

目 次

序..... 龚晓南 (3)

企业简介..... (4)

淤泥原位固化技术..... 俞元洪, 余朝伟 (7)

滨海地区淤泥固化剂的研究.....张威, 陆建阳, 姜欢悦 (14)

碱渣固化材料的研究.....郑敬云, 周龙 (23)

淤泥原位固化施工工法.....陈富强, 余朝伟, 郑恩喜, 周龙, 干焕军 (26)

淤泥固化海上施工固化浆液远距离输送技术探讨.....刘朋, 余朝伟, 张威 (33)

深层固化搅拌桩质量问题分析.....郁盛志, 张威 (37)

淤泥原位固化技术在软基预处理工程中的应用.....尹镭, 陈富强, 付显阳 (41)

淤泥固化在改善软基动力特性中的应用..... 胡海龙, 王杰, 郑亮, 姜欢悦 (48)

淤泥固化技术在滩涂路基工程中的应用.....李金柱, 金礼祥, 曹俊杰, 张伟芳 (55)

淤泥原位固结技术在围堰工程基础中的应用.....周龙, 郑恩喜, 余朝伟 (61)

淤泥固化在软土路基处理中的应用.....郑恩喜, 王杰, 曹道彬, 胡海龙 (66)

序

在水利、交通、土建、市政工程中，常常遇到淤泥软基处理。淤泥自身矿物质成分复杂，具有含水率高、渗透系数小、压缩性大、抗剪强度低等特点。淤泥地基承载力很低，在荷载作用下沉降大，且极易产生较大的不均匀沉降。由于化学加固方法施工周期短、适用范围广、施工简便、加固土体形状可控制、且有较好的耐久性，在淤泥软基处理中得到广泛应用。以往常用的水泥搅拌桩和高压旋喷桩施工方法往往不能适用于超软淤泥软基的处理，而且在水泥搅拌桩和高压旋喷桩施工中常采用水泥作为固化剂，加固成本较高。为了能在超软淤泥软基中进行地基处理施工，进一步降低地基处理工程费用，近年来淤泥原位固化新技术发展较快。在这期专刊中介绍该领域的发展，特别是近年来“围海股份”在该领域的进展。

淤泥原位固化技术主要针对各类淤泥软基工程，以自主研发的系列螺旋式固化施工机械和系列固化剂为依托，可在滩涂、沼泽等淤泥软基上直接施工作业。让土壤固化剂与淤泥在原位充分拌匀发生固化反应，实现淤泥的固化处理。搅拌系统采用高压旋喷结合强制搅拌，升降采用液压匀速控制，固化搅拌混合均匀性好，原位固化体抗剪强度提高、压缩性减小。

淤泥原位固化技术根据软基淤泥特性，添加高效复合型固化材料。自主研发的系列固化剂是以工业废渣复合而成的新型环保材料，不仅在淤泥颗粒各单元相界面产生牢固结合，且能与淤泥颗粒中的活性物质发生反应，生成膨化胶凝物质，同时还可以把重金属、有机物封存，防止有害物质的溶出，具有固化速度快、强度高、稳定性好、耐久性强、无污染等特点。

淤泥原位固化技术利用工业废渣等固体废弃物作为固结材料，将软土地基进行固化处理，实现了资源的可持续发展。淤泥原位固化技术已在江苏、浙江等地多个工程中得到应用，取得了良好的社会效益、环境效益和显著的经济效益。淤泥原位固化技术已得到业界的认可和重视，近期会得到较快的发展。

龚晓南

中国工程院院士

浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心教授

2015年9月22日

浙江省围海建设集团股份有限公司

浙江省围海建设集团股份有限公司（简称：围海股份；股票代码：002586）始于 1984 年的围海集团，地处宁波国家高新区，是国内最早从事海堤建设的专业化集团公司，经过三十年的艰苦奋斗、创新发展，围海已成长为事业经营与资本运作互动发展的现代化企业集团，成功涉足海洋与水利工程建设、房地产开发、科技、文化等多个领域，具有水利水电工程施工总承包壹级、港口与航道工程施工总承包贰级、房屋建筑工程施工总承包贰级等十余项资质。

公司主营业务为海堤工程、城市防洪工程、河道工程、水库工程及其他水利工程，依靠自身技术优势，为客户提供工程勘察、设计、施工、科研、设备、管理、咨询等一体化服务，已发展成为全国水利系统在海岸堤坝、海口城防、近岸海域工程建设规模最大的专业公司之一。公司及所承建项目曾荣获“全国优秀水利企业”、“全国优秀施工企业”、“全国文明单位”、“全国五五普法先进单位”、“鲁班奖”、“詹天佑奖”、“建国六十周年百项经典工程奖”等百余项省部级以上荣誉。

中国水利企业协会对公司作过这样的评价：“围海公司不仅在海堤工程建设上取得了巨大业绩，而且在海堤工程施工设备研制，施工工艺创新，软基处理和深水施工技术等方面都作出了突出贡献。”



浙江省围海建设集团股份有限公司

地址：浙江省宁波高新区广贤路 1009 号围海大厦

网址：www.zjwh.com.cn

电话：0574-87902828

传真：0574-87901002

宁波高新区围海工程技术开发有限公司

宁波高新区围海工程技术开发有限公司成立于 2007 年，是围海股份（上市公司代码 002586）旗下的一家全资子公司，主要负责水利工程技术研发、咨询、施工，机械设备、仪器仪表研发及租赁业务等工作。公司先后被评定为宁波市科技型企业、国家级高新技术企业、宁波市创新型企业、宁波市科技服务业示范企业；同时设有院士工作站、“围海-浙大”滨海岩土研究中心、市级围海海堤防工程技术中心，拥有科研用房面积 1328 平方米，科研仪器设备 500 多万元。

公司成立以来主要以海堤防、软基处理、水处理、生态治理为主要研究方向，针对市场发展态势推出引领市场的新技术、新工艺、新设备；先后成功研发了海涂泥快速固结技术、泵送淤泥快速脱水技术、复杂爆破挤淤筑堤技术、深水爆破挤淤筑堤等核心技术；并成功研制了淤泥快速固结机、泵送淤泥快速脱水系统、深水排水板插设船、深水土工布铺设船、液压对开驳、活塞式土方输送船、爆破挤淤装药器等一系列科技创新设备，多项技术形成了具有国际领先、国内一流的核心竞争力。在稳步开展各项经营业务的同时，公司将进一步响应“发展蓝色经济 建设绿色家园”的号召，深入科学研究，践行“科技围海、绿色围海、品牌围海、智慧围海”战略，承担起生态环保的社会责任，力争为扩展人与自然和谐共存的生态空间做出更加积极的贡献。



宁波高新区围海工程技术开发有限公司

地址：浙江省宁波高新区广贤路 1009 号围海大厦 3 楼

网址：www.zjwh.com.cn

电话：0574-83887939

传真：0574-87096916

淤泥原位固化技术

俞元洪, 余朝伟

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司 浙江 宁波 315040)

摘要: 本文给出了一种淤泥软基处理的淤泥原位固化处理方法, 从施工材料、设备、工艺介绍了该技术原理及先进性, 并介绍了该技术的适应范围, 结合实际工程实例从设计到施工详细说明了该技术的实施效果。

关键词: 淤泥原位固化、淤泥软基处理、螺旋式淤泥固化机

1 引言

俗话说得好, “基础不牢, 地动山摇”, 在水利、交通、土建、市政工程往往遇到的最大难题就是淤泥软基处理, 软土地基自身矿物质成分复杂、天然含水率高、天然孔隙比大、渗透系数小、压缩性高、强度低等特点, 因此地基承载力低, 不均匀沉降大, 往往容易造成建筑物滑动、坍塌、倾斜等, 针对淤泥软基的处理国内外也有不同的处理方法, 主要有挖除换填法、复合地基法、排水固结法、化学加固法等等。近年来, 由于化学加固方法在淤泥软基处理中其施工周期短, 适用范围较广、施工简便、固结形状可控制、有较好的耐久性, 被广泛应用, 相应新技术发展较快, 常见的有水泥搅拌桩施工方法、高压旋喷桩施工方法; 淤泥原位固化技术是在此基础上研究开发的一项新技术, 实现了各种淤泥软基表面原位直接施工, 将淤泥进行原地固化, 且从施工效果及材料性能上大大降低了材料用量。

2 淤泥原位固化技术研究

淤泥原位固化技术主要针对各类淤泥软基工程, 以围海集团自主研发的螺旋式固化机为依托, 将固结材料直接在淤泥软基表面与淤泥搅拌, 使其充分发生固化反应, 实现淤泥的原位固化处理。

2.1 固化材料

利用固化材料激发淤泥活性、提高淤泥强度、降低污染物的可溶性为目标进行研发。通过分析海涂泥的特性及其主要化学成分组成, 针对海涂泥的自身化学成份的各种特性, 利用胶凝固化原理, 以工业废渣粉煤灰、矿渣作为主要材料, 同时配以一定比例的水硬性胶凝材料、碱性激发剂、膨胀剂、表面活性剂、减水剂、凝固剂和辅助剂混合而制成。

通过大量的室内实验研究分析对比,开发一种固化速度快、固结强度能满足软基处理设计要求的固化剂。该固化剂充分发挥了淤泥单元矿物成分中硅酸盐矿物质的活性,快速产生固化反应,不仅在淤泥颗粒各单元相界面产生牢固结合,而且能与淤泥颗粒中的活性物质发生反应生成膨化胶凝物质,既经过化学激活产生结合,又产生物理结合,同时还可以把重金属、有机物封存,防止有害物质的溶出,使土体自身产生高强度的同时,还具有良好的水稳性和耐久性。

表1 固化剂掺合比与不同龄期下的固化土抗剪指标(以宁海某工程泥质为例)

含水率	掺入量	7天(快剪)			14天(快剪)		
		摩擦角/°	粘聚力/kPa	承载力/t	摩擦角/°	粘聚力/kPa	承载力/t
70%	8%	20.8	60.52	37.7	21.4	77.6	51.3
80%	8%	19.5	68.1	41	23	71.8	47.4
100%	8%	36.63	20.72	23	25	50.63	36.7
120%	6%	13.0	15.0	8.0	15.0	40.0	21.8
120%	8%	18	22	14.8	18	47	27.1
120%	10%	16.6	28.8	16.34	24.2	46.6	33.2

注:承载力换算按塑性状态计算,基础受中心荷载,地基上刚开始出现剪切破坏(即开始有弹性变形进入塑性变形)时的临界压力,由下式换算而来。

$$f_{cr} = \frac{\pi(\gamma_m d + c_k \cot \varphi_k)}{\cot \varphi_k + \varphi_k - \frac{\pi}{2}} + \gamma_m d = M_d \gamma_m d + M_c c_k \quad (1)$$

式中: f_{cr} 为临塑压力,可直接作为地基承载力特征值 kPa; γ_m 为基础底面以上土的加权平均重度,地下水位以下取有效重度, kN/m^3 ; d 为基础埋置深度,对于建筑物基础,一般自室外底面起算。在填方整平地区,可从填土地面起算,但填土在上部结构施工后完成时,应以天然地面起算。对于地下室,如采用箱形基础或筏基时,基础埋置深度自室外地面起算,在其他情况下,应从室内地面起算, m ; c_k 、 φ_k 分别为基底下—倍基础宽度的深度范围内土的粘聚力(kPa)和内摩擦角(°)标准值; M_d 、 M_c 为均承载力系数,可根据 φ_k 值按规范查取。

2.2 淤泥软基固化施工设备

针对淤泥软基承载力低、粘聚力较大的特点,施工设备没有持力点,容易陷入淤泥中,并且淤泥粘聚力大,容易被吸牢而无法行走等问题,研究开发了螺旋式淤泥固化机,采用圆柱形浮筒结构加旋转叶片。浮筒提供设备的浮力使设备浮于淤泥表面,浮筒以转动的方式提供横向动力,克服淤泥软基粘聚力,且转动的浮筒带动旋转叶片旋转提供竖向推进动力,使设备克服淤泥软基粘聚力能提供向前推动的动力,为淤泥软基原位直接固化搅拌提供施工平台,实现了淤泥软基的原位直接施工。

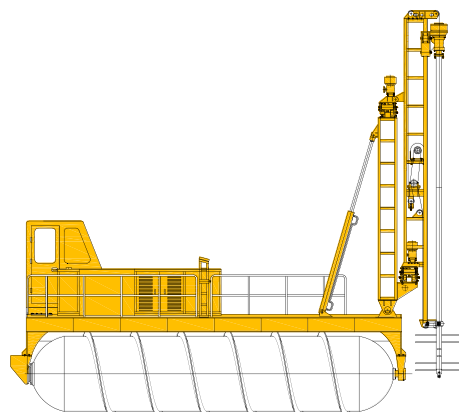


图1 淤泥固化机结构图

2.3 施工工艺

(1) 搅拌均匀度研究: 结合机械搅拌技术与高压旋喷技术, 搅拌的同时结合加压旋喷作用, 实现海涂泥与固化剂的充分均匀搅拌。根据设计的下钻、提升速度与搅拌回转速度, 研究设计采用液压分流阀, 调试淤泥施工机械设备各液压马达的技术参数, 经试验, 要实现海涂泥与固化剂的充分均匀搅拌, 海涂泥与固化剂搅拌次数应达到 24 次以上, 施工前针对不同淤泥, 应先通过现场试验, 确定最佳搅拌次数。设备的下钻、提升速度与搅拌回转速度、搅拌杆升降次数按式 (2) 确定。

如海涂泥与固化剂搅拌次数要求达到 24 次, 则下钻、提升速度与搅拌回转速度对应关系:

$$N \times \frac{n \cdot h \cdot \sum Z}{v} > 24 \quad (2)$$

式中: N 为搅拌杆升降次数 (采用四搅两喷, 取 4); n 为回转速度 (r/min); h 为叶片高度, m ; Z 为叶片数量; v 为升降速度 (m/min)。

(2) 掺和比控制研究: 利用输送系统变频器, 控制泥浆泵的电机, 实现供浆流量控制, 通过安装浆液计量仪进行浆液计量监测; 根据设计供浆流量、供浆压力、固化剂用量、水灰比以及搅拌杆升降速度, 按式 (3) 确定泥浆泵的供浆流量, 进行泥浆泵调试以设定供浆流量对应的泥浆泵电机功率。

固化剂输送流量计算公式:

$$Q = \frac{\pi r^2 \cdot \gamma \cdot n \cdot (1+m)v}{a \cdot \rho} \quad (3)$$

式中： Q 为泵输送流量（ m^3/min ）； r 为桩半径（ m ）； γ 为泥浆容重（ kg/m^3 ）； n 为固化剂添加比例； m 为水灰比； v 为升降速度（ m/min ）； a 为喷浆循环次数； ρ 为固化剂容重（ kg/m^3 ）。

（3）施工工艺流程

在该施工工艺流程中，采用了四搅二喷的工艺，针对四搅二喷，有两种做法：

做法一：第一次下钻，喷浆搅拌施工；第一次提升，喷浆搅拌施工；第二次下钻，复搅至设计深度、不喷浆；第二次提升，复搅至工作面、不喷浆。

做法二：第一次下钻，喷浆搅拌施工；第一次提升、不喷浆；第二次下钻，复搅至设计深度，喷浆搅拌施工；第二次提升，复搅至工作面、不喷浆。

经实验比较，第一种做法，固化后的强度更高。经分析，这是由于做法一更能保证两次喷浆都有两次以上的复搅，施工流程如图2所示。

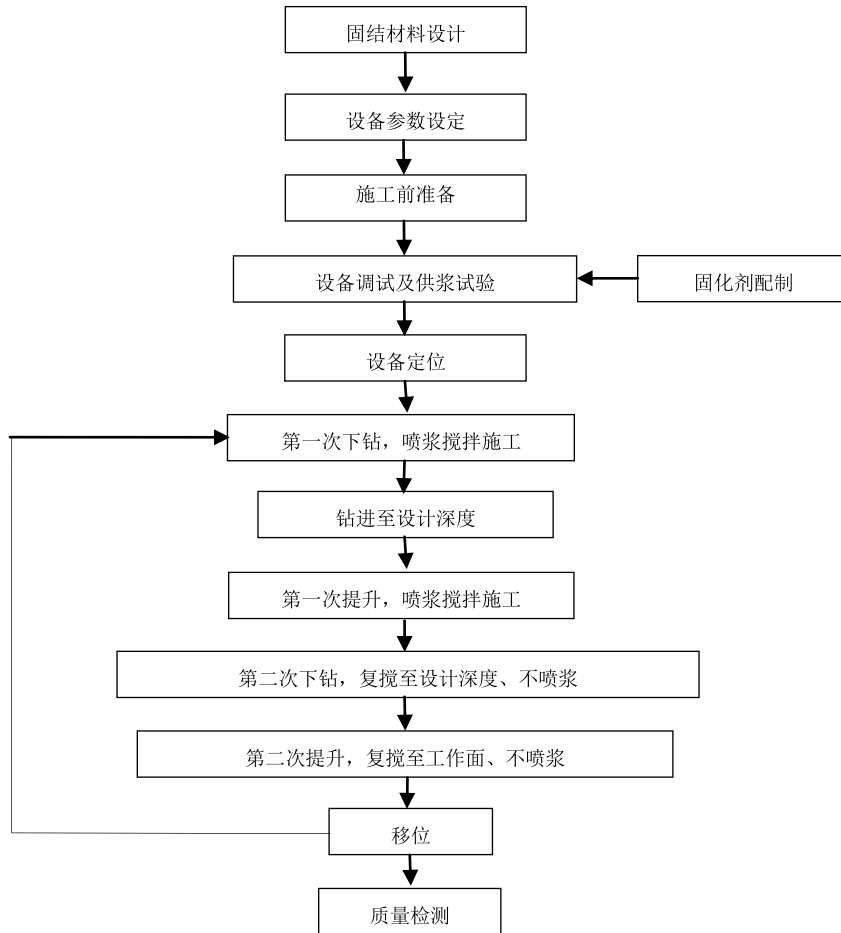


图2 施工工艺流程图

3 技术特点

3.1 稳定性好、渗透性小

高强度的胶凝固结作用,使固化后的淤(污)泥稳定性好,渗透性系数小,孔隙率小,防止淤(污)泥因渗滤液造成的二次污染,经浙江工业大学模拟稳定性试验分析研究,其固化产物稳定性可达到70年。下图为固化后自然条件下浸泡水中五年后的照片。



图3 稳定性试验

3.2 封存重金属,兼有消臭、杀菌功能

经稳定固化处理后的淤泥软基,无重金属溶出,各项指标符合环保要求。

3.3 原泥面直接处理,效率高

本技术采用的螺旋式固化机,如图4所示,在泥面上可直接行走,解决了淤(污)泥含水量高、不稳定无法直接行走的难题,经科技查新为国内外首创,经鉴定达到国际领先水平。



图4 螺旋式固化机

4 工程设计

固化后形成的固化桩按其强度和刚度是介于刚性桩（钢筋混凝土预制桩、灌注桩）和散体材料桩（沙桩、碎石桩）之间。其承载力和变形性状偏近于刚性桩，因此固化桩满堂设计时一般情况下可仅在上部结构基础范围内布桩，间隔布置时应像散体材料桩那样在基础以外再设置保护桩。

4.1 满堂基础处理

对于整个区域承载力要求一致，不均匀沉降要求一致，作为基础预处理或低承载力要求的工程，如重型打桩设备基础预处理、无需打预制桩的低承载力厂区、建筑物以及厂区道路，可以将整个区域满堂固化，形成一个整体。

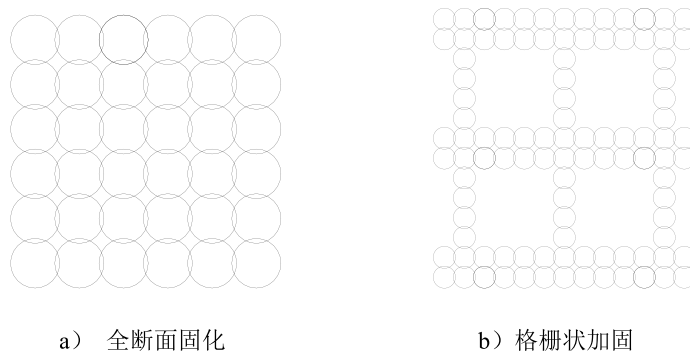


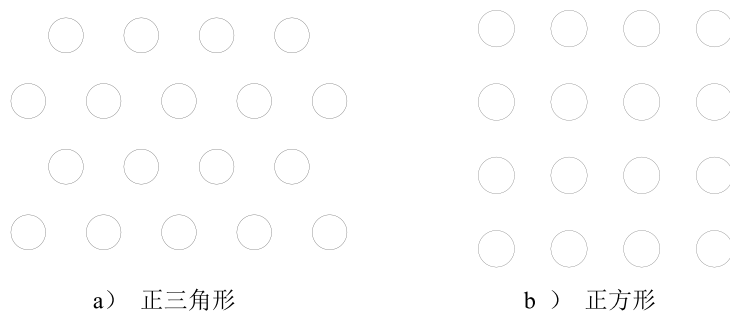
图5 满堂固化

4.2 防渗加固、边坡支护处理

将相邻两根固化桩相互搭接一部分，以联结成壁状；将纵横两个方向的壁状加固体相互搭接成方格，即为格栅状加固，作为防渗加固、支护处理，可用于基坑支护、河道边坡支护、地下建筑物开挖支护；也可应用于重力式挡墙，但为了克服固化土的抗拉强度不高的性能，可在固化土挡墙中插入竹筋或型钢。

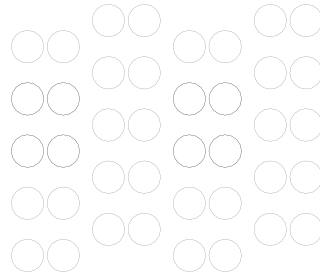
4.3 柱状间隔布置基础处理

在要求加固的区域，每隔一定距离布置一根固化桩，应用于复合地基与临时工程基础处理，如机场跑道、高速公路路基，以及水利工作中的围堰基础、堤坝基础。



a) 正三角形

b) 正方形



c) 双桩梅花形布置

图6 固化桩间隔布置示意图

4.4 基础不均匀沉降处理（长短桩结合）

当地基结构复杂，同一建筑物坐落在两类不同性质的地基土上时，可用3米左右的短桩将柱状加固的相邻长桩连成壁状或格栅状，以调整和减少不均匀沉降量。

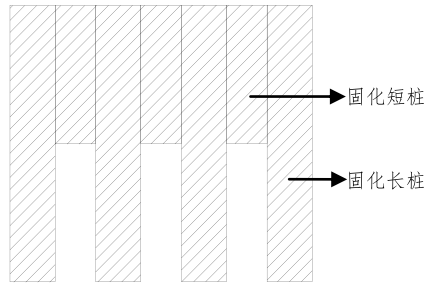


图7 长短桩结合

5 结论

该技术具有固化速度快、强度高、施工质量更易保证、稳定性好、耐久性强、无污染等优点；而施工机械则具有在滩涂、沼泽等淤泥软基表面直接行走功能。更重要的是，该技术利用工业废渣等固体废弃物作为固结材料，将淤泥固化代替了石料填筑，实现了废弃资源再生利用，既实现了资源的可持续发展，又创造了较高的经济效益。

参考文献：

- [1] 陈富强, 俞元洪, 余朝伟等. 海淤泥快速固结技术研究与应用[J]. 中国水利, 2011, 8: 43-44.
- [2] 谢新宇, 马伯宁, 刘开富等. 软粘土流变微结构突变模型与试验研究[J]. 工程力学, 2012, 8: 202-207.
- [3] 谢新宇, 李金柱, 王文军等. 宁波软土流变试验及经验模型[J]. 浙江大学学报, 2012, 46(1): 67-71.

滨海地区淤泥固化剂的研究

张威¹, 陆建阳², 姜欢悦¹

(1.浙江省围海建设集团股份有限公司, 浙江 宁波 315040; 2.浙江大学, 浙江 杭州 310058)

摘要: 我国江浙滨海地区大量分布着淤泥质软土, 在该软土地基上进行工程建设之前, 必须要对其进行固化处理。现有的针对滨海地区淤泥质软土的固化材料多采用细灰, 粉煤灰等传统的矿物掺和料, 固化土强度偏低, 而且固化成本高。因此, 迫切需要研发新型高效的固化剂产品, 使得固化土强度高, 后期承载力高, 而且固化剂用量少, 价格便宜。采用新的固化材料就必须深入认识其与淤泥土之间的物理化学作用, 研究固化淤泥质土物质成分及结构变化对强度的影响, 进而对已选择的新型固化材料予以改进, 有针对性的开发新的固化材料配方。

关键词: 滨海淤泥; 固化剂; 有机质; 无侧限抗压强度

1 引言

土壤固化剂 (Soil Stabilizer) 是指凡是在常温下能够直接胶结土体中土体颗粒表面或能够与粘土矿物反应生成胶凝物质, 从而改善和提高土体力学性能的材料。我国沿海地区分布着大量淤泥质软土, 在该软土地基上进行工程建设之前, 必须要对其进行固化处理。现有的针对滨海地区淤泥质软土的固化材料多采用细灰, 粉煤灰等传统的矿物掺和料, 固化土强度偏低, 而且固化成本高。因此, 迫切需要研发新型高效的固化剂产品, 使得固化土强度高, 后期承载力高, 而且固化剂用量少, 价格便宜。

采用新的固化材料就必须深入认识其与淤泥土之间的物理化学作用, 研究固化淤泥质土物质成分及结构变化对强度的影响, 进而对已选择的新型固化材料予以改进, 有针对性的开发新的固化材料配方。研究新型高效固化剂对淤泥土的固化机理, 及固化土微结构变化机理, 可以为江浙滨海地区淤泥固化提供理论支持。对固化淤泥土的水稳性, 环保性等进行测试和研究, 将确保所开发的固化剂安全, 环保。结合不同滨海城市淤泥地的工程项目, 将所开发的高效复合固化剂应用于现场试验, 可进一步考察固化剂对不同地区淤泥的经济性和适用性, 为固化剂大范围的应用于滨海地区淤泥固化提供理论和技术基础。

2 国内外研究现状

2.1 国内研究现状

沿海地区高有机质含量的软土进行固化的研究, 大多沿用熟料、细灰、粉煤灰或者硅

粉及纳米硅粉等传统的固化材料,固化效果并不理想。许多学者都进行了复合固化剂的研究,但已有研究大都针对软土固化的单个方面来进行处理,试图通过掺入一种或多种添加剂来改善熟料固化有机质软土的效果。本文以应用于天津滨海软土地基固化中的HSC301固化剂^[1]为例进行说明。固化剂 HSC301主要成分为炉石粉、熟料及其它副添加料组成。其基本机理可以归结为两大部分:水的处理和土壤颗粒的胶结。水的处理:将游离水转化为结晶水,利用生成高结晶水的物质消耗土壤中的游离水分;土壤颗粒的胶结:利用自身形成粘结土粒的结构(凝胶),将土粒包裹镶嵌在已经形成的结构中。同时固化剂 HSC301的作用机理归纳总结起来,可以概括为物理力学过程、化学过程和物理化学过程三大过程。

(1) 物理力学过程是指 HSC301 在固化土壤时,土料经过粉碎、拌合和压实,土体的基本单元在外力的作用下彼此靠近,从而减少土体的空隙率,增大密实度,降低渗水性,这种过程是可逆的,土体的强度随着外界条件的改变会发生变化。

(2) 化学过程是指 HSC301 在固化土壤的过程中,其本身组分发生的化学反应、土体与HSC301 中的某些组分发生的反应等。

(3) 物理化学过程主要指土壤颗粒与 HSC301中各组分的吸附过程,包括物理吸附、化学吸附和物理化学吸附。该固化剂对于淤泥中所含有机质对固化的影响作用没有进行研究,而滨海地区淤泥中有机质含量相对较高,对固化剂的作用影响较大。因此,该固化剂的作用原理还缺少一些元素,还有较高的提升空间。

2.2 国外研究现状

在工程领域,国外一些专家就有机质对软土固化的影响的研究已有很多,许多学者也提出了相应的固化对策。Modmoltin Chirdchanin 等提取了 Ariake 粘土中的有机质,并成功确定了胡敏酸和富啡酸精确数量,通过试验得出,胡敏酸直接影响 Ariake 粘土的固化效果,而富啡酸对细灰固化土强度发展的影响较小,随着盐类浓度的提高,胡敏酸对固化土的强度影响变小。但是,该项研究在滨海地区淤泥固化中并没有成熟的产品进行应用,与无机材料进行结合的研究也没有展开,在实际工程的应用中还存在局限性。

3 技术原理

3.1 滨海淤泥工程特性的研究

在物理实验的方法下,通过对滨海淤泥工程性质的研究,发现滨海地区淤泥中含有较高的有机质和较高含水量,同时滨海地区淤泥强度低,流动性较强,短时期内很难自行完成固结。在室内化学试验的帮助下,得出了如下结论:固化材料与滨海地区淤泥的反应可以分成两类,一是立即发生的阳离子交换和絮凝作用,形成稳定结构;二是需要较长时间的水化反应和火山灰反应,通过熟料水化、碳化引起结构变化,进而达到稳定状态。

3.2 各类固化材料固化机理的研究

在淤泥固化机理研究的基础上,对常用的土壤固化材料的固化机理也进行了一系列的研究与试验,着重从熟料、细灰、粉煤灰、工业废料等常用的材料出发,研究这些材料在淤泥固化过程中的作用,从而总结出了固化材料的的固化机理以及应用范围。

4 试验研究方法

4.1 单因素试验

在固化材料固化机理研究的基础上,对熟料、石膏、细灰、粉煤灰、铝渣和三乙醇胺等外添加剂进行单掺试验,在对单掺试验试块的7天、14天和28天养护期的检测后,对检测结果进行了综合性分析,最终得出了各添加剂对淤泥的影响规律,确定单种材料应用于淤泥固化时掺量的范围。

4.2 响应面试验

在确定了各添加剂的掺量范围后,为了对固化剂的配方进行优选,需要考察配方中各因素间的相互作用。通过对不同试验方法的探讨,最终决定采用响应面法进行试验,响应面法是利用合理的试验设计并通过对试验数据进行一定的处理,建立影响因素与响应值之间的函数关系,同时考虑影响因素之间的交互作用影响。通过对回归方程进行分析,选择最优工艺参数,解决多变量问题的一种统计方法。

以旋转中心组合设计(Central Composite Rotatable Design, CCRD)来安排试验。旋转中心组合设计的试验总数为 $2K+2K+M_0$,其中 K 代表自变量总数, M_0 代表中心点实验数,自变量 X_i 按下式进行编码变换:

$$X_i = (x_i - x_0) / \Delta x_i \quad (1)$$

式中, X_i 为自变量 x_i 的编码变量, x_0 为自变量在中心点的值, Δx_i 为自变量变化步长。用标准多项式回归方法,对试验数据进行拟合,便得到一个二次多项式,该方程为描述响应量(应变变量)和自变量关系的经验模型。模型可以描述为:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ii} X_{ii}^2 + \sum b_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

式中, Y 为预测响应值, b_0 为截距, b_i 为线性系数, b_{ii} 为平方系数, b_{ij} 为交互作用系数。

4.3 试验分析

通过对各物质间的成分和固化土的作用机理,以及单掺试验结果的整理与分析,我们最终选取了熟料、铝渣、粉煤灰及三乙醇胺为添加剂,进行详细的试验。我们将以上四种物质作为响应面因子,采用上述材料用于固化土的无侧限抗压强度作为响应值进行响应面试验设计。

表1 旋转中心组合设计试验因素水平及编码

因素	编码		水平				
	编码变量	真实变量	-2	-1	0	1	2
熟料	X ₁	W _g (%)	0	3	6	9	12
铝渣	X ₂	W _l (%)	0	3	6	9	12
粉煤灰	X ₃	W _f (%)	0	3	6	9	12
三乙醇胺	X ₄	W _t (%)	0	0.8	1.6	2.4	3.2

其中, $X_1=(w_g-6\%)/3\%$, $X_2=(w_l-6\%)/3\%$, $X_3=(w_f-6\%)/3\%$, $X_4=(w_t-1.6\%)/0.8\%$ 。

4.4 试验结果

在响应面试验方法的帮助下, 我们对试验试块进行了 28 天龄期的详细检测与分析。在获得 28 天检测数据后, 对试验数据进行了二次多项式回归拟合, 通过对方差的分析, 得到熟料、铝渣、粉煤灰、三乙醇胺四种添加剂在滨海地区淤泥固化过程中的相互影响程度和最优搭配用量。通过多次的响应面试验以及多次的数据优化分析, 最终得出了适用于滨海地区淤泥固化的添加材料以及添加材料的最优初步配比。

由方差分析可知, 该模型极显著 ($p<0.0001$), 该模型的相关系数为 $R^2=0.9856$, 表明模型与实际情况拟合很好, 用此模型可以优化熟料、铝渣、粉煤灰和三乙醇胺的配比。 X_1 , X_2 对固化土强度增长率的线性效应显著, 各因素对强度的曲面效应也显著, X_1X_2 , X_3X_4 的交互影响显著。此结果表明熟料和铝渣、粉煤灰和三乙醇胺对固化土强度增长的线性效应明显, 且熟料和铝渣、粉煤灰和三乙醇胺对强度增长有交互作用的影响。

采用 DesignExpert 软件逐步法剔除不显著项 X_2 , X_1X_2 , X_1X_3 。则用代码表示的回归方程如下:

$$Y_{28}=1049.21+503.75*X_1+240.42*X_2+85.13*X_1*X_2+62.13*X_3*X_4-69.36*X_1^2-102.73*X_2^2 \quad (3)$$

上述方程回归系数为 0.9654, 表明模型与实际情况拟合良好。进一步分析表明:

当四种固化材料的掺量满足熟料: 铝渣: 粉煤灰: 三乙醇胺=12: 8.87: 3.96: 1.28 时, 28 天强度达最优, 最优值为 2.096MPa。因为我们最终我们参考的是 28D 龄期的强度值, 所以采取 28D 模型得到的配比为最终配比。

通过响应面交互反应分析, 由图 1 可知, 当粉煤灰和三乙醇胺掺量固定在 0 水平, 即粉煤灰和三乙醇胺的参量分别为 6% 和 1.6%, 熟料和铝渣含量的增加对土壤强度增长有明显的促进作用, 从图中可以直观地看到, 熟料含量的增加比铝渣更加有利。与 14D 龄期相同, 反应以水化反应和火山灰反应为主导, 水化生成 C-S-H 和大量的 $Ca(OH)_2$, 反应大量消耗了 $Ca(OH)_2$, 而铝渣中含有大量的钙, 很好地促进了反应的进行, 生成更多地胶凝材

料。从图中也可以看到随着龄期的增长,土体强度接近 1800kPa,进一步分析得到,熟料和铝渣的比例在 8~12: 6.23~8.87 时,土体的强度增长最佳。

表 2 回归模型系数的显著性检验及方差分析

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	7.976E+006	14	5.697E+005	73.42	< 0.0001
X ₁	5.965E+006	1	5.965E+006	768.74	< 0.0001
X ₂	1.362E+006	1	1.362E+006	175.51	< 0.0001
X ₃	5781.20	1	5781.20	0.75	0.4016
X ₄	66.97	1	66.97	8.630E-003	0.9272
X ₁ X ₂	76456.40	1	76456.40	9.85	0.0068
X ₁ X ₃	1357.37	1	1357.37	0.17	0.6817
X ₁ X ₄	849.87	1	849.87	0.11	0.7453
X ₂ X ₃	25785.13	1	25785.13	3.32	0.0883
X ₂ X ₄	167.51	1	167.51	0.022	0.8851
X ₃ X ₄	64230.57	1	64230.57	8.28	0.0115
X ₁ ²	97345.21	1	97345.21	12.54	0.0030
X ₂ ²	3.886E+005	1	3.886E+005	50.08	< 0.0001
X ₃ ²	317.05	1	317.05	0.041	0.8425
X ₄ ²	420.65	1	420.65	0.054	0.8190
残余项	1.164E+005	15	7759.75		
失拟项	1.164E+005	10	11639.63		
误差	0.000	5	0.000		
和	8.092E+006	29			

注: R-Squared=0.9856

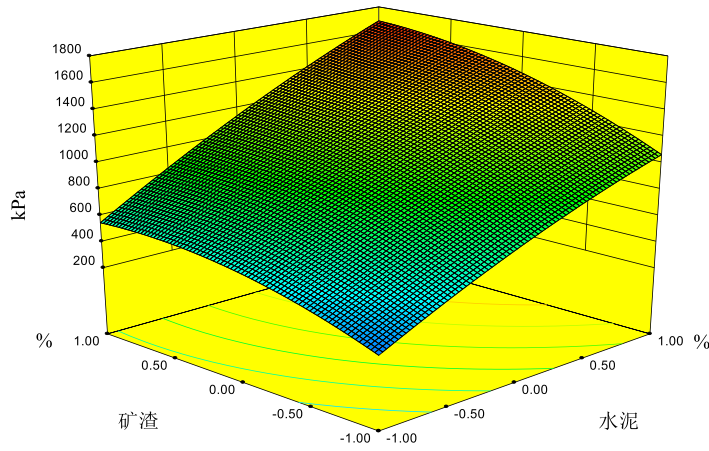


图 1 熟料和铝渣交互作用下强度的响应面图

由图 2 可知,当熟料和铝渣掺量固定在 0 水平,即粉煤灰和三乙醇胺的参量都为 6%。从图中我们可以看到,当粉煤灰掺量较小时,三乙醇胺掺量的增加起到负面作用,而当粉煤灰掺量较大时,三乙醇胺的增加,对土体强度增加起到很好的辅助作用。原因如下:当粉煤灰的掺量较小时,其微集料效应不显著,而三乙醇胺具有稳定环境 PH 值的效果,不利于水化反应和火山灰反应的进行;当粉煤灰的掺量较大时,微集料效应明显,极大地促进了土体强度的增强,此时三乙醇胺对环境 PH 值的影响降低到很小的程度,几乎可以忽略不计;随着三乙醇胺掺量的增加,其减水性和早强性的作用更加突出,而且加速了固化材料的流动性,对粉煤灰的微集料作用起到促进作用。

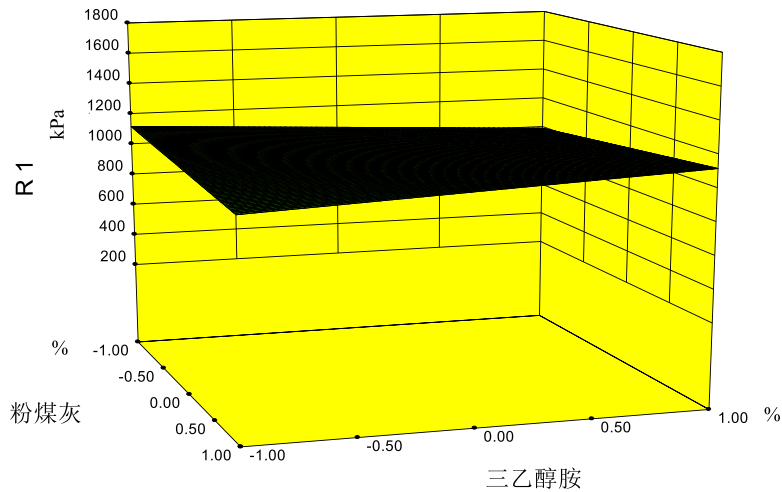


图 2 粉煤灰和三乙醇胺交互作用下强度的响应面图

将我们得到的最终配比熟料: 铝渣: 粉煤灰: 三乙醇胺=8~12: 6.23~8.87: 3.96~5.48: 1.28~1.89。

5 稳定性分析

5.1 稳定性分析

在最优配比得出后, 对其固化后的淤泥进行了电镜结构分析, 从以上两组照片可以看到, 28D 龄期的土体结构比 14D 龄期的土体结构更加密实, 反应生成的晶体填充了土体的空隙。随着固化土龄期的增长, 土体内部结构将更加密实, 形成的固化土将更加稳定。

14D 龄期时土体在 2000 倍电镜下的结构:

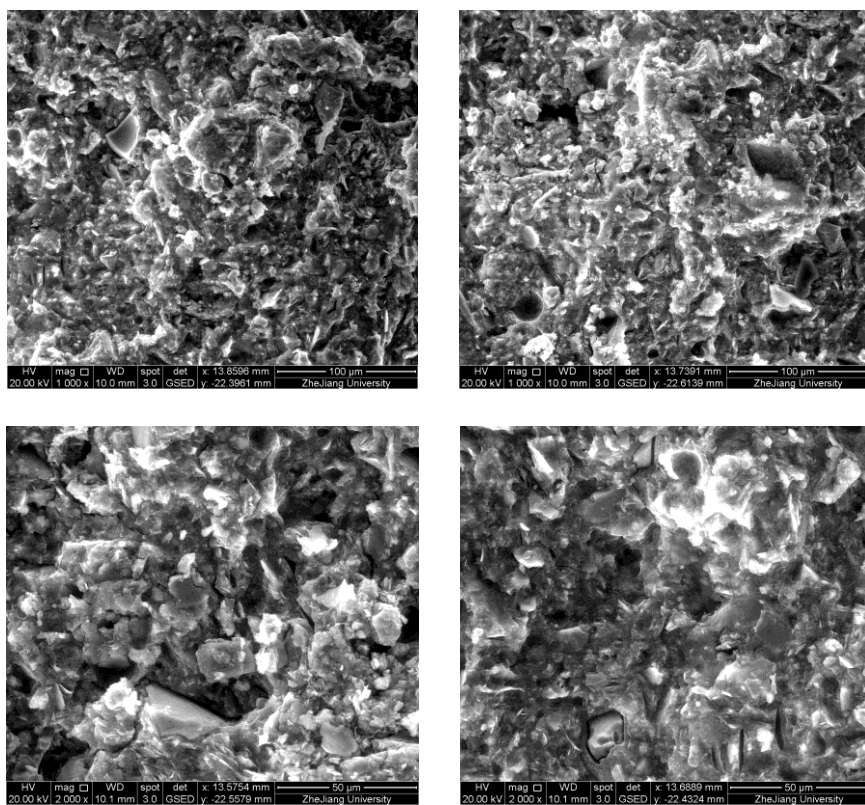


图 3 14D 龄期照片

28 龄期时土体在 2000 倍电镜下的结构:

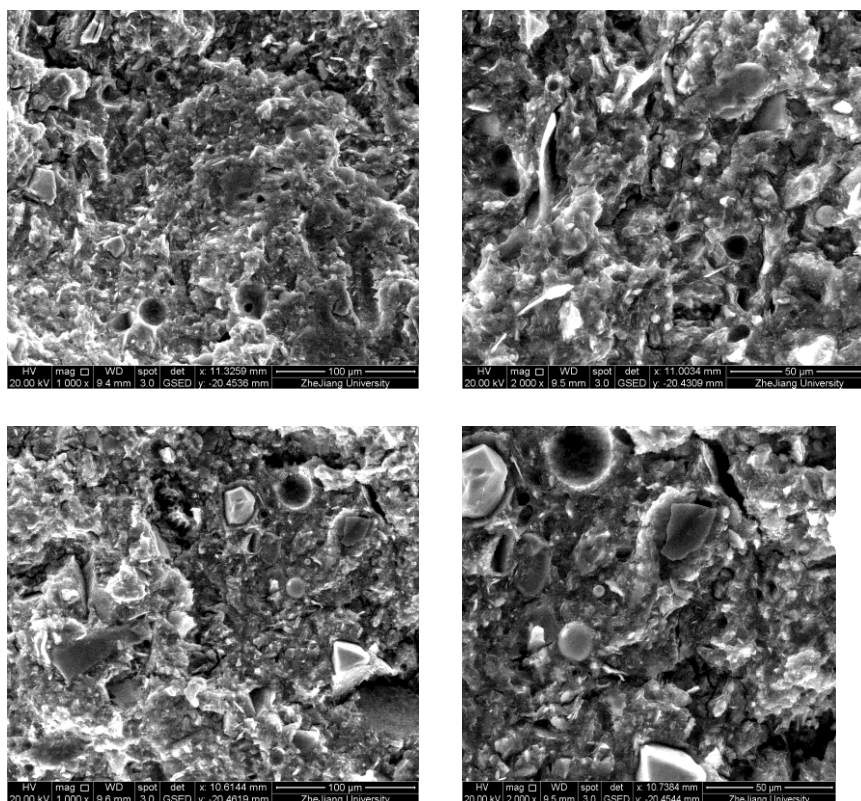


图 4 28D 龄期照片

5.2 耐久性分析

表 3 不同龄期固化土成分及质量组成

龄期	铁铝酸盐晶体	二氧化硅	硅酸铝盐晶体	镁铝酸盐晶体	碳酸钙	其它
14D	23.4%	41.2%	12.1%	8.4%	4.7%	10%
28D	35.3%	25.3%	17%	16.7%	5.7%	/

通过对最优配比固化后的淤泥进行成分分析,从表 3 中我们看到,14D 龄期时土体中二氧化硅含量还是很高,对土体结构其填充和支撑作用的晶体含量已经达到 40%以上,但是反应还在剧烈的进行;28D 龄期时铁铝酸盐的含量达到了 35.3%。

6 结束语

本文提出的滨海地区淤泥固化剂的研究将解决围垦回填对土石方资源的依赖,且改变了滨海地区滩涂淤泥作为回填施工不能直接利用需要后期再处理的现状。

参考文献:

- [1] 刘俊, 蒋宏伟. 固化剂 HSC301 应用于天津滨海软土地基浅层处理的探讨. 城市道桥与防洪, 2011, 4(4): 47-51.
- [2] 王振军, 翁优灵, 杜少文. 铝渣粉加固粉土的理论分析及路用性能研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 709-714.
- [3] 宁建国, 黄新. 利用工业废渣配制熟料系软土固化剂探讨[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊): 432-437.
- [4] 黄新, 周国均. 工业废石膏在地基加固中的应用[J]. 工业建筑. 1994, 9: 24-28.
- [5] 黄新, 周国均. 软土地基熟料-石膏固化剂的适用条件及加固机理初探[J]. 地基处理, 1994, 5(2): 13-20.
- [6] 黄新, 胡同安. 工业废石膏与熟料配全加固软土地基[J]. 建筑技术, 2001, 32(3): 161-163.
- [7] 梅国兴, 刘伟宝. 掺凝灰岩粉、磷铝渣粉熟料浆体水化的SEM分析[J]. 混凝土, 2003, 3: 49-52.

碱渣固化材料的研究

郑敬云, 周龙

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 碱渣固化土是在淤泥土中加入碱渣混合料后固化形成的特殊工程土。本文对多种不同掺入量的碱渣土进行了室内试验, 包括直接剪切试验、固结试验、无侧限抗压强度试验等, 求得固化土的各种力学参数。根据室内试验结果, 确定合适的碱渣掺入量, 分析碱渣固化材料的经济性和适用性, 为该新型固化材料在实际工程中的应用提供理论依据。

关键词: 碱渣; 滩涂淤泥; 固化土; 无侧限抗压强度

1 引言

碱渣俗称自泥, 是氨碱法生产纯碱过程中产生的废渣。一般情况下, 碱渣采取地表堆积的处理方式, 大量的碱渣沉积造成了周围环境的污染, 碱渣的治理问题成为制约碱厂发展的一大难题。目前处理碱渣废料的方式, 如利用碱渣制造建筑砂浆改良剂、空心砖及空心砌块、提取氯化钙、钙镁肥、鸡饲料添加剂、橡胶填料等, 碱渣消耗量不多, 不能从根本上解决问题。多年的实践经验认为^[1, 2], 要想全部或大部分地处理碱渣最有可能的途径是用碱渣制作工程材料, 即在碱渣中加入某些原料如粉煤灰、水泥、石灰等形成碱渣混合料。

闫澍旺等^[3]通过一系列常用的土工试验, 研究了一种添加水泥的碱渣土的强度、变形、湿陷性等工程性质, 试验研究结果表明该种碱渣土可作为工程回填土应用, 但添加水泥大大增加了材料费用, 制约了其应用。通过对碱渣混合土料工程性质的研究, 寻找一种处理费用低廉、能够大量消耗碱渣的实用方法, 具有重要的工程意义。本文对多种配方的碱渣固化土进行了剪切试验、固结试验、无侧限抗压试验等, 在此基础上, 通过比较选择最优配比, 得到低成本、高性能的碱渣混合材料。

2 主要材料及实验内容

(1) 主要材料

本文试验所采用的固化材料主要由碱渣、粉煤灰、矿粉、石膏、特殊精料等组成, 其中碱渣主要成分及含量如表 1, 粉煤灰的主要化学成分见表 2。

表 1 碱渣主要成分 (%)

CaCO ₃	CaCl ₂	NaCl	CaSO ₄	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	R ₂ O ₃	Cl-	酸不溶物
40-60	10-14	3-8	2-5	6-10	0.95-2.38	4.14	1.08	3-6	8-13	6-10

表2 粉煤灰的主要化学成分(%)

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	S	烧失量
50.46	26.05	15.4	3.98	1.05	3.43

(2) 试样制备

本文根据自制的配方,按照一定的比例依次将碱渣、粉煤灰、矿粉、石膏、特殊精料等材料混合并拌匀,制成碱渣固化材料,用于制备碱渣固化土的固化剂。

原状土取自宁波沿海某滩涂淤泥,其物理力学性质见表3所示。将原状土烘干后,配制含水率为60%、80%、100%原样泥,用作碱渣固化土试样制备。

表3 原状土的物理力学性质参数

含水率 /%	密度 /g/cm ³	孔隙比	压缩系数 MPa ⁻¹	压缩模量 MPa	C /kPa	ϕ /°	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	液性 指数
81	1.63	1.67	1.51	1.77	3	1.7	54.2	26.1	28.1	1.18

根据试验需要,共制成70.7mm的立方体试样和61.8mm×20mm的环刀试样各若干,分别用于无侧限抗压强度试验和直剪试验,试样共分8%、10%、12%和15%四种固化剂掺入量,如表4所示。试样制备后,经过24h成型,待达到拆模条件后进行拆模,最后置于标准养护箱内进行养护至指定龄期。标准养护条件为:温度20℃±1℃,湿度≥95%。

表4 固化剂的掺入量

编号	含水率	龄期	碱渣固化材料掺入量			
I	60%	14d	8%	10%	12%	15%
		28d	8%	10%	12%	15%
		90d	8%	10%	12%	15%
II	80%	14d	8%	10%	12%	15%
		28d	8%	10%	12%	15%
		90d	8%	10%	12%	15%
III	100%	14d	10%	12%	15%	18%
		28d	10%	12%	15%	18%
		90d	10%	12%	15%	18%

3 试验结果及分析

根据《水泥石配合比设计规程》(JGJT 233-2011),对于达到指定龄期的试样进行抗压试验和直剪试验。抗压试验采用YES-100数显压力试验机,以8mm/分钟的速度缓慢加载,至试样破坏,记录压力值;直剪试验采用电动四联等应变直剪仪,以100kPa、200kPa、300kPa、400kPa四个等级进行加载,记录剪切破坏时的读数。限于篇幅,本文只介绍28d龄期的无侧限抗压强度和直剪试验结果。

(1) 无侧限抗压试验

取3个平行试验破坏荷载的平均值计算抗压强度,若单个试件测值偏离均值的15%,

则予以剔除, 取余下测值的平均值计算。28d 无侧限抗压强度结果如表 5 所示。

表 5 28d 无侧限抗压强度结果 (单位: MPa)

含水率	掺入量			
	8%	10%	12%	15%
60%	0.10	0.12	0.18	0.26
80%	0.09	0.10	0.15	0.22
100%	0.06	0.09	0.13	0.19

此碱渣混合料对淤泥加固处理后, 其固化土抗压效果明显增强, 软硬度基本都能达到中等的甚至硬的程度。同一含水率条件下, 固化材料掺入量越大, 固化土强度越高; 同一固化材料掺入量条件下, 原样泥含水率越大, 抗压强度越低。此外, 分析固化材料的配方发现, 碱渣中外掺材料对抗压强度影响最大的是矿粉, 其次是特殊精料。

(2) 直剪试验

表 6 28d 抗剪强度参数

含水率	掺入量							
	8%		10%		12%		15%	
	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$
60%	4.61	12.98	7.94	28.92	9.77	42.72	18.64	81.56
80%	3.64	11.75	5.96	23.64	8.15	37.52	15.71	68.20
100%	2.92	9.58	4.92	17.78	6.53	29.83	13.05	41.91

此碱渣混合料对淤泥加固处理后, 固化土的内摩擦角和粘聚力均得到提高, 含水率越低, 固化土抗剪性能提高越明显。

4 结论

(1) 用碱渣混合料制备固化土是一种能大量消耗废弃碱渣的方式, 具有明显的环保效应和社会效应。

(2) 碱渣混合料对滩涂淤泥改善效果明显, 固化土的基本力学性能能满足一定的要求, 具有较好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 娄性义, 张焕云. 碱渣(白泥)综合利用途径的探讨[J]. 青岛建筑工程学院学报, 1999, 2: 55-57.
- [2] 刘心中, 姚德, 董凤芝, 任传成. 碱渣(白泥)综合利用[J]. 化工矿物与加工. 2001(3): 2-3.
- [3] 闫澎旺, 祁寿簏. 碱渣土工程性能的试验研究[J]. 石油工程建设, 1997, 4: 1-8.

淤泥原位固化施工工法

陈富强, 余朝伟, 郑恩喜, 周龙, 千焕军

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 本文介绍了一种淤泥软基处理的淤泥原位固化施工工法, 从工法特点、适用范围、工艺原理等方面介绍了该施工工法原理及先进性, 并结合实际工程实例说明了该施工工法的经济效益与社会效益。

关键词: 淤泥原位固化; 淤泥软基处理; 螺旋式淤泥固化机

1 前言

随着海洋经济的建设, 新兴产业与人口将不断向沿海区域集中, 然而沿海地区分布着大量软土地基, 该类软土含水率高, 压缩性高, 渗透系数小, 抗剪强度低, 沉降稳定时间长, 土体颗粒细, 多以淤泥质粘土为主, 基础条件差, 采用水泥搅拌桩技术处理软土地基, 其质量控制难, 成桩效果上下、内外难均匀, 往往中间强度高, 两端强度低, 桩中心强度高, 周边强度低; 采用高压旋喷桩技术处理软土地基成本高、水泥用量大。我公司根据软基施工经验, 通过技术创新, 研究开发了喷搅式水泥搅拌桩的施工工法, 降低了施工成本, 克服了水泥搅拌桩不足。

本工法的关键技术于 2014 年 11 月 19 日通过浙江联政科技评估中心科技成果鉴定, 评审认为: 该项技术研发了由高压原料输送、旋转旋喷搅拌等系统组成的施工机械; 成桩过程中, 压力喷浆与强制搅拌相结合, 促使浆液与土体充分混合, 大幅度提高土体抗剪强度以及无侧限抗压强度, 处于国内领先水平; 关键技术获得实用新型专利 2 件, 专利号为 ZL201220521679.5、ZL 201320265629.X。

2 工艺原理及特点

淤泥原位固化施工工法利用喷搅式水泥搅拌桩施工设备进行施工, 在承载力 5t 以上的地面上施工, 采用履带式淤泥固化机; 在承载力达 5t 以下的泥面上施工, 采用螺旋式淤泥固化机。施工时, 胶凝材料通过高压输送系统输送至自主研发的旋转接头, 再通过高压旋喷搅拌与强制式搅拌双重作用, 确保胶凝材料与泥质软土充分混合粘结, 实现泥质软基的原地固结。

加固材料主要由水泥和固结剂组成, 其中水泥的质量分数为 45~55%。固结剂能够充分激活海涂泥自身硅酸盐矿物质单元成份中活性分子, 产生固化反应, 不仅在淤泥颗粒相界面产生牢固结合, 而且能与淤泥颗粒中的活性物质反应生成胶凝物质, 集物理与化学作用于一身的固结效果, 在大幅提高泥质软基强度的同时, 还具有良好的水稳性和耐久性。

本工法适用于处理淤泥、淤泥质土、粉质粘土等软土地基。目前, 在工程应用中的最大施工深度达 17 米。

本工法特点如下:

(1) 本工法以水泥、固结剂作为主要加固材料, 将其在淤泥软基原地直接固化, 处理后固化土的无侧限抗压强度可达 1~1.8MPa。

(2) 本工法采用喷搅式水泥搅拌桩施工设备, 能在地面、泥面上直接施工; 设备将压力喷浆与强制搅拌结合, 采用自主研发的旋转接头, 以大幅度提高施工质量及施工效率。

(3) 本工法与水泥搅拌桩、高压旋喷桩等技术相比, 做到相同技术指标情况下, 其费用降低 5~10%。

(4) 本工法对周边环境无污染。在加固过程中对周围土体无扰动, 施工时无振动、噪音低, 对周边环境无污染。

(5) 本工法的提出改变了水利工程与海洋工程对土石方资源的依赖, 减少了矿山资源的开采, 有利于保护生态环境和节约自然资源。

3 施工工艺

3.1 施工工艺流程

淤泥原位固化施工流程如下图所示。

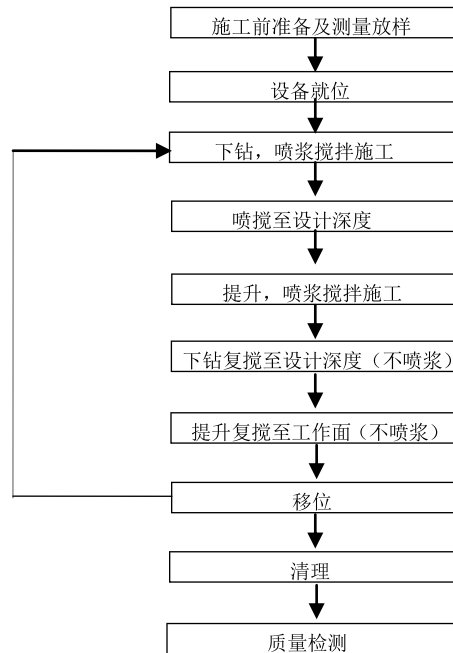


图1 施工工艺流程图

3.2 操作要点

(1) 施工前准备及测量放样

编制施工方案, 进行技术交底和岗前培训, 做好现场“三通一平”工作。喷搅式水泥搅拌桩施工前, 备齐施工机械机具和材料, 接通电力, 施工人员进场, 需将进行喷浆固化

处理地点的地面表皮清除，查明地下线路管道情况进行场地平整，桩位放线，一切准备就绪后，进行喷搅式水泥搅拌桩作业。

a) 编制施工方案

根据工程作业环境及设计图纸，编制施工方案，在施工前进行技术交底、岗前培训工作以及安全教育；

b) 场地清理

施工前，按技术规范要求进行场地清理，清理后进行场地平整

c) 测量放样

施工前，测量人员按施工设计图，在原地面进行测量放样，并做好标记和记录工作。

d) 材料

喷搅式水泥搅拌桩采用的加固材料为水泥和固结剂，其中水泥的质量分数为 45~55%，将水泥和固结剂的混合物称为固化剂。固化剂浆液的水灰比宜为 0.5~0.7，当待处理软土含水率 >70% 时，采用 0.5 的水灰比为宜；

当待处理软土含水率 <60% 时，采用 0.7 的水灰比为宜；当浆液输送距离小于 200m 时，采用 0.5 的水灰比为宜；当浆液输送距离大于 500m 时，采用 0.7 的水灰比为宜；施工前，应通过土工试验和工艺试桩最终确定水灰比。根据工程淤泥土质检测数据及工程承载力指标要求，进行土工试验，以 7 天龄期的固化土强度达到工程设计强度指标的 60% 来确定固化剂配方和掺和比，掺和比在 5%~12% 之间。

e) 工艺试桩

喷搅式水泥搅拌桩施工前必须进行工艺试桩，以掌握适用于该区段的成桩经验及各种操作技术参数。成桩工艺试桩数根据固化剂配方、掺和比以及检测组数确定，一般不宜少于 12 根。

通过工艺试桩，根据土体与固化剂浆液的搅拌次数达到 26 次以上要求，获取关键的设备操作参数，如设备下钻、提升速度与搅拌回转速度；根据固化剂用量、水灰比及搅拌升降速度，确定泥浆泵的供浆流量以及供浆压力值。

(2) 设备就位

正式施工作业前，检查喷搅式水泥搅拌桩施工设备搅拌系统、液压动力系统以及各管道的密封连接情况是否正常，做好必要的调整和工作，排除异常情况，方可进行操作。将搅拌头对准测量放样标记进行喷搅式水泥搅拌桩施工作业，注意调整设备以保证桩的垂直度。

(3) 下钻喷浆搅拌

启动搅拌马达与升降马达，搅拌头沿着导向架向下钻，边喷浆、边搅拌，严格控制下钻速度与喷浆流量。随时观察设备运行及地层变化情况，搅拌头下钻至设计深度位置时，开始提升。

(4) 提升喷浆搅拌

喷搅下钻至设计深度，定喷完成后，提升复喷复搅，边喷浆、边搅拌，严格控制提升速度，保证固化剂浆液与土体充分拌和；最后，上升至工作基准面停止喷浆。

(5) 复搅

为确保淤泥土层与固化剂材料搅拌均匀,进行二次搅拌不喷浆,即下钻搅拌不喷浆与提升搅拌不喷浆。

(6) 移位

根据施工顺序移至进行下一桩位,重复以上2~5步骤进行施工;若固化机一次定位多次作业时,搅拌杆在桩架上横移至其根据桩间距设定的刻度点;或固化机移至下一工作机位。

(7) 清理

若施工段成桩完成后,应关闭施工机械,在固化剂浆剂搅拌桶中注入适量清水,开启灰浆泵清洗喷浆管道、搅拌杆内等全部管线中残留的固化剂浆液,并将附着在旋转接头的杂物清理干净。

(8) 质量检测

对完工区域内7d和28d龄期的固化土进行取芯检测,测定固化土力学性质指标,主要包括:粘聚力、内摩擦角及无侧限抗压强度,检测其结果是否满足设计要求,以及时控制施工工艺进而保证施工质量。

3.3 材料与设备

本工法每100方固化土,根据工程指标要求,进行土工试验确定,一般需要8000~15000kg固化剂。

本工法涉及的主要设备见表1。

表1 淤泥固化设备

序号	设备名称	单位	数量	主要用途	备注
履带式淤泥固化机/螺					
1	旋式淤泥固化机	台	1	固化搅拌施工设备	
2	水泥槽罐	个	3	原材料存储	
3	螺旋输送机	个	3	固化剂配制输送原材料	
4	计量料斗器	个	1	固化剂配制原材料计量	
5	固化剂搅拌罐	个	1	固化剂配制搅拌	
6	输送泵	台	3	固化剂输送至施工设备动力	备用1个
7	高压管线	套	1	固化剂输送至施工设备管道	根据施工距离
8	发电机	台	2	动力	备用1个
9	水泵	台	2	固化剂配制	备用1个

4 质量控制

4.1 质量控制标准

本工法采用的质量控制标准:《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB50202-2002)、

《水泥搅拌桩施工工艺及质量验收标准》(QB/BY10301-2003)以及《地基处理技术规范》(JGJ79-2002)。

4.2 质量保证措施

(1) 原材料控制

对各原材料做好入库登记,保证其供应的持续性以及使用的有效性,对来料进行记录统计。

(2) 固化浆液配制与输送

a) 固化剂的配置时需先放水再放料,根据计量称读数严格控制固化剂重量。

b) 严格控制水灰比、固化剂掺量,固化浆剂配制后需不间断搅拌,保证浆液材料均匀且不沉淀;输送过程必须连续,间隔时间不大于 5 分钟,大于 5 分钟需喷浆疏通,大于 20 分钟需用清水冲洗。

c) 施工前,必须根据供浆量调节各供浆泵的供浆流量;施工时,不断监控供浆流量,若发生异常情况,立即通知喷搅式水泥搅拌桩施工设备操作者,进行设备及管道检查,保证设备正常和管道畅通后方可重新施工。

d) 高压供浆泵系统操作人员应严格按照调试后输送电机频率进行操作控制,保证输送浆液稳定性与持续性。

(3) 固化施工

a) 施工前,严格按设计施工图放样,划分桩位作业编码,编码由区位、机位、桩位组成;确保可根据施工记录表能找到相应施工区位、机位、桩位。施工过程中做好施工记录,现场施工人员认真填写施工原始记录,记录内容应包括施工位置、固化深度、施工时间,抽检下钻与提升速度、灌浆流量,统计每天固化剂用量与固化方量等。

每个机位施工完成后需做好相应标记,每个台班完成后做好相应标记。

b) 严格控制搅拌杆定位垂直准确度。

c) 开机作业前,必须检查机械各部件行走系统与机上各液压马达工作压力情况;开钻前,根据施工设计确保固化机定位准确。

d) 严格控制固化剂掺和量,施工时,应严格按照设定喷浆嘴孔径大小、泥浆泵电机频率及其开启时间和停止时间,以保证淤泥固化掺和量;上升至工作基准面后应立即停止,防止固化剂流失。

e) 搅拌均匀度控制:严格控制搅拌时的下钻、提升速度及搅拌次数,必须保证土体与固化剂的搅拌次数达到 26 次以上,以确保加固范围内土体与固化剂得以充分搅拌。

f) 每次搅拌应连续作业,不得中断喷浆,如机械故障影响喷浆或搅拌次数,必须重新加固施工。

g) 施工过程中,如因地下障碍物等原因使搅拌器无法正常施工时,应及时记录该点位置,按不触碰到障碍物为底高程喷浆。

5 安全及环保措施

5.1 安全措施

为加强施工安全管理,严格遵守《安全生产法》等相关安全生产的法律法规和公司规章制度,坚持“安全第一,预防为主,综合治理”的安全生产方针,按照“管生产必须同时管安全,谁主管,谁负责”的原则逐级落实安全生产责任制,特制订以下安全措施:

(1) 严格执行公司的安全规范,每位上岗职工都必须经过三级安全教育和安规考试,施工人员必须经体检合格后方可上岗。

(2) 进入施工现场必须戴好安全帽,穿上救生衣,严禁酒后操作和施工。

(3) 固化剂配制人员应戴好口罩、披肩帽、风镜、穿保温工作服,衣领、袖口、裤脚应扎紧,着装符合安规要求。

(4) 固化剂按工作所需量运送到现场,并有序堆放在设有防雨、防潮、防损坏、不影响他人正常施工的场所。

(5) 电动设备使用前应先检查导线及机械运转的完好情况,各种电动工具应配有触电保护装置。机械运转情况异常时,及时由专业人员进行维修保养。

(6) 专用机械设备应定人操作,必须持有上岗证上岗作业,并定期参加证件审验。

(7) 启用搅拌设备前,必须认真检查索具及连接部位的情况,若发现问题,及时认真处理。

(8) 夜间或容器内施工应有足够的照明和必要的安全措施,施工结束后切断所有的电动工具、照明电源,并经检查确认安全后方可离开。

5.2 环保措施

(1) 加强施工期环境管理,制定严格的规章制度,依照公司《环境管理体系》的规定,不得随意排放油类、油性混合物、废弃物和其他有害物质。

(2) 施工设备产生的生活污水、含油污水以及生活垃圾集中统一处理,做好船舶垃圾日常的收集、分类与储存工作,不得任意倒入施工水域,靠岸后交陆域处理。

(3) 工作时所使用的固化剂包装袋或其它废弃材料,下班后应每天清理,保持现场整洁。

(4) 要有控制原材料灰尘飞扬的措施。垃圾的处理必须符合国家、地方环境保护相关规定。

(5) 在施工过程中应防止噪声污染,在施工噪声敏感区域宜选择低噪声设备,也可采取其他降低噪声的措施。

(6) 设备装设处理舱底污水的设备,施工设备舱底含油污水不得随意排放。

6 效益分析

6.1 经济效益

2014年3月至2015年3月,喷搅式水泥搅拌桩计技术已在奉化市象山港避风锚地建

设项目及配套工程、江苏斯尔邦石化有限公司醇基多联产项目一期 EVA 装置压缩机区域软基固化工程、台州东部新区涂面整理和临时航道（港池、锚地）疏浚工程等多项工程实施，实现收入 2650 万，利润 672 万，税收 257 万。

6.2 社会效益

（1）随着我国海洋经济的建设，该技术在滨海淤泥软基处理中发挥作用，以及本项目的施工设备对软基工程的高效、高质量处理，对我国海洋经济建设有着重要的意义；同时该技术可应用于河道淤泥固化、城市建筑淤泥垃圾处理，对城市环境建设也有着重要的意义。

（2）该技术将软基进行固化处理，处理后固化土的无侧限抗压强度可达 1~1.8MPa，可缩短施工工期 1 个月，降低施工成本 5%~10%；该技术不仅解决了软基处理质量难控制的难题，而且切实提高了水利、市政等建设行业科技水平。

（3）本项目利用自主研发的固化材料和施工机械将软土直接固化，改变了回填施工时对土石方的依赖，间接地阻止了对山体石料的开采，保护了生态环境，实现了资源的可持续发展。

（4）本项目的创新施工理念，推广应用新材料、新设备、新工艺，实施生态环境建设，实现绿色施工，对提升工程施工技术、经验积累、科技进步和社会发展起推动促进作用。

淤泥固化海上施工固化浆液远距离输送 技术探讨

刘朋, 余朝伟, 张威

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 泵送固化浆液已经成为施工中的一个常用品种, 它具有施工速度快, 节省人工, 施工方便等特点, 文章结合浙江省宁海县三山涂淤泥固化项目泵送固化浆液的施工进行总结, 针对距离长, 施工难度大等特点提出了对远距离海上泵送固化浆液施工要点以及堵管的预防处理措施。

关键词: 海上长距离; 泵送固化浆液; 堵管; 预防措施

1 前言

宁海县三山涂淤泥固化项目受地理条件制约, 施工环境恶劣, 距离海岸较远, 铺管长度达 4 公里, 施工难度处于国内首例, 主要在于以下几个方面:

(1) 距离远, 导致泵送固化浆液时间长, 前后工作平台遥相呼应有障碍。

(2) 配浆量不易掌控, 容易造成前台施工停顿, 影响工程进度。或者造成材料的浪费, 增加工作成本。

(3) 管道输送系统庞杂, 容易出现故障, 造成堵管, 检修难度大, 耗费人力物力时间较多。

(4) 排除清管等零碎时间, 还有潮起潮落等自然因素引起的日有效工作时间缩短, 易造成日工作量减少, 拖延工期。

工程采用泥浆泵, 在施工中间多次发生堵管事件, 历经配合比优化、管道布设方式调整、管道清洗及固化浆液泵送前润管工艺改进等多次多种方式的改进, 最终实现施工效率的大大提高。

2 施工工艺及泵送前期准备

固化剂采用当地硅酸盐水泥, 粉煤灰, 还有围海科技公司自主研发的外加剂, 再加水搅拌均匀。配比经过合理优化, 水灰比为 1.62, 满足强度等要求, 达到行业技术标准。

后台为水泥搅拌基地, 负责固化剂的生产和泵送, 通过海上长远距离管送, 到达淤泥固化临时工作平台, 通过转仓与再次搅拌, 再经过泥浆泵二次输送至淤泥固化搅拌桩进行施工。

每台固化浆液输送泵配备2名经过培训的机械操作人员,另外配备2名操作工人现场配合,固化机每台配备2名熟练驾驶员。

拌和泵送平台、泵机中转平台,固化机施工平台,指挥领导平台全部配备对讲机,实行多位一体化,保证各个环节及时联系沟通,时刻掌握整个流水线工艺是否正常运行,便于对特殊情况果断采取措施,降低损失。

布管非常重要,布管设置及施工应注意:

(1) 施工前认真进行配管设计,绘制布管简图,列出各种管件、连接件和配件的规格数量,提出清单。

(2) 保证尽量缩短输送距离,减少弯管,减少输送过程中的阻力。

(3) 在同一条管路中保持断面不变,采用直通圆管输送浆体。

(4) 配管时把新管配置在管路开始部分,因为该处压力比较高。经长期使用后泵管磨损较大,不把这类管配置在泵压较大的区间,不合要求的旧管不能使用。

(5) 管路必须联接牢固,进行可靠的固定,弯管处要增加固定设施,减少浆体输送过程中管路的冲击震动,避免管路或接头变形断裂。

(6) 管卡要紧,接头密封要严,确保不漏、不漏水。

(7) 输送高度比较大时要注意在垂直管下端设置垂直管高度50%长度(一般不少于15m)的水平管,以通过水平管的管壁摩阻力克服垂直管的逆流压力,避免逆流压力集中造成混凝土离析堵管。

(8) 特殊季节季工,应当对管路进行防护处理,冬季夏季要用草垫等对管道进行保温包裹,防止冬季混凝土受冻或者夏季因高温浆体硬化过快堵管造成过大损失。

3 现场施工要求

现场施工应注意以下事项:

(1) 严格进行设备安全检查,满足各项指标要求后,方可进行生产。

(2) 泵送混凝土与前端取得联系,前端管口处不得有人,避免浆体喷出伤人;软管弯曲半径应当大于1.5m防止软管爆裂。

(3) 较长时间暂停泵送,必须每20min左右分别反、正泵送1~2个行程,防止固化浆液固结。

(4) 发现料离析,要搅拌均匀后再泵送。

(5) 泵送过程中如果要泵送压力突然升高,或泵管产生突然异常震动,要立刻开反泵2~3个行程,并同时易形成堵管的锥形管、弯管处进行敲打,如连续几次反泵无改善,则可判断是堵管,要及时按照堵管进行处理。

(6) 在泵送过程中,应随时保持料斗中的浆量不低于吸料口,否则可能因吸入空气而导致出口处出现喷溅伤人的现象或者堵管现象。

(7) 不得随意调整液压系统压力,每次泵送结束要立即将泵及管道中的浆体彻底清洗。

4 泵送固化浆液常见问题及解决方案

泵送固化浆液常见两大类问题：

(1) 后台送料不及时，导致前台无法顺畅工作，复杂化施工流程。其原因有：

- a) 原料到仓的外界因素。
- b) 管道过长，达 4 公里，拌料时间过长。
- c) 前后沟通未达统一。

解决办法：

- a) 事先储备足够的原料于料仓内。
- b) 配备更多人力资源，根据后台开工时间推算送料时间，提前拌料泵送，实现高效。
- c) 对讲机，电话等通讯手段，多位一体，流程统一有序。

(2) 泵送过程中堵管

1) 操作不当造成堵管的解决办法

a) 输送泵操作人员在泵送施工中应精力集中，时刻注意泵送压力表的读数，一旦发现压力表读数突然增大，应立即反泵 2~3 个行程，再正泵，一般情况下堵管即可排除。若已经进行了反泵、正泵几个操作循环，仍未排除堵管，应当机立断及时拆管清洗，否则将使堵管更加严重，在正反泵送过程中可以通过经验（管道摩擦声音）确定堵管位置，可以采取局部拆管处理。

b) 泵送时，操作人员须随时观察送料斗中的余料，余料不得低于搅拌轴，如果余料太少，极易吸入空气，导致堵管。料斗中的料也不能堆得太多，应低于格网高度，以便于及时清理固化的小浆块。

c) 泵送时，泵送速度的选择很关键，操作人员不能一味地求快，首次泵送时，由于管道阻力较大，此时应高压小排量泵送，混合料出管输送正常后，可适当提高泵送速度。当现出堵管征兆（压力表读突然增大、泵管产生突然异常震动、机器负荷明显增大），应高压小排量泵送、将堵管消灭在萌芽状态。

d) 停机期间，应每隔 10min（具体时间视当日气温、浆体初凝时间而定）开泵一次，以防堵管；对于停机时间过长，接近初凝时间的浆体，不宜继续泵送，应当果断进行管道清理。

e) 上次泵送完毕，管道未清洗干净，会造成下一次泵送时管道阻力增大上起堵管。解决办法就是每次泵送完毕一定要按照操作规程将输送管道清洗干净。

2) 管道连接及泵功率不足引起堵管的解决办法

a) 管道布置应按最短距离，最少弯头和最大弯头来布管，尽量减少输送阻力，减小堵管的可能性。

b) 泵出口锥管处，不允许直接接弯管，至少应接入 5m 以上直管后，再接弯管。泵送中途接管时，每次只能加接一根，且应用水润滑管道内壁，并排尽空气，否则极易造成堵管。垂直向下的管道应设防离析装置，以防堵管。

3) 局部漏浆造成的堵管

局部漏浆将导致浆体水分流失和泵送压力的减小,从而导致堵管。漏浆的原因主要有:

a) 输送管道接头密封不严,管卡松动或密封圈损坏而漏浆。处理措施就是紧固管卡或更换密封圈。

b) 混凝土推进活塞或眼镜板磨损严重造成漏浆。操作人员一旦发现冷却水浑浊或水中有浆体。或者向上泵水出现喷射状反流,表明活塞或眼镜板已经磨损,应及时更换,否则将因漏浆和压力损失而导致堵管,同时还会加剧活塞和输送缸的磨损。

4) 浆体离析造成的堵管

浆体遇水容易发生离析,有时泵送浆体时发生堵管,就是因为浆体遇水发生离析。相应的处理措施为:泵前用水浸润管道,从最低点将管道中的水分放掉,或者在送浆之前放入一海绵,将水与浆体分开。泵送完浆体后也要放入海绵,避免用水清洗时于浆体接触发生离析,造成堵管。

5) 气温变化导致的堵管

夏季气温较高,管道在强烈阳光照射下,浆体易脱水,流动性变弱,从而导致堵管,因此在管道上应加盖湿草袋或其它降温用品。冬季应采取保温措施,确保浆体湿度,避免冻结堵管。

5 结语

有经验的浆送泵操作人员通过泵工作声音的微小差异以及泵送压力表读数变化,可以基本上确定是否发生堵管。如果输送压力表突然压力增大或者管道“沙沙”声音变短,则有可能是发生了堵管。

一般在施工过程中堵管发生概率比较大的区域分别是:锥管处、端头软管、弯管处、垂直变化的节点处。对于因部分混合料不良原因发生堵管,可以根据泵管直径推算浆体推进的长度进行排查,决定处理范围。

施工过程中前后场人员配合一定要紧凑,保证浆体施工过程中工作节奏,特别是浆体泵送时的停止等待时间尽可能缩短,如果等待时间比较长可以适当考虑反复进行正泵与反泵,如果(环境温度 30℃以内)时间超过 0.5h 尽量进行泵清洗,具体时间掌握要根据配制浆体的缓凝时间进行确定。

长距离输送浆体在实际中要注意:

- (1) 搅拌站与输送泵之间设置中转仓。
- (2) 注意原材料的选择和配比,有效防止堵管。
- (3) 制定长距离输送安全操作规程。

总之,通过多种措施的综合应用,可以从根本上减少堵管事故,而且若措施得力还可以最大程度减少堵管造成的损失及对工程的影响。

参考文献:

- [1] 《工程机械使用手册》中国水利水电工程总公司编。
- [2] 赵志缙,赵帆,混凝土泵送施工技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1998:36-52.

深层固化搅拌桩质量问题分析

郁盛志, 张威

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 利用深层固化搅拌桩进行基础处理是一项新技术, 该技术已经成功应用于海堤建设中的地基处理上, 并且取得较为理想效果, 但在施工过程中仍有一些问题尚未得到解决, 影响该项技术的大面积推广。本文以宁海县三山涂促淤试验堤项目为研究对象, 介绍并分析了影响深层固化搅拌桩质量的若干因素。

关键词: 深层固化搅拌桩; 施工; 质量问题; 对策

1 引言

国内搅拌桩加固深度一般在 10~15m 左右, 并且在行业内有着“深层水泥石搅拌桩属于柔性桩, 其有效作用桩长不会超过 15m”的说法, 其原因是搅拌桩下部施工质量难以得到保证, 导致荷载不能有效向下传递。笔者经过研究分析并结合宁海县三山涂促淤试验堤项目的实际情况, 认为只要施工工艺运用得当, 该问题能够得到妥善解决。

2 项目简介

宁海县三山涂促淤试验堤项目是三山涂围垦工程前期项目, 位于宁海越溪乡东南侧三门湾沿海海涂, 东临力洋港, 西南濒青山港, 北与越溪相接。试验堤呈 U 型结构, 全长 4872m, 由于三门湾大桥与试验堤跨中正交, 所以交叉部分设计采用桩基础混凝土框架结构。研究和解决深层固化搅拌桩质量问题直接关系该项工程的施工质量。

3 施工情况简介

本项目中淤泥固化搅拌桩采用本公司自行研制的打桩机进行施工, 该设备可以在沿海滩涂软基中进行淤泥固化搅拌桩的施工。施工时, 利用泥浆泵将固化剂浆液输送至打桩机刀头处, 并随着桩机刀头旋转, 将固化剂浆液连续、均匀的喷入软泥中。利用桩机刀头的旋转及纵向提升, 将固化剂浆液与软泥搅拌均匀, 最终形成完整的水泥石搅拌桩, 达到增加基础强度的目的。

施工过程中采用“四搅三喷”施工工艺, 即桩机刀头一共上下来回搅拌四次, 但只有前三次喷出浆液, 第四次空搅。同时, 严格按照设计要求控制刀头下降速度及旋转次数, 保证浆液与软泥混合均匀。固化剂浆液方量及喷浆速度, 由靠近泥浆泵的电磁流量计控制, 并指派专人管理, 随时监控喷浆情况, 以便及时调整喷浆速度, 保证浆液方量满足要求及

浆液均匀输送至桩机。

施工现场配备技术人员,解决施工现场技术问题及控制施工质量,同时记录相关参数,以便专业人员分析问题以及调整或改进施工工艺,达到控制质量的目的。

由于施工场地位于沿海滩涂,施工受潮水影响。为了保证质量,当潮水超过一定高度时,便停止施工。

4 深层固化搅拌桩质量问题 and 产生原因

4.1 当前深层固化搅拌桩的质量问题

在宁海县三山涂促淤试验堤项目中,按照设计要求,打桩深度 10m 范围内桩身强度一致,达到设计要求 1MPa。但是,根据本工程试桩检测取芯结果可知,桩深 6m 以上部分完全符合设计要求,6m 以下部分分层严重,强度显著降低,不符合设计要求。

从实地取芯结果来看,桩深为 6m 以下部分分层严重,有的地方存在严重的水泥富集块,有的地方甚至根本没有水泥浆,这就导致整根水泥搅拌桩强度不足。结合国内外水泥土搅拌桩的实际情况,可以肯定水泥和软泥搅拌不均匀是导致上述现象的主因^[1]。

4.2 深层固化搅拌桩的质量问题产生的原因

业内普遍认为地基土质影响水泥强度增长,但依据搅拌桩规范^[2],当决定用水泥土搅拌桩来处理基础时,先要在室内标准条件下制备不同配比的水泥土试件,进行不同龄期强度试验,确定合适的水泥掺量和外加剂,再依据 90 天龄期的试件强度标准值来计算单桩竖向承载力。本工程开工前依据规范在室内完成了配比试验,获得 90 天龄期试验强度,符合规范要求后才进行搅拌桩施工,因此可以肯定的说,造成该问题的主因并不是土质。

通过分析,导致水泥土搅拌桩分层、搅拌不均匀的原因主要分为技术因素和人为因素两大类,具体如下:

(1) 泵送固化剂流速过大。通过现场对比试验,流量过大直接导致两大缺陷:第一大缺陷是拌合不均匀;第二大缺陷是冒浆严重。第一个缺陷使搅拌桩桩体中水泥与泥土混合不均匀,而二者结合越均匀水泥土强度越高,反之则强度降低。第二个缺陷导致整根搅拌桩中水泥含量降低,不仅质量下降,而且极其浪费材料。

(2) 搅拌次数不足。搅拌次数不足又包括以下几个原因:①喷浆提升速度过快;②叶片数量过少;③搅拌轴上下循环搅拌次数不足。

(3) 搅拌刀头形成泥团。通过现场对比试验,搅拌刀头形成泥团后,提升时有大量水泥浆液冒出,没有形成泥团时冒浆较少或不冒。

(4) 喷浆压力太低。喷浆压力太低,导致出浆集中,直接导致搅拌桩桩身分层严重,进而影响搅拌桩质量。

(5) 固化剂水灰比较大、比重轻。浆液比重过轻,在扬压力作用下,导致浆液来不及与泥土结合就上浮,直接影响搅拌桩下部桩体质量。

(6) 员工技术交底接受差,并未完全按照设计要求进行施工。员工不清楚设计要求,在施工过程中会人为导致各种质量问题。例如,搅拌桩桩杆并未完全打至设计深度、一些

施工细节并未完全遵守等。

(7) 技术人员因素。技术人员不足, 导致相关仪器无法控制, 或相关施工参数无法及时反映等。这些原因也会直接影响搅拌桩的质量。

通过实地试验或比较观察, 得出以上影响搅拌桩质量的主要原因, 由此可知, 只要施工工艺运用得当并且现场施工人员按照设计要求来做, 搅拌桩搅拌不均匀的问题是可以解决的。

5 深层固化搅拌桩的质量问题的解决办法

针对上述影响搅拌桩质量的原因, 项目部通过头脑风暴法从以下几个方面进行解决:

(1) 降低打桩机提升速度, 同时降低泵送浆液流速, 改变喷浆顺序, 增加搅拌次数。该解决方法既可以解决冒浆问题, 也可使浆液与泥土充分混合, 从而提高搅拌桩质量。

(2) 合理设计搅拌叶片形状, 并且适当增加搅拌叶片数量以及搅拌叶片层数, 保证搅拌次数符合设计要求。

(3) 在搅拌刀头处设计去泥团装置, 使搅拌刀头不易形成泥团, 进而降低冒浆量。

(4) 增大喷浆压力, 并且将喷浆出口适当外移, 保证浆液连续、均匀喷出。

(5) 在不影响管道输送的前提下, 适当增加浆液稠度, 或者添加减水剂; 如果施工条件允许, 可以适当采取措施, 降低扬压力。

(6) 定喷。适当定喷可以保证固化桩底部有充足浆液。

(7) 提高操作员工的水平, 尽量保证员工的稳定以及与机器的对应, 并且实施上岗前统一培训制度, 并进行适当考核, 保证操作员了解设计要求。

(8) 合理安排现场技术人员, 要做到主次分明, 技术人员一定要保证主要质量指标满足设计要求, 并且及时记录相关数据, 保证施工参数的准确性。

6 具体解决方案及效果

经技术人员反复研究并结合实际情况, 在不改变固化剂总量的前提下, 采取如下改进方案:

(1) 将原方案中桩机提升速度由 1.6m/min 降低至 1.2m/min。

(2) 将原方案中的喷浆速度由 6.8m³/h 降低至 5.1m³/h。

(3) 在第一喷下降至底部时, 定喷 30 秒后再开始提升。

(4) 保证喷浆压力在 1.1MP~1.2MP 之间, 维持输浆稳定。

(5) 对桩机刀头进行改进, 并且定时用高压水枪冲洗。

(6) 对一线施工人员进行培训, 并且保证桩机上至少有一名熟练操作手。

(7) 调整现场技术人员分工, 保证重要仪器良好运转。

(8) 适当增加固化剂浆液浓度。

经过上述改进后, 基本上解决了冒浆问题, 后期取芯检测结果表明桩身 6m 以下部分固化剂与软泥混合较为均匀, 没有明显分层现象, 抗压强度显著提升, 满足最初设计要求。因此, 深层固化搅拌桩质量问题得到妥善解决。

7 结语

本文中提到的搅拌桩下部分层明显,或缺少水泥浆液而导致搅拌桩不合要求的现象在水泥土搅拌桩施工中普遍存在,只要合理改进施工工艺、提高人员素质,搅拌桩的质量是可以得到保证的。

同时,在施工过程中,浆液流速、搅拌次数、提升速度等关键因素均是相互影响、相互关联的,具体操作时应该系统考虑,这样才能使搅拌桩质量显著提高。

参考文献:

- [1] 何开胜. 水泥土搅拌桩的施工质量问题 and 解决方法, 岩土力学, 2002, 23(6): 778-781 .
- [2] JGJ79-1991, 建筑地基处理技术规范[S].

淤泥原位固化技术在软基预处理工程中的应用

尹镭, 陈富强, 付显阳

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 软土地基处理采用淤泥固化施工技术新材料、新工艺。通过江苏连云港虹港石化有限公司 PTA 一期 TPA 工程项目厂区场区地质情况进不了大型工程机械设备, 经淤泥固化地基处理后解决了工程施工技术难点, 淤泥固化施工技术的新材料、新工艺, 形成了一整套较为成熟的淤泥固化施工技术。淤泥固化施工质量经现场施工全面开实开挖和现检测全部符合设计标准要求, 践表明该施工方法的使用新材料、新技术合理、有效, 对特殊工况下的软基处理提供有效借鉴。

关键词: 软基处理; 淤泥固化; 固化剂; 新材料; 新工艺; 工程应用

1 前言

江苏虹港石化有限公司软基预处理工程位于江苏连云港市徐圩开发区内的江苏虹港石化有限公司 PTA 一期 TPA 工程项目厂区内。该工程基础地质为一种特殊的盐碱性软土地质, 含水量高、盐分大、压缩性高、颗粒细、渗透性差、承载力低, 为项目设计、建设带来极不利的影 响, 必须进行软土基础处理。

由于该工程基础大部分为吹填淤泥, 深厚、软弱, 承载力无法满足工程建设的需求, 必须进行软基预处理。浅层软基加固处理使初期地基承载力达到 80kpa 以上将对后期深层预制管桩施工设备载荷、嵌固管桩提供支持并减少基坑围护。

2 虹港石化软基处理区域情况说明

2.1 地质勘探结果

该工程自上而下划分为 21 个工程地质层:

①层素填土: 黄褐色, 稍湿, 松散, 主要由粘性土组成。场区普遍分布, 厚度: 0.30~0.70m, 平均 0.44m; 层底标高: 1.80~3.30m, 平均 2.48m; 层底埋深: 0.30~0.70m, 平均 0.44m。

②层黏土: 黄褐色, 软塑, 切面光滑, 韧性高, 干强度高。场区普遍分布, 厚度: 1.40~2.80m, 平均 2.08m; 层底标高: -0.70~0.90m, 平均 0.40m; 层底埋深: 1.80~3.20m, 平均 2.53m。

收稿日期: 2015 年 8 月

③层淤泥：灰色，臭，流塑，局部夹粉砂薄层。场区普遍分布，厚度：13.80~14.80m，平均14.25m；层底标高：-14.50~-13.40m，平均-13.85m；层底埋深：16.00~17.60m，平均16.78m。

其它略。

2.2 原土物理力学性质

②层黏土。土工试验指标平均值如下：含水率 $\omega=41.4\%$ ，重度 $\gamma=17.5\text{kN/m}^3$ ，孔隙比 $e=1.196$ ，液性指数 $I_L=0.84$ ，压缩模量 $E_s=2.77\text{MPa}$ ，内聚力 $c=20\text{kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi=8.9^\circ$ 。双桥静探 q_c 标准值 $=0.243\text{MPa}$ ，双桥静探 f_s 标准值 $=15\text{kPa}$ 。

③层淤泥。土工试验指标平均值如下：含水率 $\omega=62.4\%$ ，重度 $\gamma=15.9\text{kN/m}^3$ ，孔隙比 $e=1.775$ ，液性指数 $I_L=1.58$ ，压缩模量 $E_s=1.52\text{MPa}$ ，内聚力 $c=6\text{kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi=1.4^\circ$ 。双桥静探 q_c 标准值 $=0.352\text{MPa}$ ，双桥静探 f_s 标准值 $=9\text{kPa}$ ，其它略。

软基固化区域内地块基本上为滩涂河沟回填淤泥，厚度大、相对地下水位高且土质含水量大，建设单位为方便机械施工已对浅层粘土层基础进行了石灰搅拌固化处理，表层土坚硬但硬壳层以下淤泥层强度极低。

2.3 工程难点

介于上述施工工况，在进行软土地基加固施工过程中，一般工程施工机械设备无法正常进入施工场区作业，施工参数需不断进行调整，为整个工程施工带来难度。

(1) 由于软基处理区域内承载力强度低且分布不均，一般软基固化设备在施工工程中易产生桩杆倾斜现象，不能保证底层固化桩之间的搭接而影响工程施工质量；

(2) 由于基础土层侧向承载力低，已完成预制管桩打设的施工区域内管桩在动荷载作用下易发生侧向位移。为了确保后续管桩施工质量，需针对不同土质采用合理的固化剂配合比及机械施工参数以确保固化处理后土体侧向承载力达到设计强度。

(3) 部分区域表层2~3米的处理范围内存在由于重车碾压而形成的高强度固结土及块石，由于无法预测其具体位置分布，致使固化桩机搅拌叶片极易损坏折断，机械损耗大，影响固化施工进度与质量。

3 固化方案及主要参数控制

3.1 固化方案

软基固化施工采用整体固化，桩间相互搭接，固化深度为6m，典型固化桩施工平面图如图1所示：

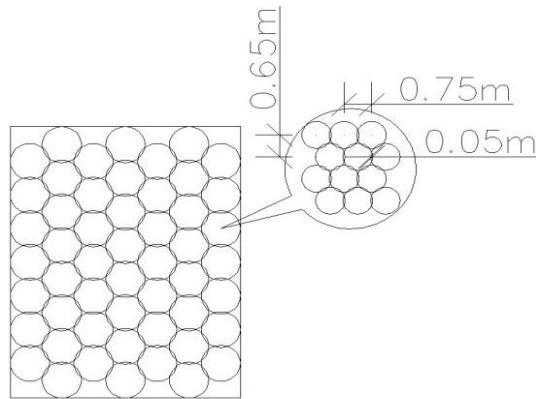


图1 典型固化桩施工平面图

施工机械分为两套系统：固化剂搅拌站及软基固化设备。
整个施工过程中的工艺流程如图2所示：

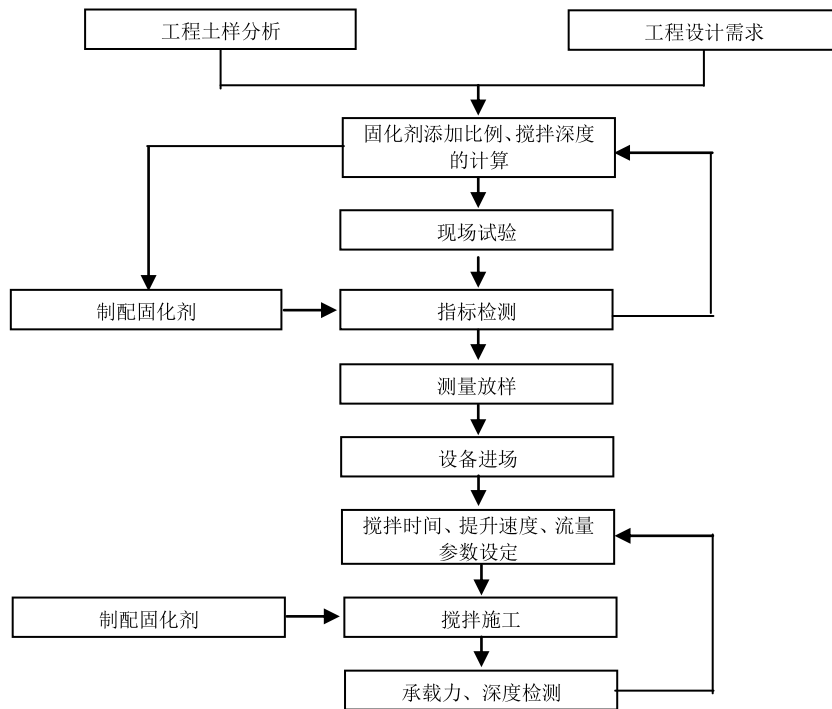


图2 施工工艺流程图

淤泥固化处理所采用的固化设备、固话材料及方法如下：

(1) 固化剂搅拌站。固化剂搅拌站由高低双桶连续搅拌设备、恒压供浆泵及压力输送管道组成，浆液经压力管道输送至软基固化设备，然后通过桩端喷浆孔注入固化土层，喷浆与搅拌同时进行。

(2) 淤泥固化设备。针对虹港石化场区特殊的地质情况,可采用淤泥软基固结机(专利号: ZL 2012 2 0521679.5)进行施工。固化机包含履带式结构的行走系统,操作平台、机械臂和用于将固化剂增加搅拌入淤泥软基中的固化剂搅拌系统,操作平台连接于行走系统机械臂的固定端与操作平台固定连接,机械臂的抓取端与固化剂搅拌系统连接,优点在于采用履带式结构的行走系统能够使该固结机在淤泥软基的硬壳层上自由灵活的行走作业;通过机械臂的抓取端连接一个结构简单的固化剂搅拌系统,能够将固结剂增加搅拌入淤泥软基中,不仅施工效率高,而且固结效果好。见图3。

(3) 固化材料。固化材料采用以粉煤灰、矿渣作为主要材料,同时配以一定比例的水硬性胶凝材料、碱性激发剂、膨胀剂、表面活性剂、减水剂、凝固剂和辅助剂混合而成的固化剂(专利号: ZL 2010 1 0268432.2),使用该固化剂固化速度快、强度高、稳定性好、耐久性强、无污染。另外,该固化剂多采用工业废料,既再生了废弃资源,又创造了社会效益。



图3 履带式淤泥固化机



图4 螺旋式淤泥固化机

3.2 主要参数控制

(1) 搅拌叶片旋转半径尺寸及搭接控制

① 旋转半径

由于固化桩机叶片偏大, 机组易产生损耗、故障。针对虹港石化场区工程地质特点, 经过现场探讨、多次试验, 最终确定采用叶片半径为 40cm 最为合理, 不仅大大降低了机械损耗, 而且间接提升了搅拌转速, 在成桩时间一定的情况下提高了固化土搅拌均匀性。

② 搭接

为了保证整块区域的固化整体性和连续性, 我们对搭接宽度进行了精确计算, 经过经济成本, 施工质量要求及可行性等多方面的比较, 固化土置换率应达到 99.5% 以上, 最终根据叶片直径确定每根固化桩搭接宽度确定为 5cm 时, 整体固化土置换率可达 99.57%。

(2) 钻杆行走速度的确定

当土质强度较大时, 旋转马达功率明显下降, 固化均匀度受到一定影响, 为了保证施工质量必须确保搅拌时间, 根据以往的试验经验, 当钻杆每下沉 1cm 深度时, 该区域内固化土搅拌次数超过 12 次则均匀度达到最佳固化效果。

根据上述已知条件可知:

$$T = \frac{kH}{n_0 \cdot m} \quad (1)$$

式中: T 为每根桩固化时间, min; k 为根据不同土质而确定的每厘米最佳搅拌次数; H 为固化深度, m; n_0 为旋转马达在固化施工过程中的转速, rad/min (最低转速); m 为搅拌叶片数量。

实际施工过程中, 一次性达到每立方米固化土搅拌次数超过 12 次难度大且喷浆时间难以把握, 在软基处理固化施工中, 我们分别进行了双层搅拌叶片、三层搅拌叶片, 以“四搅两喷”、“四搅三喷”、“四搅四喷”的施工工艺进行试桩, 通过在施工质量, 机械使用稳定性等方面的技术比较, 最终确定拟采用“三层六刀片错位分布, 四搅两喷”的施工方法最为合理, 能确保固化施工的均匀连续性及固化桩机的正常运行。当土质强度较大时, 旋转马达功率明显下降, 固化均匀度受到一定的影响, 固化施工班组技术管理人员即可根据公式重新调整钻杆行走速度以确保施工质量。

(3) 固化剂掺入量及水灰比的确定

根据土样工程分类、天然含水率、固化土基础承载力特征值等按表 1 选取, 固化剂掺入比 α 按下式计算:

$$\alpha = \frac{m_{c0}}{m_{s0}} \cdot 100\% \quad (2)$$

式中: m_{c0} 为每立方米固化土的固化剂用量 (kg/m^3), m_{s0} 为每立方米固化土的湿土用量 (kg/m^3)。

表1 固化剂掺入比选用表

土样工程分类	土的天然含水率/%	水灰比	地基承载力特征值/kPa	固化剂掺入比/%
淤泥质粘土及粉土	>10, <30	0.7	≤80	6~8
			≥100	9~10
	≥30, ≤70	0.5~0.65	≤80	9~10
			≥100	11~12

4 淤泥固结技术对软土地基的固化作用

淤泥固结技术是通过淤泥固化设备直接将固化剂与地基中淤泥质软土均匀搅拌混合的施工技术。固化剂充分发挥了淤泥单元矿物成分中硅酸盐的活性，快速产生固化反应，不仅与淤泥颗粒相界面产生牢固结合，而且能与淤泥颗粒中的活性物质反应生成膨化胶凝物质，同时还可以把重金属、有机物封存，防止有害物质的溶出；使土体自身强度大幅提升的同时，还具有较好的水稳性和耐久性。见图5。

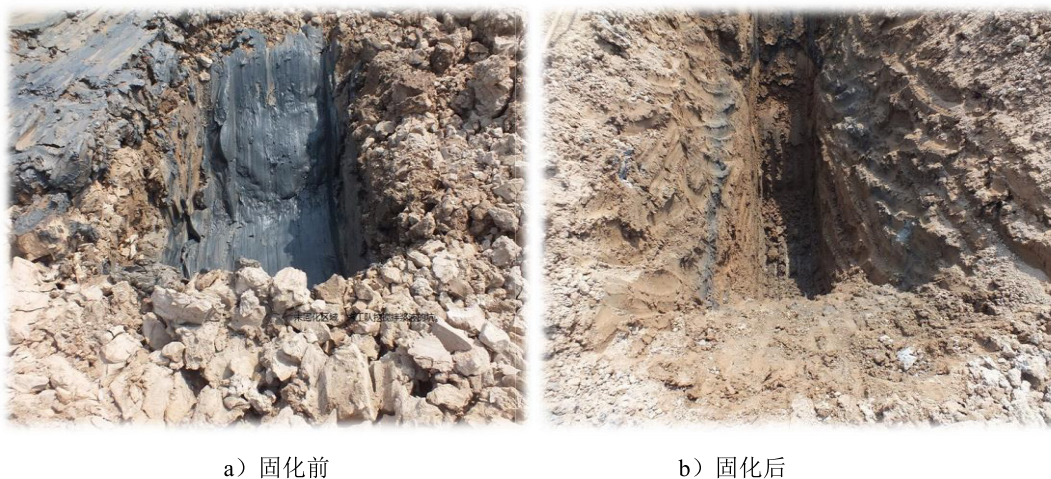


图5 原位固化效果图

无锡水文地质勘察院对施工区相关区域(1#、2#试验点)进行了载荷板试验,按照《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)进行检测,检测结果见表6。

根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)的规定,结合相关试验结果,认定1#、2#试验点承载力特征值达到100kPa。可见通过淤泥固化技术处理之后的软土地基承载力已达到软基预处理工程技术要求。

表6 载荷板试验成果汇总表

荷载/kPa	累计沉降量/mm	
	01#	02#
40	0.31	0.27
60	0.56	0.50
80	0.85	0.74
100	1.23	1.05
120	1.72	1.42
140	2.17	1.82
160	2.72	2.39
180	3.56	2.96
200	4.52	3.61

5 结语

综上所述,在硬壳软基处理工程中应从固化剂的选材,配合比,施工机械及施工方法等方面采取一系列措施,并通过对不同龄期固化土承载力进行监测来调整和指导施工。施工实践证明,本工程所采用的淤泥固化技术较好的满足了施工质量要求,取得了良好的处理效果。

淤泥固化在改善软基动力特性中的应用

胡海龙, 王杰, 郑亮, 姜欢悦

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 海涂围垦后是以淤泥、淤泥质土为主的软土, 不能直接为工程所用, 如何改善海涂的工程特性, 既能改良性质差的围涂淤泥, 又能提供建设用土, 在沿海滩涂区的开发利用上具有相当重要的意义。淤泥原位快速固化技术主要针对滩涂、沼泽等软基, 通过固化设备将固化剂与需要固化处理的软土进行充分混合, 使得淤泥单元矿物成分中的硅酸盐矿物的活性得以充分发挥, 产生固结反应, 不仅在淤泥颗粒相界面牢固结合, 而且能与淤泥颗粒中的活性物质反应生成胶凝物质, 使淤泥丧失流动性, 产生较强的竖向承载力和抗侧向压力, 使地基能够承受较大静荷载的同时, 也能够满足较大的动荷载要求。从而改善土壤力学属性, 实现淤泥软基的原位固结。

关键词: 淤泥固化; 地基处理; 动剪切模量

1 引言

随着经济的发展, 土地资源越来越成为限制地方经济发展的重要限制因素, 特别是沿海地带, 人口密度大, 土地资源紧缺, 寸土寸金的现象更加明显, 海涂围垦成为缓解这一问题的的重要途径, 但海涂围垦后形成的区域内, 地质条件中广泛分布着深厚的淤泥层, 因淤泥性地质, 承载力差, 并且具有较大的流动性, 因此无法满足工程建设及生活生产对地基的承载力要求, 更无法满足动荷载对地基的要求。淤泥原位快速固化技术, 无需针对土层进行开挖, 仅利用原位淤泥固化机械对土层进行搅拌, 同时喷出固化剂, 使得固化剂能与需要固化的土层中土壤充分搅拌混合均匀, 然后经过固化剂与土壤间的固结反应和胶凝作用, 使得淤泥及淤泥质土的各项指标得到很大的提高, 使淤泥丧失流动性, 使得固化区域内的地质, 形成一个整体, 具有较强的承载能力及抗剪切力的性质, 使得原本无法满足工程建设及生产生活的淤泥质地质条件, 经固化后能够满足工程建设的需求。

2 沿海地质和淤泥原位快速固化技术

2.1 沿海地区地质情况

我国沿海地区未被开发的土地资源较大一部分属于淤泥质土地资源, 在土地资源日趋紧张的现今, 将此部分现阶段较少开发利用到的土地资源开发出来, 为日常生活生产所用, 是一件具有较高的实用性、经济性、合理性及绿色环保工程项目, 然而淤泥的主要特性是:

天然含水率高于液限,孔隙比多大于1.0;干密度小,一般只有 $0.8\sim 0.9\text{g}/\text{cm}^3$;压缩性特别高,压力自 $98\text{N}/\text{m}^2$ 增加到 $196\text{N}/\text{m}^2$ 时,压缩系数为 $a_{1.2}>0.05$,压力自 $98\text{N}/\text{m}^2$ 增加到 $294\text{N}/\text{m}^2$ 时,压缩系数 $a_{1.3}>0.1$;强度极低,常处于流动状态,并且淤泥的自然结构变化十分敏感,结构及其强度受力破坏后能自动复原,这就是所谓的触变性。因为它会产生不均匀沉降,使建筑物产生裂缝、倾斜、影响正常使用,故淤泥不宜作天然地基,并且由于沿海地区地质条件中,淤泥层一般覆盖较厚,处理起来难度较大,若采用传统压密、夯实,用垂直砂井排水等工艺,除造成工程量巨大以及处理难度大外,处理后效果一般。

2.2 淤泥原位快速固化技术

淤泥原位快速固化技术主要是针对滩涂、沼泽等软基基础,利用淤泥固化施工机械,将固结材料直接在上位上与淤泥质软基搅拌均匀,经过一系列物理-化学反应,实现淤泥质软基的原位固结。在实际工程应用中,淤泥原位快速固结技术具有经济环保、工程量小、施工周期短、施工简便等优点。

淤泥原位快速固化技术应用于工程施工前,应针对特定的施工项目土层地质情况进行分析,并且使用工程项目的土质情况现场采集样土,经过固化剂掺加量配比实验,分析不同固化剂掺加量的固化土的土力学性质,再根据工程设计要求,结合工程的经济性、安全性得出最优固化剂掺加量。

3 实际工程中的应用

本次选用江苏连云港某地海涂围垦工程为例,分析淤泥原位固化技术在实际工程中应用。

3.1 工程地质情况

地基处理工程地质区域隶属于华北地层区。上部为第四系全新统滨海、海陆交替相(Q^{4m+mc})淤泥质土及粘性土,下部为上更新统冲洪积(Q_3^{al+pl})粘性土及砂土,基底为元古界(Pt)风化片麻岩。场地原为盐场水库。根据岩(土)层地质时代,成因类型、岩性及工程地质特征,勘测深度范围内的岩(土)体,自上而下划分为20个工程地质层。此次列举对工程施工影响较大的三层土体。

(1) ②层淤泥质黏土:软塑,饱和,土质均匀,干强度及韧性低,夹淤泥,厂区普遍分布,厚度 $1.0\text{m}\sim 3.4\text{m}$,平均 1.88m ,土工试验指标平均值如下:含水率 $\omega=50.3\%$,重度 $\gamma=17.4\text{kN}/\text{m}^3$,孔隙比 $e=1.334$,液性指数 $I_L=1.09$,压缩模量 $E_s=2.43\text{MPa}$,内聚力 $c=10\text{kPa}$,内摩擦角 $\phi=3.8^\circ$ 。双桥静探 q_c 标准值 $=0.387\text{MPa}$,双桥静探 f_s 标准值 $=28\text{kPa}$ 。

(2) ③层淤泥质黏土夹淤泥:流塑,饱和,土质均匀,干强度及韧性低,夹淤泥,含贝壳碎片。场区普遍分布,厚度 $11.90\sim 15.00\text{m}$,平均 13.49m ,土工试验指标平均值如下:含水率 $\omega=52.1\%$,重度 $\gamma=17.2\text{kN}/\text{m}^3$,孔隙比 $e=1.394$,液性指数 $I_L=1.13$,压缩模量 $E_s=2.32\text{MPa}$,内聚力 $c=9\text{kPa}$,内摩擦角 $\phi=3.2^\circ$ 。双桥静探 q_c 标准值 $=0.327\text{MPa}$,双桥静探 f_s 标准值 $=13\text{kPa}$ 。

(3) ④层粉质黏土:可塑,土质均匀,有光泽,含铁锰氧化物,零星钙质结核,干

强度及韧性中等。厚度：0.30~2.10m，平均 1.04m，土工试验指标平均值如下：含水率 $\omega = 30.7\%$ ，重度 $\gamma = 19.2\text{kN/m}^3$ ，孔隙比 $e = 0.833$ ，液性指数 $I_L = 0.65$ ，压缩模量 $E_s = 5.57\text{MPa}$ ，内聚力 $c = 31\text{kPa}$ ，内摩擦角 $\phi = 9.7$ 度。双桥静探 q_c 标准值=0.749MPa，双桥静探 f_s 标准值=15kPa。

3.2 方案设计原则

根据勘测报告和地基处理的设计要求动剪切模量 $G \geq 18\text{MPa}$ ，固化深度要求达到 18m，根据设计计算确定合理淤泥固化方案，以满足地基处理 G 值要求。

3.3 淤泥固化设计

根据地基处理要求，结合本项目实际情况，淤泥固化设计主要解决以下两个问题：固化后地基土 $G \geq 18\text{MPa}$ 、固化剂掺加量。

3.4 淤泥快速固化技术现场应用

根据设计要求，根据室内试验及现场实验检测数据结果（均值），如下表 1，确定此次固化剂掺入量：

表 1 固化剂掺量分析

序号	固化剂掺入比/%	水灰比	孔隙率	塑性指数
1	8%	0.65	1.79	24.1
2	10%	0.65	1.50	23

动剪切模量 G_d 值按如下公式进行计算：

$$G_d = 99.5 \times P_a^{0.305} \times \frac{q_e^{0.695}}{e_o^{1.13}} \quad (1)$$

其中： G_d 为动剪切模量； P_a 为大气参考压力，0.101325MPa； q_e 为锥尖阻力，由试验室经验公式求得； e_o 为初始孔隙比。

经验算当水灰比为 0.65，固化剂掺加量为 6%~8%时， G_d 值为 15.6MPa，固化剂掺加量为 9%~10%时， G_d 值为 19.5MPa。此次工程选取固化剂掺加量为 10%。

3.5 整体固化施工工艺流程：

(1) 测量放样

根据设计要求，用全站仪放出施工区域并进行桩位布置。

(2) 桩机就位、调试

深层淤泥固化桩机移到指定桩位，调试机械，确保安装稳固。调试各施工参数，确定喷浆量、水灰比、转速、提升下沉速度、喷浆压力、搅拌次数、搅拌深度、垂直度等。

(3) 第一次喷浆下沉

施工参数调试确定后正常施工，开启浆泵，待浆液到达喷浆口，边搅拌边下沉。按确定的下沉速度，使其将浆液均匀地喷入土中，喷入量为设计浆液掺量的 50%。

(4) 第一次搅拌提升

搅拌头下沉到达处理深度后，关闭浆泵，空搅提升，使淤泥土和浆液充分搅拌均匀严格控制提升速度。

(5) 重复喷浆下沉

深层淤泥固化桩喷浆提升到设计标高后，再次开启浆泵。重复第一次喷浆下沉。

(6) 重复搅拌提升

搅拌头第二次下沉到设计深度以后，再次关闭浆泵提升至设计位置。

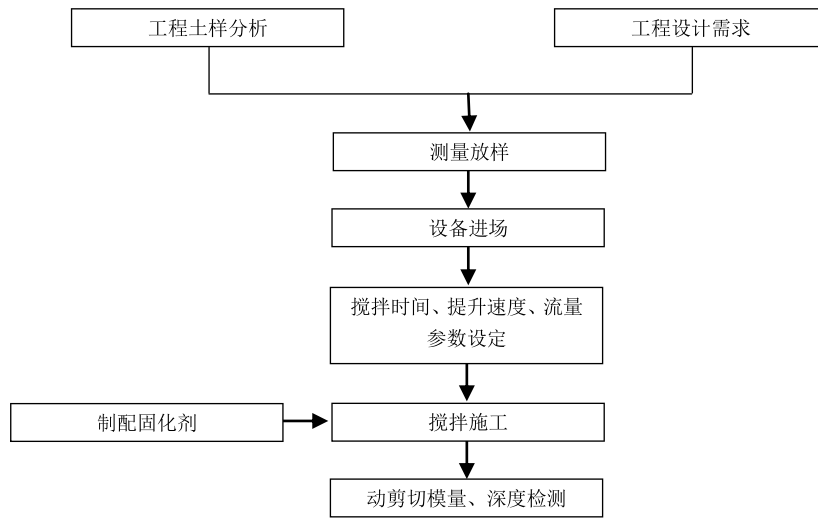


图1 固化施工工艺流程

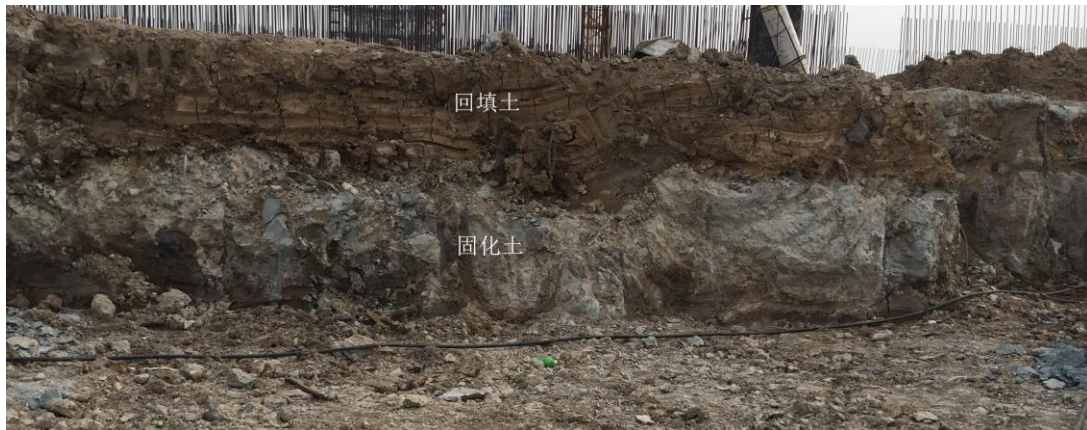


图2 固化完成效果图

3.4 试验检测结果与分析

本次检测动剪切模量 G_d 值, 在固化土经过大于 28d 养护后进行, 采用剪切波速测试方法确定, 同时采用标准贯入法及室内土工试验法进行固化效果检测。

试样进行室内土工试验, 测定固化前后土体的含水率、重度、液塑限、直接剪切强度。含水率采用烘干法, 重度采用环刀法, 土粒比重试验采用比重瓶法, 界限含水率采用滚搓法塑限试验及圆锥仪法液限试验, 直接剪切强度采用四联电动直剪仪测得。

现场对加固后土体进行剪切波速测试, 测试自地面下 1.0m 深度开始, 其下测点间距 1.0m。待其测试仪器通电正常后, 激发震源和接收记录波形信号。当记录波形清晰完整后, 移动震源和检波器, 将其移至下一测点, 如此重复, 直到完成检测。

确定土层密度和剪切波速后按下式计算土层的动剪切模量:

$$G_d = \rho v_s^2 \quad (2)$$

式中: G_d 为土层的动剪切模量, kPa; ρ 为土层的质量密度, g/cm^3 ; v_s 为土层的剪切波速, m/s。

固化前后剪切波速实验及剪切模量变化曲线见图 3:

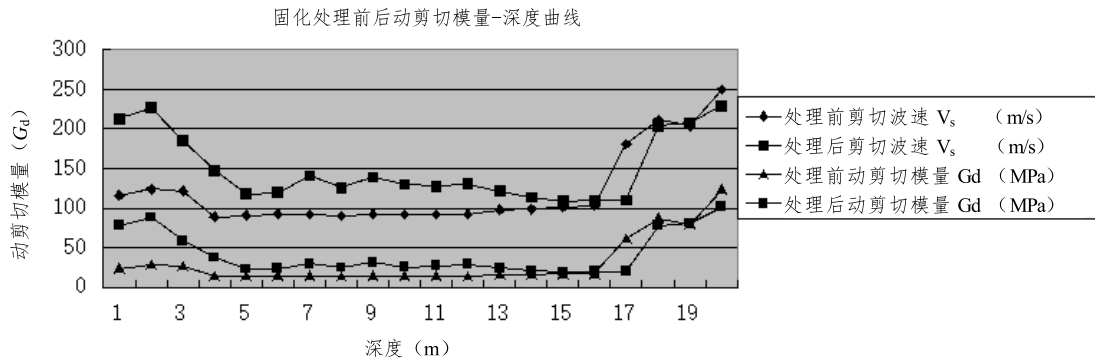


图 3 剪切波速及动剪切模量曲线

未处理前各土层动剪切模量值见表 2, 固化处理后各土层动剪切模量值见表 3。

表 2 固化处理前土层动剪切模量

层号	土层名称	层底深度/m	密度 ρ_g/cm^3	剪切波速 $v_s/\text{m/s}$	动剪切模量 G_d/MPa
① ₁	素填土	0.9	(1.85)	116	24.9
① ₂	粘土	3.8	1.82	123	27.5
② ₁	淤泥质粘土	13.2	1.72	92	14.6
② ₂	粘土	16.8	1.65	100	16.5
③ ₁	粉质粘土夹粉土	19.3	1.92	202	78.3

表3 固化处理后土层动剪切模量

层号	土层名称	层底深度/m	密度 ρ_0/cm^3	剪切波速 $v_s/\text{m/s}$	动剪切模量 G_d/MPa
① _{-I}	固化土	3.3	1.72	208	74.4
① _{-II}	固化粘土	4.2	1.72	148	37.7
② _{-I}	固化淤泥质粘土	14.9	1.62	127	26.1
② _{-II}	固化粘土	17.6	1.66	110	20.1
③ _{-I}	粉质粘土夹粉土	未揭穿	1.90	214	87.0

注：①_{-I}为原①_{-I}填土及①₋₂固化粘土，①_{-II}对应原①₋₂粘土固化处理土，②_{-I}对应原②_{-I}淤泥质粘土固化处理土，②_{-II}对应原②₋₂层粘土固化处理土。

由表2及表3得出固化处理前后动剪切模量-深度曲线图4，及剪切波速及动剪切模量-深度曲线图5。

根据此次工程施工实例，经检测发现，经过淤泥原位快速固化技术处理后，土体剪切波速大大增加，各土层动剪切模量明显上升。

在针对沿海地区淤泥质土壤处理方面具有良好的效果，特别是针对传统压密、夯实，用垂直砂井排水等工艺较难处理的深层淤泥，具有非常明显的优势。

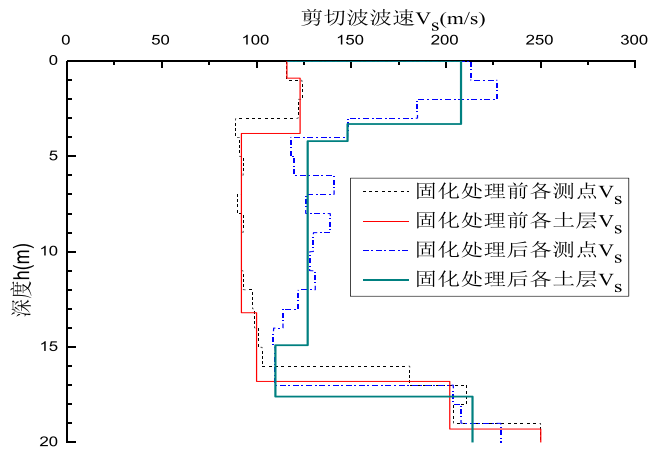


图4 试验段固化处理前后剪切波波速—深度曲线

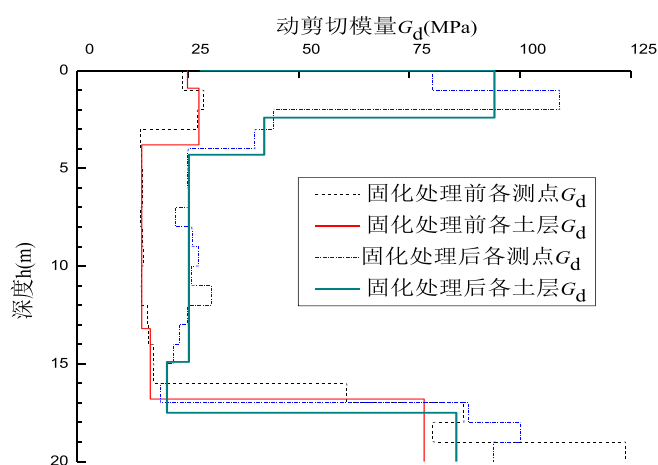


图5 固化处理前后动剪切模量—深度曲线

4 结语

淤泥原位快速固化技术主要是针对滩涂、沼泽等软基基础，利用淤泥固化施工机械，将固结材料直接在原位上与淤泥质软基搅拌均匀，经物理-化学反应后，改善淤泥各项土工性质，使其具有较强承载力，具有复合地基效果好、抗水平力大、抗侧滑移效果好、工后沉降小、深厚软基处理有特效、施工速度快、工艺简单、成本低、质量稳定、泥浆污染少等优点，在海涂围垦、高速铁路、公路软地基处理、深基坑支护、普通建筑物的基础处理、特别在沿海地区地质条件中淤泥层较厚地区具有显著优势，本文针对淤泥原位快速固化技术方面作出较为详细的阐述，希望能够对淤泥固化施工带来一定的参考作用。

参考文献：

- [1] 王晓东, 蒋建. 淤泥处理技术研究综述[J]. 科技资讯, 2009, 10: 154-157.
- [2] 唐强. 浅谈淤泥的资源化利用[J]. 水利发展研究, 2004, 10: 46-49.
- [3] 中国土木工程协会. 土木工程可持续发展指南[M]. 中国建筑工业出版社, 1999.
- [4] DB 33 /1001-2003 浙江省建筑地基基础设计规范[S].
- [5] 张春雷. 淤泥固化土力学性质及固化机理研究[D]. 南京; 河海大学, 2003.
- [6] 董邑宁, 徐日庆等. 固化剂 ZDYT-I 加固土研究[J]. 岩土工程学报. 2001, 23(4): 472-475.
- [7] SL237-1999 土工试验规程[S].

淤泥固化技术在滩涂路基工程中的应用

李金柱¹，金礼祥²，曹俊杰³，张伟芳²

(1.浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 2.温州市瓯江口开发建设投资集团有限公司, 浙江 温州 325026; 3.宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 我国沿海地区有着大量的滩涂资源, 随着发展海洋经济步伐的加快, 滩涂资源得到越来越多的开发利用。传统的技术条件下, 滩涂软基的处理工期长、处理费用高, 制约了滩涂资源的进一步开发。淤泥固化技术是直接原滩涂面进行处理, 提高土体强度和承载力, 并有效减小工后沉降, 降低路基处理费用, 为滩涂路基提供了一种新型的处理技术, 已成功应用于温州浅滩二期围涂工程路基淤泥固化处理项目中, 加固效果良好。

关键词: 滩涂路基; 淤泥固化; 承载力; 沉降; 工期

1 概述

自 2008 年 2 月《国家海洋事业发展规划纲要》颁布实施以来, 我国沿海地区建设迎来了二次快速发展的时期, 建设用地的需求不断扩大, 造成许多地区土地资源紧张, 严重制约了海洋产业经济的进一步发展, 滩涂开发利用成为缓解这一问题的有效手段。目前, 在我国的天津、江苏、浙江、广东等省市, 正进行着大规模的滩涂开发利用工程。

滩涂开发利用虽为我国发展国民经济的重大举措, 然而滩涂淤泥的地基处理成为工程建设中的一个棘手问题^[1]。与一般软土地基相比, 滩涂淤泥具有颗粒细、孔隙比大、含水率大、塑性高、渗透性低, 强度低(基本为零)等特点, 当前工程中普遍采用真空预压的方式进行处理, 真空预压是一项比较常规且比较成熟的基础处理方法^[2]。

路基处理要求处理工期短、工后沉降小, 但是真空预压法受工艺限制, 处理工期相对较长, 地基承载力提高有限, 且处理后地基基础的工后沉降也较大^[3]。对此国内外许多学者对此进行了一系列的研究, 取得了许多有意义的研究成果^[4-5], 为滩涂淤泥的处理提供了一定的参考。

2 淤泥固化技术简介

淤泥固化技术, 即在淤泥中添加由水泥、矿粉、粉煤灰、石灰、石膏等材料按一定配比制成的固化剂, 进行搅拌混合, 制成淤泥固化土。掺入的固化剂与淤泥之间发生一系列物理、化学作用在淤泥土粒表面形成胶凝物质, 使土粒形成具备一定网状骨架和被填充空

隙并具有一定水稳定性和强度稳定性的土体,并不断凝结硬化,从而使淤泥分散的单元结构渐变为具有一定整体强度的结构。经该技术处理后的淤泥固化土孔隙比减小,含水率降低,压缩性减小,其强度和稳定性较之淤泥有极大幅度的提高,同时固化土的透水系数很小,可避免有害物质溶出造成污染^[6-9]。

滩涂路基淤泥固化技术采用螺旋式淤泥固化机,施工时不受淤泥承载力低的限制,通过双螺旋滚筒的旋转达到在淤泥软基上直接行走的目的。淤泥固化技术通过输送系统向淤泥中注入固化材料,通过强制搅拌使淤泥和固化材料充分拌匀结合,发生胶凝反应,固化施工 28 天即可达到设计承载力指标,可以从很大程度上缩短工程的整体工期。该方法充分发挥了淤泥单元矿物成份中硅酸盐矿物的活性^[10],产生胶凝固化反应,不会在固化范围内产生压缩沉降,不需后期二次处理,节约资源,减少对周边环境和生态的影响。

3 工艺分析

3.1 施工准备

施工前应做好以下技术准备:

- (1) 场地清理:施工前应将场地予以平整,清除施工区域内地上地下的大型障碍物;
- (2) 设备调试及供浆试验:根据设计调整设备的下钻、提升速度和搅拌速率,并结合固化材料添加量调试设备供浆速率,然后根据设定的供浆压力及供浆流量进行供浆试喷,保证喷浆压力能达到设计深度和成桩半径;
- (3) 固化剂浆液配置:原材料的储存应保证储存容器的干燥,不同的材料分别储存;固化剂的配置应根据设计材料的配比按重量称重计量配置。

3.2 固化施工

固化施工时应按以下顺序进行:

- (1) 设备定位:按设计施工图放样,确定相应施工区位、机位,控制施工边线,搅拌头对准相应桩号位置。
- (2) 下钻喷浆搅拌:启动搅拌马达与升降马达,搅拌头沿着导向架向下钻,边喷浆、边搅拌,严格控制下钻速度与喷浆流量。随时观察设备运行及地层变化情况,搅拌头下钻至设计深度位置时,开始提升。
- (3) 提升喷浆搅拌:搅拌下钻至设计深度,定喷完成后,提升复喷复搅,边喷浆、边搅拌,严格控制提升速度,保证固化剂浆液与土体充分拌和;最后,上升至工作基准面停止喷浆。
- (4) 复搅:为确保淤泥土层与固化剂材料搅拌均匀,进行二次搅拌不喷浆,即下钻搅拌不喷浆与提升搅拌不喷浆。
- (5) 移位:根据施工顺序移至进行下一桩位,重复以步骤进行施工;若固化机一次定位多次作业时,搅拌杆在桩架上横移至其根据桩间距设定的刻度点;或固化机移至下一工作机位。

滩涂路基淤泥固化技术施工工序简要步骤如图 1 所示。

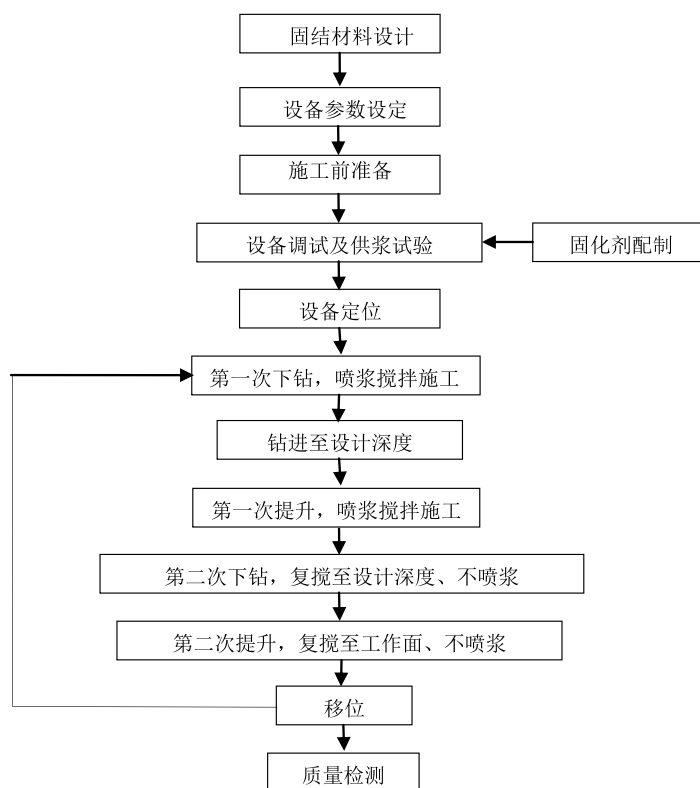


图1 施工工艺流程图

3.3 质量控制

固化施工时应注意以下几点:

- (1) 配置好的固化剂浆液在储存罐内必须不间断搅拌, 保证浆液均匀不沉淀, 且配置好的浆液 1h 内必须用完, 超过时间不得使用, 同时需清除储存罐内沉积的材料;
- (2) 施工前和施工期间, 应不间断监控供浆压力和供浆流量数值, 发现异常及时处理;
- (3) 施工应保证桩杆的垂直度, 放样保证准确无误, 设备对中、定位误差控制在一定范围内, 保证相邻桩位的搭接, 以满足路基淤泥固化基础连续性、均一性的要求;
- (4) 控制固化剂的添加量应控制固化剂浆液的水灰比、配比、固化剂浆液的流量等因素;
- (5) 定时复核钻杆提升、下钻速率、搅拌速率, 保证搅拌的均匀度;
- (6) 每次施工应保证连续性, 中途不得中断喷浆、搅拌, 如引起中断施工, 该桩位必须重新施工。

4 工程应用

温州浅滩路基淤泥固化处理项目位于温州浅滩二期围涂工程围区内，围区内为吹填淤泥，局部吹填已达 4.0 米高程，吹填完成近一年。吹填淤泥为流塑，含水量 84.2~97.9%，土体颗粒细、压缩性高、孔隙比大，基础承载力小，施工机械无法进入进行基建施工，本工程需要将场地处理为地基承载力特征值 $\geq 80\text{kPa}$ 适于机械施工的场地。

工程采用淤泥固化技术，根据场地地质情况使用 10%固化剂、20%激化剂、0.7 水灰比配制掺和料，使用螺旋式淤泥固化机按照上述淤泥固化工艺对路基淤泥进行固化处理。上部土层整体固化，间隔布置深层固化桩，固化桩桩径 1.0m，整体固化深度 2.0m，间隔固化桩深度 7.0m（置换率为 22.6%），如图 2 所示。

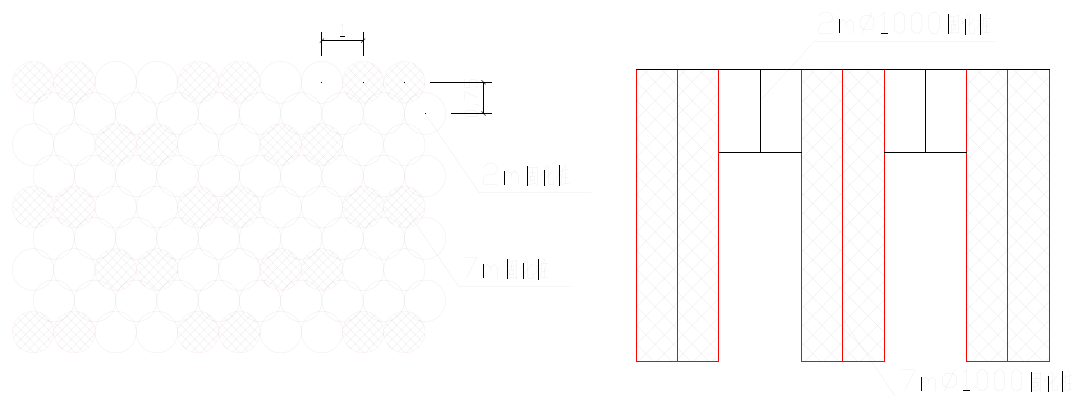


图 2 淤泥固化地基处理方案示意图

7 天龄期的固化土无侧限抗压强度达到 0.93MPa，远超设计指标；路基淤泥固化后 28 天即可达到设计指标，固化效果如图 3 所示。若采用真空预压法，需经过两次真空预压处理，单次真空预压工期 3 个月，两次真空预压工期需 6 个月，则工期太长。本施工区域需处理淤泥层较厚，换填法也不适用。故淤泥固化法处理软土路基在工期和适用性上有很大的优势。

路基处理费用方面，结合理论分析计算和实际处理费用考虑，淤泥固化处理费用也远远低于其他处理工艺，且淤泥固化法施工期基本无沉降，处理后的路基工后沉降很小，基本上不需要砂石等资源，也从侧面降低了路基处理的难度。



图3 固化现场施工



图4 固化效果

5 结语

淤泥固化法作为一项新的软基处理技术,具有工期短、造价低、工后沉降小、处理后基础承载力高、效果好等特点,淤泥固化可广泛应用于沿海滩涂、围区吹填土路基的基础处理工程,加快沿海围垦造地的步伐,为沿海经济发展提供强有力的保障。

参考文献:

- [1] 王晓东, 蒋建. 淤泥处理技术研究综述[J]. 科技资讯, 2009, (10): 154-155.
- [2] 刘汉龙, 董志良, 沈扬等. 大面积超软地基复式负压快速固结技术开发与应用[J]. 地基处理, 2014, 25(4): 16-21.

- [3] 谢雪. 天津滨海新区软土路基处理方案研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
- [4] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002, 1-33.
- [5] 冯仲仁, 朱瑞赓. 我国高速公路软基处理研究的现状与展望[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(1): 78-80.
- [6] 曹玉鹏, 卞夏, 邓永锋. 高含水率疏浚淤泥新型复合固化材料试验研究. 岩土力学, 2011, 32(增 1): 321-326.
- [7] 李奇云. 浅析淤泥化学固化的原理[J]. 江苏水利, 2011, (8): 32-34.
- [8] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 62-68.
- [9] 李琴, 孙可伟, 徐彬等. 土壤固化剂固化机理研究进展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(9): 64-67.
- [10] 王振军, 翁优灵, 杜少文. 矿渣粉加固粉土的理论分析及路用性能研究[J]. 工程地质学报, 2006, 5: 709-714.

Application of silt solidification technology in beach roadbed engineering

Abstract: Coastal areas have a lot of beach resources, and with the development of marine economy and utilization of marine resources, the traditional technical needs long duration, high processing costs to deal with the tidal flats subgrade. Silt solidification technology is directly processed in the original mudflat surface, improving soil strength and capacity, and effectively reducing the settlement after construction, reducing processing costs, which provides a new process technology for the tidal flats subgrade. It has been successfully applied in Wenzhou shoal Phase II reclamation project roadbed sludge solidification processing projects, getting good reinforcement effect.

Keywords: beach roadbed; silt solidification; bearing capacity; settlement; construction period

淤泥原位固结技术在围堰工程基础中的应用

周龙, 郑恩喜, 余朝伟

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要: 本文简单介绍了一种淤泥软基处理的淤泥原位快速固化处理方法, 结合实际工程详细介绍了该技术在工程应用中的施工参数控制以及质量管理方法, 并说明取得的实际效果。

关键词: 淤泥原位快速固结技术、质量控制方法

1 引言

外海滩涂区域建设水闸和船闸, 围堰受基础条件限制, 多采用土石围堰和吹砂管袋或钢板桩围堰, 但由于钢板桩造价较高和施工条件的限制, 一般不采用; 由于外海滩涂多为深厚淤泥质土, 土石围堰和吹砂管道围堰受基础施工条件的限制, 一般采用塑料排水板排水固结, 但固结时间较长, 一般 3~6 个月。该技术的研究应用提升了海堤施工中的围堰施工技术, 在施工造价和工期、工程安全上占有绝对优势, 缩短了整个工程的进度, 可提高我公司的竞争力, 同时该技术还可解决软基工程中的防渗加固支护处理、河道边坡支护、滨海地下建筑物开挖支护, 对整个行业的技术进步有了促进推动作用。

2 工程概况

奉化市象山港避风锚地建设项目位于奉化市裘村镇象山港北侧, 本围堰工程为船闸、水闸临时围堰, 围堰位于外海滩涂区域, 基础为深厚淤泥质土, 围堰总长 660 米, 围堰结构为吹砂管带+外侧抛石镇压, 按设计要求本工程围堰设计标准为汛期 10 年一遇高潮位加安全超高, 围堰顶高确定为 5.0m, 施工工期 3 个月。

表 1 土层物理力学性质指标

岩土名称	天然含水率/%	比重 Gs	饱和度/%	固结快剪		压缩模量 Es (0.1-0.2MPa) /MPa
				粘聚力/kPa	内摩擦角/°	
淤泥	62.8	2.75	98.9	7.0	2.2	1.84
淤泥质黏土	47.9	2.75	98.2	7.6	1.4	2.29
含粘性土	30.2	2.65	-	-	-	2.87
粉质黏土	27.7	2.73	92.7	36.8	16.3	5.89

3 设计方案

3.1 结构形式

围堰基础及内侧防渗支护处理 26 米，采用双柱梅花形淤泥固化处理技术，断面形式如图 1 和图 2。

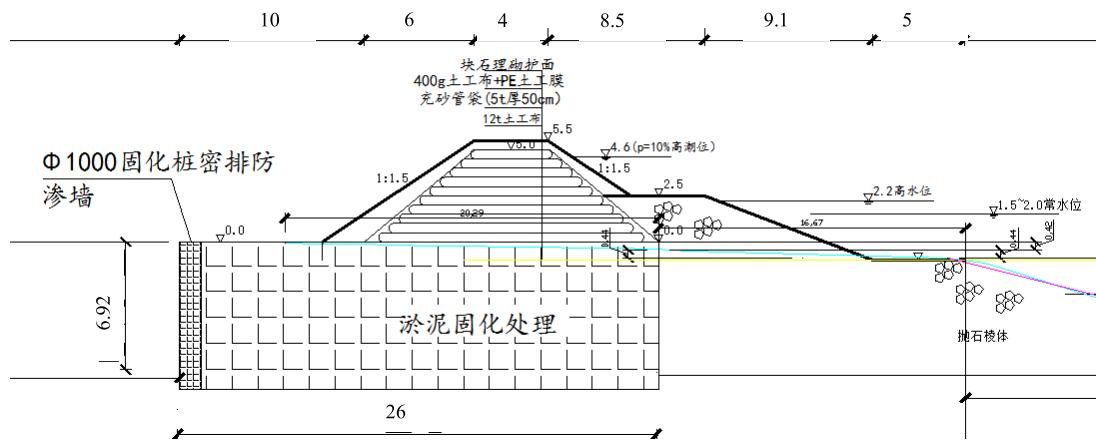


图 1 围堰淤泥固化加固断面图

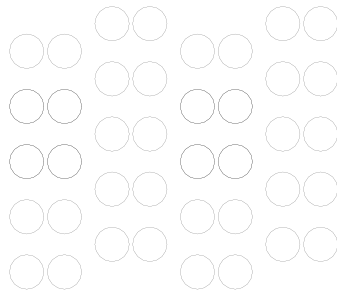


图 2 双柱梅花型桩

3.2 稳定计算

复杂软土地基堤坝设计计算结果如下：

最不利滑动面：

总的下滑力= 178.931 (kN)

总的抗滑力= 209.028 (kN)

土体部分下滑力= 178.931 (kN)

土体部分抗滑力= 118.413 (kN)

筋带的抗滑力= 90.615 (kN)

地震作用下滑力= 0.000 (kN)

其中，滑动圆心= (42.714283,21.250000) (m)

滑动半径= 13.238203 (m)

滑动安全系数= 1.168

4 施工过程

4.1 施工工艺

经过前期试桩，确定本工程的施工参数为：桩长 8m、掺量 8%、水灰比 0.7、升降速度 1.5m/min、转速 50r/min、浆液比重 1.3、四搅二喷、喷浆量 49l/min，设计强度指标：0.8MPa。

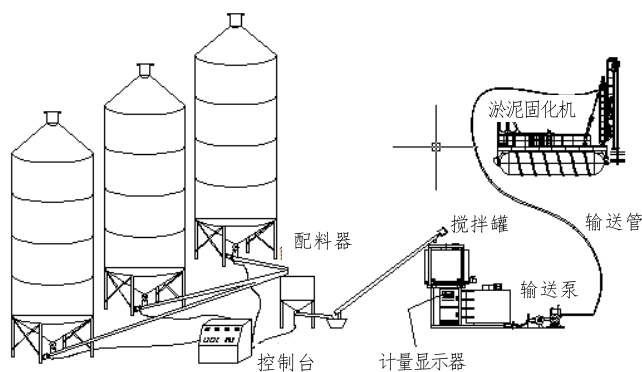


图3 施工工艺流程图

4.2 质量控制方法

根据类似技术的成桩质量情况来看，由于淤泥软基地质情况的复杂性，往往导致施工桩的取芯质量问题情况较多，主要有：强度不足、不均匀、贝壳混杂、含沙量大、草根杂物多、底部浆液不足等等。

在本工程的应用实施过程中，专门针对淤泥原位快速固结施工的质量管理，采取“班组自查、技术人员复核”的方式，总结了一套质量控制方法及记录表格，以保证施工质量，满足设计强度指标，介绍如下。

(1) 固化剂材料及浆液配制控制

a) 选择诚信可靠的原材料供应商,对每种原材料随机抽样检测,对每种原材料做好入库登记,保证其供应的持续性以及使用的有效性。

b) 浆液配制:配料员按每吨固化剂材料和所需用水量进行配制,并记录每种材料重量技术人员每班进行复核检查。

(2) 固化剂浆液输送

每台搅拌桩杆都配置一台供浆压力泵和一个流量计,在施工前开泵操作手根据流量计读数调节好供浆压力,保证供浆量并记录每根桩的浆液用量。若发现浆液用量不能满足要求时,及时调整供浆压力,保证浆液用量。

4.3 固化施工过程控制

本过程主要由技术人员对相关设定参数进行复核,即升降速度、搅拌转速,进而推算搅拌均匀性是否满足要求,具体介绍如下:

(1) 固化机定位与桩位控制:严格按设计施工图放样,表明横向和纵向距离,确定每个桩点,淤泥固化机定位准确率对中允许不大于 $\pm 5\text{cm}$,桩位偏差不大于 $\pm 3\text{cm}$ 。

(2) 喷浆压力与升降速度控制

根据设定的下钻与提升速度,确定固化剂添加量与钻杆下钻和提升完成一次所需时间,设定喷孔大小与供浆压力及供浆时间三者吻合。技术人员复核测试升降速度,并计算对应浆液输送流量是否满足公式(1),并及时调整。

$$Q = \frac{3.14r^2 \times n \times (1+m) \times v \times \gamma}{a \times \rho} \quad (1)$$

式中: Q 为泵输送流量, m^3/min ; r 为桩半径, m ; n 为固化剂添加比例; γ 为泥浆容重, kg/m^3 ; m 为水灰比; v 为升降速度, m/min ; a 为喷浆循环次数; ρ 为固化剂容重, kg/m^3 ;

(3) 搅拌速度与均匀度控制:

根据《原位淤泥快速固结施工工法》,土体和固化剂的搅拌要求达到20次以上。技术人员复核测定的设备搅拌器回转转速,并结合提升速度,叶片数量与厚度,进行搅拌次数计算。如发现不满足要求,应及时调整,保证施工质量。

搅拌桩杆提升或下钻一次土体和固化剂的拌合次数,按公式(2)计算:

$$G = \frac{n \times h \times \sum Z}{V} \quad (2)$$

(4) 桩底定喷搅拌控制:

启动旋转马达与升降马达,边喷浆、边下钻搅拌,严格控制桩杆下钻和旋转速度,桩杆下沉至设计深度位置时,定喷10~20秒,保证桩底质量。

5 实施效果

表5 不同龄期钻孔取芯检测平均力学指标 (单位: MPa)

龄期	配比	抗剪(q)		抗压强度/MPa
		粘聚力 c/kPa	内摩擦角/°	
3天取芯		41	17	0.57
7天取芯	8%	/	/	0.96
28天取芯		/	/	1.27

注: 由于固化后土体强度高, 7天龄期抗剪指标已无法试验检测, 所以力学指标检测只有3天的抗剪强度。

由上表可知, 淤泥固化强度高、速度快, 各龄期强度之间关系如下:

$$q_{u,3} \approx 0.45q_{u,28} \quad q_{u,7} \approx 0.76q_{u,28}$$



图4 固化桩芯

6 结论

本文中详细介绍的质量控制方法是专门针对淤泥原位快速固结新技术而总结得出的, 也是在本工程中得到充分应用的一套方法, 经过实施, 取得了明显的施工效果, 固化桩完整性好、均匀性好、强度达标, 为今后该技术的应用项目提供了宝贵的经验和方法。

参考文献:

- [1] 陈富强, 俞元洪, 余朝伟等. 海淤泥快速固结技术研究与应用[J]. 中国水利, 2011, 8: 43-44.
- [2] 《原位淤泥快速固结施工工法》. 中国水利部编.

淤泥固化在软土路基处理中的应用

郑恩喜, 王杰, 曹道彬, 胡海龙

(宁波高新区围海工程技术开发有限公司, 宁波 315040)

摘要: 淤泥固化是将一定的固化材料按最佳比例掺入淤泥中, 利用其与淤泥的化学反应形成固化层, 具有强度高、稳定性好等特点。本文以某道路路基作为研究对象, 阐述淤泥固化在处理软土地基中的施工方法及成果。

关键词: 淤泥固化剂; 软土地基; 承载力; 弯沉值

1 引言

滨海地区软土地基的承载力低、地下水位高、土质盐渍化而具有强腐蚀性、土源干缩严重, 且因地而异、因层而异, 具有很强的不可预见性等特点。随着我国沿海地区大规模的围海造地, 软土地基处理成为施工中经常遇到的难题之一。传统的水泥搅拌桩法、山石抛填法、高压注浆法等工程造价昂贵, 污染环境, 从长远来看是不可行的, 为响应“可持续发展”战略方针的号召, 我公司推出了“淤泥固化技术”。本文着眼于“淤泥固化技术”在道路软土路基处理的案例, 来阐述其施工方法及成果。

2 工程概况

该工程地址区域隶属于华北地层区, 上部为第四系全新统滨海、海陆交替相 (Q_4^{m+mc}) 淤泥质土及粘性土, 下部为上更新统冲洪积 (Q_3^{al+pl}) 粘性土, 基底为元古界 (Pt) 风华片麻岩。基底构造以北东向为主, 无活动性断裂, 属较稳定地块。原始地势平坦, 地面标高最大值 3.40m, 最小值 2.39m, 地表相对高差 1.01m; 后期全场地回填约 0.4-0.8m 的淤泥, 回填后整个场区高程约为 3.8m。(此道路所在地层概况详见表 1)

表 1 地层概况

层序	地层名称	层底深度/m	分层厚度/m	地基土承载力特征值 f_{sk} /kPa	预制桩设计参数	
					极限端阻力标准值 q_{pk} /kPa	极限侧阻力标准值 q_{sk} /kPa
1	素填土	0.50	0.50	/	/	/
2	粘土	2.10	1.60	50	/	/
3	淤泥	11.90	9.80	40	/	/
4	粘土	13.00	1.10	200	/	65

收稿日期: 2015 年 9 月

续表 1

层序	地层名称	层底深度/m	分层厚度/m	地基土承载力特征值 f_{ak}/kPa	预制桩设计参数	
					极限端阻力标准值 q_{pk}/kPa	极限侧阻力标准值 q_{sk}/kPa
5	粘土	16.00	3.00	170	/	61
6	粉质粘土	19.50	3.50	160	/	54
8	粉质粘土	23.00	3.50	210	1400	63
10	粉砂	29.10	6.10	220	4400	74
11	粉质粘土	29.90	0.80	220	3000	64
12	粉砂	31.50	1.60	200	4000	58
13	粉砂	35.80	4.30	210	4200	69
14	粉质粘土	37.60	1.80	230	3200	86
15	细砂	40.00	2.40	240	5000	114

3 设计方案

(1) 淤泥固化剂配方见表 2

表 2 固化剂配方

序号	材料名称	单位	1T 用量
1	粉煤灰 (二级)	kg	350
2	矿渣	kg	300
3	熟料 (已磨)	kg	300
4	石膏	kg	50

(2) 淤泥固化剂设计掺量为 8%，处理后的成果要求：处理后承载力达到 200kPa, 弯沉值不大于 220 (0.01mm)；处理深度 1.2m。

(3) 道路基础设计断面见图 1。

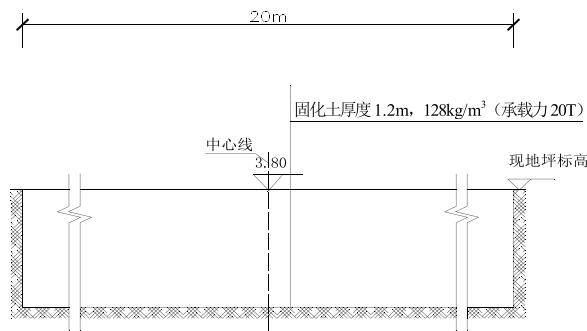


图 1 道路基础断面 (单位: m)

4 施工工艺

4.1 总体施工程序

此次固化施工采用旋耕机匀拌（挖机初拌，见图2）后分层摊铺碾压，严格控制各层的层厚和标高。

总体施工程序：

上层土方开挖→下层土铺料→下层土固化搅拌→下层土碾压→上层土固化搅拌→运输或转运→回填碾压→路基的养护

4.2 分项施工工艺

（1）固化搅拌

- a) 根据设计掺量要求，按土方量掺入相应量的固化剂。要求配料准确，拌合均匀；
- b) 施工方法：先用挖机将固化剂掺入软土中，再用旋耕机匀拌，见图3；
- c) 搅拌控制方法：按照配比掺量进行施工区域划分，严格控制固化剂掺量；
- d) 固化搅拌后，无固化剂块状物质，色泽一致、均匀；
- e) 雨季节施工时，应采取措施，保护好固化剂和已搅拌待摊铺的固化土，防止渗水或雨淋。



图2 挖机搅拌



图3 旋耕机匀拌

(2) 回填固化土控制

a) 回填厚度控制：分三层施工

基层：压实土厚度控制在 45~50cm（松铺厚度不大于 55cm）；

路基封层：压实厚度控制在 30~40 cm。

b) 回填时间控制：

上、下两层固化土回填摊铺碾压的间隔时间原则上为 24 小时以上。

(3) 碾压要求

遵循先边后中、先轻后重、先慢后快的原则。一般来说，先静压，后弱振动碾压，终平时采用静压。

碾压机械：采用 8T 的轻型压路机碾压 3~4 遍，见图 4。



图 4 压路机碾压

(4) 工后养护

a) 固化土路基顶面应覆盖草垫、薄膜或土工布进行养护，若实际施工条件衔接较紧，则采用洒水方式养护，养护期间固化土路基表面不得有积水现象。

b) 路基养护龄期为 14 天，若固化土路基养护得当，土体强度增长较快，养护龄期可大于 7 天。整个养护期，淤泥固化土的强度处于不断地增长状态，在其养护未达到要求养护龄期之前，禁止各类车辆通行，尤其是重载车。

c) 路基养护结束后，必须将覆盖物清除干净，拆除覆盖后，不能立即检测弯沉、地基承载力等指标，需在路基顶面固化土的水分适当蒸发后（不高于路基顶层碾压时的含水率）进行。

5 检测结果

该路基经淤泥固化土施工结束后 28 天，委托第三方检测单位进行了道路路基的弯沉和浅层平板载荷试验。

(1) 弯沉试验检测结论：检点总数=80，温度系数=1.0，保证率系数=1.645，平均值=138.90，均方差=24.54。该路段经检测，弯沉代表值为 179.27 (0.01mm)，详见表 3，符

合设计要求。

表3 道路弯沉试验

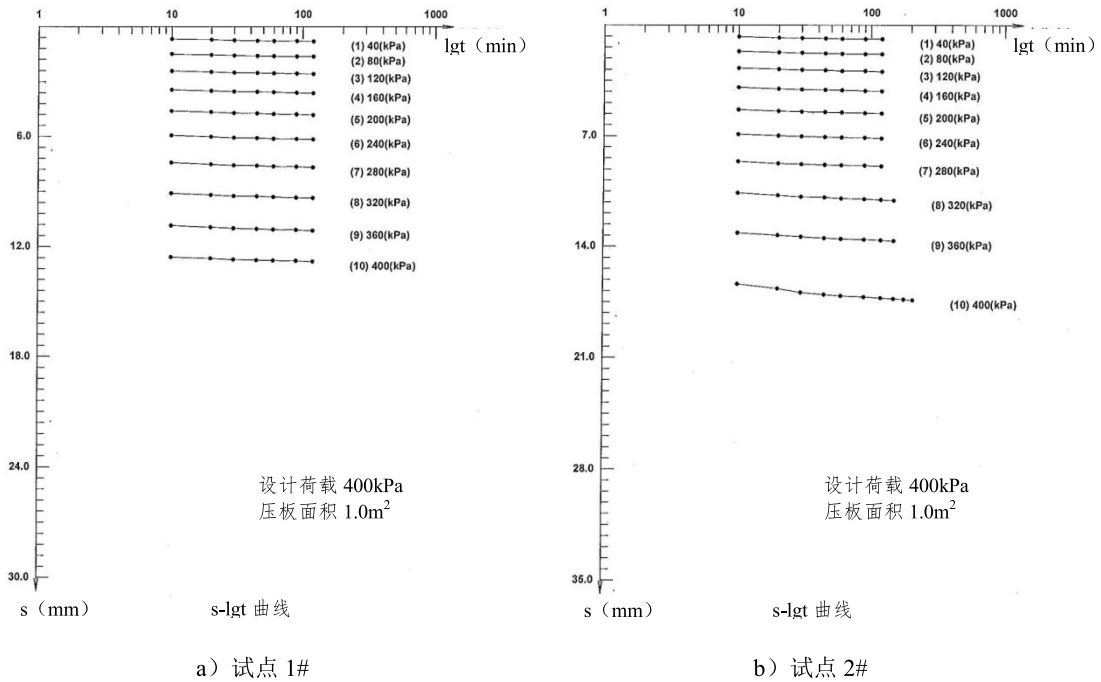
序号	桩号	弯沉标准值/ 10^{-2} mm			
		左轮	评定	右轮	评定
1	K0+010	104	合格	162	合格
2	K0+030	136	合格	148	合格
3	K0+050	128	合格	110	合格
4	K0+070	148	合格	126	合格
5	K0+090	180	合格	102	合格
6	K0+110	118	合格	144	合格
7	K0+130	128	合格	136	合格
8	K0+150	142	合格	112	合格
9	K0+170	136	合格	162	合格
10	K0+190	164	合格	116	合格
11	K0+190	170	合格	142	合格
12	K0+170	130	合格	170	合格
13	K0+150	134	合格	134	合格
14	K0+130	120	合格	140	合格
15	K0+110	150	合格	174	合格
16	K0+090	138	合格	102	合格
17	K0+070	146	合格	128	合格
18	K0+050	178	合格	152	合格
19	K0+030	174	合格	172	合格
20	K0+010	150	合格	118	合格
21	K0+010	100	合格	170	合格
22	K0+030	112	合格	130	合格
23	K0+050	108	合格	128	合格
24	K0+070	100	合格	106	合格
25	K0+090	158	合格	124	合格
26	K0+110	154	合格	142	合格
27	K0+130	126	合格	106	合格
28	K0+150	110	合格	104	合格
29	K0+170	144	合格	152	合格
30	K0+190	160	合格	100	合格
31	K0+190	122	合格	146	合格
32	K0+170	174	合格	172	合格

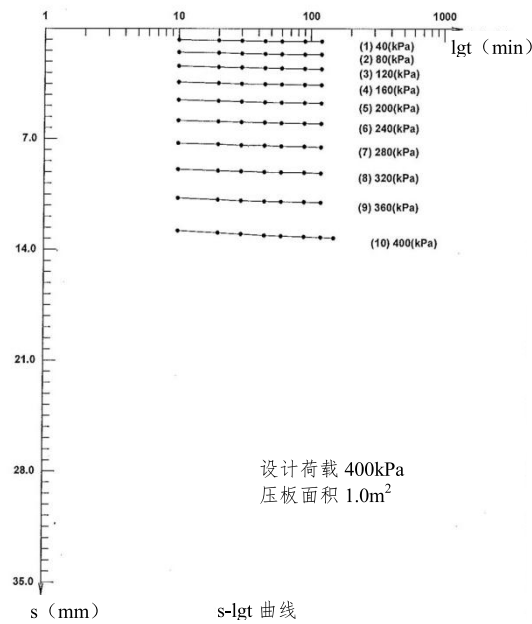
续表 3

序号	桩号	弯沉标准值/ 10^{-2} mm			
		左轮	评定	右轮	评定
33	K0+150	158	合格	120	合格
34	K0+130	170	合格	168	合格
35	K0+110	174	合格	100	合格
36	K0+090	174	合格	108	合格
37	K0+070	164	合格	104	合格
38	K0+050	156	合格	174	合格
39	K0+030	138	合格	126	合格
40	K0+030	128	合格	178	合格

(2) 浅层平板载荷试验过程: 1#点自第一级荷载 40kPa 加载开始, 经过 1080min 的实验观察, 第 9 级荷载 360kPa 已达到稳定, 加载到第 10 级荷载 400kPa, 经 120min 观察, 达到稳定, 累计沉降量 12.84mm; 2#点自第一级荷载 40kPa 加载开始, 经过 1140min 的实验观察, 第 9 级荷载 360kPa 已达到稳定, 加载到第 10 级荷载 400kPa, 经 210min 观察, 达到稳定, 累计沉降量 17.41mm; 3#点自第一级荷载 40kPa 加载开始, 经过 1080min 的实验观察, 第 9 级荷载 360kPa 已达到稳定, 加载到第 10 级荷载 400kPa, 经 150min 观察, 达到稳定, 累计沉降量 17.41mm。

浅层平板载荷实验结论: 1#、2#、3#试点的地基承载力特征值均为 200kPa, 均满足设计要求。详见地基载荷试验曲线图, 如下:





c) 试点 3#

图 5 地基荷载试验

6 结语

通过本工程软土路基淤泥固化处理过程,可以得出以下结论:淤泥固化技术在处理软土地基时,具有固化速度快、淤泥固结强度高、稳定性好、环保等优点。这种环保型技术,对创建节约型社会有着极为深远的意义,市场前景十分广阔。因此,淤泥固化技术值得我们投入更多的精力去研究。

参考文献:

- [1] 范公俊. 固化淤泥的收缩性质及其控制措施研究. 硕士学位论文[D]. 南京: 河海大学环境科学与工程学院, 2007.
- [2] 肖兵, 罗海兵, 周莉. 淤泥固化技术在处理城市道路软土路基中的应用[J]. 市政技术, 2012, 5: 70-71.
- [3] 刘俊, 蒋宏伟, 程海波. 浅谈淤泥固化技术在中新天津生态城中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2012, 12: 178-181.