

新型环保均质塑性 (EHP) 桩的 桩身完整性研究

李兴兵¹, 刘大军², 翁佳兴¹, 徐建国¹, 强成仓¹, 邱成春^{3*}

(1. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225000; 2. 中水淮河规划设计研究有限公司, 安徽 合肥 230000;
3. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224000)

摘要: 水泥土搅拌桩在软土地基加固工程中应用广泛, 但成桩过程中易受原位土体性质及地基成层性的影响, 经常出现桩身完整性较差、强度不均匀的问题。在传统水泥土搅拌桩的基础上, 提出了一种加固软土地基的新型环保均质塑性桩——EHP 桩。采用提钻出土技术, 利用水泥作为固化剂及土体在原地基外强制搅拌, 然后回填至钻孔内的施工方式, 具有施工效率高, 桩身完整性好, 污染小等优点。通过低应变反射法分析成桩后的 EHP 桩桩身完整性与桩身缺陷, 并与传统水泥土搅拌桩的桩身结构进行对比, 验证了 EHP 桩处理软土地基的施工适用性和优越性。结果表明: EHP 桩的桩身完整性等级基本接近 I 级, 桩身强度和完整性均优于传统水泥土搅拌桩。

关键词: 软土地基加固; EHP 桩; 低应变反射波法; 完整性检验

中图分类号: TV553 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2020)04-0039-06

Study on the integrity of new environment homogeneous plastic (EHP) piles

LI Xingbing¹, LIU Dajun², WENG Jiaying¹, XU Jianguo¹, QIANG Chengcang¹, QIU Chengchun^{3*}

(1. Jiangsu Hongji Water Source Technology Co., Ltd., Yangzhou 225002, Jiangsu;
2. China Water Huaihe Planning, Design and Research Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui;
3. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu)

Abstract: The cement-soil mixing pile is widely used in the soft soil foundation reinforcement engineering, but it is easy to be affected by the in-situ soil properties and the stratification of the foundation during the pile forming process, which often leads to the problems of poor integrity and uneven strength of the pile body. Based on the traditional cement soil mixing pile, a new environment homogeneous plastic pile (EHP pile) was proposed to strengthen the soft soil foundation. It adopted the technology of drilling and excavation, using cement series curing agent and soil to force mixing outside the in-situ foundation, and then backfilling to the borehole, with the advantages of high construction efficiency, good integrity of pile body, small pollution and so on. Through the low strain reflection method, the integrity and defects of EHP pile after pile forming were analyzed, and compared with the pile structure of traditional cement soil mixing pile, the applicability and superiority of EHP pile in soft soil foundation treatment were verified. The results showed that the integrity grade of EHP pile was close to grade I, and the strength

收稿日期: 2019-11-27

基金项目: 淮河水利委员会治淮工程项目 (HGBF-QT-41); 江苏省水利科技项目 (2015068); 江苏省自然科学基金项目 (BK20170477); 国家自然科学基金项目 (51808481, 51978597)

作者简介: 李兴兵 (1971—), 男, 高级工程师, 主要从事地基处理研究工作。

通信作者: 邱成春 (1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土工加筋技术和地基处理研究工作。

and integrity of EHP pile were better than that of traditional cement soil mixing piles.

Key words: soft soil foundation reinforcement; EHP pile; low strain reflection wave method; integrity test

工程建设过程中常遇到软土地基,软土天然含水量高,渗透性差,易沉降,承载力低^[1-2]。为保证施工安全,提高施工质量,需要对地基进行加固处理,改良软土地基的工程特性。目前常用的方法是改善土壤三相体的结构比例关系(如换填法、强夯法和排水固结法)和采取固化措施(如搅拌桩、灌注桩法),其中应用较为广泛的是水泥土搅拌桩技术。

水泥土搅拌桩利用水泥作为固化剂,通过搅拌桩机将水泥喷入土体并充分原位搅拌,使水泥与土发生一系列物理化学反应,土体硬结而形成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥土桩^[3]。然而,水泥土搅拌桩对被加固地基的土体性质有很大要求,不宜在地基土中存在硬质夹层的地区使用。在处理复杂的多层土地基时,不同土性的土体与水泥的物理化学反应效果存在差异,同一根桩体在不同土层中采用相同的水泥掺入比,会造成桩体强度不均匀甚至出现强度分段现象,并且深层地基加固时,水泥搅拌桩法施工历时比较长,施工效率较低,很大程度上牵制了施工进度。

针对水泥土搅拌桩易受地基土性质干扰的问题,本文提出一种新型环保均质塑性桩——EHP 桩(Environment Homogeneous Plastic Pile),在传统水泥土搅拌桩技术的基础上,发展创新,改变了传统水泥搅拌法在地基土中原位搅拌的方法,利用特制机械设备一边提钻出土,一边浇筑充填,有效地解决了水泥土搅拌桩均匀性差的问题,形成了一种特有的搅拌桩施工工艺。本文依托淮河干流蚌埠~浮山段行洪区调整和建设工程施工 XXIX 标——五河大桥接长工程(简称五河大桥接长工程),通过低应变反射法对 EHP 桩的桩身结构进行分析,以验证 EHP 桩加固软土地基时的桩身完整性和均匀性。

1 EHP 桩施工工艺

1.1 工程概况

本次 EHP 桩工法桩依托淮河干流蚌埠—浮山段行洪区调整和建设工程施工 XXIX 标——五河大桥接长工程开展试验研究,五河大桥接长工程桥坡段采用水泥搅拌桩复合地基处理方案,湿法施工,设计桩长 14.5 m,桩径为 600 mm,正三角形布设。按平行于桥台走向将桥坡段划分为 A、B、C、D 4 个区,其中 D 区为台前处理区,A、B、C 区为台后处理

区,A 区桩间距 1.0 m,B、D 区桩间距 1.1 m,C 区桩间距 1.3 m。搅拌桩布置如图 1 所示。桥坡段处理区桩号范围:K0+457~K0+519,处理总长度 62 m,其中 A 区长度 24 m,B 区长度 16 m,C 区长度 14 m,D 区长度 8 m。桩数 1 672 根,共计 24 244 m。本次现场试验位置选择在五河大桥接长工程桥坡段 C 区外围。

1.2 工程地质

工程沿线地势较平坦,高程在 17.0~20.0 m,地势坡降约 1‰~2‰。岩土工程勘察资料显示工程范围内地层中广泛分布承载力偏低的淤泥质重、中粉质壤土。具体为一般地基层素填土,以轻粉质壤土、砂壤土为主,灰黄色,局部为重、中粉质壤土,软可塑,结构松散,其下分布淤泥质重、中粉质壤土局部夹砂壤土,灰色,软塑状为主,属高压缩性土。

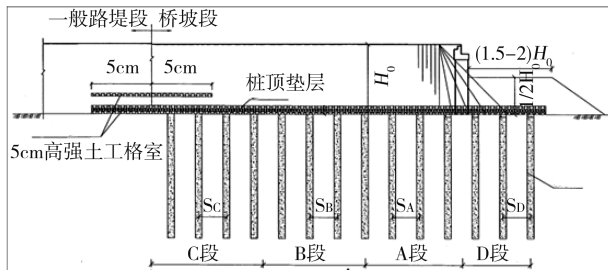


图 1 水泥搅拌桩布置剖面图

1.3 EHP 桩施工流程

(1) 施工前准备

施工前对施工场地进行平整,达到施工机械进场施工的要求。随后将长螺旋钻机、强制搅拌机等机械安置到位。

(2) 水泥土搅拌

机械安装到位后,按要求搅拌水泥土,搅拌的关键是控制含水率,以快速获得符合流动度要求的水泥土,且搅拌均匀。由于施工过程中,水泥土会被快速泵送入长螺旋钻形成的孔中,搅拌中加土、水、水泥的速率及搅拌速率是影响 EHP 桩施工的重要因素。为了能够快速配置符合标准的水泥土,采用挖掘机加土,抽水泵进行加水。采用质量控制法控制搅拌后的含水率,即事先量测挖土机挖斗 1 次能够挖取的粉土重量,根据该重量计算所需的水量及水泥重量。施工过程中,根据每次挖斗投放粉土的重量,放入事先计算好重量的水及水泥。每次投

料后,搅拌机搅拌 10 min 以上,确保土料均匀。

(3) 泥浆坍落度现场测试

当泥浆搅拌基本均匀后,迅速从搅拌桶中取少量水泥土进行坍落度或流动度检测,如果流动性偏离目标流动度超过 10% 时,需要进行流动性调整。流动性较高时,需要再放入适当的土料,当流动性较小时,放入适当质量的水,使流动性接近于目标流动性。需要指出,实践表明,现场水泥土的流动性调节相对比较困难,常常会出现流动度偏大或偏小的情况。

(4) 钻进取土

在搅拌水泥土的同时,长螺旋钻机开始钻进取土,钻进过程中,控制钻进速率。

(5) 提钻注浆

当长螺旋钻机钻头达到指定土层深度后,同时,水泥土的流动性调整到位时,开始泵送注浆,在注浆过程中,向上提升长螺旋钻头。在提升长螺旋钻头的过程中,应控制钻头的提升速率,确保钻头的提升速率小于注浆速率。如出现堵管等现象,应立即停止钻头的提升,待堵管问题处理后,再重新提升钻头。

(6) 清理机械

当长螺旋钻头提升至地表时,一根 EHP 桩施工完毕,准备进行下一根桩的施工。在此过程中,如果距离下一根桩的施工时间较长,要清洗搅拌机和水泥土泵。

2 EHP 桩桩身完整性检测

2.1 低应变反射波法检测原理

桩基动力检测是指在桩顶施加一个动态力,可以是瞬态冲击力或稳态激振力。桩-土系统在动态力的作用下产生动态响应,采用不同功能的传感器在桩顶测量动态响应信号(如位移、速度、加速度),通过对信号的时域分析、频域分析或传递函数分析,判断桩身结构完整性^[4]。

本次测试采用低应变法,低应变法作用在桩顶上的动荷载远小于桩的使用荷载,能量小,只能使桩土产生弹性变形,适于检测混凝土桩的桩身完整性,判断桩身缺陷的位置和程度,该方法检测速度快,效率高。

2.2 测试方案

低应变测试所用的仪器为 RS-1616K(S) 型基桩低应变测试仪。本次共测试 6 根桩,包括 5 根 EHP 桩和 1 根 MIP 桩(传统水泥土搅拌桩)。EHP

桩中,8% 水泥掺量的 2 根,10% 水泥掺量的 1 根,13% 水泥掺量的 2 根。在开展低应变测试前,事先将预测试的桩的桩头进行处理,凿去 EHP 桩的桩顶浮浆和松散破碎部分,确保桩头完整、平整、没有积水。

测试过程中,传感器与检测桩桩顶垂直,用黄油进行耦合粘接,要求粘贴密实,有足够的粘结强度。激振点位置在桩的中心处,传感器安装位置在距离桩顶面中心的 2/3 半径(距离桩心 200 mm 处),如图 2 所示。采集桩身的波形信号时,通过增益和击振频率使桩身的反射特征清晰、重复性好。对存在缺陷的桩基选用多种击振频率进行重复检测,进一步明确桩身缺陷。测试工作遵循《建筑基桩检测技术规范》JGJ106—2014^[5] 的规定开展。

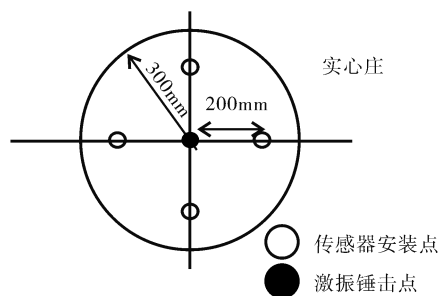
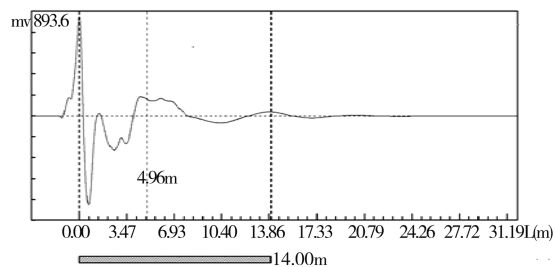


图2 激振点位与传感器点位

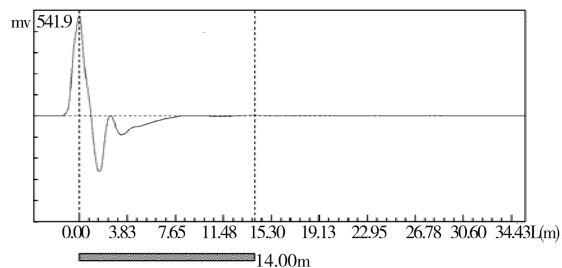
2.3 测试结果分析

图 3 ~ 5 分别为 8%、10% 及 13% 水泥掺量的 EHP 桩低应变完整性测试获得的反射波时程图。图 6 为 13% 水泥掺量的 MIP 桩低应变完整性测试获得的反射波时程图。

由图可知,在桩 8-4(8% 水泥掺量的 EHP 桩)中,实测信号曲线在 4.96 m 处幅值激增,出现较大幅度反射波,可知基桩在该位置处出现较大缩颈;这可能是由于该工程场地以淤泥质重、中粉质壤土为主,搅拌后水泥土较致密强度较高造成桩身出现一定程度缩颈。在桩 8-5 中(8% 水泥掺量的 EHP 桩),信号曲线在 3.83 m 处有小幅波动,但是应力波整体较平稳,桩身完整性好,质量可靠;在桩 10-7 中(10% 水泥掺量的 EHP 桩),波形图没有出现过大的波动,桩身没有明显缺陷^[6];在桩 13-6(13% 水泥掺量的 EHP 桩)中,实测信号曲线在 3.52 m 处有小幅度的反射波,判断桩身在 3.52 m 处存在轻微的缩颈;在桩 13-7 中(13% 水泥掺量的 EHP 桩),波形图在桩身 2 m 位置处出现一个明显的峰值,判断此位置存在扩径现象;在桩 PJ 中(13% 水泥掺量的 MIP 桩),桩身 1.44 m 处,波形图

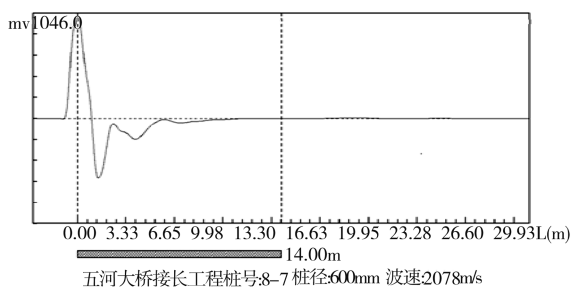


(a) 五河大桥接长工程桩号:8-4 桩径:600mm 波速:2166m/s



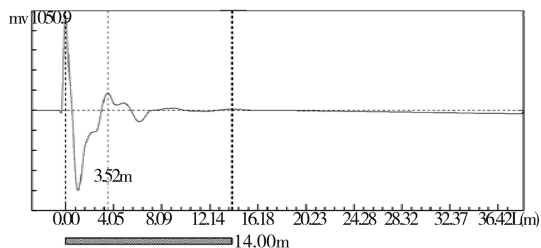
(b) 五河大桥接长工程桩号:8-5 桩径:600mm 波速:2391m/s

图 3 8% 水泥掺量 EHP 桩低应变放射波信号

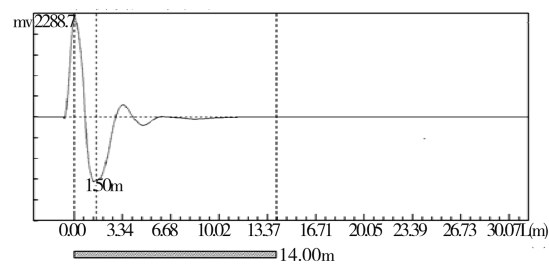


五河大桥接长工程桩号:8-7 桩径:600mm 波速:2078m/s

图 4 10% 水泥掺量 EHP 桩低应变放射波信号



(a) 五河大桥接长工程桩号:13-6 桩径:600mm 波速:2529m/s

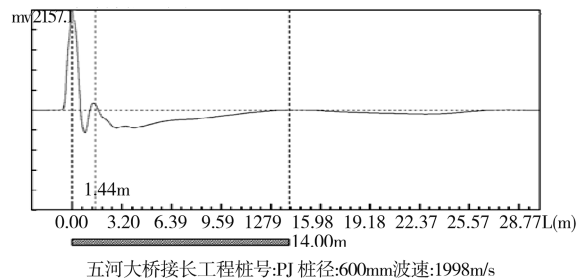


(b) 五河大桥接长工程桩号:13-7 桩径:600mm 波速:2088m/s

图 5 13% 水泥掺量 EHP 桩低应变放射波信号

有小幅度反射波,可知该处有轻微缩颈。

由低应变波形图可知,6 组检测桩在桩头附近的信号曲线波动较大,这是因为低应变检测时,桩



五河大桥接长工程桩号:PJ 桩径:600mm 波速:1998m/s

图 6 13% 水泥掺量 MIP 桩低应变放射波信号

顶部分声场复杂,应力波可为半球面波,远离桩顶后可近似为平面波。入射波在桩顶附近将产生折射,应力波将由桩身扩散到桩周土层中,也就产生应力波能量的折射损失。一般情况下可以认为,折射损失主要发生在桩头附近^[7]。

从频域信号上看,6 组测试桩都无较清晰的桩底反射信号。这可能是因为实际工程中,应力波到达桩底时,会发生透射和反射,而不像自由杆件仅在桩端发生反射。这样桩身应力波有一部分进入土中,反射部分自然就少。在频域信号上的反映是,桩底反射幅值比桩顶入射波幅值降低。当桩身阻抗和桩端土差别越小时,进入土中透射波分量越多,也就是桩底土层越好,桩底反射信号越不容易看到^[8]。另外,应力波在桩身传播过程中,桩身和桩侧土阻尼对应力波也会有衰减作用,阻尼越大,衰减越快,就越不易看到桩底反射。研究表明,应力波的衰减服从指数规律^[9]。EHP 桩在施工过程中,桩周土经过挤密,密实性和强度都有很大提高,桩周土的阻抗也会有所提高。在这种情况下,桩身中的应力波会迅速衰减,EHP 桩的桩底反射一般不明显。

混凝土实际上是一种混合材料,桩身材料本身具有一定的不均匀性,再加上施工工艺和地质条件的影响,桩身材料的模量和强度有很强的变异性。桩身材料的弹模一般很难确定,而强度的概念却很直观,使用的也较多。有相当长的一段时期,学者们认为,低应变的检测波速可以确定桩身混凝土强度,在旧规范《基桩低应变动力检测规程》(JGJ/T93—95)中,反射波法可以对桩身混凝土强度等级做出估计。然而后来的研究表明,事实并非如此。波速与桩身混凝土强度整体趋势上呈正相关关系,但并没有一一对应的关系。影响混凝土波速的因素很多,强度对波速并没有决定性的影响。从一般情况来看,对于不同桩型、强度的桩,波速确实有一个大致的范围(表 1),EHP 桩的平均波速为 2 250 m/s,远高于普通深层搅拌桩的波速。根据

《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106—2014)中规定的桩身完整性分类标准(表 2),并综合分析图 3~6 中各类型桩的低应变完整性测试时程曲线,可得到如下结论:PJ 桩(13% 水泥掺量的 MIP 桩)的完整性等级为Ⅱ类,EHP 桩的桩身等级基本接近Ⅰ类桩,低应变检测结果见表 3。由此可见,EHP 桩的施工工艺基本满足其完整性要求。

4 结 论

本文提出了一种新型 EHP 桩,阐述了 EHP 桩的施工工艺,给出了 EHP 桩相对于传统水泥土搅拌桩(MIP 桩)的技术优势,并对 EHP 桩的桩身完整性进行了分析,主要结论如下:

(1)EHP 桩在传统水泥土搅拌桩基础上,创新施工工艺,采用一边成孔一边拌合料浇筑填充的方

式成桩,有效解决了传统水泥土搅拌桩搅拌不均匀的问题,施工效率提高,环境污染小,为加固软土地基提供了新的选择。

(2)采用低应变反射波法进行基桩检测,检测数据推断 EHP 桩的桩身完整性较好,完整性等级基本接近Ⅰ类,优于传统水泥土搅拌桩的桩身结构。

(3)EHP 桩的低应变纵波波速大于传统水泥土搅拌桩,结合已有工程经验分析,EHP 桩的桩身强度较高。

参考文献:

[1] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998(1):100-111.
[2] 张向东, 刘家顺, 张虎伟. 循环荷载作用下软土动力特性试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(5):1-7, 20.

表 1 不同类型桩的波速范围

桩型	PHC 桩	钢筋混凝土灌注桩	素混凝土桩	高压旋喷桩	深层搅拌桩
波速/(m·s ⁻¹)	4 000~4 500	3 800~4 000	3 000~3 800	1 600~2 100	1 200~1 600

表 2 桩身完整性分类

桩身完整性类别	分 类 原 则
Ⅰ类桩	桩身完整
Ⅱ类桩	桩身有轻微缺陷,不会影响桩身结构承载力的正常发挥
Ⅲ类桩	桩身有明显缺陷,对桩身结构承载力有影响
Ⅳ类桩	桩身存在严重缺陷

表 3 低应变检测结果汇总

序号	桩号	桩长/m	桩径/mm	波速/(m·s ⁻¹)	桩身结构完整性描述	类别
1	8-4	14.00	Φ600	2 166	在 4.96 m 处,存在缩颈	Ⅱ类
2	8-5	14.00	Φ600	2 391	桩身完整	Ⅰ类
3	10-7	14.00	Φ600	2 078	桩身完整	Ⅰ类
4	13-6	14.00	Φ600	2 529	在 3.52 m 处,存在轻微缩颈	Ⅱ类
5	13-7	14.00	Φ600	2 088	在 2 m 处,存在扩径现象	Ⅰ类
6	PJ	14.00	Φ600	1 998	在 1.44 m 处,存在轻微缩颈	Ⅱ类

注:Ⅰ类桩为完整桩;Ⅱ类桩为基本完整桩;Ⅲ类桩为缺陷桩;Ⅳ类桩为严重缺陷桩。其中Ⅰ类桩、Ⅱ类桩可正常使用;Ⅲ类桩、Ⅳ类桩须经处理后,方可使用。

- [3] 刘武杰,刘一濛. 软土地基加固对深层水泥搅拌桩运用的探析[J]. 黑龙江交通科技, 2018, 41(12):73-74.
- [4] 李万峰. 低应变检测桩基础及缺陷桩处理效果探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008(1):115-118.
- [5] JGJ 106-2014, 建筑基桩检测技术规范[S].
- [6] Poulos HG. Pile behavior – consequences of geological and construction imperfections[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005, 131(5):538-563.
- [7] 邹清林. 低应变反射法在基桩完整性检测中的应用探讨[J]. 福建建材, 2019(2):18-19.
- [8] 易鹏,李国成,王靖涛. 土阻力引起桩中应力波衰减的模型试验研究[J]. 土工基础, 2001(3):9-13.
- [9] 蔡靖,王建华,张献民. 桩基完整性检测中桩身应力波衰减规律及其应用[J]. 水文地质工程地质, 2005(5):73-76.
- 