

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904036

硅藻土地区桥梁灌注桩成孔测试研究*

康银庚¹, 高磊², 罗易², 高明军², 张振雷²

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 硅藻土作为一种特殊的黏性土, 在分布上具有一定的区域性, 目前针对该类型土的工程特性以及硅藻土地区灌注桩成孔方法的研究都较少。以杭绍台高铁项目为工程依托, 为了研究硅藻土层中灌注桩的成孔方法, 开展了灌注桩成孔方法现场试验; 分别采用冲击锤锤击成孔、旋挖干钻成孔和旋挖泥浆护壁成孔三种方法进行施工, 对三种方法的成孔质量进行分析对比。研究表明: 在硅藻土地区施工灌注桩, 旋挖干钻成孔施工工艺施工速度较快, 效率高, 桩长、桩径、桩位偏差和垂直度均能满足设计要求, 成孔后孔壁稳定性好, 成孔质量更为可靠; 冲击锤法成孔, 成孔速度较慢, 且存在桩孔扩径现象; 旋挖泥浆护壁法成孔后平稳性较差, 波动性较大, 且存在局部塌孔现象, 成孔效果较差。因此建议硅藻土地段优先考虑采用旋挖干钻法施工桥梁灌注桩。

关键词: 硅藻土; 灌注桩; 成孔方法; 成孔测试

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0335-08

Study on Borehole Test of Bridge Cast-in-place Piles in Diatomite Area

KANG Yingeng¹, GAO Lei², LUO Yi², GAO Mingjun², ZHANG Zhenlei²

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Diatomite is a special type of clay, which has a certain regional distribution. At present, there are relatively few studies on the engineering characteristics of this type of soil, especially on the drill method of cast-in-place piles in diatomite area. Based on the Hangzhou-Shaoxing-Taizhou high-speed railway project, field test was carried out according to the field condition to study the drill method of cast-in-place piles in diatomite layer. Three types of drill methods, including the impact hammer drill method, dry rotary drill method and rotary drill method with mud wall protection, were used to construct the holes. The quality of the pile holes by the three methods was analyzed and compared. The results show that the rotary dry drill method is faster and more efficient in diatomite soil area. The length, diameter, deviation and verticality of piles can all meet the design requirements. The borehole wall is stable and the quality of bored piles is more reliable. The impact hammer method has a slow drill speed, and pile hole enlargement phenomenon exists. Rotary drill with mud wall protection meth-

* 收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508159)、江苏省自然科学基金项目(BK20151495)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019B12914)资助

作者简介: 康银庚(1986—), 男, 工程师。主要从事桥梁结构设计与施工方面的研究。E-mail: 534586234@qq.com

通讯作者: 高磊(1984—), 男, 副教授, 硕士, 博士。主要从事工程地质和岩土工程方面的研究。

E-mail: jacob6521@163.com

od has poor stability of pile holes and undulation hole wall. There sometimes is local collapse of holes wall, resulting in poor hole forming effect. Therefore, it is suggested that the dry rotary drill method should be preferred in the construction of bridge cast-in-place piles in diatomite soil areas. The research results can provide reference for similar engineering applications in the future.

Keywords: diatomite; cast-in-place pile; dill method; pile hole test

引 言

硅藻土作为一种含有较多有机质的特殊黏性土,具有孔隙率大、密度小、结构松散、压缩性较高等特点,在空间分布上具有一定的区域性,在我国主要分布在浙江、云南等地区,其中以吉林、浙江嵊州市分布面积较多^[1]。洪振舜等^[2]对天然硅藻土的应力水平与孔隙空间分布的关系进行了研究,发现在不同应力水平作用下硅藻土孔隙空间的变化规律;马秋柱等^[3]通过室内土工试验和原位试验对纳米比亚硅藻土的工程特性进行了研究,发现该地区硅藻土具有含水率高、密度低、孔隙比大,抗压强度高大于其抗剪强度的性质;R. W. Day等^[4]对硅藻土填料的工程性质进行了研究,发现硅藻土填料虽然具有低干密度和高含水率,但在低于50 kPa的有效应力下表现为致密的颗粒材料;张永双等^[5]在云南腾冲发现了一种膨胀性硅藻土,具有高塑性和显著的膨胀崩解性;匡朝辉等^[6]通过在硅藻土地质进行灌注桩施工,对部分地区硅藻土地质的成孔技术进行了研究与分析。现有研究多集中在硅藻土的物理力学性质研究,针对硅藻土地层灌注桩成孔方法的研究成果还相对较少。

尽管目前针对灌注桩成孔工艺的研究已经有了相关成果,如谢星等^[7]针对黄土地区进行了钻孔灌注桩成孔工艺的研究,探讨了旋挖干钻和泥浆护壁法两种成孔工艺对钻孔灌注长桩承载力的影响;唐剑等^[8]针对砂卵石覆盖层岩溶地区研究了深桩的成孔工艺,通过冲击钻与旋挖钻两种成孔工艺的对比,总结出适用于该地区的成孔方法。由于硅藻土本身特殊的物理力学性质及其分布的区域性,在硅藻土层中进行桩基施工的工程项目相对较少,缺少相关的灌注桩成孔经验,为了解决硅藻土地区灌注桩成孔问题,本文依托浙江某高铁桥梁桩基工程项目,在同一硅藻土层区域同时采用冲击锤锤击成孔、旋挖干钻成孔和旋挖泥浆护壁法成孔三种灌注

桩成孔工艺,通过对三种成孔工艺的施工过程和成孔质量进行分析对比,明确给出适用于本高铁工程的桥梁灌注桩成孔方法,并可为类似工程项目提供借鉴。

1 工程地质条件

本桩基工程位于浙江省绍兴嵊州市剡湖街道上碑山村,为大型高铁桥梁灌注桩基础,共打入26根灌注桩试桩,桩长为25~39 m,桩径为1 m。施工场地位于玄武岩台地,地势略有起伏,区内主要为村庄、果园、农田,地面标高一般为112.09~173.55 m,相对高差在5~62 m,场地综合地下水水位埋深为3.4~15.7 m,地下水主要受大气降水补给,受季节变化影响,地下水位变动幅度在1~3 m。

施工场地范围内土层从上往下依次为:粉质黏土、白色硅藻(岩)土、兰色硅藻(岩)土、含硅藻土砂岩以及兰色硅藻(岩)土。各土层性质如下:

(1)粉质黏土:土层深度范围在0~1.3 m,灰黄色,硬塑,含少量铁锰质氧化物,偶见有小砾石。

(2)白色硅藻(岩)土:土层深度范围在1.3~9.8 m,颜色呈现灰白色,弱风化,主要由硅藻遗骸(约占15%~20%)及黏土矿物(80%~85%)所组成,含少量石英和铁质。白色硅藻(岩)土主要分布于上部,风化较兰色硅藻(岩)土强烈,且硅藻碎屑含量稍高。

(3)兰色硅藻(岩)土:土层深度范围在9.8~10.7 m以及17~30 m,兰色,弱风化,主要由硅藻遗骸(约15%~20%)及黏土矿物(75%~80%)所组成,含少量石英和铁质。兰色硅藻(岩)土主要分布于中部及下部,风化较小。

(4)含硅藻土砂岩:土层深度范围在10.7~17 m,灰白色,强风化,砂质结构,层状构造,含20%的硅藻土成分。根据工程地质勘察报告,得到典型地层分布情况如图1所示,硅藻土层基本物理力学特性指标见表1。

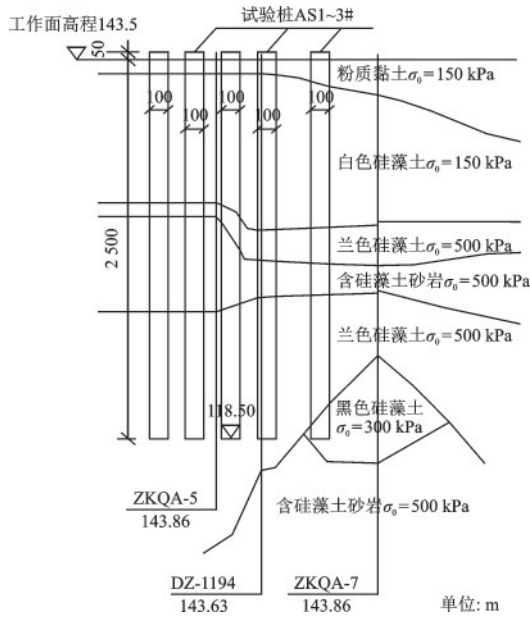


图1 典型断面地基土层分布

Fig.1 Distribution of soil layer of typical foundation section

表1 硅藻土层基本物理力学特性指标

Table 1 Basic physical and mechanical properties of diatomite layer

土层名称	密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	孔隙比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
白色硅藻土	1.74	35.0	0.94	46.0	25.4
兰色硅藻土	1.49	70.6	1.71	60.4	25.8

2 灌注桩成孔质量现场测试

2.1 灌注桩成孔方法

本次成孔现场试验采用冲击锤、旋挖干钻和旋挖泥浆护壁法三种灌注桩成孔方法进行施工。冲击成孔灌注桩是指用冲击式钻机或卷扬机悬吊冲击钻头(又称冲锤),在桩位上下往复冲击,将坚硬土或岩层破碎成孔,部分碎渣和泥浆挤入孔壁,使其大部分成为泥渣,用掏渣筒掏出成孔,然后浇筑混凝土成桩。本次现场试验主要采用简易型冲击钻机,现场情况如图2所示。冲击锤锤击成孔现场施工工艺流程如下:桩位放样→埋设护筒→桩机就位→冲击锤锤击成孔(泥浆配制、冲击钻进、泥浆循环)→终孔(检查孔深、清孔)→钢筋笼制作安装→灌注混凝土→成桩、拔出钢护筒。

旋挖钻机成孔首先是通过底部带有活门的桶



图2 现场施工情况

Fig.2 Field construction

式钻头回转破碎岩土,并直接将其装入钻斗内,然后再由钻机提升装置和伸缩钻杆将钻斗提出孔外卸土,这样循环往复,不断取土卸土,直至钻至设计深度。对黏结性好的岩土层,可采用干式或清水钻进工艺,无需泥浆护壁;而对于松散易坍塌地层,或有地下水分布,孔壁不稳定,必须采用静态泥浆护壁钻进工艺,向孔内投入护壁泥浆或稳定液进行护壁,现场情况如图2所示。旋挖干作业成孔灌注桩施工工艺流程如下:桩位放样→打入钢护筒(隔离地下水)→桩机就位→钻进成孔(下钻、提钻、卸土、渣土外运)→终孔(检查孔深、孔底清渣)→钢筋笼制作安装→灌注混凝土→成桩、拔出钢护筒。旋挖泥浆护壁成孔灌注桩施工工艺流程如下:桩位放样→埋设护筒→桩机就位→钻进成孔(泥浆配制、送泥浆、下钻、提钻、卸土、渣土外运)→终孔(检查孔深、孔底清渣)→钢筋笼制作安装→灌注混凝土→成桩、拔出钢护筒。

2.2 成孔质量现场测试

2.2.1 测试方法与原理

本次成孔质量测试主要使用两种仪器:智能超声成孔测试仪器和伞型井径仪。智能超声成孔测试是通过把仪器的绞车置于成孔上,将能发射超声波并且接收超声波信号的探头对准测试孔中心位置,放线将探头逐渐深入孔内,探头不断下降向四周发射脉冲,信号遇到孔壁后反射并被接收器接收,最终传往操作系统得到成孔质量曲线,从而判断成孔质量。井径仪测试是通过将井径臂伸入孔

中与孔壁接触,通过孔壁作用的弹簧力使井径臂发生收缩或者伸张,并将变形变化转换成电阻值的变化以电信号的形式传输给操作系统,从而反映井径的变化,判断成孔质量。

2.2.2 现场测试

本次成桩工艺研究选择试验区内5根试桩作为研究对象,在同一硅藻土层区域采用冲击锤、旋挖干钻和旋挖泥浆护壁法三种灌注桩成孔工艺进行施工。其中AM5和AM9采用旋挖干钻法施工,孔内未注水,智能超声检测仪在没水的情况下不能使用,故采用伞型井径仪进行成孔测试,如图3所示。

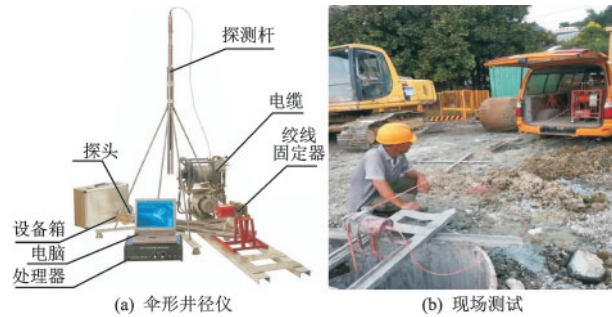


图3 伞形孔径仪现场测试
Fig.3 Field test of umbrella aperture meter

AM7采用冲击锤锤击成孔,测试时主要使用智能超声成孔测试仪,如图4所示,为对比和验证两种测试仪器数据的准确性和一致性,测试过程中两次使用了伞型井径仪。

AM10和AM11采用旋挖泥浆护壁法成孔,采用智能超声成孔测试仪。相关检测参数见表2。

3 成孔质量测试结果与分析

3.1 成孔质量测试结果

本次测试中每根试桩共进行9次检测,历时

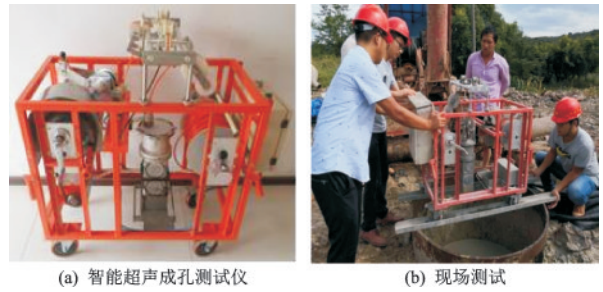


图4 智能超声成孔现场测试
Fig.4 Field intelligent ultrasonic test on drilled pile hole

表2 成孔方法试验与质量测试参数

Table 2 Test on hole drilling method and quality test parameters

成桩工艺	试桩编号	设计值		测试日期	测试方法
		桩长/ m	桩径/ m		
旋挖干钻 (XWGF)	AM5	27.5	1.0	20180907~ 08	伞型 井径仪
	AM9	26.6	1.0	20180903~ 04	伞型 井径仪
冲击锤法 (CJCF)	AM7	25.0	1.0	20180819~ 20	超声波 伞型 井径仪
旋挖泥浆 护壁 (NJHB)	AM10	26.7	1.0	20180909~ 10	超声波
	AM11	28.2	1.0	20180916~ 17	超声波

26 h,前4次测试间隔2 h一次,后5次测试间隔4 h一次,最后一次测试数据见表3。对现场测试的结果进行统计分析,并绘制孔深随时间的变化曲线如图5所示。从图中可以看出随着时间的增加,孔深逐渐减小,但变化均不大。测试曲线如图8~12所示。

图6为孔径随时间的变化曲线,通过分析最大

表3 最后一次成孔质量测试数据汇总

Table3 Summary of the last quality test data for the pile holes

成桩工艺	试桩编号	设计值		最后一次(成孔26 h后)检测结果					
		桩长/ m	桩径/ mm	孔深/ m	最大孔径/ mm	最小孔径/ mm	平均孔径/ mm	沉渣厚度/ mm	垂直度/ %
旋挖干钻	AM5	27.5	1 000	27.16	1 127	959	994.3	未测	<1.0
	AM 9	26.6	1 000	25.71	1 134	958	1 000	395	<1.0
冲击锤法	AM7	25.0	1 000	27.06	1 246	1 042	1 138	335	<1.0
旋挖泥浆 护壁	AM10	26.7	1 000	26.6	1 373	852	972	375	>1.0
	AM11	28.2	1 000	27.82	1 190	951	988	476	<1.0

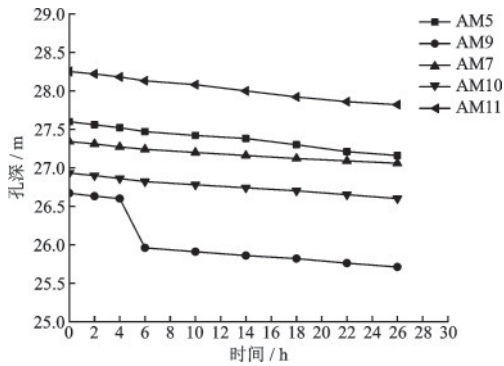


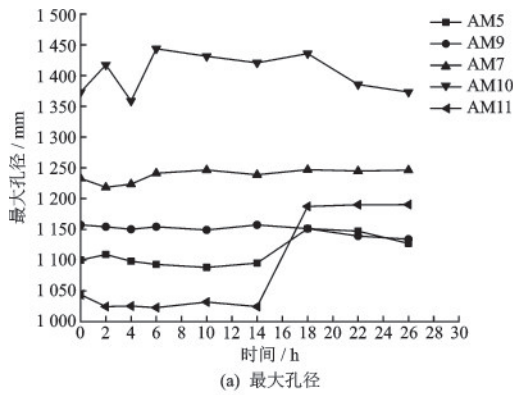
图5 孔深值变化曲线

Fig.5 Variation curve of hole depth

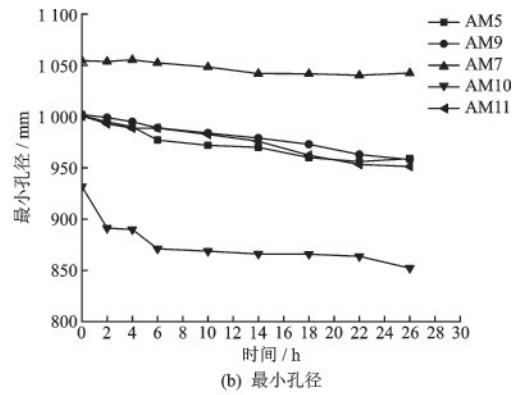
孔径、最小孔径、平均孔径、孔径极差值等4个指标可以看出,冲击锤法孔径容易扩大,而旋挖泥浆护壁法容易塌孔,孔径变化范围较大,旋挖干钻孔径控制相对稳定。

同时分别得出三种不同成孔工艺的桩孔在首次检测、中间检测(第5次)和末次检测三个阶段的全深度测试曲线,从图7~11中可以看出成孔质量效果。

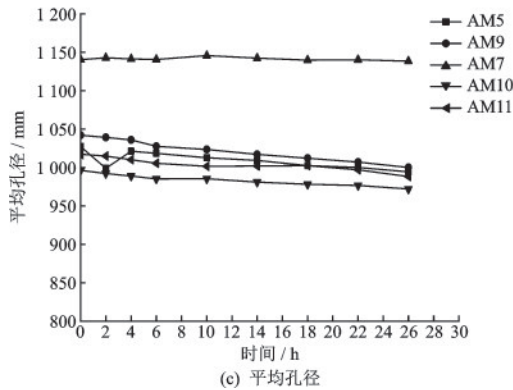
图9~11是AM7、AM10和AM11三根试桩的成孔深度实测图像,图中结果表明:AM7采用冲击



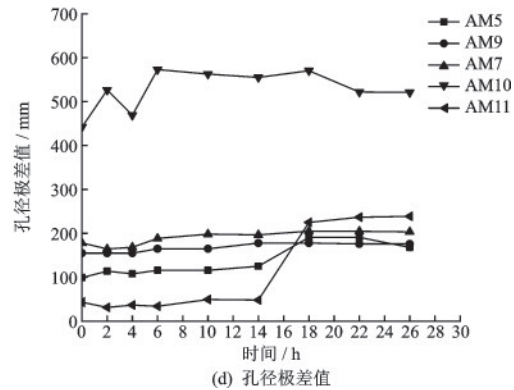
(a) 最大孔径



(b) 最小孔径



(c) 平均孔径



(d) 孔径极差值

图6 孔径值变化曲线

Fig.6 Variation curve of borehole diameter

锤法进行成孔,孔径沿深度方向波动总体较小,说明孔壁稳定性较好,但在桩孔最上端扩径现象较为明显,沿深度向下方向也存在一定的扩径现象;AM10和AM11两根试桩采用旋挖泥浆护壁法进行成孔,成孔后孔径随历时变化过程的平稳性稍差,对比不同阶段的测试图像,孔径沿深度方向波动总体较小,局部易出现小范围孔径不均匀变化。图10表明在孔深16~19 m桩孔出现明显的塌孔现象,且图10~11均表明桩孔沿深度方向存在多处小范围孔径大小不均的现象,说明旋挖泥浆护壁法在此硅藻土层中成孔效果较差。

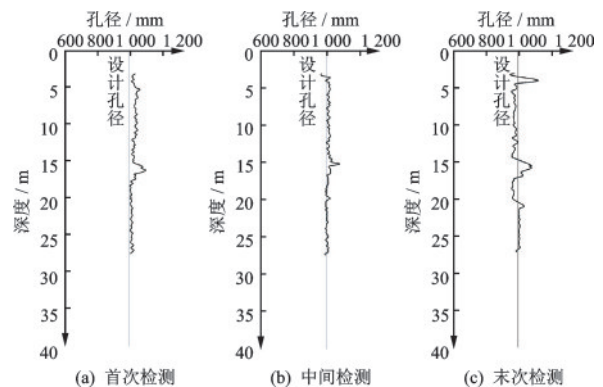


图7 AM5桩孔全深度实测曲线

Fig.7 Full depth measured curve of AM5 pile hole

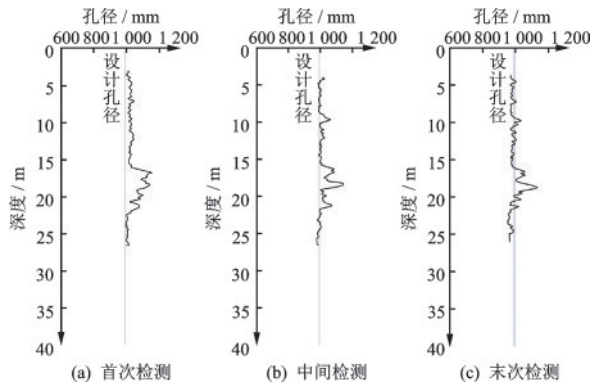


图8 AM9桩孔全深度实测曲线

Fig.8 Full depth measured curve of AM9 pile hole

3.2 成孔质量结果分析

(1)AM5和AM9为旋挖干钻成孔工艺,成孔速度快,桩长、桩径、桩位及垂直度都能满足设计要求,现场施工质量控制较容易。成孔后实测孔径值随历时变化过程总体较平稳,末次检测平均孔径分别为994 mm和1 000 mm,孔径极差值(最大孔径与最小孔径之差)在100~200 mm,孔径沿深度方向波动总体较小,说明孔壁稳定性较好。由于桩孔应力释放的原因,成孔后容易出现轻微缩颈现象;实测

沉渣厚度随历时逐渐增大,末次测试值分别接近50 cm和40 cm。

(2)AM7为冲击锤法成孔,成孔速度较慢,清孔时间较长,桩长、桩位及垂直度能满足设计要求,但与旋挖法相比,垂直度的现场控制难度较大。成孔后实测孔径值随历时变化过程总体较平稳,末次测试最大孔径为1 246 mm,最小孔径为1 042 mm,平均孔径为1 138 mm,孔径极差值(最大孔径与最小孔径之差)在100~200 mm,孔径沿深度方向波动总体较小,说明孔壁稳定性较好。由于强力冲击和侧向挤压填充的原因,桩孔扩径现象较为明显,成孔后实测孔径值随时间变化而减少的趋势不明显。实测沉渣厚度随历时逐渐增大,末次测试值接近为34 cm。

(3)AM10和AM11采用旋挖泥浆护壁法成孔。正常情况下,成孔速度较快,桩长、桩径、桩位及垂直度都能满足设计要求。与旋挖干钻相比,成孔后实测孔径值(最大孔径、最小孔径、孔径极差值)随历时变化过程的平稳性稍差,波动性稍大,末次测试平均孔径分别为972和988 mm。平均孔径随历时变化平稳,说明孔壁稳定性较好。实测沉渣厚度随历时逐渐增大,末次测试值分别接近为38 cm和

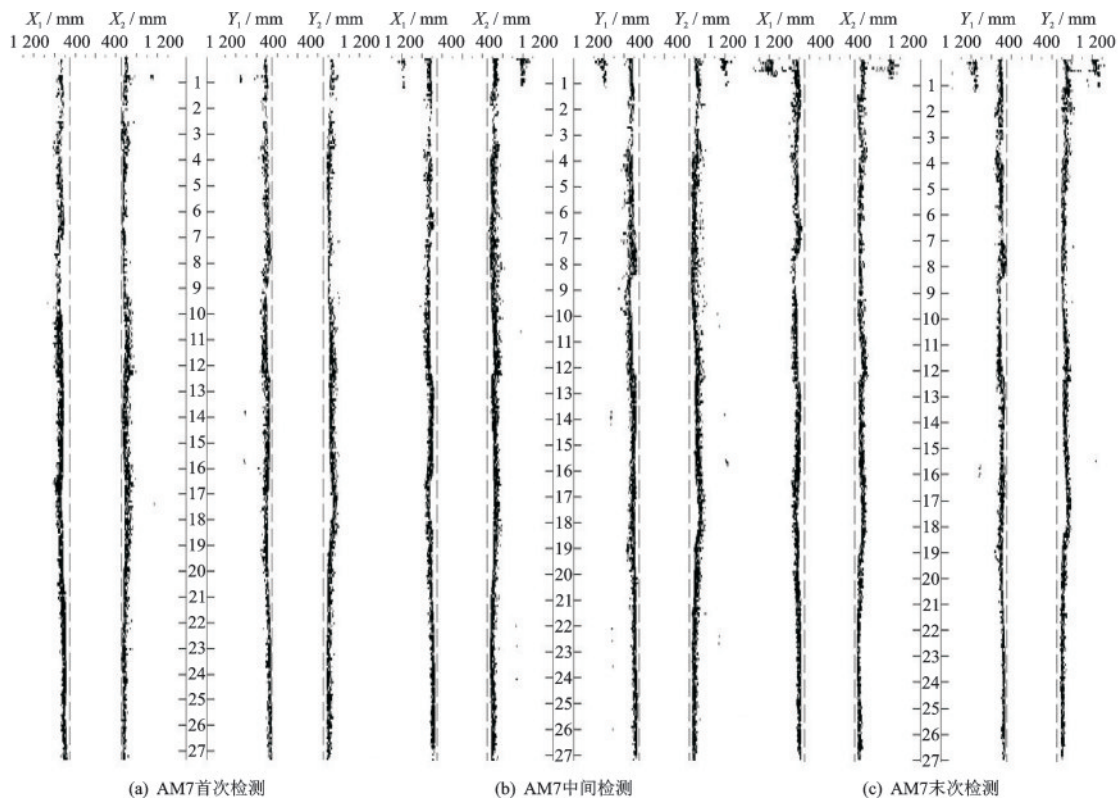


图9 AM7桩孔全深度实测图像

Fig.9 Full depth measured result of AM7 pile hole

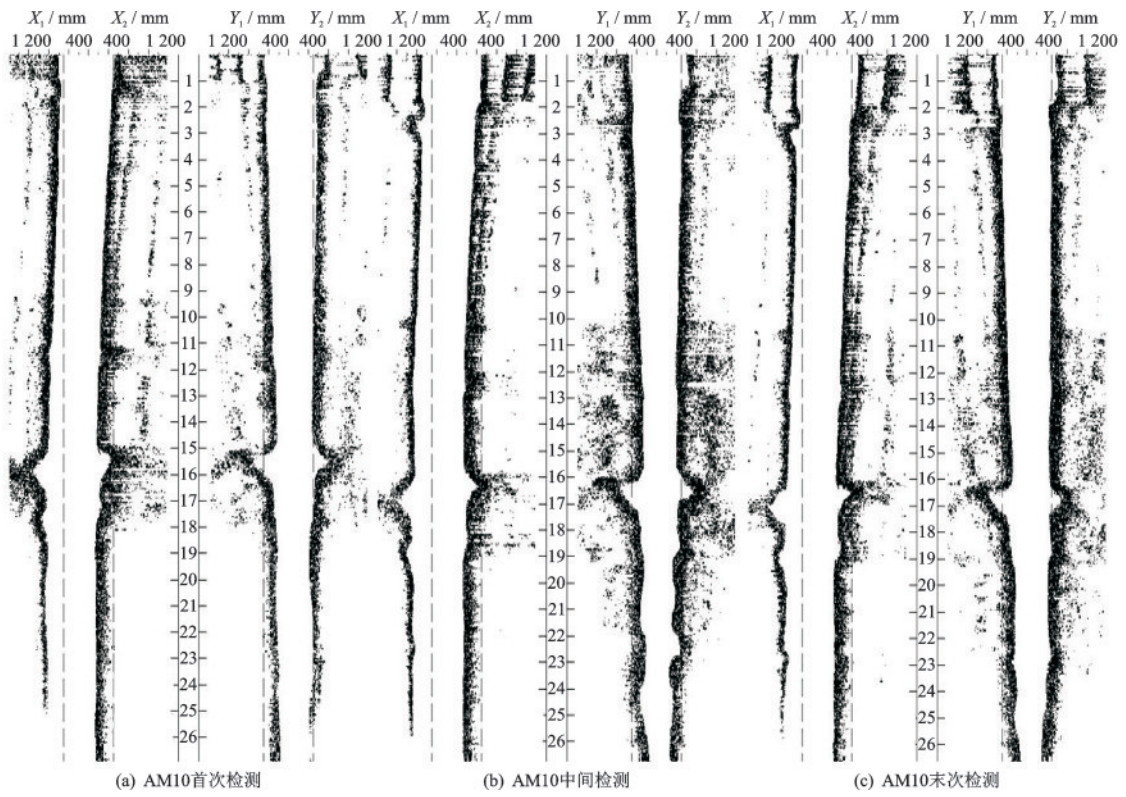


图 10 AM10 桩孔全深度实测图像

Fig.10 Full depth measured result of AM10 pile hole

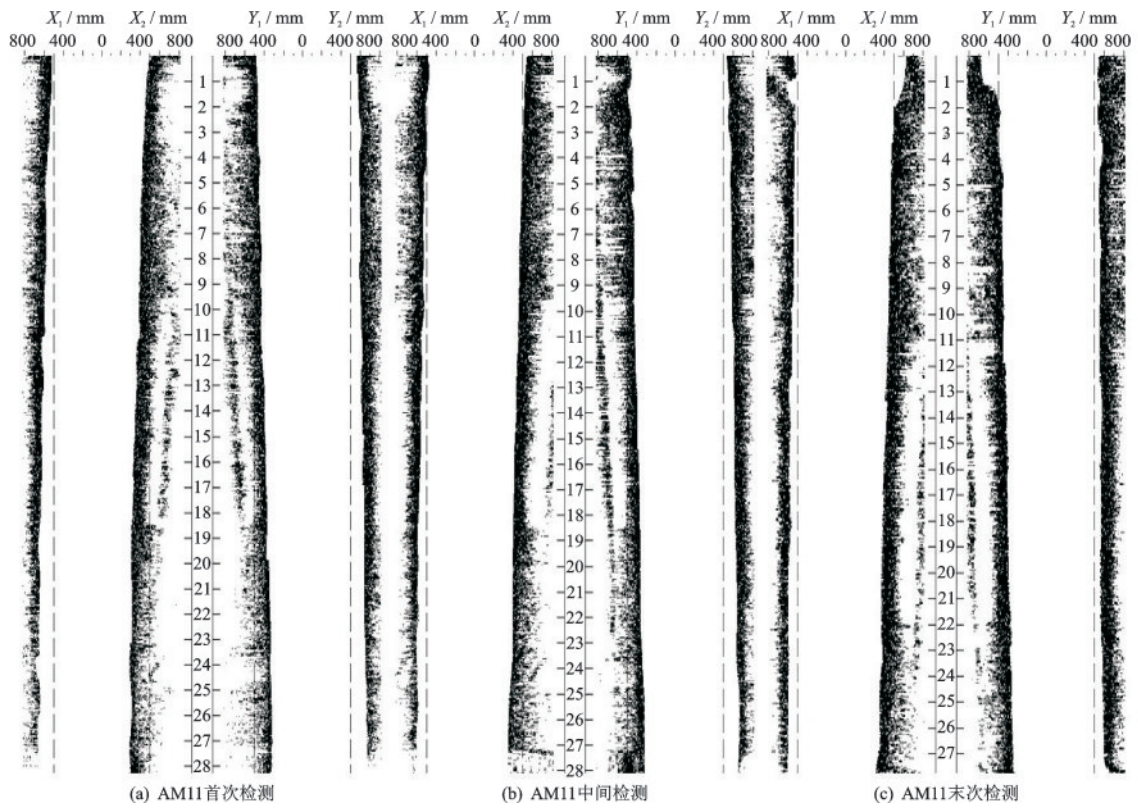


图 11 AM11 桩孔全深度实测图像

Fig.11 Full depth measured result of AM11 pile hole

48 cm;其中AM10桩施工时因桩机未能很好调平,造成桩孔倾斜,检测垂直度大于1.0%,桩孔实测图像(图10)表明在孔深16~19 m出现明显的塌孔现象,综合分析出现这种现象的原因有两种:一是因桩孔倾斜导致施工过程中刚好在此位置附近对钻具进行角度调整,导致钻头局部切削桩壁土层;二是桩壁土层局部坍塌,导致垂直度偏离较大。

综上所述,与冲击锤法、旋挖泥浆护壁成孔法相比,旋挖干钻成孔法具有速度最快、效率高、现场操作方便、成孔质量容易控制、效果可靠等优点。在硅藻土地基施工灌注桩,建议在合适的环境和条件下优先考虑采用旋挖干钻法成孔工艺,但在施工时应重点控制以下几个要素:(1)场地平整度和桩机的调平;(2)对地下水的有效隔离措施;(3)清孔措施和清孔质量,确保沉渣厚度满足设计和规范要求。

4 结 语

在硅藻土地区,旋挖干钻成孔工艺施工速度最快,效率高,桩长、桩径、桩位偏差和垂直度均能满足设计要求,成孔后孔壁稳定性好,成孔质量可靠;冲击锤法成孔,成孔速度较慢,清孔时间较长,桩长、桩位及垂直度能满足设计要求,但与旋挖法相比,垂直度的现场控制难度较大,且存在桩孔扩径现象;旋挖泥浆护壁法正常情况下,成孔速度较快,桩长、桩径、桩位及垂直度都能满足设计要求,但对泥浆成分配制和比重控制要求高,成孔后平稳性较差,波动性较大,且存在局部塌孔现象,成孔效果较差。因此建议在硅藻土地段适合的环境和条件下优先考虑采用旋挖干钻法施工桥梁灌注桩。

参考文献:

[1] 高华喜,殷坤龙,周春梅.硅藻土滑坡稳定性分析及其时间预报[J].西北大学学报(自然科学版),2007,37(1):127-130.
Gao H X, Yin K L, Zhou Ch M. Stability analysis and time prediction of diatomite landslide [J]. Journal of Northwestern University (Natural Science Edition), 2007, 37(1): 127-130. (in Chinese)

[2] 洪振舜,立石义孝,邓永峰.天然硅藻土的应力水平与

孔隙空间分布的关系[J].岩土力学,2004,25(7):1023-1026.

Hong Zh Sh, Li Shi Y X, Deng Y F. Relationship between stress level and pore space distribution of natural diatomite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1023-1026. (in Chinese)

[3] 马秋柱,何智敏,蔡泽明.纳米比亚硅藻土的工程特性[J].水运工程,2017,45(12):80-84.

Ma Q Zh, He Zh M, Cai Z M. Engineering characteristics of Namibian diatomite [J]. Port & Waterway Engineering, 2017, 45(12): 80-84. (in Chinese)

[4] Day R W. Engineering properties of diatomaceous fill [J]. Journal of Geotechnical Engineers Division [J], American Society of Civil Engineers, 1995, 121(12): 908-910.

[5] 张永双,郭长宝,曲永新,等.云南腾冲膨胀性硅藻土的发现及其工程地质意义[J].工程地质学报,2012,20(2):266-275.

Zhang Y Sh, Guo Ch B, Qu Y X, et al. Discovery of expansive diatomite in Tengchong, Yunnan Province and its engineering geological significance [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 266-275. (in Chinese)

[6] 匡朝辉,周希泯.硅藻土地质的灌注桩成孔技术研究与分析[J].珠江水运,2018,24(9):19-21.

Kuang Ch H, Zhou X M. Study and analysis of hole forming technology of cast-in-place pile in diatomite geology [J]. Pearl River Water Transport, 2018, 24(9): 19-21. (in Chinese)

[7] 谢星,王东红,赵法锁,等.黄土地区两种成孔工艺钻孔灌注长桩承载力性状对比研究[J].西安科技大学学报,2005,25(1):42-46.

Xie X, Wang D H, Zhao F S, et al. Comparison for bearing behavior of longhole bored pile by two types of holing technology in loess foundation [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(1): 42-46. (in Chinese)

[8] 唐剑,范平阳,张晨.深厚砂卵石覆盖层岩溶地区深桩成孔工艺研究[J].公路交通科技,2018,35(增1):153-158.

Tang J, Fan P Y, Zhang Ch. Deep pile hole forming technology in karst area with deep sand and pebble overlay [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(Sup1): 153-158. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)