

基于低应变动测法的双向粉喷桩桩身质量评价

谢胜华^{1,2}, 刘松玉¹, 杜广印¹, 季鹏¹

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 低应变动测法桩基检测技术, 具有检测速度快、反应直观、适应性强等特点, 目前该方法在桩基(钻孔灌注桩和预应力管桩)工程检测中得到广泛应用, 但在粉喷桩的桩身完整性和桩长检测过程还存在大量的问题还有待进一步进行探索。文中探讨了双向粉喷桩单桩检测方法的适用程度及具体标准, 提出用低应变动测法评价双向粉喷桩的桩身强度、桩长等特性以及对检测效果的影响因素分析, 并通过现场取芯检测进行对比分析, 验证了该法在双向粉喷桩检测的适用性, 并在连云港至临沂高速公路(江苏段)LL-8标双向粉喷桩处理的工程中使用, 取得较好的检测效果。

关键词: 桩身完整性; 低应变动测法; 双向粉喷桩; 有效桩长

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-0064-05

作者简介: 谢胜华(1977-), 男, 安徽怀宁人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土力学、高速公路软弱地基处理等方面的研究与教学工作。E-mail: xieshua@sina.com。

Quality evaluation of pile integrity by bidirectional dry jet mixing method based on low-strain integrity tests

XIE Sheng-hua^{1,2}, LIU Song-yu¹, DU Guang-yin¹, JI Peng¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: The low-strain reflection wave method for the pile foundation is an inspection technology. It has advantages such as rapid detection speed, intuitive reaction, strong adaptability. At present this method has been widely used in pile foundation (cast-in-situ bored piles and prestressed pipe piles). Nevertheless problems still exist in terms of monitoring of pile shaft completeness and pile length for DJM piles. In this study, the applicability and specific standards of inspection methods for bidirectional DJM piles are discussed. The low-strain dynamic test method is proposed to detect the strength the pile length and characteristics of bidirectional DJM pile body. Through the in-situ core tests, this method is verified in term of bi-directional DJM pile tests, and applied in Lianyungang-Linyi highway (Jiangsu province) LL-8 section bidirectional DJM pile project, and convinced results are achieved.

Key words: pile integrity; low strain integrity testing; bidirectional dry jet mixing column; critical length of column

0 引言

粉喷桩处理软土地基具有经济、有效、节省工时等多种优点^[1]。尽管其作用机理和设计方法已渐趋明朗和成熟, 但对其使用效果仍有争议。主要集中在对其成桩质量、尤其是深部质量检测尚无可靠有效的方法和判别标准, 因而在国内有些地区的使用受到限制。

针对上述问题, 东南大学岩土工程研究所组织相关科研力量, 从施工机械、施工工艺以及检测标准进行一系列研究, 提出了双向搅拌粉喷桩的成套施工技术^[2-4]。双向搅拌粉喷桩机是在常规的粉喷桩的施工机械(PH-5D系列), 通过增加内钻杆和上传式动力设备, 将原来螺旋式叶片更换为3组6片式十字叶片,

下钻至停灰面即开始喷灰, 全程搅拌, 仅仅“一下一上”即可完成一根桩的施工, 从而将原来常规粉喷桩的“四搅两喷”工艺改变成双向搅拌的“两搅一喷”, 大大缩短了施工时间, 从而提高了施工效率。

连云港至临沂高速公路(江苏段)位于江苏连云港地区沿海地区, 沿线总体属于苏北滨海平原地区, 其表层全部为第四纪所覆盖, 第四纪沉积物主要以海积、冲积物为主。工程地质勘察资料表明, 该地区软土分布广泛且工程性质差, 因此必须对软土地基进行

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879011); 江苏省交通科技项目资助(08Y33); 江苏省普通高校科研成果产业化推进项目(JH08-2)
收稿日期: 2011-08-03

处理才能满足工程要求, 根据设计, 连(云港)临(沂)高速 LL-8 标沿线采用了近 20 万延米双向搅拌粉喷桩施工, 因此对成桩工艺及质量检测方法进行专项研究, 现将其中质量检测方法研究成果之一作简要介绍。

1 双向搅拌粉喷桩的检测方法

TB10113—96《粉体搅拌桩加固软弱土层技术规范》对粉喷桩的设计与施工作出了详细规定和说明, 促进了粉喷桩的推广应用^[5]。同时, 该技术规范也规定或提出了一些粉喷桩的检测方法。但是, 双向搅拌粉喷桩是一种新的工法和施工技术, 目前还未见成熟的检测方法和标准, 因此, 为了探索各种检测方法的适用程度及具体的标准, 从桩头检测、桩身检测和承载力检测三方面来总结, 并制订了如下检测研究途径(如图 1 所示)。

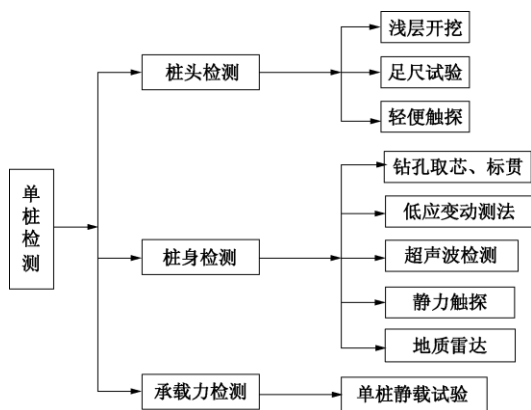


图 1 双向粉喷桩单桩检测方法汇总

Fig. 1 Summay of bidirectional DJM pile test methods

1.1 桩头检测

包括浅层开挖, 目测其搅拌均匀性; 在桩顶以下 0.5, 1.0, 1.5 m 截取 3 段桩体进行现场足尺桩身无侧限抗压强度试验, 该方法可以比较直观地得出上部桩体强度及变形特征参数。其缺点是检测深度受到限制, 深度超过 2 m 时, 桩体挖掘比较困难; 轻便触探适用于成桩在 3 d 内, 通过触探点的贯入 100 mm 的锤击数 N_{10} 来判断每米桩身的均匀性, 以上几种方法检测桩体的深度有限。

1.2 桩身检测

包括无损检测和有损破坏检测。其中无损检测包括低应变动测法、超声波检测和地质雷达检测; 有损破坏检测包括钻孔取芯、进行标准贯入试验和静力触探检测。在保证取芯质量的前提下, 可采用钻探取水泥土芯样, 但是该方法取芯样的工艺是关键, 往往因水冲或干钻取的均为破碎水泥土芯样, 造成假象, 而且取完芯样用水泥土回填导致填充的水泥土与未取芯

样的水泥土由于龄期不一致而导致胶结不好; 同样静力触探由于一定龄期的水泥土强度较高而导致钻进困难。在无损检测中, 超声波检验成桩质量的方法, 一般来说比较可靠, 但需预埋钢管, 比较麻烦, 成本也较高, 难以大量采用; 地质雷达方法只能根据图像色彩亮度对桩身强度和均匀性作定性判别, 定量评价还有待进一步研究; 低应变动测法对粉喷桩进行桩长和桩体均匀性的检测是可行的, 目前只能定性检查。在定量方面还须进一步积累粉喷桩桩身材料与波速之间的相互关系。

1.3 承载力检测

对于承受竖向荷载的粉喷桩, 静载荷试验是最可靠的质量检验方法。但往往因为试验费用高, 且检测深度受承压板宽度限制。所以只在重要工程或特殊要求的工程中采用, 且检查的频次较低, 为总桩数的 0.5%~1%, 但不少于 3 根。

上述粉喷桩检测方法的结果表明, 结合室内水泥土试块的超声波检测试验, 在诸多检测方法中, 只要找到水泥土试块的强度和波速的关系, 低应变动测法检验双向粉喷桩的桩身长度、搅拌均匀性是可行的。

2 一维应力波理论

一维线弹性杆件模型是低应变法的理论基础^[6]。假设桩为等截面细长杆(直杆, 一般粉喷桩直径为 0.5 m, 桩长 10~20 m, 长径比为 20~40)四周无侧摩阻力作用(自由), 顶端受到激振后杆截面在变形后仍保持平时不变, 如图 2 所示, 则微单元的应变 ε 为

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1)$$

式中 u 为沿 z 方向的位移, ε 在不同位置 and 不同时间均在变化, 即 z 的函数, 为应变变量。

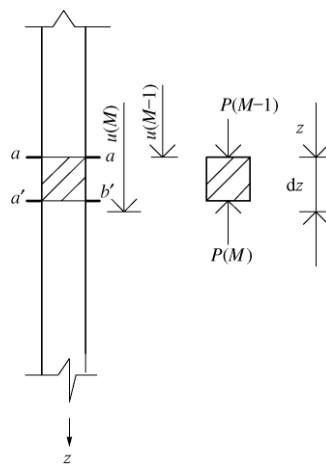


图 2 一维弹性杆系模型

Fig. 2 One-dimensional elastic bar system model

z 深度处一截面 ab 的轴向力为

$$P(z) = A\sigma = AE\varepsilon = AE \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

式中 A 为桩的截面积, 对于粉喷桩直径为 0.5 m, 则 $A=0.19625 \text{ m}^2$; E 为粉喷桩的弹性模量, MPa。

则 $z+dz$ 深度截面 $a'b'$ 的轴向力为:

$$P(z+dz) = AE \frac{\partial u}{\partial z} - AE \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = AE \frac{\partial u}{\partial z} - AE \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz, \quad (3)$$

所以, 微单元受力为

$$P(z) - P(z+dz) = AE \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz \quad (4)$$

由微单元满足平衡条件得

$$AE \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

式中右边项为惯性力, m 为微单元的质量。

令微单元质量密度 $\rho = \frac{m}{Adz}$, 应力波沿杆身传播

速度 $c = \sqrt{E/\rho}$, 代入式 (5) 中可得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (6)$$

式 (6) 即为一维波动方程。

3 反射波法估计桩身水泥土的强度

3.1 纵波速度与桩身水泥土强度的关系

双向粉喷桩在一定条件下可视为一维杆件, 桩顶端受到激振后, 其振动方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

式中, c 为波沿桩身传播时的速度, 其值为

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

式中 E 为桩身弹性模量 (N/m^2); ρ 为桩身质量密度 (kg/m^3)。

从式 (8) 可知, 桩身纵波速度与桩身的弹性模量 E 和质量密度 ρ 有关。在质量密度大致一定的情况下, 桩的弹性模量越大, 桩身质量越好, 所测得的纵波速度 c 越大。因此从理论上讲, 应用反射波法测得的纵波速度定性甚至近似定量来评定桩身质量和水泥土的强度。

3.2 由波速评价桩身水泥土质量

图 3 是桩长、桩径、养护龄期都相同的两根试桩, 在激发、检波以及桩头处理条件较一致的前提下测得的反射波时程曲线。

图 3 (a) 的波峰 - 峰值时间间隔小、桩底反射时间短、纵波速度 $c = 2L/\Delta t$ 大, 而图 3 (b) 的波峰 - 峰值时间间隔大、桩底反射时间长、纵波速度小, 这

种波速差异、频率差异, 只能用桩的水泥土质量优劣来解释^[7]。

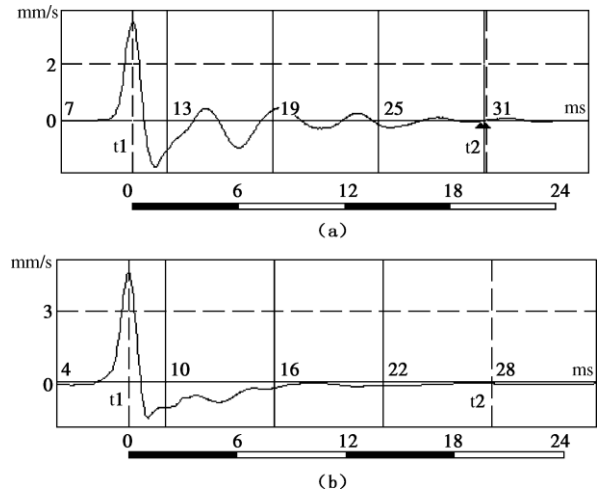


图 3 低应变反射波法检测时程曲线

Fig. 3 Time history curves of low-strain integrity tests

3.3 双向粉喷桩强度与波速的关系

由于场地的土质条件、粉喷桩施工工艺对桩身的波速影响很大, 当土质条件较为复杂时, 动测法很难反映在不同介质中桩体的波速, 只能得出一个平均波速。因此目前很难建立一个粉喷桩与平均波速之间的关系方程表达式, 这需要在以后的工作中不断试验和分析^[8-9]。图 4 为室内水泥土试块强度与纵波速度的关系图, 纵波速度是采用声波仪在试块加压前测定的, 显然两者之间具有很好的相关性, 其关系与水泥土强度与波速关系类似^[10]:

$$q_u = 0.17c^{2.38} \quad (9)$$

式中 q_u 为室内水泥土无侧限抗压强度, kPa; c 为纵波速度, m/s。

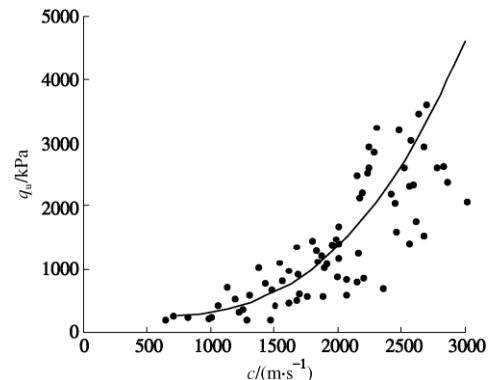


图 4 室内水泥土试块强度 q_u 与波速 c 关系

Fig. 4 Relationship between block strength q_u and velocity c in laboratory tests

图 5 为连云港至临沂高速公路 LL-8 标工程通过钻孔所取原状水泥土芯样在室内测定的水泥土强度与纵波波速关系图, 其关系式为

$$q_u=6.57c^{1.38} \tag{10}$$

式中 q_u 为现场芯样的无侧限抗压强度, kPa。

比较图 4, 5 不难看出, 室内试块的强度和波速均高于现场取芯的对应值, 说明搅拌均匀对水泥土强度和波速影响较大, 但相关关系是类似的。

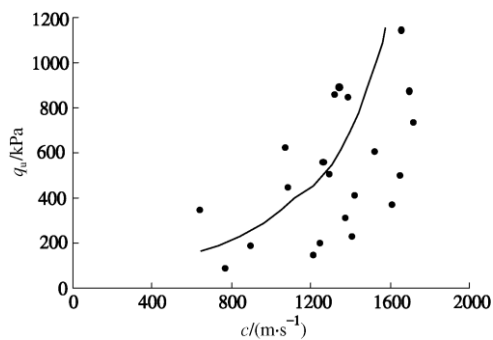


图 5 现场芯样无侧限抗压强度 q_u 与波速 c 关系图

Fig. 5 Relationship between block strength q_u and velocity c in field tests

图 6 是现场随机抽查检测 200 根双向粉喷桩的平均波速分布图, 从 6 图中可以看出, 低应变动测法检测双向粉喷桩的波速基本在 1000~2000 m/s 之间 (约占 87.5%), 平均波速为 1572.76 m/s, 基本呈现正态分布趋势。上述成果表明, 水泥土搅拌桩基本符合反射波动测法的条件, 且波速与强度之间存在良好的相关性。因此, 用反射波动测法来评价水泥土搅拌桩桩身质量是可行的。

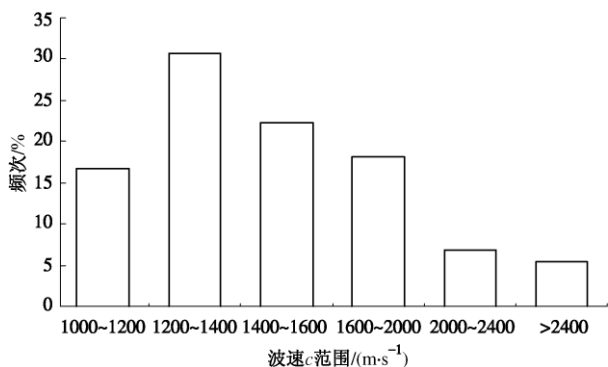


图 6 低应变反射波速法测定波速频次分布图

Fig. 6 Distribution of velocity frequency from low-strain integrity reflection tests

图 7 是随机检测过程中, 所得桩身完整的双向粉喷桩的低应变动测法所得到的典型波形图。从图中可以看出, 该双向粉喷桩的施工桩长 11 m, 平均波速为 2482 m/s, 对应的混凝土的强度等级为 C10~C15, 为 I 类桩, 桩身完整, 表明水泥土胶结密实、搅拌均匀。

4 低应变反射法检测目前存在问题

应力波反射法桩基检测技术, 具有检测速度快、反

应直观、适应性强等特点, 所以在目前的低应变桩基检测中得到广泛应用。但该技术同其他检测技术一样还存在大量的问题还有待进一步进行探索^[11-12]。

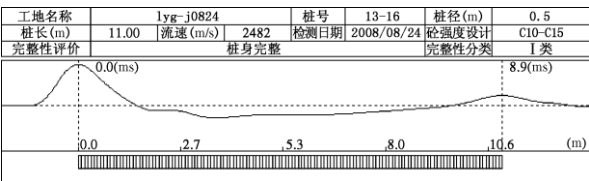


图 7 双向粉喷桩桩身完整的典型波形图

Fig. 7 Typical waveform of bidirectional DJM pile

- 4.1 尚无法对缺陷准确定位
- 由于所得的桩顶反射波幅度受各种因素影响, 缩径、裂隙、离析的表现形式完全相同, 造成缺陷的具体性质无法正确判定, 进一步确定缺陷的性质需要检测经验及其它补充资料, 如钻孔取芯样检测或施工记录、场地勘察报告。
- 4.2 桩长和缺陷位置的计算误差
- 由于水泥土波速的确定受人为因素的影响较大, 及反射波初至时间的判读不准等因素, 而影响桩长及缺陷位置的计算精度。
- 4.3 参数的误差
- 在低应变动测方法中, 除了现场试验确定的参数外, 还有一些需靠经验或已有动力与静力对比试验资料确定的参数, 这些参数本身与实际均有一定出入。
- 4.4 桩的三维效应的影响
- 对于浅部缺陷, 不同接收点的差别比较大, 给分析工作带来一定问题。特别对于桩头浮灰情况下, 它的缺陷界面特征反射信号和入射波叠加到一起, 这给缺陷性质的判定带来极大的困难。

5 结 论

- (1) 用低应变动测法进行质量检测可定性地检测双向搅拌粉喷桩的质量, 同时结合现场的钻孔取芯描述及进行标准贯入试验, 缺陷判读位置与之基本吻合。
- (2) 利用低应变动测双向搅拌粉喷桩的正常波速范围在 1000~2000 m/s 之间, 远小于混凝土桩的波速。
- (3) 曲线形态平顺, 并位于基线以上, 无明显同向反射波谷, 成桩质量好, 属于 I 类桩。
- (4) 波形的同相反射时差反映桩中缺陷 (一般为夹泥层) 的位置, 波形的宽度和深度一般反映缺陷的严重程度, 根据缺陷相对于施工桩长的位置大致判断桩的好坏程度类别。当有严重缺陷存在时, 第二缺陷位置及桩底深度往往判断不准。
- (5) 测试方法应清除桩头浮土至硬质桩面, 传感器安装牢靠正确、采用木锤等工具激振、采集真实波

形是判读波形质量的基础, 否则无法对双向粉喷桩的质量状况下准确结论。

参考文献:

- [1] 刘松玉, 钱国超, 章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (LIU song-yu, QIAN Guo-chao, ZHANG Ding-wen. The principle and application of dry jet mixing composite foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 刘松玉, 杜广卯, 杨泳, 等. 双向搅拌粉喷桩成桩操作方法[P] 2008.7. (LIU Song-yu, DU Guang-yin, YANG Yong, et al. The methods of operation of bidirectional DJM column[P] 2008. 7. (in Chinese))
- [3] 刘松玉, 杨泳, 孙竹萍, 等. 一种双向搅拌粉喷桩机[P]. 2008-12-31. (LIU Song-yu, YANG Yong, SUN Zhu-pign, et al. The bit of bidirectional DJM machinery [P]. :CN200820032126.7, 2008-12-31. (in Chinese))
- [4] 谢胜华, 刘松玉, 杜广印, 等. 双向搅拌粉喷桩技术开发与应用研究[J]. 工程勘察, 2011, 录用待刊. (XIE Sheng-hua, LIU Song-yu, DU Guang-yin, et al. Technology research on bidirectional dry jet mixing columns and its engineering application[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, submitted. (in Chinese))
- [5] TB 10113—96 粉体喷搅法加固软弱土层技术规范[S]. 北京: 铁道部标准科情所出版, 1996. (China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. TB 10113—96 Technical code on dry jet mixing method to stabilize soft foundation[S]. (in Chinese))
- [6] 刘屠梅, 赵竹占, 吴慧明. 基桩检测技术与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (LIU Tou-mei, ZHAO Zhu-zhan, WU Hui-ming. The foundation pile testing technology and examples[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006. (in Chinese))
- [7] JGJ/T 93—1995 基桩低应变动力检测规程[S]. 1995. (JGJ/T 93—1995 The foundation pile low strain dynamic testing procedures[S]. 1995. (in Chinese))
- [8] 雷林源. 桩基动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. (LEI Lin-yuan. Pile foundation dynamics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000. (in Chinese))
- [9] 徐攸在. 桩的动测新技术 [M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (XU You-zai. The new technology of pile dynamic testing[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [10] JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (JGJ 106—2003 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))
- [11] HIRD C C, CHAN C M. Correlation of shear velocity with unconfined compressive strength of cement-stabilised clay[J]. Deep Mixing, 2005(5): 79 – 85.
- [12] 史佩栋. 实用桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SHI Pei-dong. Practical handbook for pile foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)