

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211466

基于磁探测技术的灌注桩超灌检测系统*

宋传旺¹ 郭成龙¹ 李运红² 张莅详² 金承满²

(1. 青岛理工大学信息与控制工程学院 青岛 266520; 2. 中国冶金地质总局山东局集团青岛有限公司 青岛 266035)

摘要: 检测混凝土界面位置是控制灌注桩超灌高度的关键所在,传统方法凭借人工经验测定混凝土界面位置的误差较大,不能有效地控制灌注高度。针对浇注时混凝土界面难以判别,导致混凝土欠灌或超灌过多等问题。首次提出基于磁探测技术的灌注桩超灌检测方法,首先利用钻孔中不同介质的密度差异设计磁性目标,然后通过测量和处理磁场三分量数据,实现探测混凝土界面位置从而控制混凝土灌注高度。设计了一套基于磁探测技术的灌注桩超灌检测系统,通过室内试验完成测点选择,并将磁性目标比重设计为 2.1 g/cm^3 ,报警阈值标定为 333 mG 。通过施工现场试验验证:系统实现快速检测混凝土界面到达桩基标高和超灌上限位置,准确完成两级预警实现了自动化检测,解决了施工现场混凝土欠灌或超灌过多的难题,有效地减少了混凝土的浪费。

关键词: 钻孔灌注桩;超灌检测;磁探测技术;磁场三分量;磁场强度

中图分类号: TN02 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Overfill detection system for grouted piles based on magnetic detection technology

Song Chuanwang¹ Guo Chenglong¹ Li Yunhong² Zhang Lixiang² Jin Chengman²

(1. School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2. Metallurgical Geological Administration of China, Shandong Bureau Group, Qingdao 266035, China)

Abstract: The detection of concrete interface position is the key to control the overfilling height of the pile. The traditional method of determining the concrete interface position by manual experience has a large error and cannot effectively control the filling height. It is difficult to discriminate the concrete interface during pouring, which leads to the problem of underfilling or overfilling of concrete. The first method of overfilling detection based on magnetic detection technology is proposed. Firstly, the magnetic target is designed by using the density difference of different media in the borehole, and then by measuring and processing the three-component data of magnetic field, the concrete interface position is detected to control the concrete filling height. This paper designs a set of overfill detection system based on magnetic detection technology, completes the selection of measurement points through indoor tests, and designs the magnetic target specific gravity as 2.1 g/cm^3 , and the alarm threshold is calibrated as 333 mG . Through construction site tests, it is verified that the system achieves rapid detection of concrete interface to the pile elevation and overfill ceiling position, and accurately completes two levels of warning to achieve automatic detection, which solves the problem of It solves the problem of concrete underfilling or overfilling at the construction site, and effectively reduces the waste of concrete.

Keywords: bored cast-in-situ pile; super-filling detection; magnetic detection technology; the three components of the magnetic field; magnetic field strength

0 引言

我国是世界上施工钻孔灌注桩最多的国家,据不完全统计,每年完工的钻孔灌注桩可达5 000万根^[1],因超灌而导致的混凝土浪费数额相当惊人。其根本原因是工程现场

主要采用人工检测的方法来测量混凝土与桩顶标高距离,不能很好地满足桩顶标高控制的准确性^[2]。例如某桩基工程施工130根桩,基坑开挖后,测量坑底以上桩柱长度3~10 m,平均5 m以上。直接浪费混凝土 $1\ 260\text{ m}^3$,占桩身混凝土量的 $16.2\%\text{[3]}$ 。这不仅导致了工期延误和混凝土材

收稿日期:2022-09-20

* 基金项目:国家自然科学基金青年项目(61902205)资助

料的严重浪费,更造成了后期土方开挖和破除桩头的施工困难,极大地增加工程施工成本造成了巨大的经济损失。

为了解决灌注桩混凝土欠灌或超灌过多的问题,近年来学者和技术人员提出了多种检测方法并设计出相应的检测工具或监测系统。李亚哲等^[4]设计了一种取样桶,通过多次使用取样桶取样来确定混凝土界面位置以达到控制灌注高度的目的,其工具使用过程十分繁复,检测过程主要依靠人工;张磊等^[5]设计了一种可调比重测定锤,同样是通过人工反复测量来确定钻孔中混凝土界面位置从而控制混凝土的超灌,其可调比重特性虽然可以适应多种工况,但仍未实现自动检测;张晓双等^[6]通过利用不同介质的电阻值特性,测量灌注桩内的实时电阻率判别混凝土的位置,但温度变化等因素会使得灌注时电阻率发生改变,从而可能导致实际检测时出现误判;Liu 等^[7]利用了物体在不同的介质中所受压差是变化的原理,以此辨别混凝土和泥浆的界面,虽然该方法可以获取混凝土界面位置,但对混凝土实时位置的分析能力有待进一步提升;李波等^[8]利用介电常数和压力变化感应区分混凝土与泥浆,从而判别超灌检测位置的介质是否为混凝土,其操作步骤以及算法相对较为复杂;曹煜等^[9]通过测量桩底位置和桩顶位置电阻率的接近程度判断灌注的混凝土到达桩内的位置。但施工过程相对繁琐,且该系统不利于回收利用;李亮亮等^[10]利用灌注过程中混凝土和泥浆的压应力变化从而实现控制混凝土高度。该方法容易受钻孔中异物影响从而使得混凝土高度难以达到精准控制的效果;杨广磁等^[11]利用两种介质浮力的差异设计了一种浮力检测装置,实现对混凝土灌注高度的控制。但当使用不同水灰比的混凝土灌注时需要重新标定浮力装置;卢则阳等^[12]利用了桩孔内两种液态介质比重不同的特点,提出了比重法测定灌注桩桩顶标高,虽然避免了人为因素的影响,但需要人工不断观察测绳距离。

通过以上学者们的研究可以看出,虽然混凝土灌注控制方法较多,但仍无法很好地解决混凝土超灌问题。本文提出利用磁探测技术测量混凝土高度的方法,通过试验研究测点选择、磁性目标设计和系统报警阈值标定,研制基于磁探测技术的灌注桩超灌检测系统,实现控制混凝土灌注高度,从而减少因混凝土欠灌或超灌而带来的经济损失。

1 磁探测技术及磁阻传感器

1.1 磁探测技术

地球自身是一个巨型的天然磁体,地表平均磁感应强度大约为 0.5 Gs。磁性材料在地球磁场中会干扰周围空间的地磁场分布,从而产生磁异常信号这种扰动磁场。磁探测技术是通过探测对磁场探测而实现对固定或移动目标进行非接触测量^[13],将测量到的磁场信号经过一定的数据处理获取目标信息,在无损的情况下检测出关键目标的位置等信息^[14]。

磁探测技术除了广泛应用于地球资源勘探、车辆检测、

军事技术等领域。在工程行业中也在越来越多的应用,其中钻孔灌注桩通过应用磁探测原理,利用具备导磁能力的钢筋笼和天然地磁场应用磁测井法^[15-17]检测磁场曲线从而确定灌注桩钢筋笼长度。

磁探测技术测量的磁场不受天气条件影响,并且在空气,水和大多数固体中都能有效传播,可用于探测一些不可见的隐蔽目标。钻孔中有多种泥浆混凝土等介质,磁导率在复杂地质介质中几乎相同,信道较为稳定^[18],通过对钻孔中进行磁探测,可以不受介质影响获取钻孔中磁场信息。

1.2 磁阻传感器

各向异性磁阻传感器利用了当外部磁场存在时,载流磁性材料的电阻将会发生改变的物理特性来测量磁场变化^[19]。传感器在正常工作时,如果不存在任何的外部磁场,薄膜合金的内部磁化矢量平行于电流方向^[20]。磁场作用效果如图 1 所示,假设有一个与电流方向垂直,且与薄膜合金平面平行的外磁场 H ,薄膜合金内部磁化向量将会旋转一个角度 α 。

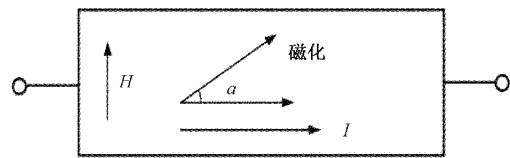


图 1 磁场作用效果图

薄膜合金的电阻 R 会随角度 α 的变化而变化,电阻 R 与角度 α 存在如下关系:

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cos^2 \alpha \quad (1)$$

式中: R_{\min} 为薄膜合金电阻最小值, R_{\max} 是薄膜合金电阻最大值。由式(1)可以看出,磁畴在 H 方向磁场作用下重新排列,产生定向磁化, H 方向为难磁化轴,与难磁化轴垂直的方向称为易磁化轴。在传感器内部的 4 条薄膜合金以惠斯登电桥的形式排列,当外部供电后,在外加磁场的作用下薄膜合金的电阻值会发生变化,最终电桥的输出端输出差分电压信号^[21]。

磁阻传感器工作原理如图 2 所示,均匀磁场中磁性材料会使得磁场发生畸变,这种磁异常现象导致地磁场强度与理论磁场强度有所不同,从而在地磁场中出现磁异常信号,使得磁场强度发生改变。

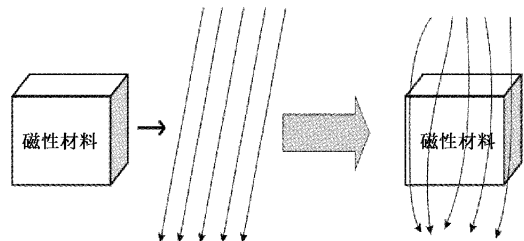


图 2 磁阻传感器工作原理

例如在检测车辆存在的问题时,汽车上的磁性材料会干扰附近空间的磁场,致使磁场强度发生变化。磁阻传感

器的3个方向 x 、 y 、 z 只需其中任一方向的磁场强度能够满足检测车辆存在的条件要求,通过简单的磁场强度阈值分析,就可以确认车辆存在^[22-23]。本文超灌检测系统采用的各向异性磁阻传感器QMC5883L引脚如表1所示。

表1 磁阻传感器引脚功能

引脚编号	引脚名称	引脚功能
1	VCC	模块电源
2	RX	串行数据输入
3	TX	串行数据输出
4	GND	地线

2 系统设计

本文超灌检测系统通过非接触式测量钻孔中的磁场变化,以磁场信号作为信息载体来检测混凝土界面位置,从而实现灌注桩的超灌控制。此方法不同于压应力、电阻率等接触式测量方法,不会因长时间直接接触混凝土和泥浆而导致设备失灵,所以信号的测量精度更为稳定,系统可靠性也相对较高。

系统检测如图3所示分为3个步骤:步骤1)利用比重法测量原理,使用适当比重的磁性目标来表征混凝土界面;步骤2)在浇注过程中磁阻传感器实时测量磁性目标产生的扰动磁场;步骤3)采集数据并通过扰动磁场强度的大小来判断混凝土界面是否到达标高位置或超灌上限位置,从而实现混凝土的超灌控制。

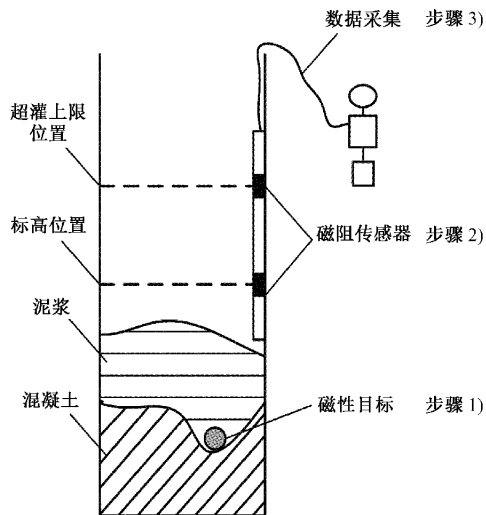


图3 系统检测

然而系统在不同工作环境下,背景磁场也会随之发生变化。为避免不同环境下磁场干扰对系统检测的影响,浇注混凝土前须记录磁场强度初值;浇注过程中实时计算磁场强度当前值与初值之差,并根据磁场强度差值来标定判断混凝土界面位置。

在浇注混凝土时混凝土界面不断翻滚,磁性目标受到混凝土挤压,在不断上升的同时,水平方向也在不断变化位置,因此磁性目标会从多个可能的方向接近磁阻传感器。因此磁阻传感器测得的磁场三分量值只要某一方向的磁场数据满足相应判定条件,便可以判定混凝土界面的位置是否在传感器附近,判定条件公式为:

$$F(n) = \begin{cases} 1, & |A_m(n) - B_m| > T_m \\ 0, & |A_m(n) - B_m| < T_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为采样点序列号, m 表示传感器的 x 、 y 、 z 轴, $A_m(n)$ 为 m 轴的磁场强度当前值, B_m 为 m 轴的磁场强度初值, T_m 为 m 轴磁场强度差值判定阈值, T_m 的设定要考虑到钻孔中的磁场干扰等实际情况。 $F(n)$ 为判定结果,值为0时表示混凝土界面的磁性目标距离磁阻传感器较远,值为1表示混凝土界面的磁性目标距离磁阻传感器较近。其中 $F(n)$ 连续3次判定结果为1时,则判定混凝土界面将要到达磁阻传感器位置。其中设置连续3次判定结果来进行检测的目的是避免磁阻传感器因采集到异常的波动信号而导致系统误报警。

系统检测要同时检测混凝土界面是否在桩顶的标高位置和超灌上限位置,因此磁阻传感器要分布在以上两处位置,分别用来测量钻孔灌注桩标高位置的磁场数据和超灌上限位置的磁场数据。磁阻传感器位置分布参考JGJ94-2008《建筑桩基技术规范》^[24],标高位置与超灌上限位置之间垂直距离设为0.8 m。

2.1 硬件设计

基于磁探测技术的灌注桩超灌检测系统组成如图4所示,其整个系统主要由磁性目标、磁场数据采集模块、主控模块、显示模块以及报警模块组成。

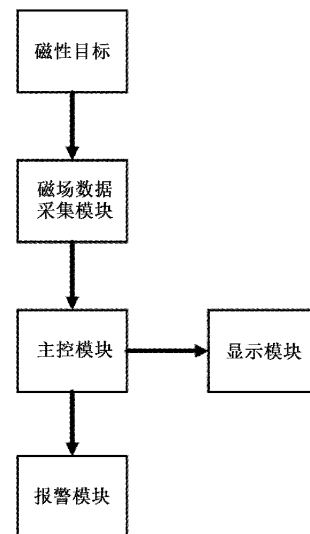


图4 基于磁探测技术的灌注桩超灌检测系统

磁性目标由磁性材料包装制成,在背景磁场中产生干扰磁场。磁场数据采集模块作用是将磁场信息转化为电信号,测量检测区域内的磁场数据。主控模块实现磁场数据

处理和报警模块进行声光报警等功能。显示模块实现磁场强度初值、磁场强度当前值和磁场强度差值的显示功能。报警模块通过声音和灯光报警,灯光报警用黄色灯和红色灯分别表示混凝土灌注位置达到标高位置和超灌上限位置。

系统在工作时主控模块首先向磁场数据采集模块发送指令,然后磁场数据采集模块对钻孔中的磁场数据进行采集并传送至主控模块;其次主控模块对采集的磁场数据进行处理,并将相应的磁场数据实时传输至显示模块;最后主控模块将处理完成后的实时磁场强度差值与设定报警阈值进行比较,若磁场强度超过设定报警阈值,系统报警模块进行声音报警和灯光报警提示施工人员控制灌注速度或停止灌注混凝土,系统实物如图 5 所示。

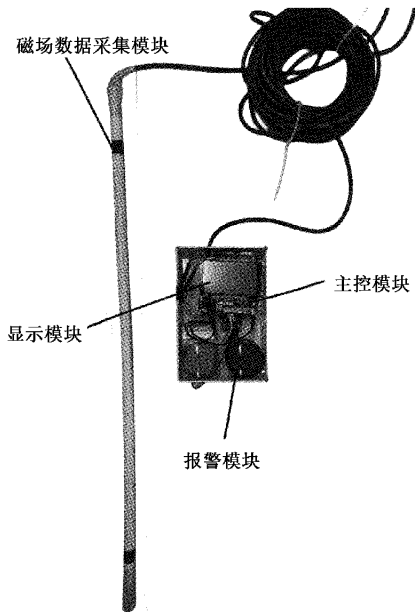


图 5 系统实物图

2.2 软件设计

基于磁探测技术的灌注桩超灌检测系统程序流程如图 6 所示,首先对系统进行初始化操作,包括对主控模块和磁场数据采集模块初始化。然后主控模块发送指令判断磁阻传感器是否可以正常工作,如果不能正常工作,则重新进行初始化操作;如果传感器工作正常,主控模块接收磁阻传感器测量的磁场强度数据;然后将标高位置和超灌上限位置磁阻传感器实时采集到的磁场强度当前值与两处的初始的磁场强度初值作差;如果标高位置磁场强度差值小于或等于设定报警阈值,传感器采集实时磁场强度数据发送,主控模块接收磁场强度数据;如果标高位置磁场强度差值大于设定阈值,系统声光报警器黄色灯光闪烁;如果超灌上限位置磁场强度差值小于或等于设定阈值,传感器采集实时磁场强度数据发送,主控模块接收磁场强度数据;如果超灌上限位置磁场强度差值大于设定阈值,系统声光报警器红色灯光闪烁。

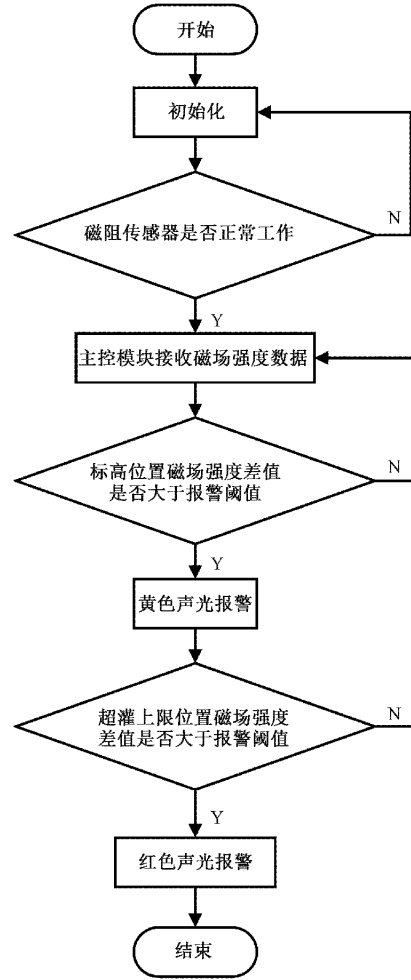


图 6 系统程序流程

3 试验与分析

系统采用 STM32F103ZET6 作为主控芯片执行算法和控制功能,其中磁场数据采集模块使用量程 $-8 \sim 8$ Gauss 的磁阻传感器,灵敏度 $3\ 000$ LSB/Gauss,波特率 $115\ 200$ 。

3.1 室内试验

室内试验分为测点试验、比重试验和磁性目标模拟试验,所用钢筋笼直径 68 cm,高 100 cm,导浆管直径 28.5 cm。测点试验探究磁阻传感器测量空间范围,使得传感器测量区域覆盖整个钻孔平面。比重试验筛选出比重在泥浆和混凝土之间的磁性目标,能够在检测时贴近混凝土界面。磁性目标模拟试验通过测量铁磁性物体和磁铁的干扰磁场强度来标定系统报警阈值,避免因沉渣中残留铁磁性沉渣和物体而导致的系统误判。

1) 测点试验

测点布局如图 7 所示,在灌注桩基标高位置平面分别布置 6 个传感器测量点位。将磁场数据采集模块分别安装在 1~6 号测点,使用永磁体分别在 1~6 号测点垂直运动,

记录标高位置磁阻传感器 x 、 y 和 z 轴中数据变化最大轴的磁场数据。

测点磁场强度差值如图 8 所示,永磁体在某一测点做垂直运动时,其两侧相邻测点均能测量到磁场强度发生明显变化,其余 3 个测点测量磁场强度无明显变化。

由此可知,在进行系统检测时为了确保磁阻传感器探测范围可以覆盖整个钻孔平面,需要在钢筋笼两端对称布置磁场数据采集模块。例如在系统检测时已将磁场数据采集模块固定在 1 号测点,同时也需要在 4 号测点布置磁场数据采集模块。

2) 比重试验

引起磁场变化的磁性目标是超灌检测系统的重要组成部分。首先试验所用的磁性材料比重较大,需要进行包装降低其比重;其次磁性材料中磁铁的磁性较强,且钻孔中有铁制的钢筋笼和导浆管。为避免其吸附在钢筋笼或导浆管上且便于滚动上升,使用球形外包装包裹磁性材料,球形外壳如图 9 所示。

比重试验共使用 2 种不同材料和 6 种不同规格的磁性材料进行试验,磁性目标比重试验结果如表 2 所示,其中 ϕ 表示磁性材料半径, δ 表示磁性材料厚度。灌注桩中混凝土和泥浆的比重差异十分明显,泥浆比重约为 $1.01 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$,混凝土比重约为 $2.30 \sim 2.60 \text{ g/cm}^3$ [25]。根据比重法测量原理筛选表征混凝土界面的磁性目标,其比重

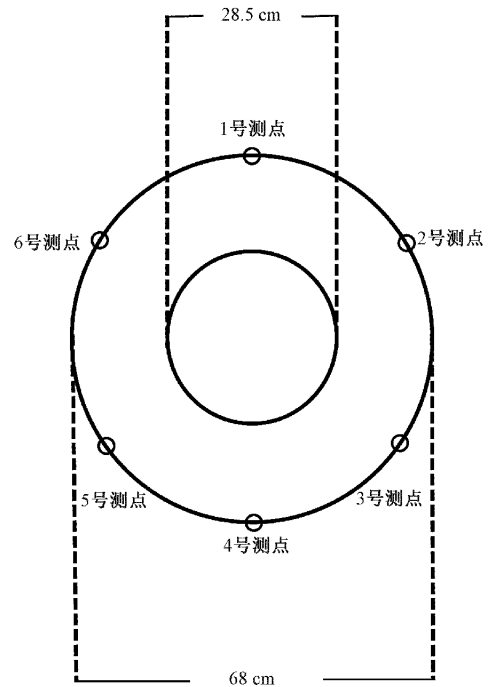
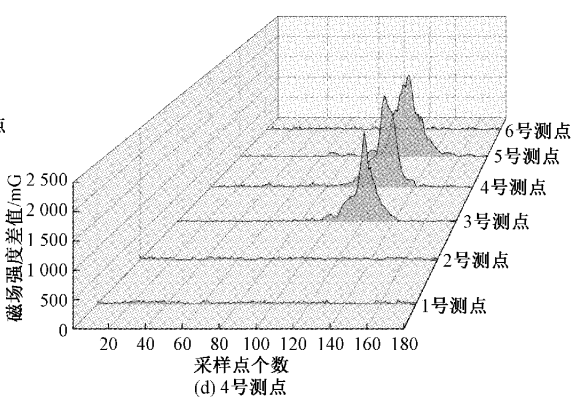
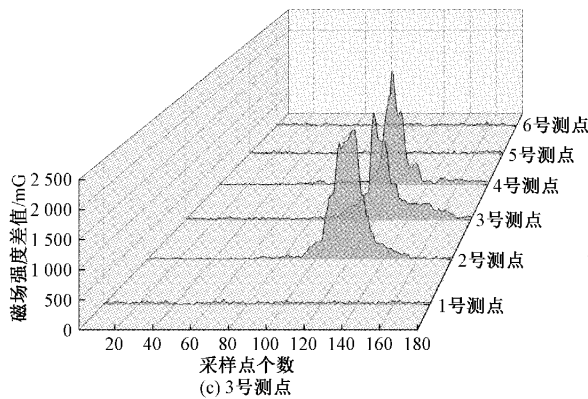
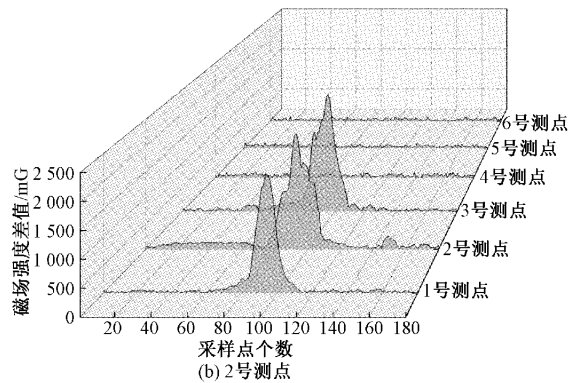
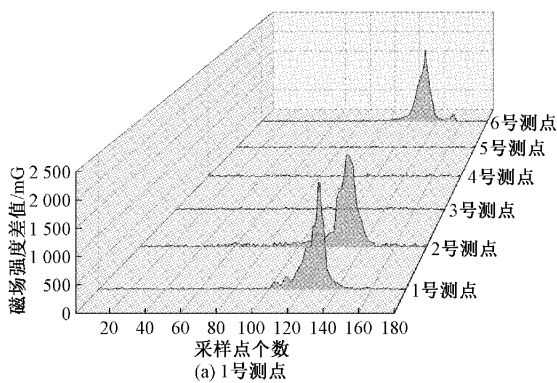


图 7 测点布局

应控制在 $2.10 \sim 2.20 \text{ g/cm}^3$,其中 2 号铁球和 3 号圆柱形磁铁制作的磁性目标满足比重控制范围,可用来表征混凝土界面。



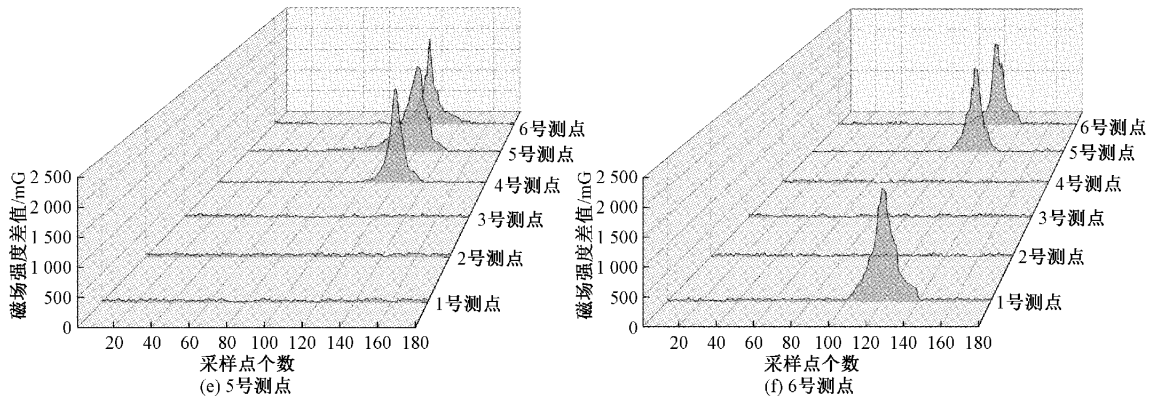


图 8 测点磁场强度差值

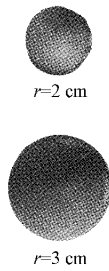


图 9 球形外包装

表 2 磁性目标比重

磁性材料	规格	比重/(g·cm ⁻³)	半径/cm
1号铁球	Φ20 mm	1.37	2
2号铁球	Φ25 mm	2.14	2
3号铁球	Φ30 mm	3.88	2
1号圆柱形磁铁	Φ40 mm	1.49	3
	δ20 mm		
2号圆柱形磁铁	Φ30 mm	0.97	3
	δ20 mm		
3号圆柱形磁铁	Φ30 mm	2.10	2
	δ10 mm		

3) 磁性目标模拟试验

磁性目标模拟试验如图 10 所示,共进行 3 种工况试验。分别为背景磁场试验、2 号铁球试验和 3 号圆柱形磁铁试验,每种工况进行 10 组试验,分别记录了标高位置磁阻传感器所测得的 3 组 x 轴、3 组 y 轴以及 4 组 z 轴磁场数据。

磁性目标磁场强度差值如图 11 所示,通过对 3 种工况试验的数据进行分析,选取本文超灌检测系统的磁性目标,并对系统的报警阈值进行标定。

试验 1 为钢筋笼内无磁性目标运动,是对包括有固定磁场、感应磁场和随机磁场等干扰源的背景磁场的测量。背景磁场的磁场强度差值如图 11(a)所示,系统测得的最大磁场强度差值小于 60 mG 且波动较小。

试验 2 为模拟 2 号铁球磁性目标进行钻孔灌注桩超灌

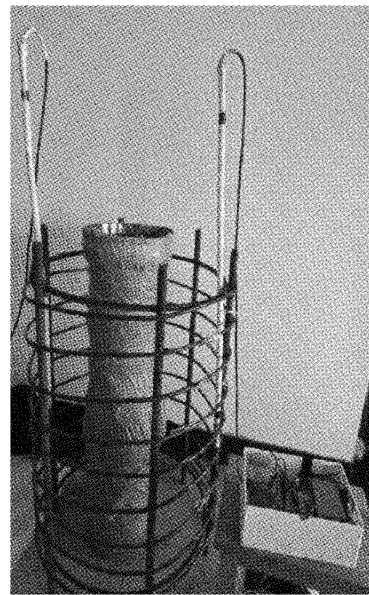


图 10 磁性目标模拟试验

检测。2 号铁球磁性目标磁场强度差值如图 11(b)所示,相较于试验一中的磁场强度差值出现了明显的上升与下降,系统所测得的 10 组数据中最大的磁场强度差值大于 200 mG 而小于 250 mG。

试验 3 为模拟 3 号圆柱形磁铁磁性目标进行钻孔灌注桩超灌检测,3 号圆柱形磁铁磁性目标磁场强度差值如图 11(c)所示,相较于试验一和试验二中的磁场强度差值出现了更为明显的上升与下降,其磁场的变化幅度较大。系统所测得的 10 组数据中最小峰值为大于 800 mG,最大峰值可达 1 500 mG 左右。

试验 1、试验 2 和试验 3 的平均磁场强度差值如图 12 所示,3 号圆柱形磁铁磁性目标对桩顶的磁场强度干扰较为明显,同时 2 号铁球磁性目标虽然对桩顶的背景磁场产生了一定的干扰,但相较于 3 号圆柱形磁铁磁性目标,其产生的磁场干扰十分微弱。

工程现场的工况较为复杂,钻孔中的残渣中有时会有铁磁性矿物,从而产生干扰磁场影响检测效果。如果采

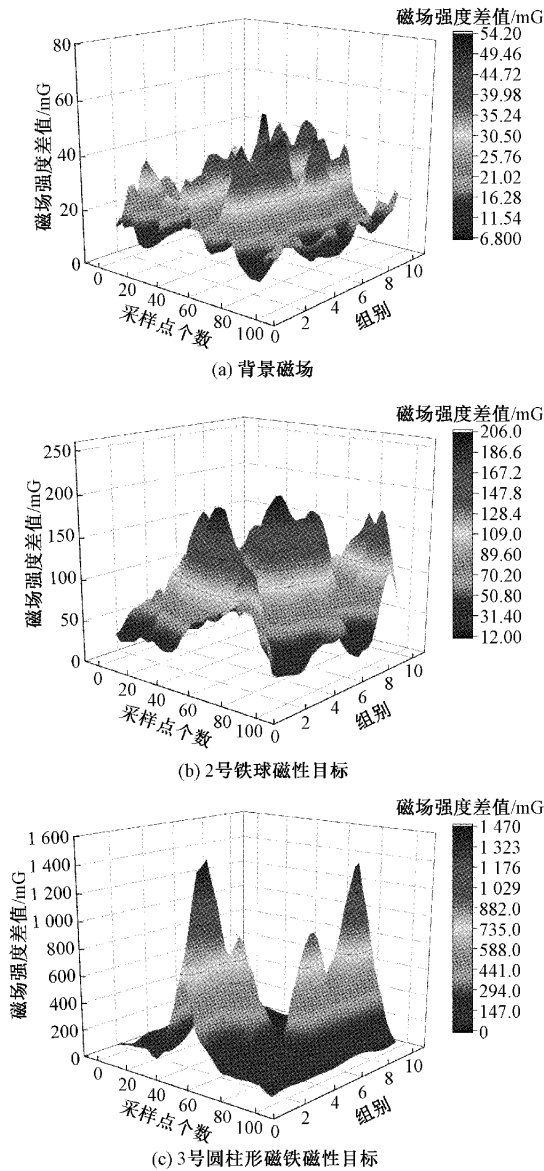


图 11 磁性目标磁场强度差值

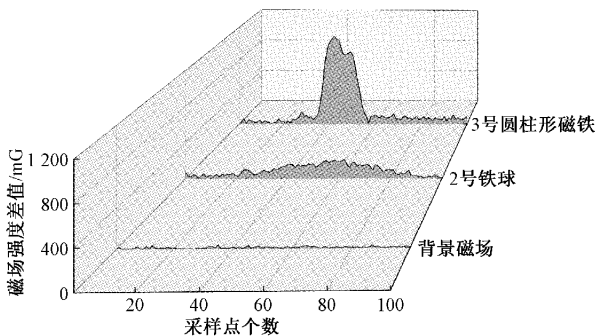


图 12 平均磁场强度差值

用 2 号铁球磁性目标表征混凝土界面系统来标定报警阈值,由于其产生的干扰磁场较为微弱,因此相应的报警阈值标定值也会相对较小,如果钻孔中内沉渣和泥浆中含有

铁磁性异物,则系统会出现频繁误报警的情况,从而失去工程应用价值。而 3 号圆柱形磁铁磁性目标产生的干扰磁场较强,用其表征混凝土界面进行超灌检测,其特征较为明显,同时也可以避免误报警,因此本文系统须使用 3 号圆柱形磁铁磁性目标进行超灌检测。

报警阈值的标定要考虑在进行超灌检测时报警阈值需要避免钻孔中出现含铁磁性物质的沉渣或物体而产生的误判的情况,其阈值必须大于试验 2 中的 250 mG;同时灌注混凝土时需要提前预警,其阈值必须小于试验 3 中的 800 mG。

通过大量的多组试验,3 号圆柱形磁铁磁性目标在距离磁阻传感器 20 cm 左右位置时,磁场强度差值稳定在 333 mG 左右。然而在 20 cm 之内的位置条件下试验,磁场强度差值变化较大,无固定的数值变化区间。因此设定 20 cm 左右位置的 333 mG 为系统的报警阈值。即标高位置磁场强度差值大于 333 mG,混凝土界面接近标高位置;超灌上限位置磁场强度差值大于 333 mG,混凝土界面接近超灌上限位置。

3.2 现场验证与数据分析

1) 现场试验

现场试验地点如图 13 所示,为青岛市某基坑支护工程项目工地。该项目工地桩直径 1.0 m,间距 1.6 m,孔深约 19.0~21.5 m,泥浆比重 1.15 左右,含砂率小于 4%,混凝土比重为 2.40 g/cm³,磁性目标由上文 3 号圆柱形磁铁制成,整体比重 2.10 g/cm³,半径为 2 cm。



图 13 现场鸟瞰图

现场施工如图 14 所示,在对钻孔灌注桩浇筑混凝土前,需要先将钢筋笼和钢护筒置于钻孔内,现场施工人员在吊放钢筋笼时将磁场数据采集模块固定于钢筋笼对应位置,确认磁阻传感器可以正常测量到钻孔灌注桩标高位置和超灌上限位置的磁场数据。

2021 年 12 月 19 日进行了第一次现场试验,并测量了第 51 号桩整个浇筑过程的磁场强度数据,采集磁场强度数据共 2 707 组;2022 年 1 月 16 日进行了第 2 次现场试验,并测量了第 118 号桩整个浇筑过程的磁场强度数据,共采集磁场强度数据 10 824 组。



图 14 现场施工图

现场试验所采集到的部分磁场强度差值如表 3 所示。钻孔灌注桩标高位置在第 380 采样点时刻磁场强度差值为 338 mG,且第 381 和 382 采样点磁场强度差值均大于系统设定的报警阈值 333 mG;此时声光报警器的黄色灯光闪烁,施工人员人工检测混凝土界面在标高位置附近,此时现场施工人员开始控制浇注速度,以免因浇注速度过快而导致混凝土超灌过多。

表 3 磁场强度差值表

采样点	标高位置磁场强度差值/mG	超灌上限位置磁场强度差值/mG
1	44	16
2	47	14
3	18	14
⋮	⋮	⋮
380	338	138
381	339	148
382	347	164
383	351	182
384	353	203
385	359	227
386	363	256
387	362	286
388	362	313
389	359	336
390	363	353
391	366	365

钻孔灌注桩超灌上限位置在第 389 采样点时刻磁场强度差值为 336 mG,且第 390 和 391 采样点磁场强度差值均大于系统设定的报警阈值 333 mG;此时声光报警器的红色灯光闪烁,施工人员人工检测混凝土界面在超灌上限位置附近,此时施工人员停止灌注混凝土。经技术人员现场确认,混凝土界面处于标高位置和超灌上限位置之间,系统检测报警时间点准确及时且控制超灌效果良好。

2) 数据分析

磁场强度差值曲线如图 15(a) 所示,共记录现场试验中系统报警前后共 680 个采样点的数据。在前 150 采样点内磁性目标距离传感器位置较远,同时传感器受到钻孔中的环境和噪声影响,磁场强度差值波动范围为 3~52 mG,且标高位置和超灌上限位置的磁场强度差值长时间稳定在 40 mG 左右。

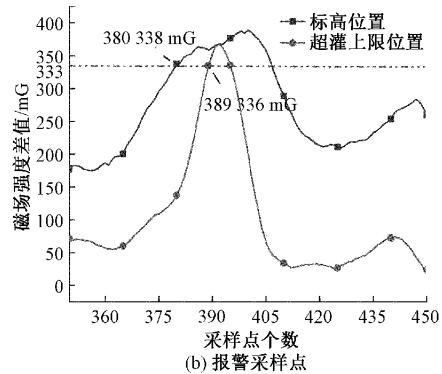
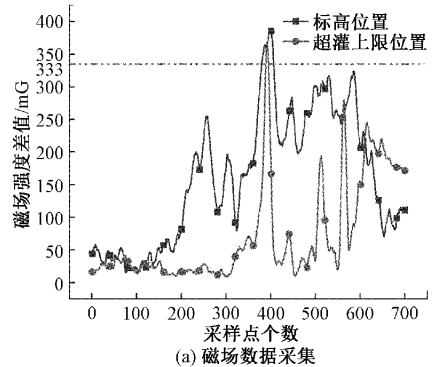


图 15 磁场强度差值

标高位置磁场强度差值曲线在报警前 300 个采样点时间内,先是逐渐上升,然后是在短时间内有所下降后再次迅速上升;如图 15(b) 所示,在第 380 采样点达到 338 mG 超过报警阈值。当磁场强度差值曲线经过峰值点后先是逐渐下降而后出现短暂的上升后又逐渐下降,最后稳定在 100 mG 左右,整个灌注过程中磁场强度差值整体上是先变大后变小的趋势。

超灌上限位置磁场强度差值曲线在报警前 300 个采样点时间内较为稳定,在第 300 个采样点时磁场强度差值迅速上升;如图 15(b) 所示,在第 389 采样点为 336 mG 超过报警阈值,经过峰值点后磁场强度短暂迅速下降后不断

回升,最终稳定在 150 mG 左右。整个灌注过程中同样是磁场强度差值先逐渐变大而后逐渐变小。

综合标高和超灌上限位置的磁场强度差值数据,其曲线整体趋势皆呈现先上升至峰值点后下降特点,且最终的强度数值大于最初强度数值。标高位置最先超过报警阈值,随后超灌上限位置超过报警阈值,报警时间上有明显的时间间隔,整体上符合混凝土高度变化规律。

浇注过程中,磁场强度差值的理想曲线应是连续上升后再连续下降,而在图 15(a)中曲线在上升阶段出现了异常下降。其原因主要有两点,首先是由于磁性目标在钻孔中受混凝土反复挤压翻滚,导致其在水平方向短时间远离了磁阻传感器,最终致使磁场强度差值曲线下降;其次是因为系统采集数据频率较高,曲线的正常上升变化和短时间内的异常下降变化皆采集记录下来,从而出现大量的异常下降趋势。但同时也保证了系统得以及时预警,避免错过判别超灌的关键时间点,提高了本文超灌检测系统的准确性。系统相比于采样桶、可调比重测锤等检测工具,实现了自动化检测减少了人工成本,同时在测量精度的稳定性和设备的可靠性上也优于压应力法和电阻测量法等接触式测量方法。

4 结 论

本文基于磁探测技术研制了灌注桩超灌检测系统,并进行室内试验和现场试验。

首次提出基于磁探测技术的灌注桩超灌检测方法,通过检测桩顶磁场三分量的磁场强度变化来探测和跟踪混凝土界面位置,从而准确控制混凝土的超灌量,解决混凝土灌注桩欠灌或过度超灌的问题。

通过室内试验确定磁场数据采集模块的测点,选取规格为 $\Phi 30 \text{ mm} \delta 10 \text{ mm}$ 的磁铁作为磁性目标的基础材料,同时将报警阈值标定为 333 mG;现场试验混凝土浇注到标高和超灌位置处时,系统先后触发两级声光报警,经现场人工校验混凝土高度在超灌 0.8 m 以内,后期土方开挖超灌高度完全符合桩基设计要求。工程现场验证表明该系统能有效控制混凝土的灌注高度。本文的超灌检测系统是利用磁场三分量进行混凝土高度的检测,适用于工程上定位精度在 20 cm 左右的检测场景。磁场梯度张量能够很大程度地避免地磁场和背景磁场的干扰,可通过采用磁传感器阵列使用磁场梯度张量进行超灌检测,实现更为精确的定位检测,本文超灌检测系统实现了自动检测钻孔中混凝土界面位置,解决了混凝土欠灌或超灌问题,具较好的工程应用价值。

参考文献

[1] 刘晓玲,杜鹏,陈新,等.重锤法检测钻孔灌注桩有效灌注标高的改进与应用[J].中外公路,2020,40(6):27-31,DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.06.006.
[2] 赵斌.超深空桩钻孔灌注桩桩顶标高精准测量控制技

术[J].施工技术,2020,49(S1):1083-1085.

- [3] 韩云山,张晓双,姚蒙,等.一种检测混凝土超灌的方法[P].CN107419758B,2019-03-08.
[4] 李亚哲,白士新,唐文柱.一种控制钻孔灌注桩桩顶标高的装置及其使用方法[J].施工技术,2018,47(S4):205-207.
[5] 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,2017,44(20):92-94.
[6] 张晓双,张晓凤,韩云山,等.灌注桩超灌监测系统标定方法的优化设计与应用[J].科学技术与工程,2021,21(5):1989-1994.
[7] LIU Z L, YU L, ZHANG S. Interface detection of concrete and slurry in cast-in place pile[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 238: 2013, DOI: 10.1051/mateconf/201823802013.
[8] 李波,雷斌,黄凯,等.灌注桩混凝土顶面标高监测及超灌控制施工技术[C].2021年全国土木工程施工技术交流会论文集,2021:430-433,DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.034524.
[9] 曹煜,胡斌,桂林,等.一种基于实测电阻率法的灌注桩超灌监控装置及方法[P].CN113846708A,2021-12-28.
[10] 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,2017,46(1):36-38.
[11] 杨广磁,王亚斌.桩基混凝土超浇预警装置施工新技术研究[J].价值工程,2017,36(32):106-107.
[12] 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,2010,39(S2):36-38.
[13] 赵驰盟,兀伟,杨银芳.磁探测引信目标识别算法研究[J].国外电子测量技术,2020,39(9):47-52,DOI:10.19652/j.cnki.femt.2002170.
[14] 马凯,王习东,冯文杰,等.基于FPGA和磁传感器阵列的磁场扫描系统[J].电子测量技术,2022,45(2):140-147.
[15] 朱正.磁测井法检测钻孔灌注桩钢筋笼长度的应用与分析[J].土工基础,2021,35(2):218-221.
[16] 陈旻.磁测井法在基桩检测中的应用研究[J].福建建材,2020(11):13-15.
[17] 徐以艳,杨榕.磁测井法在灌注桩钢筋笼长度检测中的应用[J].江西建材,2018(12):23-24,26.
[18] 刘宝衡,付天晖,侯文达.两种磁感应通信信道建模与特性分析[J].电子测量技术,2021,44(16):18-22.
[19] 马建军,李岩松,李雪洋,等.基于巨磁阻效应的电流传感器密封式聚磁环设计[J].电子测量与仪器学报,2022,36(5):39-46,DOI:10.13382/j.jemi.B2105017.
[20] 张晓明,杨国欢,赖正喜,等.各向异性磁电阻传感器高精度测试技术[J].测试技术学报,2015,29(1):73-77.

- [21] 姜博文,管雪元,李文胜. 基于磁阻传感器的高转速测量方法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 47-50, DOI:10.19651/j.cnki.emt.2017.05.010.
- [22] 赵中琦,陈永锐,易卫东. 基于磁阻传感器的无线车辆检测器[J]. 电子测量技术, 2013, 36(1): 1-7.
- [23] 黄泽江,卜雄洙,丁岳峰,等. 基于磁传感器的道路车流量检测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(11): 66-70, DOI:10.19652/j.cnki.femt.1901653.
- [24] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94-2008[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2008.
- [25] 陈学明,郝显伟. 一种精准控制钻孔灌注桩混凝土灌注高度的技术[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(4):

126-127.

作者简介

宋传旺(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为通信网络技术、人工智能。

E-mail: songchw_2006@163.com

郭成龙, 硕士研究生, 主要研究方向为人工智能、磁性目标探测。

李运红, 高级工程师, 注册一级建造师, 主要研究方向为岩土工程勘察、设计及施工。

张莅详, 工程师, 主要研究方向为岩土工程勘察及施工。

金承满, 高级工程师, 主要研究方向为岩土工程勘察、设计及施工。