挂环安装在孔口钻孔平台顶面,将吊入孔内的钢筋笼通过加强后的加劲箍支撑在钢筋笼悬挂环上,然后起吊下一节钢筋笼与之对接。

声测管安装垂直度容许偏差不大于 0.5%,接头处孔壁过渡应圆滑,连接密封不透水,并注水检查。

### 3.6 水下砼浇筑

单桩砼方量 480 m<sup>3</sup>,全桥 4 根桩,单桩平均灌注 10 h。浇筑砼的关键是导管的埋置深度,实践证明导管埋深为 6 m 左右时成桩质量好。首批砼灌注后,连续灌注,并尽可能缩短拆除导管的间隔时间。灌注过程中每 20 min 量测孔内砼顶面标高,以便及时调整导管埋深,砼导管不宜埋置过深,拆除导管应迅速、及时。为确保成桩质量,桩顶加灌 1.0~2.0 m 高度。

## 4 结语

变截面大直径钻孔灌注桩因其单桩承载力高、

沉降变形小、施工进度快、经济效益好,现已广泛应用于高层建筑和大型桥梁中。随着城市的快速发展,交通量日益增长,加上钢结构疲劳、温度效应、超载超负荷运营等因素,一大批城市桥梁将迎来维修保养改造。对于城市内桥梁维修改造,限于城市环境、资源有限等因素,大直径钻孔灌注桩逐渐显现出其优势。随着理论研究的深入和施工机具的逐步发展,变截面大直径钻孔灌注桩的应用前景愈加广阔。

### 参考文献:

- [1] 黄宏伟,张冬梅,徐凌,等.国内外桥梁深基础形式的现状[J].公路交通科技,2002,19(4).
- [2] 胡培进,汪中卫,李强.变截面桩的力学性能及工程意义[J].上海地质,2007(3).
- [3] 张剑锋,鲁智明.钻孔灌注桩桩型与承载力的关系[J].上海地质,1999(4).
- [4] 黄天贵,韩国明.大直径深孔变截面钻孔灌注桩施工工艺与技术研究[J].公路,2011(10).
- [5] 梁韵,任士房,耿大新,等.大直径变截面桩竖向承载力及沉降算法研究[J].华东交通大学学报,2009,26(4).
- [6] 崔桂官.某特大桥大直径钻孔灌注桩断桩处理技术[J].公路与汽运,2010(5).
- [7] 史佩栋,梁晋渝.大直径灌注桩的产生、发展与前景:纪念大直径灌注桩问世 100 周年[J].工业建筑,1993(12).
- [8] 孙阳.大直径深长桩施工孔壁稳定性分析与成孔技术研究[J].西安:长安大学,2009.
- [9] 李丰国.贵广铁路北江特大桥大直径超长钻孔桩施工技术[J].铁道建筑技术,2011(4).
- [10] 丁建文.大直径深长桩灌注桩承载性状及工程应用研究[J].南京:东南大学,2005.
- [11] 黄勇,章斌.苏通大桥主桥基础深水大直径超长钻孔桩施工[J].山西建筑,2008,34(6).
- [12] 刘忠平,谭世霖,李永龙.大鳌特大桥深水大直径变截面桩基施工技术研究[J].铁道建筑技术,2015(9).

收稿日期:2016-10-21