

重锤法检测钻孔灌注桩有效灌注标高的改进与应用

刘晓玲¹, 杜鹏^{1,2*}, 陈新³, 付连红⁴, 李光范¹

(1. 海口经济学院, 海南 海口 571127; 2. 长沙理工大学;

3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心; 4. 浙江易通基础工程有限公司)

摘要: 钻孔灌注桩有效灌注标高的确定是成桩质量控制的关键之一。通过室内试验,验证了利用重锤检测混凝土拌和物面的可行性;通过现场试验研究,揭示了利用重锤检测混凝土拌和物面的影响因素和作用机制。结果表明:可将测力计到达 0.5 N 时作为浮浆和混凝土拌和物分界的预警判定点。工程中,考虑钢护筒、导管等影响因素,建议将重锤设置在设计标高以上 50 cm 处,安全经济。

关键词: 桩基工程; 重锤检测; 有效灌注标高; 混凝土拌和物面; 现场试验

钻孔灌注桩在施工时,为了保证桩顶混凝土质量, JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》中 6.3.30.5 条规定,应控制最后一次灌注量,超灌高度宜为 0.8~1.0 m。按桩径 3 m 计算,如果超灌 1 m,则超灌混凝土量约为 7 m³。据不完全统计,中国每年完工的钻孔灌注桩达 5 000 万根,如果计算因超灌引起的混凝土浪费和随之产生的截桩头费用,将是天文数字。因此如何少超灌甚至不超灌,开发桩顶混凝土面测量仪,具有重要的工程意义、经济意义和极高的应用价值。

目前国内外开展混凝土拌和物灌注标高研究成果较多,其测量方法主要有测深锤法、取样法、感应式测深仪法、电导式测深仪法等。张国强和曹惠宾利用以压力测量为主、温度参数为辅,研制开发了混凝土灌注标高定位仪;张磊等研制了一种可调比重的测定锤和一种液压控制水下取样器,结合两种装置可判定混凝土灌注标高;刘韬利用足尺模型试验模拟灌注桩浇筑的过程,在控制标高处设置探头,基于混凝土与护壁泥浆液之间电阻率的差异,设计了一种灌注桩超灌监测智能化系统。

实际工程应用中,由于已有混凝土拌和物面测量仪或价格偏高、或测量精度不足、或安装操作复杂,使得应用最广泛的仍是误差较大的测深锤法。但实际施工过程中发现,随着深度增大,浮浆层黏度也将增大,现有

的重锤可能无法穿越浮浆层,而是被浮浆顶托悬停起来,重锤没有到达混凝土层,故无法准确判断混凝土拌和物面的实际位置;况且,即便重锤顺利到达了混凝土拌和物面,仅仅依赖工人的经验、测绳松弛度和下放的具体手感来判断,人为因素干扰太大,极不精确,因而亟待更加精确的方法来确定混凝土拌和物面的标高。该文介绍一种精准、快速、方便的利用重锤检测混凝土拌和物面的方法。

1 重锤法改进原理

水下灌注混凝土通常采用直升导管法,如图 1 所示。将导管居中插入桩孔,上接漏斗,设隔水栓;漏斗装入混凝土,放开隔水栓,混凝土因自重向孔底下落,

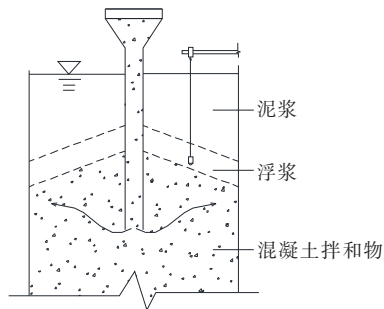


图1 直升导管法

收稿日期:2020-05-25

基金项目:海南省重点研发项目(编号:ZDYF2017097);长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金资助项目(编号:kfj190109);海南省自然科学基金资助项目(编号:519MS072);海口经济学院校级科研项目(编号:HJKY(YB)19-05)

作者简介:刘晓玲,女,硕士,讲师。E-mail:695991480@qq.com

*通信作者:杜鹏,男,博士研究生,副教授。E-mail:pengdu_ctgu@163.com

将水挤出并使导管始终埋在混凝土内,此后连续灌注混凝土,不断提升导管,直至灌注完毕。

混凝土在管外上升过程中,由于混凝土拌和物中粗骨料下沉,孔壁黏土和细骨料上浮,形成浮浆层,孔内自上而下存在 3 层物质,即泥浆层、浮浆层及混凝土拌和物层。

该文在传统重锤法的基础上,创新性地引入简易支架和测力系统辅助检测混凝土拌和物面,在混凝土灌注标高位置悬吊重锤,随着混凝土拌和物的上返,重锤会依次接触泥浆、浮浆和混凝土拌和物。当重锤悬空时,测力计显示重锤的重力;当重锤逐渐浸入泥浆层,随着浸入体积的增大,受到泥浆的浮力作用会逐步增大,测力计数值下降明显,当完全浸没后,测力计数值基本不变;当浸入黏稠状的浮浆层中,重锤主要受力由浮力逐步转变为顶托力,随着深度的增大,浮浆黏度增大,此时测力计数值降低的幅度和速率会增大,但变化仍不明显;而只有当重锤开始接触混凝土拌和物面被顶托,测绳逐渐出现松弛,测力计数值迅速下降并趋于稳定。此时,从测力计曲线可以预见,其曲线斜率在浮浆中缓慢小幅降低与在混凝土中迅速大幅降低之间存在一个拐点,一旦捕捉到该拐点,即可精确判定混凝土拌和物面的标高。

2 室内试验研究

2.1 试验装置

为开展重锤法测量混凝土灌注标高的室内试验研究,研制了一套模拟混凝土灌注过程的多功能试验装置,包括升降驱动缸、支架、测力计、采集系统和材料筒等,装置示意图见图 2。选用高 30 cm、体积 20 L 的薄壁钢桶,筒体内从上到下依次设泥浆层、浮浆层和混凝土层。试验前,将材料桶置于连接反力架的法兰盘上,在反力架横梁中部安装精度为 5 g 的弹簧测力计,下设吊绳和锥形重锤,重锤质量 210 g,高度 55 mm,直径 35 mm。

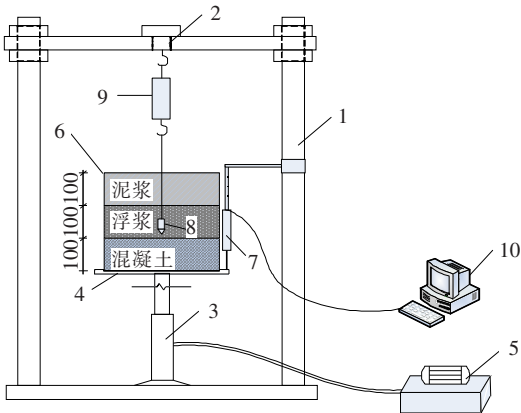
2.2 材料制备

室内试验时在材料桶内等体积设置混凝土、浮浆、泥浆 3 种材料,为契合现场材料,混凝土强度等级选用 C30,坍落度为 35~50 mm,按 JGJ 55—2011《普通混凝土拌和物配合比设计规程》进行配合比设计,人工制造浮浆和泥浆,具体参数如表 1 所示。

2.3 试验过程及结果

材料制备完成后,依次分层将混凝土、浮浆和泥浆

装入材料桶中,控制各材料层高度均为 10 cm。安装位移传感器、弹簧测力计和锥形重锤,通过调整吊绳的长度使锥形锤尖与泥浆液面刚好接触,启动油泵电机,设定上升速率为 2 mm/s,同时开始采集记录数据。为减小误差,重复试验一次。测力计力与顶升位移之间的变化规律如图 3 所示。



1- 多功能反力架;2-混凝土面监测装置预留孔道;3-千斤顶;4-法兰盘;5-千斤顶顶升速率控制器;6-材料桶;7-位移传感器;8-重锤;9-弹簧测力计;10-数据采集系统

图 2 混凝土拌和物灌注环境模拟装置图(单位:mm)

表 1 材料参数

材料	要求标准
混凝土拌和物	配合比为 $m_{\text{水泥}} : m_{\text{砂}} : m_{\text{石}} : m_{\text{水}} = 1 : 1.44 : 3.08 : 0.42$,其中水灰比 $W/C = 0.46$,砂率 $\beta_s = 32\%$
浮浆	人造浮浆层,其配合比为 $m_{\text{水}} : m_{\text{水泥}} : m_{\text{膨润土}} : m_{\text{砂}} = 50 : 10 : 20 : 20$, $\rho = 1.45 \text{ g/cm}^3$
泥浆	设定密度为 1.1 g/cm^3 ,5 : 1 的水与膨润土搅拌而成

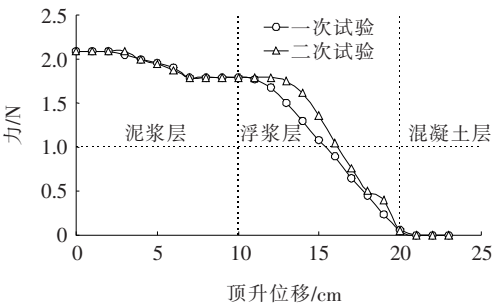


图 3 力与顶升位移关系曲线

根据理论分析,忽略动水压力的影响,测力计数值 F 可由下式描述:

$$F = mg - \rho g V - N \tag{1}$$

式中: m 为重锤质量(g); ρ 为泥浆的密度(g/cm^3); V 为重锤体积(cm^3); N 为顶托力(N)。

从图 3 的关系曲线可将其过程概括为 3 个阶段:第一阶段为缓慢下降阶段,重锤逐步浸入泥浆层,受到泥浆的浮力作用,随着浸没体积的增加,测力计数值逐渐减小直到重锤完全浸没趋于稳定;第二阶段为快速下降阶段,重锤逐步刺入黏稠状的浮浆层,受到浮浆的顶托作用,由于浮浆黏稠程度的不同,导致了一次和二次试验结果下降速率的差异;第三阶段为稳定阶段,顶升位达到 20 cm 时,此时锥形锤尖与混凝土拌和物顶面接触,吊绳处于松弛状态,两次重复试验测力计数值显示均为 0,说明重锤在混凝土拌和物面悬停起来。室内试验证实通过重锤检测的方式判定混凝土拌和物面标高的方法可行。

3 现场试验研究

为开展钻孔灌注桩有效灌注标高的现场试验研究,选择长春至深圳国家高速公路浙江省湖州段扩容工程第 1 合同段钻孔灌注桩工程,该桩基工程均为嵌岩桩陆上施工,且为单桩单柱,路线全长约为 26.147 km,基桩共 711 根,平均桩长为 40.03 m,桩径范围为 1.0~1.6 m,以 1.5 m 桩径为主。

3.1 现场施工环境

现场施工环境较复杂,在基桩定位时安放钢护筒,护筒内设有钢筋笼和声测管,吊架安放在护筒外侧,用于固定灌注混凝土时的钢筋笼,在吊架上安放导管操作平台,以供施工人员浇筑混凝土和拆管,左侧预留空间以供混凝土泵车进出,因此开展现场试验有效利用的空间有限,可操作的区域较小,对后期现场试验设备的研制提出了更高的要求。

3.2 现场试验装置

考虑现场施工环境,研制了相应的混凝土拌和物面检测装置,该装置由 5 部分组成:安装支座、悬臂梁、测力计、重锤和测绳,如图 4 所示。

为保证其刚度和稳定性,并考虑现场施工的空间有限性,测力计、重锤和测绳的设计总质量不超过 5 kg,采用外挑的悬臂梁结构,可根据现场桩径调整悬臂梁的长度和转角,工程适用性强。测力计精度为 0.01 N,测绳选用钢丝绳,锥形重锤密度为 2 000 kg/m^3 ,采用易加工的尼龙棒材料制作。

3.3 现场试验结果

选择桩径为 1.6 m 的基桩开展现场试验,其基本

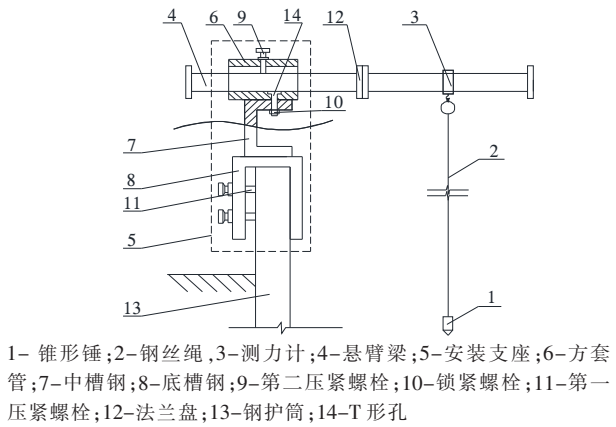


图 4 现场试验装置

参数见表 2,累计灌注混凝土量约为 75 m^3 ,累计灌注 4 h 左右,选择灌注最后一车混凝土拌和物时的监测结果进行分析,结果如图 5 所示。

表 2 现场试验基本参数

混凝土强度	泥浆质量密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	护筒顶标高/m	桩顶标高/m	桩底标高/m
C30	1.05~1.20	2.707	0.5	-34

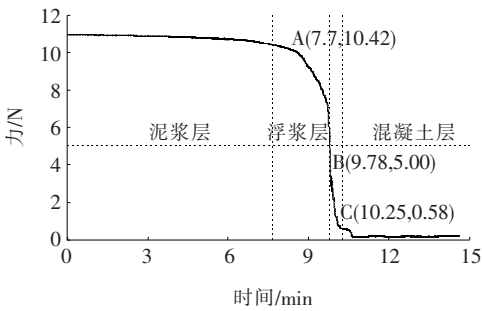


图 5 力与灌注时间的变化曲线

由图 5 可知:现场与室内试验曲线变化规律基本一致,呈现出特征明显的 3 个阶段:缓慢下降段、快速下降段和稳定阶段,分别对应于泥浆层、浮浆层和混凝土层。在现场试验中重锤事先浸没在泥浆中,随着混凝土的上返泥浆重度逐渐增大,致使重锤浮力增大,测力计数值下降但变化不明显,仅下降约 0.5 N;当重锤浸入浮浆层,重锤除受浮力作用还承受浮浆的顶托作用,下降速率和幅度均有所增加;当灌注到 B 点,曲线的斜率接近于 $\text{tg}90^\circ=1$ 时,可认为重锤开始接触混凝土拌和物面,由于其顶托作用和骨料颗粒运动,接触过程中曲线斜率迅速变小;当到达 C 点时曲线斜率趋于水平,此时重锤处于完全顶托状态。

按照理论分析,浮浆和混凝土拌和物界面的拐点

应是力与灌注时间曲线中斜率最大的 B 点,但考虑现场施工情况,针对不同的施工环境、重锤质量和形状等影响因素,B 点对应的数值不同,难以事前确定或过程捕捉。重锤从 B 点开始接触,到 C 点完全顶托,时间间隔为 28.2 s,测力计数值由 5 N 下降到 0.5 N 左右,在整个接触过程中,由于骨料颗粒运动和周围颗粒约束,重锤逐步刺入混凝土拌和物内,笔者认为其中的某一时刻均可作为预警的判定点,但为保证桩头质量,考虑检测仪器的精度,建议将完全顶托状态的 C 点作为参考,测力计数值 0.5 N 设定为预警判定特征点。

为了排除重锤未穿透浮浆层而停留在浮浆层的可能,在该基桩同时开展了利用温度检测混凝土拌和物面的现场试验,得到了重锤和温度的对比变化曲线(图 6)。由于温度法采用的是硬质顶杆,试验前通过横梁固定在设计标高位置,温度传感器绑定在顶杆侧面,在灌注混凝土的过程中位置不可移动。根据温度变化曲线,可以较为容易确定泥浆、浮浆和混凝土拌和物层的分界点,从而反推对比重锤曲线,发现其 3 层介质的分界点与初步判定结果一致,证实了重锤已穿越浮浆层到达混凝土面,同时验证了重锤法的正确性,为进一步在工程中推广应用提供理论和试验依据。

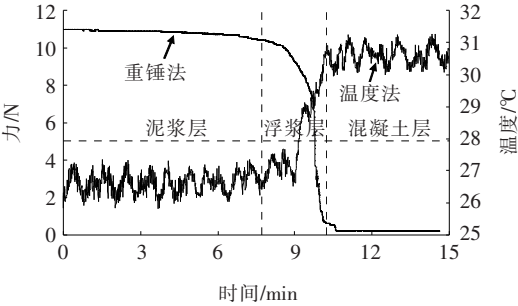


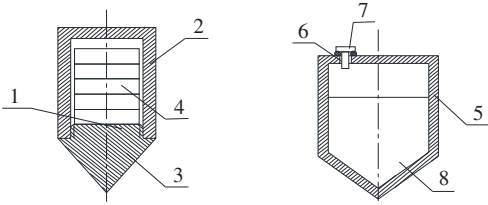
图 6 重锤法和温度法对比

4 改进重锤法的特点

重锤法检测钻孔灌注桩混凝土拌和物面,浮浆和混凝土层具有明显的分界点,是利用重锤法开展桩顶混凝土面测量仪研究的前提条件,该文研制的用于判断实际混凝土灌注高度是否到位的重锤装置,主要进行了 3 个方面的创新。

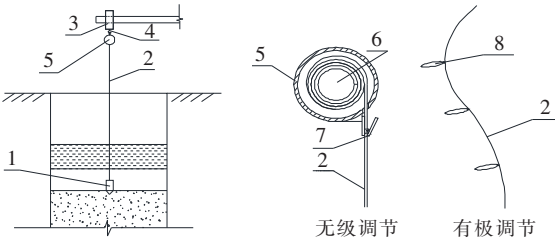
(1) 重锤的形状和密度。重锤的设计要求是穿越浮浆层悬停在混凝土拌和物面,因此重锤的重度应介于浮浆和混凝土之间。设计了如图 7 所示的中空重锤,重锤设有尖锐部,且内部设有可调节重锤密度的填充物,以适应不同类型的施工环境。

(2) 测绳的处理。在施工现场每根桩桩顶设计标高一般不同,需提前量测和打结测绳,而现场钢丝绳不易打结,且精度难控,为此设计一个蜗壳式测绳装置(图 8)。在蜗壳内安装绳轴,测绳盘绕在绳轴上,且自身附带有刻度;蜗壳开口处设有绳夹以调整和固定测绳,该装置实现了测绳的无极调节,工程适用性更广。



1-凸柱;2-圆筒;3-圆锥;4-配重块;5-壳体;
6-通孔;7-密封塞;8-颗粒物

图 7 重锤设计图



1-重锤;2-测绳;3-测力计;4-挂钩;5-蜗壳;6-绳轴;7-绳夹;8-绳结

图 8 测绳设计图

(3) 设定判定条件声光报警。施工现场环境较恶劣,噪音较大,尤其是雨天或夜晚施工,施工人员的业务能力不够,常出现超灌较多造成严重浪费的情况。研究认为在重锤装置中设定判定条件声光报警可有效避免环境和施工人员造成的影响。

5 工程应用与讨论

为了精确确定混凝土拌和物面,合理有效地控制超灌量,少超灌甚至不超灌,需要明确影响钻孔灌注桩灌注标高的因素。根据现场试验和理论分析,在灌注过程中,忽略拔钢护筒后孔壁的变化,主要的影响因素有钢护筒、导管、导管中存留混凝土量以及重锤的位置。

考虑混凝土的和易性,灌注时混凝土拌和物面会呈现倾斜状(图 1),检测时可将重锤置于 1/4 桩径处,拔管后混凝土拌和物面基本不变。

实际工程中,需要考虑钢护筒和导管占据的体积,

以及停灌时导管内部留存混凝土量。以该工程为例,1.6 m的桩径,采用高4.5 m,内径1.7 m钢护筒和分节长度3 m,内径0.3 m导管,当浇灌至混凝土设计标高停灌,此时钢护筒和导管分别有2.293 m和9.793 m(共4节导管)位于混凝土拌和物面以下。具体的计算参数如表3所示。

表3 计算参数及结果

项目	内径/ m	壁厚/ cm	高度/ m	埋深/ m	体积/ m ³
钢护筒体	1.7	1	4.5	2.293	-0.123
导管体	0.3	1	—	9.793	-0.787
导管内	0.3	1	12.0	—	0.848
合计					-0.062

由表3可得:考虑钢护筒、导管和导管内混凝土量的影响,停灌拔管后,混凝土拌和物面高度基本不变,因此实际工程中,为进一步确保桩头质量,建议将重锤设置在设计标高以上50 cm处,并以测力计数值0.5 N作为实际停灌标准,如此比规范少灌至少30 cm的混凝土量,安全且经济。

6 结论

基于重锤顶托原理,开展了钻孔灌注桩有效灌注标高的重锤检测方法室内外试验研究,得到以下结论:

- (1) 在混凝土灌注过程中,重锤能穿越浮浆层悬停在混凝土拌和物面,并在两层介质中具有明显的分界点,具有较好的敏感性和反应速度,是区分浮浆和混凝土拌和物的有效技术参数。
- (2) 现场试验表明,当测力计数值到达0.5 N时,浮浆和混凝土层出现明显的分界点,该特征点表征了实际灌注临界面,可以此作为预警的判定点。
- (3) 综合试验分析,考虑钢护筒、导管、导管内混凝土量以及重锤的位置等影响混凝土拌和物面定位的因素,将重锤在设计标高提升50 cm,比规范少灌达30 cm以上,具有更优异的工程稳定性和经济适用性。
- (4) 以重锤法为基础,利用支架和测力系统辅助检测混凝土拌和物面,创新性地设计了新式重锤和测绳系统,研制用于判断实际混凝土灌注高度是否到位

的重锤装置及特征点表征方法,具有良好的操作性和精准度。

参考文献:

[1] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].

[2] 方东. 强风化条件下大直径扩底灌注桩承载力试验研究[D]. 中国地质大学博士学位论文,2007.

[3] 许桂生. 大跨浅埋暗挖隧道近接桥桩施工扰动影响及控制技术研究[J]. 中外公路,2019(1).

[4] 赵华. 黄土冲沟区桥梁桩基受力特性现场试验研究[J]. 中外公路,2019(4).

[5] 兰凯. 钻孔桩砼灌面超声波测量的关键技术及其实现[D]. 中国地质大学博士学位论文,2008.

[6] 付祖良. 钻孔灌注桩水下混凝土灌注技术研究与应用[D]. 华中科技大学硕士学位论文,2006.

[7] Peng, Du, Xiaoling, Liu, Jingliang, Fan, et al. Review of Research on Elevation Positioning of Concrete Filling Surface of Bored Piles[C]. 2018 International Conference on Civil and Hydraulic Engineering, Qingdao, China, Institute of Physics Publishing, 2018.

[8] 杨刚. 钻孔灌注桩桩头混凝土面标高定位技术研究[J]. 科技创新,2017(35).

[9] 连绍平. 采用探测杆测定桩顶混凝土面[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),1999(3).

[10] 卢则阳, 毕然. 超深泥浆护壁灌注桩桩顶标高测定方法[J]. 施工技术,2010(S2).

[11] 李亮亮, 卢士涛, 冯玉国, 等. 低标高桩顶水下钻孔灌注桩混凝土超灌高度控制装置研制[J]. 施工技术,2017(1).

[12] 张国强, 曹惠宾. 水下混凝土灌注标高定位研究[J]. 地质装备,2006(2).

[13] 张磊, 崔建军, 李建辉. 超长细比钻孔灌注桩施工技术研究[J]. 建筑技术开发,2017(20).

[14] 刘韬. 基于 Arduino 与 LabVIEW 的灌注桩超灌监测智能化系统设计[D]. 中北大学硕士学位论文,2019.

[15] 刘晓玲, 杜鹏, 付连红, 等. 成孔灌砼的多功能室内模拟装置[P]. 中国专利:208999432,2019-6-18.

[16] 刘晓玲, 杜鹏, 杨波, 等. 向成孔内灌砼时测量混凝土液面的装置[P]. 中国专利:208833325,2019-5-7.

[17] 杜鹏, 刘晓玲, 徐新战, 等. 利用温度检测钻孔灌注桩混凝土拌合物面的研究[J]. 物探与化探,2019(3).

[18] 杜鹏, 刘晓玲, 樊敬亮, 等. 用于判断实际灌砼高度是否到位的重锤装置[P]. 中国专利:209066439,2019-7-5.