

航道整治工程水泥搅拌桩快速检测方法

李鹏飞^{1,2}, 吉同元^{1,2}, 曾彪³, 高鹏^{1,2}

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省水运技术研究中心, 江苏 南京 210014;
3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 航道整治工程中水泥搅拌桩受汛期影响检测工期较短, 当前常用的静载试验法和钻孔取芯法无法达到快速检测的目的。以长江下游某航道整治工程为依托, 开展现场标准贯入试验和室内无侧限抗压强度试验, 并建立基于不同土性条件下的标贯击数和桩身强度的计算公式, 以及基于水泥土的龄期增长规律的不同龄期标贯击数的关系式。结果表明, 水泥搅拌桩的标贯击数和无侧限抗压强度具有较好的线性关系, 其线性参数与土性密切相关, 可通过原位标准贯入试验获得桩身强度, 提高检测效率; 7 d 与 28 d 标贯击数成线性关系 $N_{28} = 1.12N_7 + 13$, 7 d 与 90 d 标贯击数成二次函数关系 $N_{90} = -0.16N_7^2 + 7.9N_7 - 30$, 关系式可在早期预测水泥搅拌桩的施工质量, 加快进度。

关键词: 航道整治工程; 水泥搅拌桩; 标贯试验; 无侧限抗压强度

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0050-04

Rapid test method of cement mixing pile in waterway regulation engineering

LI Peng-fei^{1,2}, JI Tong-yuan^{1,2}, ZENG Biao³, GAO Peng^{1,2}

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

2. Aquatic Transportation Center of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China;

3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In waterway regulation engineering, the cement mixing pile is affected by the flood season and the inspection period is relatively short. The currently commonly used static load test method and borehole core method cannot achieve the purpose of rapid inspection. Relying on a waterway regulation engineering in the lower reaches of the Yangtze River, we carry out the field standard penetration test and the indoor unconfined compressive strength test, establish a calculation formula based on the numbers of standard penetration and pile strength under different soil condition, and establish the relationship formula between different standard penetration numbers based on the growth law of cement soil age. The test results show that the standard penetration number of cement mixing pile and the unconfined compressive strength has a good linear relationship, and its linear parameters are closely related to the soil properties. The strength of the pile can be obtained through in-situ standard penetration tests to improve detection efficiency. The relationship between 7 d and 28 d standard penetration numbers is linear as $N_{28} = 1.12N_7 + 13$. The relationship between 7 d and 90 d standard penetration numbers is the quadratic function as $N_{90} = -0.16N_7^2 + 7.9N_7 - 30$. These formulas can predict the construction quality of cement mixing piles in the early-stage and accelerate the progress.

Keywords: waterway regulation engineering; cement mixing pile; standard penetration test; unconfined compressive strength

收稿日期: 2020-08-13

作者简介: 李鹏飞(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程的检测评估。

长江中下游沿河岸区广泛分布着软土层, 在航道整治中一般需要先进行地基加固再修筑护岸。水泥搅拌桩是用于加固软土地基的一种经济且有效的方法, 在航道整治工程中应用十分广泛。该方法将水泥作为固化剂, 通过搅拌机械, 将地基土体和水泥拌和, 使地基土固结成具有一定水稳定性和一定强度的桩体^[1-2]。

水泥搅拌桩属于隐蔽工程且施工质量控制难度较大, 因此对其工后质量检验尤为重要。当前水泥搅拌桩的质量检测方法仍以静载试验和钻孔取芯结合室内无侧限抗压强度试验为主, 这类方法往往操作复杂, 耗时较长^[3-5]。在航道整治工程中, 由于汛期的影响, 对工期要求较高, 因此上述方法在使用时存在一定的局限性。探讨快速有效的水泥搅拌桩检测方法对于航道整治工程具有重要意义。

标准贯入试验是动力触探试验的一种, 可以通过标准贯入击数反映桩身强度, 通过芯样研究水泥土搅拌均匀程度及桩长, 因而可以较准确且全面地评价桩身质量^[6]。相对于静载试验, 标准贯入试验更方便、快速, 且强度与承载力之间本身具有一定关系; 相对于取芯后室内强度试验, 由于标准贯入试验为原位测试, 试验数据更具有代表性。国内外已经有一些学者注意到标准贯入试验的优势, 并开展了相关试验的研究。封其坚^[7]建议采用标准贯入试验对珠江三角洲地区水泥搅拌桩进行质量检测。陈甦等^[8]对苏嘉杭高速

公路苏州南段 192 根水泥粉喷桩桩芯强度与标贯击数的关系进行统计分析, 得出标贯击数与抗压强度的线性回归方程。刘松玉等^[9]根据连徐高速公路、汾灌高速公路等大量现场粉喷桩检测结果, 统计得出标准贯入击数与无侧限抗压强度的相关关系。石名磊等^[10]结合具体的工程实例, 提出搅拌桩检测方法中标贯试验的简便判定标准: 28 d 龄期检测时标贯击数 $N > 18$ 击为合格; 10 d 龄期检测时 $N > 12$ 击为合格。Puppala 等^[11]指出, 采用标准贯入试验评价搅拌桩的桩身质量时, 很难建立对所有土性都合适的桩身无侧限抗压强度与标准贯入击数关系, 但是可以建立区域性经验公式。

本文以长江下游某航道整治工程为依托开展现场标准贯入试验和室内无侧限抗压强度试验。对比分析水泥搅拌桩标贯击数与无侧限抗压强度试验的芯样强度之间的关系, 建立基于不同土性的标贯击数与桩身强度计算公式; 研究不同龄期标贯击数之间的关系, 可用于在低龄期时对水泥搅拌桩进行检测以预估高龄期强度, 加快检测进度, 对航道整治工程中水泥搅拌桩的质量检测具有重要意义。

1 工程概况

长江下游某航道整治工程, 沿线地貌单元为长江下游冲积平原工程地质区, 浅层松散状态的粉土、粉砂和深层软土较为发育, 场地土层基本物理力学性质指标见表 1。

表 1 主要土层物理力学指标

土层 层号	土层名称	天然含 水率/%	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	天然 孔隙比	塑性 指数	液性 指数	标贯击数/击		锥尖阻力/ MPa	承载力容许 值/kPa
							实测	修正后		
① ₁	粉质黏土	25.9	1.94	0.767	12.7	0.30	5.8	5.7	1.65	120
① ₂	淤泥质粉质黏土	37.5	1.83	1.050	14.6	1.12	3.1	2.7	0.67	80
① _{2a}	粉质黏土	30.6	1.91	0.864	12.4	0.75	4.4	3.9	1.22	110
① _{2c}	粉土	28.5	1.91	0.819	8.4	0.52	7.8	6.9	3.04	110
② ₁	粉质黏土	24.9	2.01	0.699	16.6	0.22	14.5	11.2	1.99	200
② _{1a}	粉质黏土	29.9	1.93	0.834	12.0	0.74	6.4	5.0	1.16	110
② _{1c}	粉土	26.0	1.96	0.741	8.2	0.68	13.7	9.2	4.33	130

水泥搅拌桩施工方案为: 水泥粉体采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 水泥掺入质量比例为 20%, 须根据现场试桩确定, 置换率 18%~20%。水泥搅

拌桩成桩 28 d 后开始检测工作, 检测标准为 90 d 龄期的桩身强度应不小于 1.2 MPa, 7 和 28 d 龄期的桩身强度分别不小于设计值的 30% 和 70%。

2 试验方案

2.1 确定检测桩

在水泥搅拌桩成桩后，根据现场实际情况，分别对 5 个龄期(7、14、28、60、90 d)，每个龄期选取 6 根水泥搅拌桩，共 30 根桩进行钻孔取芯试验和标准贯入试验。试验段水泥搅拌桩桩长 8 m，在桩身方向每隔 1.5 m 进行一次标贯试验，每次标贯试验前先进行钻孔取芯，芯样加工后进行无侧限抗压强度试验，每根桩采集 5 组标贯数据和 5 组无侧限抗压强度数据。

2.2 钻孔取芯

检测桩达到要求龄期后，采用钻头直径为 108 mm 的钻机进行钻孔取芯，取芯位置偏离桩心 100 mm 左右。钻孔时用芯样管回转钻进方法，严格控制回次进尺。当孔底有残留芯样或浮泥时，及时进行清孔，保证标贯试验顺利进行。

芯样取出后，每根桩选取 3 个代表性芯样(上、中、下)进行无侧限抗压强度试验。若芯样不成型则认定该桩为不合格桩，不纳入本次数据分析中。

2.3 标准贯入试验

钻孔至试验高程以上 15 cm 时，清除孔底残土，开始标准贯入试验。具体试验方法参照 JTS 237—2017《水运工程地基基础试验检测技术规程》执行。

2.4 无侧限抗压强度试验

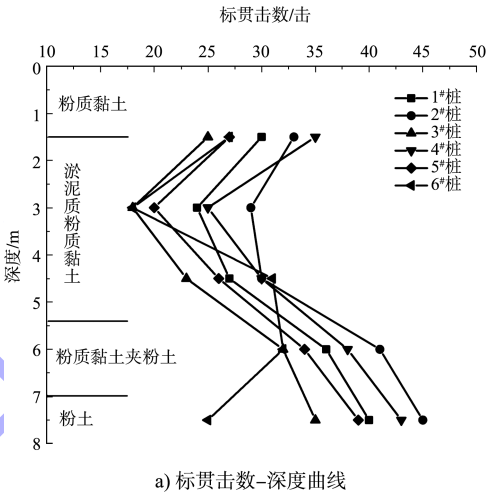
将芯样制作成高径比为 2:1 的标准试件，并准确测量高度、直径(精确到 1 mm)。用压力试验机以 0.2~0.5 MPa/s 的速率加载，直至试件破坏，记录破坏荷载(精确到 0.1 N)，并计算试件无侧限抗压强度。

3 试验结果与分析

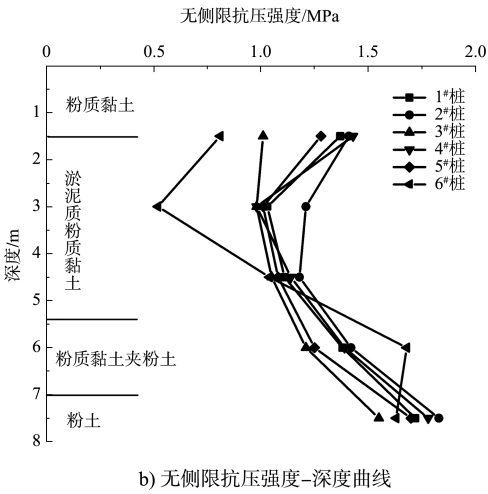
对试验结果进行统计分析，绘制不同龄期的标贯击数-深度、无侧限抗压强度-深度曲线。本文仅以 28 d 的结果曲线为例进行分析(7、14、60、90 d 龄期的曲线整体趋势与 28 d 基本一致)。

28 d 龄期的标贯击数-深度、无侧限抗压强度-

深度曲线见图 1。可以看出，在同龄期、相同的施工工艺下，水泥搅拌桩的标贯击数和强度都随深度先减小后增大，这种趋势与该深度的土性密切相关，具体表现为：粉土>粉质黏土夹粉土>粉质黏土>淤泥质粉质黏土。主要是因为淤泥质粉质黏土含水率相对较高，孔隙比较大，过高的含水率对水泥的水化反应无益，而孔隙比越大则需要更多的水泥水化产物去密实，因此淤泥质土的强度相对而言最低。



a) 标贯击数-深度曲线



b) 无侧限抗压强度-深度曲线

图 1 28 d 龄期试验结果

粉质黏土与粉土虽然含水率接近，孔隙比相似，但粉质黏土属黏性土，为絮状结构、裂隙状构造，具有松散多孔，高压缩性等特点^[12]；而粉土是介于砂性土和黏性土之间的一类无黏性土。相对于粉质黏土而言，粉土砂粒含量更多，黏粒含量更少，水泥在土中发生水解反应的过程中，

土颗粒本身充当骨架作用,而水泥的胶结性水化产物则填充于土颗粒之间,相对于黏粒而言,砂粒的骨架作用更强,所以粉土添加水泥作用后强度更大^[13-14]。

粉质黏土夹粉土介于粉土与粉质黏土之间,强度也表现出相似规律。另外,6# 桩粉土层出现异常现象可能由于施工过程中水泥土搅拌不均匀、强度偏低所致。

根据试验结果,对不同土性下的所有标贯击数与无侧限抗压强度的关系绘制散点,见图 2。可以看出,标贯击数与桩芯无侧限抗压强度基本呈线性关系,标贯击数越大,无侧限抗压强度越高。对试验数据进行拟合,标贯击数与无侧限抗压强度关系的线性系数范围在 0.023~0.075,不同土性条件下的线性系数略有差异。对不同土性条件下的标贯击数与无侧限抗压强度进行线性拟合发现,粉土的线性系数最大,约为 0.06;粉质黏土夹粉土的线性系数最小,约为 0.03;淤泥质粉质黏土与粉质黏土的线性系数比较接近,约为 0.04。

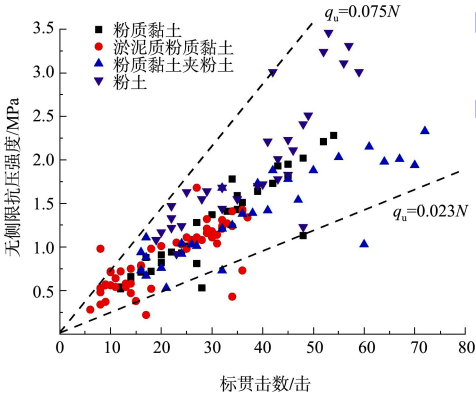


图 2 标贯击数-无侧限抗压强度拟合曲线

因此可以得到不同土性条件下标贯击数与桩芯无侧限抗压强度的简易计算模型:

$$q_u = aN \tag{1}$$

注: q_u 为桩芯无侧限抗压强度; N 为标贯击数; a 为线性系数,范围为 0.023~0.075,取值与土性相关,粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土夹粉土、粉土分别取 0.04、0.04、0.03、0.06。

上述计算将不同龄期的标贯击数与无侧限抗压强度进行统计,得到相关计算模型,并未考虑

龄期对其的影响。为了研究不同龄期下标贯击数的相关关系,从而应用低龄期标贯击数预测高龄期标贯击数,分别对 7 与 28 d、7 与 90 d 的标贯击数关系进行研究。将不同土性条件下的 7、28、90 d 标贯击数取平均值(剔除异常值后)绘制 7 d 标贯击数分别与 28、90 d 标贯击数的关系曲线,见图 3。

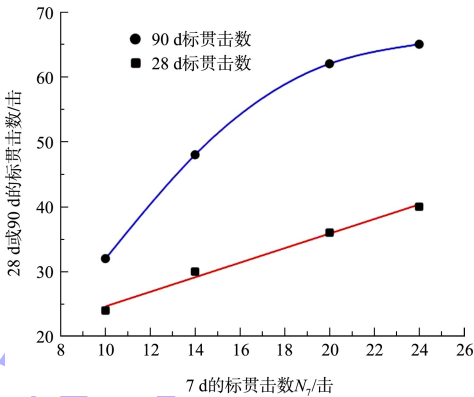


图 3 不同龄期的标贯击数关系曲线

将不同龄期内曲线关系进行拟合得到关系式如下:

$$N_{28} = 1.12N_7 + 13 \tag{2}$$

$$N_{90} = -0.16N_7^2 + 7.9N_7 - 30 \tag{3}$$

式中: N_7 、 N_{28} 、 N_{90} 分别为 7、28、90 d 的标贯击数。

从式(2)、(3)可以看出,不同龄期的标贯击数相关关系并不一样,7 与 28 d 标贯击数关系曲线基本呈线性关系,而 7 与 90 d 标贯击数呈二次函数关系。这说明早期(28 d 以内),虽然不同土性条件下水泥在土中的水解反应速率不一,但基本均呈线性增加;而往后发展,在前期强度(标贯击数)较大的土体中水解反应增长速率降低,从而在标贯击数曲线中呈现出二次函数关系,且标贯击数越大,对应的增长速率越小。

4 结语

1)在同龄期、相同的施工工艺下,水泥搅拌桩的标贯击数(强度)与土层性质密切相关,本工程中具体表现为:粉土>粉质黏土夹粉土>粉质黏土>淤泥质粉质黏土。