

DOI: 10.11779/CJGE2015S1030

# 黄骅港地区深层水泥土搅拌桩施工工艺研究

陈富<sup>1, 2, 3</sup>, 李海涛<sup>4</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222;

3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222; 4. 沧州黄骅港矿石港务有限公司, 河北 沧州 061113)

**摘要:** 水泥土搅拌桩是黄骅港地区广泛使用的软土地基处理方法, 但容易出现施工质量问题。结合黄骅港地区水泥土搅拌桩现场检测结果, 系统分析了两种主要水泥土搅拌桩施工质量问题。为探究水泥搅拌桩施工质量问题的原因, 通过室内3种水泥掺量不同龄期的室内水泥土试验排除了水泥掺量及土质等因素。通过比较室内水泥土配合比试验与水泥搅拌桩现场施工的差异, 指出施工质量问题的主要原因在于现场施工工艺因素。最后介绍了两个有效的水泥搅拌桩施工工艺改进, 首先介绍双向搅拌工艺在该地区的成功应用并提供了相关检测数据以供参考, 然后介绍扇形后喷浆钻头施工工艺能够有效解决上述两种施工质量问题。

**关键词:** 黄骅港; 水泥土搅拌桩; 现场检测; 室内配合比试验; 双向搅拌; 搅拌钻头

**中图分类号:** TU472      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2015)S1-0156-05

**作者简介:** 陈富(1986-), 男, 工程师, 主要从事岩土工程地基处理等方面的工作。E-mail: chenfu@tpei.com.cn。

## Construction technology of cement deep mixing piles in Huanghua Port region

CHEN Fu<sup>1, 2, 3</sup>, LI Hai-tao<sup>4</sup>

(1. CCCC- Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering,

Ministry of Communication, Tianjin 300222, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China;

4. Cangzhou Huanghuagang Ore Port Co., Ltd., Cangzhou 061113, China)

**Abstract:** The cement deep mixing (CDM) pile is a widely-used method for soft ground treatment in Huanghua Port region. However, construction quality problems easily occur. Based on the field inspection results of CDM in Huanghua Port region, two construction quality problems of CDM are systematically analyzed. In order to investigate the causes of construction quality problems, indoor mix proportion tests on three contents of cement under different test periods are conducted to exclude such factors as content of cement and soil texture. Through the comparison of difference between indoor mix proportion tests and field construction of CDM, the field construction technology is pointed out to be the main cause of quality problems. Finally, two effective construction technique improvements of cement deep mixing pile are proposed. The successful application of bidirectional mixing technique in the Huanghua Port region is introduced, and the relevant inspection data is provided for reference. In addition, a fan-shaped back-spraying stirring head is demonstrated to be an effective construction technique to solve the two above construction quality problems.

**Key words:** Huanghua Port; cement deep mixing pile; field inspection; indoor mix proportion test; bidirectional mixing; stirring head

## 0 引言

深层水泥土搅拌桩是用于加固软土地基的一种常用方法, 适用于处理正常固结的淤泥、淤泥质土、素填土、黏性土(软塑、可塑)、粉土(稍密、中密)、粉细砂(松散、中密)、中粗砂、饱和黄土等土层<sup>[1]</sup>。它利用水泥作为固化剂, 通过特制的搅拌机械和输浆泵, 在地基深处将软土和固化剂强制搅拌混合, 利用固化剂和软土之间所产生的一系列物理化学反应, 使软土硬结成具有整体性、水稳定性和较高地基承载力

的复合地基。

相比于其他的软土地基处理方法, 水泥搅拌桩施工工艺有以下优点:

(1) 施工速度快、工期短, 不需要地基土固结时间, 打设成桩后28 d就可以进行上部构筑物施工;

(2) 施工过程中不产生挤土效应, 适用于大面积软土地基处理;

(3) 处理后复合地基承载力一般能达到 120 kPa 以上, 适用于承载力要求较高的构筑物地基处理;

(4) 能够较好地控制工后沉降, 适用于轨道梁等工后沉降要求较高的构筑物。

水泥土搅拌桩的缺点是施工质量不易保证, 一般容易发生两种质量问题: 一是下部桩体的水泥掺入量太少, 尤其遇到塑性较大的饱和黏土层, 水泥浆液很难注入到黏土的空隙中, 而是沿着钻杆与土的孔隙返到地表, 造成下部桩体水泥掺量较少。二是水泥浆与土搅拌不均匀, 水泥浆和土没有均匀的混合并产生硬化反应。这就要求一方面在施工过程中采用可靠的施工工艺来保证水泥浆掺入量和搅拌效果, 另一方面加强钻芯检测和复合地基承载力检测, 及时发现问题并调整改进施工工艺。

黄骅港地区位于渤海湾西侧, 为典型的淤泥质海岸港口。近几年在黄骅港综合港区大规模建设过程中对于淤泥质黏土广泛采用水泥搅拌桩工艺进行地基处理, 本文重点介绍黄骅港地区的水泥土搅拌桩实际施工中的试验研究及检测数据以供参考。

## 1 现场检测结果分析

### 1.1 现场施工质量问题

黄骅港综合港区多用途码头集装箱吊车轨道梁位于真空预压加固后的吹填土场地, 地表下 7 m 深度内为吹填疏浚土, 其下为原海底黏土层, 采用水泥搅拌桩复合地基, 每条轨道梁基础下有两排水泥搅拌桩, 横向间距为 1.1 m, 纵向间距为 1.0 m (改造段) 或 0.9 m (新建段)。水泥搅拌桩直径 0.5 m, 桩长为 15 m。采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 水泥掺入量约 20%, 水灰比为 0.55。施工单位在前期主要采用大扭矩单轴单向搅拌钻机进行水泥土搅拌桩施工, 二(或三) 喷六搅。由于钻机提升过快及钻头黏土黏附等原因, 现场检测发现大量不合格桩。分析现场检测发现的不合格水泥土搅拌桩, 主要有以下两种原因:

(1) 该场地存在较厚的淤泥质黏土层, 施工中出现的主要问题是钻头搅拌不均匀、地面返浆量较多。根据现场检测结果, 水泥浆大多集中在地表下约 7.0 m 深度范围内, 7.0 m 以下的水泥浆快速减少, 造成了下部水泥掺入量严重不足。同时, 由于黏土黏附搅刀, 跟随钻头一起转动形成包裹体, 造成了水泥土搅拌不均匀。在水泥掺入量尚能保证的 7.0 m 深度范围内, 水泥浆没有与地基土充分搅拌均匀硬化成整体, 而是出现软土中零星分布水泥块的现象。该类型的不合格桩在整个场地普遍分布, 比较有代表性的桩号 13-230-S 的水泥搅拌桩的钻芯无侧限抗压强度试验结果 (试验龄期 37 d) 如图 1 所示。

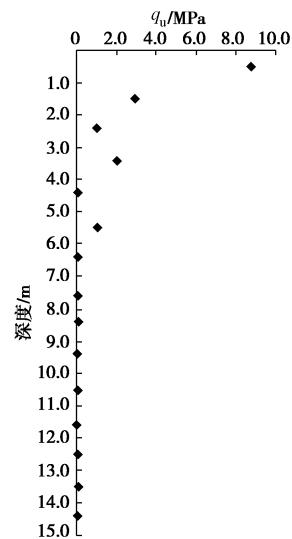


图 1 13-230-S 钻芯无侧限抗压强度试验曲线

Fig. 1 Test curve of 13-230-S unconfined compressive strength of core samples

(2) 该场地 6 轴轨道梁中段地表下约 3.0~10.0 m 范围内有较厚的粉砂层, 由于砂土较密实摩擦力较大造成钻头的负载扭矩较大, 施工困难。经现场检测发现, 在该粉砂层施工后的水泥搅拌桩的质量很好, 双重管钻芯芯样 28 d 龄期无侧限抗压强度强度能够达到 6.0~8.0 MPa, 最高可达 12.0 MPa。从试样破坏面形态可以发现, 试样整体性较好, 呈现出明显的脆性破坏, 基本可以看作砂浆试样。但粉砂层以下的黏土层的水泥掺入量快速减少, 导致下部水泥土搅拌桩桩体强度很低, 造成不合格桩。比较有代表性的桩号 6-920-S 的水泥搅拌桩的钻芯无侧限抗压强度试验结果 (试验龄期 51 d) 如图 2 所示。

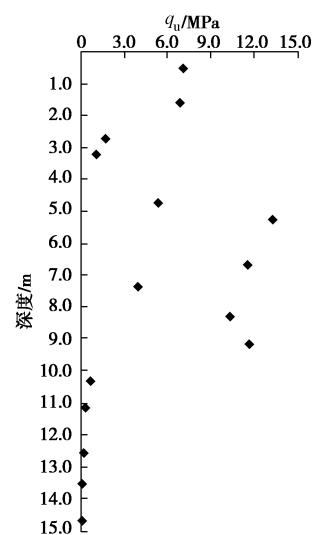


图 2 6-920-S 桩钻芯无侧限抗压强度试验曲线

Fig. 2 Test curve of 6-920-S unconfined compressive strength of core samples

### 1.2 水泥土室内配合比试验

针对现场水泥土搅拌桩施工在淤泥质黏土层中出

现的质量问题,受业主委托,利用施工现场的淤泥质黏土进行了一系列室内配合比试验。分别进行了20%,22%,25%三种水泥掺量的水泥土试样的7,14,28,45天龄期的无侧限抗压强度试验,共12个试验组。为了尽可能消除对比试验的干扰因素,每试验组均6个试样,试样为直径50 mm、高度100 mm的圆柱体。2012年9月19日至2012年10月27日分别进行了7,14,28,45 d 4个龄期的无侧限抗压强度试验,通过观察试样的破坏面,均呈现较好的整体性和脆性破坏,形成较为明显的破坏椎体,试样破坏形态如图3所示。3种水泥掺量的水泥土试样各个龄期的无侧限抗压强度试验的结果见表1。



图3 试样破坏形态

Fig. 3 Failure mode of sample

表1 3种水泥掺量不同龄期无侧限抗压强度试验结果

Table 1 Test results of unconfined compressive strength of three cement contents under different test periods

水泥掺量 /%	龄期 /d	平均值 /MPa	变异系数
20	7	1.98	0.17
	14	4.20	0.12
	28	5.80	0.10
	45	6.06	0.13
22	7	2.21	0.13
	14	3.66	0.11
	28	5.74	0.03
	45	7.46	0.07
25	7	2.80	0.07
	14	4.25	0.12
	28	6.49	0.08
	45	7.36	0.07

室内配合比试验结果表明,3种水泥掺量的7 d龄期的强度就能达到2.0 MPa左右,并且随龄期增长能够增长到6.0~7.0 MPa左右,后期强度增长较慢并

最终停止。25%水泥掺量水泥土试样无侧限抗压强度试验结果比20%水泥掺量的试验结果增大20%左右,但后者也远远超出28 d龄期2.0 MPa的设计强度要求。

室内配合比试验结果说明黄骅港地区的淤泥质黏土完全可以与水泥产生硬化反应,排除了水泥掺量及黄骅港地区土质等原因。为了找到水泥搅拌桩施工质量问题的原因,需要进一步对现场施工工艺进行重点分析。

## 2 施工工艺研究

室内水泥土配合比试验的结果都能满足设计要求,而现场施工中为什么却出现大量不合格桩?经分析,室内水泥土配合比试验与现场水泥搅拌桩现场施工主要存在以下差异:

(1)室内配合比试验能够保证设计要求的水泥掺量,现场施工中经常出现地面返浆造成水泥浆浪费的现象,从而导致水泥掺量小于设计值。

(2)室内试验借助搅拌机配合人工搅拌,能够最大限度地保证水泥浆和地基土的拌合均匀性,使两者能够硬化成整体,现场施工中由于钻头喷浆和搅拌叶片黏附包裹体等原因经常出现搅拌不均匀的现象。

(3)室内试验水泥土装入试模后进行振动密实以消除试样内部空洞,而现场施工中不存在该振动密实过程。

因此,在现场施工中只要保证水泥掺量和搅拌均匀性,在淤泥质黏土层中也完全可以施工出合格的水泥土搅拌桩。为了保证水泥掺量和搅拌均匀性,一方面需要提高施工人员的责任心,做到精心施工,避免因追求施工进度而放松对各个施工参数和质量的控制;另一方面需要加强对水泥土搅拌桩施工工艺的改进,提高施工效率和合格率。

下面结合黄骅港地区水泥土搅拌桩现场施工检测结果,介绍两个比较有效的施工工艺改进。

### 2.1 双向水泥土搅拌桩施工工艺

双向水泥土搅拌钻机利用钻机顶部的转换箱分别驱动两根套在一起的同心钻杆正反方向转动,内外钻杆分别焊接搅拌叶片,水泥浆在下层叶片处喷出到土中,然后通过上下两层叶片的正反方向相向转动来使水泥土混合均匀<sup>[2]</sup>。2013年3月,双向水泥土搅拌钻机厂家技术人员进行现场试桩,严格按照施工参数进行施工,可以排除施工人员责任心不强的问题。共完成12根双向搅拌桩无侧限抗压强度试验,分别采用20%,18%,15%三种水泥掺量和三喷六搅、两搅四喷两种搅拌工艺,经钻芯检测均判定为合格桩。比较有

代表性的桩号 4-287-S 的水泥搅拌桩的钻芯无侧限抗压强度试验结果(试验龄期 18 d)如图 4 所示。在该同一场地后续铁路连接线工程中打设的双向水泥土搅拌桩现场钻芯照片如图 5 所示。

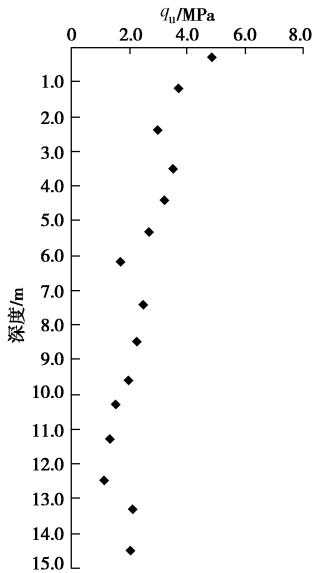


图 4 4-287-S 桩钻芯无侧限抗压强度试验曲线

Fig. 4 Test curve of 4-287-S unconfined compressive strength of core samples



图 5 钻芯照片

Fig. 5 Photo of core samples

对 12 根水泥土搅拌桩钻芯试样无侧限强度试验结果按照不同的水泥掺量和搅拌工艺进行统计对比。为了研究桩身强度随不同深度的变化情况, 对上部 7 m 土层和下部 8 m 土层的钻芯试样的无侧限抗压强度试验结果分别进行了统计, 统计结果见表 2~4。

通过表 2~4 可以看出, 双向水泥土搅拌桩施工工艺能够较好地解决水泥掺入量和搅拌均匀性问题, 尤其能够保证 7 m 以下的桩体质量, 较好地提高复合地基承载力和减小工后沉降。

当采用 15% 水泥掺量时, 18 d 龄期的无侧限抗压强度最小值约为 0.3 MPa, 比其他两种水泥掺量的强度有了明显的降低, 需要引起足够重视。

表 2 双向搅拌工艺 20% 水泥掺量无侧限抗压强度试验结果

Table 2 Test results of unconfined compressive strength under bidirectional mixing and cement content of 20%

搅拌 工艺	桩号	龄 期 /d	上部	下部	平均	最小
			7 m /MPa	8 m /MPa	/MPa	/MPa
三喷 六搅	4-287-N	18	3.22	1.85	2.49	1.12
	4-288-S	18	3.28	1.59	2.38	1.02
	平均值	—	3.25	1.72	2.44	1.07
两喷 四搅	4-284-N	18	3.99	3.09	3.51	2.35
	4-285-S	16	3.11	1.06	2.02	0.56
	平均值	—	3.55	2.08	2.77	1.46

表 3 双向搅拌工艺 18% 水泥掺量无侧限抗压强度试验结果

Table 3 Test results of unconfined compressive strength under bidirectional mixing and cement content of 18%

搅拌 工艺	桩号	龄 期 /d	上部	下部	平均	最小
			7 m /MPa	8 m /MPa	/MPa	/MPa
三喷 六搅	4-287-S	16	4.10	2.46	3.22	1.64
	4-289-N	18	3.73	2.14	2.88	1.31
	平均值	—	3.92	2.30	3.05	1.48
两喷 四搅	4-284-S	18	3.50	1.55	2.46	0.90
	4-286-N	17	3.37	1.51	2.38	1.24
	平均值	—	3.44	1.53	2.42	1.07

表 4 双向搅拌工艺 15% 水泥掺量无侧限抗压强度试验结果

Table 4 Test results of unconfined compressive strength under bidirectional mixing and cement content of 15%

搅拌 工艺	桩号	龄 期 /d	上部	下部	平均	最小
			7 m /MPa	8 m /MPa	/MPa	/MPa
三喷 六搅	4-285-N	15	1.66	0.69	1.15	0.26
	4-286-S	16	3.72	1.43	2.50	0.32
	平均值	—	2.69	1.06	1.83	0.29
两喷 四搅	4-288-N	16	1.80	1.59	1.69	0.24
	4-290-S	17	1.39	0.94	1.15	0.32
	平均值	—	1.60	1.27	1.42	0.28

对于同一种水泥掺量, 两喷四搅的水泥土搅拌桩无侧限抗压强度比三喷六搅稍小, 但能够满足设计要求。在后续矿石码头取料机轨道梁工程中推广了该施工工艺, 采用两喷四搅, 取得了很好的效果。但该双向水泥土搅拌桩施工工艺只能在原双轴搅拌钻机上改装, 近年来大量使用的大扭矩单轴单向搅拌钻机由于动力装置不同而无法改装, 这也限制了该工艺的推广。

## 2.2 扇形后喷浆钻头

通过对水泥土搅拌桩质量问题的分析可以得出,

提高水泥土搅拌桩质量关键还是要从保证水泥掺量和提高搅拌均匀性这两个方面入手, 应该通过改进水泥土搅拌桩机钻头来实现。下面介绍“一种翻土叶片后中间位置扇形喷浆的水泥搅拌桩钻头”<sup>[3]</sup>, 以下简称扇形后喷浆钻头, 已申请国家实用新型专利, 该扇形后喷浆钻头仰视图如图 6 所示。

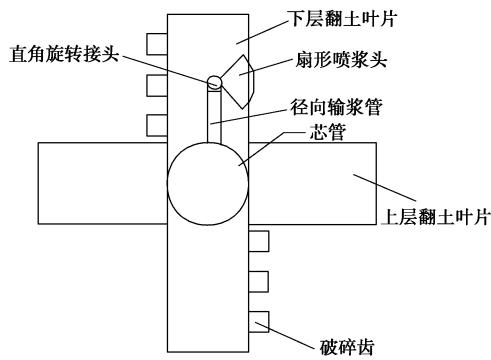


图 6 扇形后喷浆钻头仰视图

Fig. 6 Bottom view of fan-shaped back-spraying stirring head

扇形后喷浆钻头利用翻土叶片转动翻起黏土在叶片后形成一定的空隙, 利用扇形喷头将水泥浆均匀地泼洒到空隙下的黏土表面, 随后其他转动的叶片将水泥浆和黏土搅拌均匀。由于翻土叶片后留下较大的空隙, 水泥浆比较容易地直接泼洒到空隙中, 可以有效减小沿钻杆向上的返浆量。同时, 扇形喷头能够使水泥浆形成扇形洒浆面, 能够将水泥浆均匀的喷洒到桩体范围内的土中。该改进钻头可以提高搅拌均匀性, 并减少返浆量, 从而提高水泥搅拌桩施工质量。

### 3 结论与建议

本文针对黄骅港地区水泥土搅拌桩施工质量问题及原因进行了分析, 并介绍了两个有效的水泥土搅

拌桩施工工艺改进, 结论与建议如下:

(1) 水泥土搅拌桩在施工过程中存在两个主要质量问题: 一是下部桩体的水泥掺入量太少; 二是水泥浆与土搅拌不均匀。

(2) 通过室内水泥土配合比试验排除了水泥掺量及黄骅港地区土质等因素, 指出现质量问题的主要原因在于现场施工工艺因素。

(3) 双向搅拌工艺在黄骅港地区成功应用, 该工艺能够较好地解决水泥掺入量和搅拌均匀性问题。

(4) 一种翻土叶片后中间位置扇形喷浆的水泥搅拌桩钻头可以提高桩身的搅拌均匀性, 并减少地面返浆量, 从而提高水泥搅拌桩施工质量。

### 参考文献:

- [1] JGJ79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 2012. (JGJ79—2012 Technical code for ground treatment of buildings[S]. 2012. (in Chinese))
- [2] 刘松玉, 易耀林, 朱志铎. 双向搅拌桩加固高速公路软土地基现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2272 - 2280. (LIU Song-yu, YI Yao-lin, ZHU Zhi-duo. Comparison tests on field bidirectional mixing column for soft ground improvement in expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2272 - 2280. (in Chinese))
- [3] 陈富, 张健, 刘爱民. 一种翻土叶片后中间位置扇形喷浆的水泥搅拌桩钻头[P]. 中国: ZL201420100404.3, 2014-07-09. (CHEN Fu, ZHANG Jian, LIU Ai-min. Deep stirring pile stirring head with fan-shaped back-spraying at the middle of blade[P]. China: ZL201420100404.3, 2014-07-09. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)