

文章编号: 1674—8247(2018)06—0011—05

## 水泥土搅拌桩处理海相沉积软土的试验研究

吴邵海 王智猛 褚宇光

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**文章以福州某车辆段地基处理工程为背景,通过室内配合比试验和现场成桩试验,利用室内无侧限抗压试验、现场量测、取芯和承载力检测等手段,研究了单轴和双轴、不同的水泥掺量、掺砂和掺粉煤灰、不同喷浆型式和不同的喷搅次数下水泥土搅拌桩处理海相沉积软土的处理效果。研究表明,单轴搅拌桩较双轴搅拌桩、浆喷较粉喷更适合大面积处理海相沉积软土,水泥掺粉煤灰的成桩效果最好。研究结果对采用水泥搅拌桩加固海相沉积软土具有一定的指导和实践意义。

**关键词:**水泥土搅拌桩;海相沉积软土;现场试验

中图分类号:U213.1<sup>+</sup>57

文献标志码:A

## Experimental Study on Treatment of Marine Deposit Soft Soil by Cement-soil Mixing Piles

WU Shaohai WANG Zhimeng CHU Yuguang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:**Based on the ground treatment in a metro depot of Fuzhou, through indoor mix proportion test and field pile-forming test, and by means of indoor unconfined compression test, field measurement, coring and bearing capacity test, this paper studies the application effects of cement-soil mixing piles in the marine sedimentary soft soil under the conditions of uniaxial and biaxial mixing pile, different cement content, mixture of sand and fly ash, different types of shotcrete and different stirring times. The study results show that the uniaxial mixing pile is more suitable for large-scale treatment of marine sedimentary soft soil than the biaxial mixing pile, and slurry spraying is better than powder spraying, and the cement mixed with fly ash has the best pile-forming effect. The study results have a certain guidance and practical significance for the reinforcement of marine sedimentary soft soil by cement mixing piles.

**Key words:**cement-soil mixing pile; marine sedimentary soft soil; field test

水泥土搅拌桩是国内外一种常用的地基处理形式<sup>[1]</sup>,已在铁路、公路、市政和港口中得到广泛的应用。

水泥土搅拌桩主要通过理论分析、室内试验、现场试验和数值模拟等方法来研究。许春松<sup>[2]</sup>通过理论推导的方法研究水泥土搅拌桩的承载机理和沉降计算;李振龙<sup>[3]</sup>等人通过一系列的室内试验,研究了水泥掺入比、龄期等对水泥土搅拌桩的影响;刘平平<sup>[4]</sup>

通过室内模型试验的方法研究了水泥搅拌桩复合地基的沉降和桩土受力;陈仕奇<sup>[5]</sup>通过高速铁路软土地基处理现场试验及水泥土室内试验,初步研究了一般黏性土地区的水泥搅拌抗施工工艺;庄志福<sup>[6]</sup>通过确定的试桩参数验证了水泥土搅拌桩在泉州地区的适用性;柏炯<sup>[7]</sup>等人通过有限元数值模拟的方法模拟并预测了复合地基的变形。

由于水泥搅拌桩受土质、地质环境影响大,常采用

收稿日期:2018-04-26

作者简介:吴邵海(1987-),男,工程师。

引文格式:吴邵海,王智猛,褚宇光. 水泥土搅拌桩处理海相沉积软土的试验研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(6):11-15.

WU Shaohai, WANG Zhimeng, CHU Yuguang. Experimental Study on Treatment of Marine Deposit Soft Soil by Cement-soil Mixing Piles [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 11-15.

室内配合比试验和现场验证性试验的方法来确定搅拌桩的适用性和成桩效果<sup>[8]</sup>,但目前国内缺少系统性的现场试验来研究搅拌桩的成桩效果,有必要通过多组现场试验的手段研究影响水泥土搅拌桩的成桩因素。同时在实际工程中发现水泥土搅拌桩在处理含有机质、高塑性指数、海相沉积等软土时,成桩质量差甚至无法成桩,应进行现场成桩实验确定水泥土搅拌桩的适用性和施工工艺。

1 工程概况

1.1 工程背景

某段工点以填方为主,填方高度约为0~3 m,场地约 $23 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。下卧软土层主要为海相沉积的淤泥、淤泥质土、淤泥夹砂,其间夹一定厚度的粉质黏土、卵石、中粗砂等,软土总厚度 23.0~68.7 m,软土层呈流塑~可塑状态,天然含水率高,孔隙比大,为高压缩性土,局部含腐烂植物碎屑,土体性质极差且厚度大,受工程投资及工期控制,初步拟定采用水泥搅拌桩处

理。有必要进行试桩确定水泥土搅拌桩的的适用性和成桩效果。

该工点工后沉降控制标准<sup>[8-9]</sup>:一般地段按照工后沉降不大于 30 cm 控制。道岔区工后沉降不大于 20 cm,沉降速率不大于 5 cm/年。

1.2 试验点地质概况

试验点的地质自上而下分别为淤泥、粉质黏土、淤泥质土、淤泥夹砂和卵石土,水泥土搅拌桩拟处理至粉质黏土层。具体的岩土力学参数如表 1、表 2 所示。

表 1 地基土参数一览表(1)

土层	厚度(自上而下) /m	天然重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	天然含水量 $w$ /%	孔隙比 $e$	液限 $I_L$ /%	塑限 $I_p$ /%
淤泥	19.50	15.80	62.30	1.62	53.6	33.1
粉质黏土	5.50	19.10	29.70	0.83	40.94	24.15
淤泥质土	17.00	17.00	47.60	1.26	43.99	26.82
淤泥夹砂	8.30	17.40	40.00	1.11	38.14	24.35
卵石	>20	21.00	—	—	—	—

表 2 地基土参数一览表(2)

土层	直剪快剪		固结快剪		压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2}$ /MPa <sup>-1</sup>	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa	基本承载力 特征值 $f_{ak}$ /kPa
	粘聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	粘聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)			
淤泥	8.80	2.60	11.80	7.60	1.41	1.94	45.00
粉质黏土	31.00	11.30	36.90	15.50	0.35	5.38	180.00
淤泥质土	11.10	4.50	16.90	11.40	0.85	2.84	60.00
淤泥夹砂	12.50	7.00	16.60	13.90	0.65	3.37	80.00
卵石	5.00	35.00	—	—	—	40.00	450.00

淤泥呈深灰色,流塑,饱和,以粘粒为主,局部夹薄层粉细砂而表现为淤泥夹薄层砂,局部含腐烂植物碎屑,有腥臭味,摇振反应慢,有光泽,捻面光滑,干强度,韧性中等。

粉质黏土呈灰绿、灰黄色等色,可塑~硬塑,很湿,捻面较光滑,有光泽,无摇振反应,干强度与韧性中等,粘性较好。

地下水对混凝土结构具有弱腐蚀性,地表水对混凝土结构具有微腐蚀性。

2 试验方案

2.1 室内配合比试验

(1) 试验分组

浆喷的室内配合比试验进行了 6 组,水泥掺量分别为 16%、18%、20%、22%、25% 和 28%;粉喷的室内配合比试验共进行了 2 组,水泥掺量分别为 22% 和 25%;掺砂的室内配合比试验共进行了 2 组,水泥掺量分别为 22% 和 25%;掺粉煤灰的室内配合比试验共进行了 1 组,水泥掺量为 25%。

(2) 主要要求

胶凝剂为 42.5 级普通硅酸盐水泥,水灰比为 0.45~0.6,外加剂分别为细砂和粉煤灰,细砂掺入量为水泥掺量的 30%,粉煤灰掺入量为水泥掺量的 20%。取试桩区附近最软弱土层(淤泥)试样进行室内配比试验,要求试块(边长 70.7 mm 立方体)在标准养护条件下 28 d 立方体抗压强度不小于 1.2 MPa。

2.2 现场成桩试验

(1) 试验分组

根据室内配合比试验结果和现场的情况,进行现场试桩的分组,单轴搅拌桩试桩方案桩间距取 1.2 m,桩径为 0.5 m,选取 6 组试验桩进行试验(每组 3 根);双轴搅拌桩试桩方案,桩间距取 2.0 m,桩径为 0.7 m,选取 2 组试验桩进行试验(每组 3 根),具体分组如表 3 所示。

(2) 主要要求

胶凝剂为 42.5 级普通硅酸盐水泥,水灰比为 0.45~0.6,外加剂分别为细砂和粉煤灰,细砂掺入量为水泥掺量的 30%,粉煤灰掺入量为水泥掺量的

20%,搅拌桩注浆压力为 0.4~0.9 MPa,钻头搅拌下钻速度一般为 0.6~1.2 m/min,提升速度一般为 1.0~1.5m/min之间。

表 3 水泥土搅拌桩现场试桩分组一览表

试桩编号		桩长 /m	工艺	水泥掺量 /%	备注
第 1 组	SJ 500-1-1	20	两喷两搅	25	浆喷
	SJ 500-1-2	20	四喷四搅	25	浆喷
	SJ 500-1-3	20	四喷四搅	25	浆喷
第 2 组	SJ 500-2-1	20	四喷四搅	25	浆喷,掺砂
	SJ 500-2-2	20	四喷四搅	25	浆喷,掺砂
	SJ 500-2-3	20	四喷四搅	25	浆喷,掺砂
第 3 组	SJ 500-3-1	20	两喷两搅	25	粉喷
	SJ 500-3-2	20	四喷四搅	25	粉喷
	SJ 500-3-3	20	四喷四搅	25	粉喷
第 4 组	SJ 500-4-1	20	两喷两搅	22	浆喷,掺砂
	SJ 500-4-2	20	四喷四搅	22	浆喷,掺砂
	SJ 500-4-3	20	四喷四搅	22	浆喷,掺砂
第 5 组	SJ 500-5-1	20	四喷四搅	25	浆喷,掺粉煤灰
	SJ 500-5-2	20	四喷四搅	25	浆喷,掺粉煤灰
	SJ 500-5-3	20	四喷四搅	25	浆喷,掺粉煤灰
第 6 组	SJ 500-6-1	20	四喷四搅	28	浆喷
	SJ 500-6-2	20	四喷四搅	28	浆喷
	SJ 500-6-3	20	四喷四搅	28	浆喷
第 7 组 (双轴)	SSJ 700-1-1	20	两喷两搅	25	浆喷
	SSJ 700-1-2	20	四喷四搅	25	浆喷
	SSJ 700-1-3	20	四喷四搅	25	浆喷
第 8 组 (双轴)	SSJ 700-2-1	20	四喷四搅	25	浆喷,掺砂
	SSJ 700-2-2	20	四喷四搅	25	浆喷,掺砂
	SSJ 700-2-3	20	四喷四搅	25	浆喷,掺砂

(3) 现场试验施工流程

原地面处理→测量放样→钻机就位→启动自动记录仪→搅拌钻进并喷粉(浆)至设计深度→喷粉(浆)、搅拌、提升→提升至停灰(浆)面停止喷粉(浆)→复搅下沉喷粉(浆)至设计深度→喷粉(浆)、搅拌、提升至桩顶停止喷粉(浆)→关闭自动记录仪→钻机移位→成桩质量检验。

(4) 试桩检测要求

①成桩 7 d 后,应采用浅部开挖桩头,深度宜超过停浆面以下 0.5 m,目测检测搅拌的均匀性,并测量成桩直径。②成桩 28 d 后,应采用双管单动取样器在桩长范围内垂直钻孔取芯,观察桩体完整性、均匀性,取不同深度的不小于 3 个试样作无侧限抗压强度。③单轴搅拌桩承载力检测在成桩 28 d 后进行,采用单桩荷载试验。

3 试验结果

3.1 室内配合比试验结果

不同水泥掺量、掺加剂下试样的 28 d 无侧限抗压强度如图 1 所示。

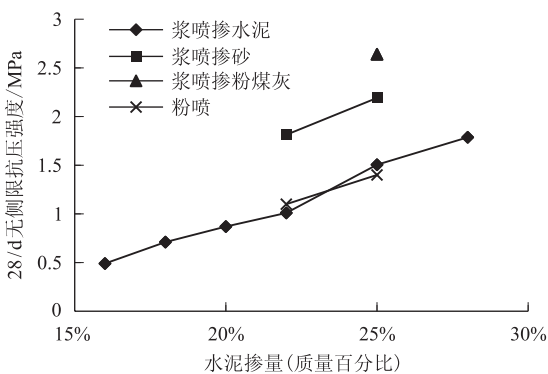


图 1 不同水泥掺量、掺加剂下试样的 28 d 无侧限抗压强度

由图 1 可以看出,随着水泥掺量的增加,试样强度不断增大;掺砂和掺粉煤灰均能提高试样强度,掺粉煤灰的效果好于掺砂。水泥掺量不小于 25%、水泥掺砂不小于 22% 和水泥掺粉煤灰不小于 25% 时,试验 28 d 无侧限抗压强度均大于 1.2 MPa,满足设计要求,但水泥掺量明显大于规范<sup>[10]</sup>推荐的 12%~20%。

3.2 单轴搅拌桩和双轴搅拌桩

从浅层开挖的结果可知,单轴搅拌桩成桩直径与理论较吻合,双轴搅拌桩成桩直径与理论偏差较大,双轴搅拌桩的直径如表 4 所示。

表 4 双轴搅拌桩的直径

桩号	桩径理论值/mm		桩径测量结果/mm	
	长轴	短轴	长轴	短轴
SSJ 700-1-1	1 300	720	1 450	860
SSJ 700-1-2	1 300	720	1 230	640
SSJ 700-1-3	1 300	720	1 470	950
SSJ 700-2-1	1 300	720	1 250	710
SSJ 700-2-2	1 300	720	1 340	780
SSJ 700-2-3	1 300	720	1 250	780

单轴搅拌桩和双轴搅拌桩的试桩结果如表 5 所示。

表 5 单轴搅拌桩和双轴搅拌桩的试桩结果

桩号	喷浆方式	水泥掺量	配合比试验强度/MPa	取芯强度(平均值)/MPa	成桩长度	芯样较完整长度	备注
SJ 500-1-1	两喷两搅	25% 掺量	1.5	0.55	8	6	
SSJ 700-1-1	两喷两搅	25% 掺量	1.5	1.1	20	8	双轴
SJ 500-1-3	四喷四搅	25% 掺量	1.5	0.7	17	12	
SSJ 700-1-2	四喷四搅	25% 掺量	1.5	1.2	20	12	双轴
SJ 500-2-1	四喷四搅	25% 掺砂	2.2	0.93	10	8	
SSJ 700-2-3	四喷四搅	25% 掺砂	2.2	1.3	20	6	双轴

由表 5 和现场试桩情况可知,单轴搅拌桩的桩身强度和成桩长度略低于双轴搅拌桩,但单轴搅拌桩的成桩比双轴更均匀。SJ 500-1-3 和 SSJ 700-1-2 的取芯结果分别如图 2、图 3 所示



图2 SJ 500-1-3 取芯结果      图3 SJ 700-1-2 取芯结果

单轴搅拌桩和双轴搅拌桩的单轴承载力特征值如表 6 所示,载荷 P-S 曲线如图 4 所示。

表 6 单轴搅拌桩和双轴搅拌桩的单轴承载力特征值

桩号	工艺	喷浆型式	水泥掺量 / %	理论值 / kN	实测值 / kN	理论/实测
SJ 500-2-1	四喷四搅	浆喷	25	88	70	79.55%
SSJ 700-2-2	四喷四搅	浆喷掺砂	25	347	210	60.52%

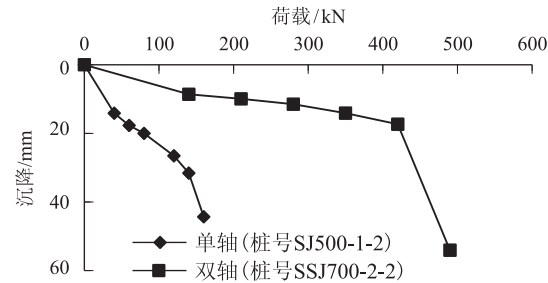


图 4 载荷 P-S 曲线

由图 5 和表 6 可知,搅拌桩的承载力比理论计算值偏低,采用单轴搅拌桩对承载力的贡献要优于双轴搅拌桩。

3.3 水泥掺量的影响

不同的水泥掺量下试桩结果如表 7 所示。

表 7 不同的水泥掺量下试桩结果

桩号	喷浆方式	水泥掺量	配合比试验强度 / MPa	取芯强度 (平均值) / MPa	成桩长度	芯样较完整长度
SJ 500-1-1	两喷两搅	25% 掺量	1.5	0.55	8	6
SJ 500-1-3	四喷四搅	25% 掺量	1.5	0.7	17	12
SJ 500-6-3	四喷四搅	28% 掺量	1.5	1.1	18	14

由表 7 可知,随着水泥掺量的增加,桩身强度和成桩效果均不断增加;室内配合比的试验强度大于现场试桩的桩身强度。

3.4 掺砂和掺粉煤灰的影响

不同的外加剂下试桩结果如表 8 所示。

由表 8 和现场试桩情况可知,无论是单轴搅拌桩还是双轴搅拌桩,掺砂均可有效提高桩身强度,但掺砂会略微降低成桩效果和成桩长度。掺粉煤灰效果更明显,不仅可提高桩身强度,更能提升成桩效果和成桩长

度,如图 5、图 6 所示。



图5 SJ 500-2-1 取芯结果      图6 SJ 500-5-2 取芯结果

表 8 不同的外加剂下试桩结果

桩号	喷浆方式	水泥掺量	配合比试验强度 / MPa	取芯强度 (平均值) / MPa	成桩长度	芯样较完整长度	备注
SJ 500-1-3	四喷四搅	25% 掺量	1.5	0.7	17	12	
SJ 500-2-1	四喷四搅	25% 掺砂	2.2	0.93	10	8	
SSJ 700-1-2	四喷四搅	25% 掺量	1.5	1.2	20	12	双轴
SSJ 700-2-3	四喷四搅	25% 掺砂	2.2	1.3	20	6	双轴
SJ 500-5-1	四喷四搅	25% 掺粉煤灰	2.6	1.15	20	12	
SJ 500-5-2	四喷四搅	25% 掺粉煤灰	2.6	1.07	20	18	
SJ 500-5-3	四喷四搅	25% 掺粉煤灰	2.6	1	19	16	

3.5 喷搅次数的影响

两喷两搅和四喷四搅的试桩结果如表 9 所示。

表 9 两喷两搅和四喷四搅的试桩结果

桩号	喷浆方式	水泥掺量	配合比试验强度 / MPa	取芯强度 (平均值) / MPa	成桩长度	芯样较完整长度	备注
SJ 500-1-1	两喷两搅	25% 掺量	1.5	0.55	8	6	
SJ 500-1-3	四喷四搅	25% 掺量	1.5	0.7	17	12	
SJ 500-4-1	两喷两搅	22% 掺砂	1.8	0.73	7	6	
SJ 500-4-3	四喷四搅	22% 掺砂	1.8	1.05	10	9	
SSJ 700-1-1	两喷两搅	25% 掺量	1.5	1.1	20	8	双轴
SSJ 700-1-2	四喷四搅	25% 掺量	1.5	1.2	20	12	双轴

由表 9 和现场试桩情况可知,无论是单轴和双轴、掺砂与不掺砂,四喷四搅的桩身强度和成桩效果均好于两喷两搅,喷浆次数越多,搅拌越充分,成桩效果越好。

3.6 喷浆方式的影响

粉喷和浆喷的试桩结果如表 10 所示。

表 10 粉喷和浆喷的试桩结果

桩号	喷浆方式	水泥掺量	配合比试验强度 / MPa	取芯强度 (平均值) / MPa	成桩长度	芯样较完整长度
SJ 500-1-1	两喷两搅	25% 掺量	1.5	0.55	8	6
SJ 500-3-2	两喷两搅	粉喷 25%	1.4	0.73	13	6
SJ 500-3-3	两喷两搅	粉喷 25%	1.4	0.87	12	7

由表 10 可知,粉喷的桩身强度和成桩效果略大于浆喷,但成桩效果好的地段均集中在桩顶以下 7 m 范围内。现场试桩表明粉喷桩钻动困难且易卡钻,且粉

喷施工对环境的影响大。故浆喷更适合该种地质条件下的大面积施工。

4 结论

本文采用水泥搅拌桩处理海相沉积软土,通过11组室内配合比试验,6组单轴搅拌桩和2组双轴搅拌桩现场试验,并经过室内无侧限抗压强度试验,现场开挖,取芯和承载力检测得出如下结论:

- (1)单轴搅拌桩比双轴搅拌桩更适合,浆喷比粉喷更适宜。
- (2)四喷四搅的效果明显好于两喷两搅。
- (3)水泥掺粉煤灰比单纯的水泥和水泥掺砂的效果好。水泥掺粉煤灰能同时提高桩身强度和成桩效果,水泥掺砂能提高桩身强度但对成桩效果影响较小。
- (4)大面积施工时建议采用水泥掺粉煤灰、浆喷且喷搅次数为四喷四搅,搅拌桩的水泥掺量不小于25%,粉煤灰掺量宜为水泥掺量的20%。

参考文献:

[1] 龚晓南.地基处理手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.  
GONG Xiaonan. Manual of Ground Treatment (Third Edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[2] 许春松.水泥搅拌桩复合地基承载特性及其在软土路基中的应用[D].长沙:湖南大学,2012.  
XU Chunsong. Bearing Characteristic of Cement Mixing Pile Composite Foundation and Its Application in Soft Soil Subgrade [D]. Changsha: Hunan University, 2012.

[3] 李振龙,潘殿琦,杨书红,等.海相淤泥特性水泥土搅拌桩强度影响因素及其变化规律的试验研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2015,16(3):16-19.

LI Zhenlong, PAN Dianqi, YANG Shuhong, et al. The Test Study on Influencing Factors and Changing Rules to Cement - soil Mixing Pile Strength in Marin Silt Characteristics [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 16(3): 16-19.

[4] 刘平平.水泥搅拌桩复合地基模型试验研究及数值分析[D].赣州:江西理工大学,2015.  
LIU Pingping. Model Experimental Study and Numerical Analysis of Cement Mixing Pile Composite Foundation [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015.

[5] 陈仕奇.深层搅拌桩处理高速铁路软土地基施工工艺研究[J].高速铁路技术,2010,1(2):64-68.  
CHEN Shiqi. Construction Technique for Deep Mixing Pile to Improve Soft Soil Ground of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(2): 64-68.

[6] 庄志福.水泥搅拌桩在福建沿海软基处理的应用[J].山西建筑,2014,40(12):78-80.  
ZHUANG Zhifu. Application of Cement Mixing Piles in Soft Soil Foundation Treatment of Fujian Coastal [J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(12): 78-80.

[7] 柏炯,黄雨,周子舟,等.大面积堆载下水泥土搅拌桩复合地基数值模拟[J].地下空间与工程学报,2009,5(S2):1716-1721.  
Bai Jiong, HUANG Yu, ZHOU Zizhou, et al. Three-Dimensional Finite Element Simulation of Cement Mixing Pile Composite Foundation Under Large Area Loading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1716-1721.

[8] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].  
JTG D30-2015 Specifications for Design of Highway Subgrades [S].

[9] GB 50157-2013 地铁设计规范[S].  
GB 50157-2013 Code for Design of Metro [S].

[10] TB 10106-2010 铁路工程地基处理技术规范[S].  
TB 10106-2010 Technical Code for Ground Treatment of Railway Engineering [S].

(编辑:苏玲梅 张红英)