

DOI: 10.11779/CJGE201402015

# 基于强度试验的五轴水泥土搅拌桩新技术研究

赵春风<sup>1, 2</sup>, 邹豫皖<sup>1, 2</sup>, 赵程<sup>1, 2</sup>, 谢晓东<sup>3</sup>, 周玉石<sup>3</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;  
3. 上海城地建设股份有限公司, 上海 200062)

**摘要:** 针对中国国内水泥土搅拌桩施工工艺存在的问题, 研究开发了五轴水泥土搅拌桩新技术。该技术在施工过程中具有机械化程度高、成本低、工期短、环境污染少等特点, 为了分析五轴搅拌桩加固软土地基以及基坑围护中的处理效果, 在同一场地进行了五轴水泥土搅拌桩和二轴、三轴水泥土搅拌桩取芯检测和室内无侧限抗压强度试验。试验结果表明, 在各土层中, 三轴水泥土搅拌桩的桩身强度值较低, 且离散性较大, 二轴水泥土搅拌桩的强度较好, 但不同龄期的强度值离散性变化较大, 而五轴水泥土搅拌桩的强度值最高, 离散性也较小, 具有良好的推广和应用前景。  
**关键词:** 五轴水泥土搅拌桩; 施工工艺; 取芯检测; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)02-0376-06

**作者简介:** 赵春风(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程的理论与应用方面的教学与研究工作。  
E-mail: tjzhchf@sohu.com。

## Experimental research on strength of five-axis cement-soil mixed piles

ZHAO Chun-feng<sup>1, 2</sup>, ZOU Yu-wan<sup>1, 2</sup>, ZHAO Cheng<sup>1, 2</sup>, XIE Xiao-dong<sup>3</sup>, ZHOU Yu-shi<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Chengdi Construction & Development Co., LTD, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Based on a review of disadvantages of the construction techniques for cement-soil mixed piles in China, a new construction method called five-axis mixed pile method is developed. This new method has low cost, environmental pollution, short construction period and high efficiency. In order to investigate the improvement effect of five-axis mixed piles for soft ground in excavation engineering, comparison tests between five-axis mixed piles and biaxial, triaxial mixed piles are conducted in the same geological field. Through the unconfined compression tests on coring samples taken from cement-soil mixed piles, the test results show that the strength of the triaxial mixed piles is low and much more discrete, the strength of the biaxial mixed piles is better in every layer, but the discreteness of strength values greatly changes at different ages. However, the five-axis mixed piles with higher strength and low discrete behavior may have a good population and application value in the future.

**Key words:** five-axis cement-soil mixed pile; construction technique; trial of drilling core; unconfined compressive strength

## 0 引言

水泥土搅拌桩利用水泥等建筑材料作为固化剂, 并利用特制的、具有针对性的水泥搅拌机械设备在软土地基处理中直接把软土以及固化剂进行强制性的搅拌, 使软土与固化剂产生一系列的物理、化学反应, 从而形成具有一定强度的、稳定的、整体的水泥土加固体, 提高软土地基的整体承载力, 并减少地基沉降的可能性。水泥土搅拌桩施工方法具有工程简便、振动小、工期短等特点, 目前在工程软弱土地基处理中被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

水泥土搅拌桩广泛应用于基坑工程的止水帷幕和

坑内加固、水库防渗墙、地下坝加固、隧道加固、垃圾填埋场的护墙等领域, 目前, 一般基坑围护止水和地基加固多采用二轴水泥土搅拌桩和三轴水泥土搅拌桩(SMW工法)。二轴水泥土搅拌桩(简称“二轴搅拌桩”)施工工艺在实际工程中应用广泛, 不但可作为围护结构重力坝结构, 也可作为基底加固措施, 二轴搅拌桩搅拌深度理论上可达到18m, 但施工过程中由于搅拌桩成桩设备本身设计的问题, 施工效率较低;

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202193, 41272295); 上海市浦江人才计划项目(11PJ1410100); 上海市重点学科建设项目(B308)  
收稿日期: 2013-04-01

三轴水泥土搅拌桩（简称“三轴搅拌桩”）施工工艺采用大水灰比设计，水泥土浆液流动性好，浆液搅拌均匀，止水效果较好，且搅拌深度也较大，理论上可达到 33 m，但三轴搅拌桩在成桩过程中有较大的溢浆现象，大量水泥成为置换土被浪费。此外，大水灰比的水泥浆的设置又将导致桩体强度降低。针对以上水泥土搅拌桩成桩质量问题，国内不少学者从施工工艺、强度影响因素以及检测方法等方面进行了探索改进<sup>[4-9]</sup>。

在分析以上两种传统搅拌桩各自特点以及在长期施工过程中不断总结经验，并引进国内外先进技术，逐步形成一种二轴搅拌桩及三轴搅拌桩优点相结合的新施工工艺的思路，开发研制了新型的“高效无置换智能化五轴水泥土连续搅拌桩工法”<sup>[10-12]</sup>（简称“五轴搅拌桩”）。本文通过现场试验，利用取芯强度检测和室内无侧限抗压强度试验方法，对比分析与二轴、三轴搅拌桩的桩身强度，进而促进这一新工法的推广应用。

1 五轴水泥土搅拌桩简介

五轴搅拌桩，即桩内土体与水泥浆液充分搅拌，形成水泥土。当水泥发生化学反应后，形成强度较大的水泥土桩体。施工 1~2 排搅拌桩时，可不考虑挤土性。如进行多排重力坝桩体施工时将会产生一定的挤土性，施工时可采用特殊钻杆实现适当抬土来达到减少挤土效应。施工机械及施工工艺流程见图 1，2。

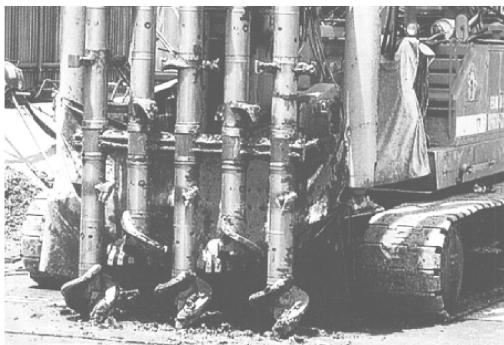


图 1 五轴搅拌桩施工机械

Fig. 1 Construction machine for five-axis cement-soil mixed pile

五轴搅拌桩适用于处理正常固结的淤泥与淤泥质土、粉土、饱和黄土、素填土、黏性土以及无地下河的饱和松散砂土等地基，且可更好的满足基坑工程围护、止水及坑底加固等工程的要求。

五轴搅拌桩具有优质、节材、降本、省工、环保等优点。其主要特点是：①机械采用 5 根并排钻杆的布置形式，增加了单次成桩的根数，提升了一次作业

功效，并有效减少了搭接冷缝的出现机率，提高了基坑止水效果。②由于采用的是桩土非置换模式，工艺上选用较小的水灰比设计（水灰比约 0.8，水泥掺量 13%~15%）及“一下一上”的施工流程，使得本工法较二轴搅拌桩在施工时间上有极大提升，施工功效提高 5~7 倍，较 SMW 工法在造价方面有极大的降低，并减少了施工对环境造成的污染（SMW 工法有 30%~40% 的水泥置换土，水泥得不到全部利用）。③增加搅拌页片排数，将全断面螺旋搅拌页片与对称直页片进行结合，在钻进过程中增加了搅拌次数。同时机械采用钻杆内喷浆方式，喷浆孔位于钻杆底部，可在下沉掘进的同时进行搅拌，提升了搅拌功效。④设备上安装了智能化监控设备，配备变频电机的送浆系统可人为控制不同深度变量喷浆，当土质出现上下不均匀时可随时调节浆量，这使得浆液的使用功效得以提升，改变了搅拌桩施工工艺中水泥使用无法准确计量的缺点。⑤桩架具有步履式或履带式的自动行走功能，大大降低了劳动强度，提升了机械作业功效。

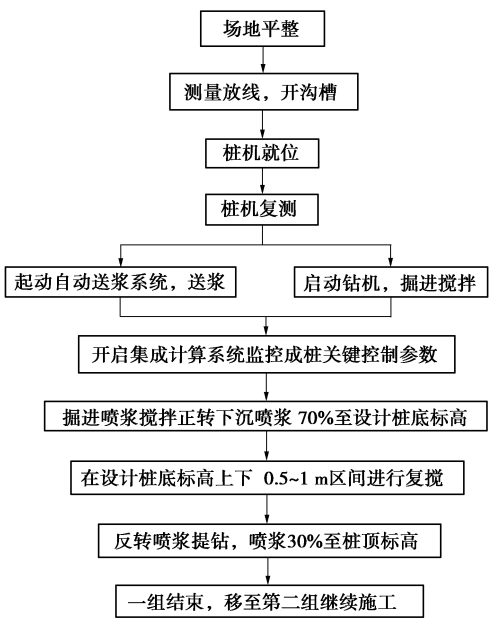


图 2 五轴搅拌桩施工工艺流程图

Fig. 2 Construction process of five-axis cement-soil mixed piles

2 试验场地工程地质概况

试验场地为上海市某小区改扩建工程，地貌类型：上海位于长江三角洲入海口东南前缘，属三角洲冲积平原，地貌形态较单一。拟建场地勘察期间场地地面标高一般在 4.01~4.64 m，在 40.45 m 深度范围内的地基土属全新世 Q<sub>4</sub> 沉积物，主要由黏性土及粉性土组成。试验段地基土层自上而下分述如下：

表 1 土层物理力学指标  
Table 1 Physical-mechanical parameters of soil layers

层号	土层名称	层厚/m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $w/\%$	孔隙比 $e$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	固结快剪		压缩模量 $E_{S0.1-0.2}/\text{MPa}$
								黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	
① <sub>1</sub>	填土	2.60								
② <sub>1</sub>	粉质黏土	0.90	18.4	32.7	0.933	38.1	21.8	20	16.0	4.44
② <sub>3</sub>	砂质粉土	3.30	18.3	33.3	0.931			4	30.5	10.00
④	淤泥质黏土	8.20	16.8	48.6	1.376	40.8	22.6	13	12.5	2.29
⑤ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	7.40	17.5	40.1	1.144	34.4	19.8	12	17.0	3.83
⑤ <sub>2</sub>	黏质粉土夹粉质黏土	12.60	18.1	32.8	0.942	30.7	18.2	10	26.0	7.14

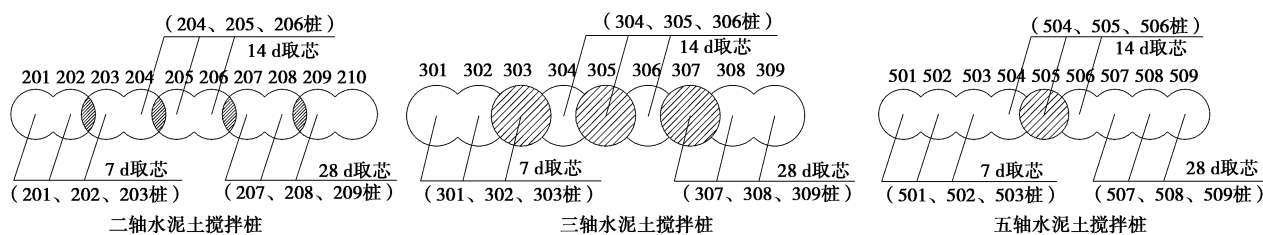


图 3 上海某广场工程试验方案布置图

Fig. 3 Arrangement schemes of a square in Shanghai

(1) 第①<sub>1</sub>层填土，1.0~1.5 m 以上深度范围内以杂填土为主，内含较多碎石、碎砖等。其下以素填土为主，夹植物根茎等杂物，土质松散不均匀。

(2) 第②<sub>1</sub>层褐黄色粉质黏土，呈可塑—软塑状态，含氧化铁锈斑及铁锰质结核，土质自上而下渐软，局部夹少量粉性土或以黏土为主。

(3) 第②<sub>3</sub>层灰色砂质粉土，呈松散状态，含云母、夹少量黏性土，土质不均匀。场地内局部分布。

(4) 第④层灰色淤泥质黏土，含云母、有机质，夹薄层粉砂，局部为淤泥质粉质黏土。该层呈流塑状态，土质软弱，压缩性高等。

(5) 第⑤<sub>1</sub>层灰色淤泥质粉质黏土，呈流塑—软塑状态，含云母、有机质，底部夹层状粉性土。

(6) 第⑤<sub>2</sub>层灰色黏质粉土夹粉质黏土，呈稍密—中密状态，含云母，夹少量腐植物及少量粉砂，局部夹多量黏性土，土质不均匀。土层主要物理力学指标见表 1。

3 试验方案

为了研究五轴搅拌桩的桩身强度，在试验场地分别施工二轴搅拌桩 5 组，采用搭接施工。三轴搅拌桩 4 组和五轴搅拌桩 2 组，采用套打施工，搅拌桩达到一定的强度后，分别进行 7，14，28 d 的取芯强度试验，每种工法桩每次取 3 根，由于本次试验重点是检测水泥土搅拌桩的强度，因而搅拌桩每米取一个试样，

进行芯样无侧限抗压强度试验。试验布置如图 3 所示，施工概况见表 2。

表 2 施工概况

Table 2 Construction situations

工法分类	桩长	桩径	水泥掺量	水灰
	/m	/mm	/%	比
二轴搅拌桩	12	φ700	13	0.65
三轴搅拌桩	28	φ850	20	1.50
五轴搅拌桩	28	φ700	13	0.80

取芯强度试验采用上海地区常用的无锡 GXY-1C 型钻机，取芯时应注意：①由于桩中心强度较弱，试验孔位布置在水泥搅拌桩桩头，并距离中心 100 mm 左右；②用岩芯管回转钻进方法，严格控制回次进深，每回次不超过 1.5 m，尽可能保持芯样的连续完整，保证取芯率>60%；③芯样取出后，观察水泥土芯样的颜色是否一致、搅拌是否均匀、桩体是否连续等，并选取有代表性的芯样及时密封保存。

水泥土芯样按 1：1 高径比制成圆柱形试块进行无侧限抗压强度试验，压缩试验采用 WDW-600 微机控制电子万能试验机，试验时：①切样做到两端面平整，并与芯样轴线垂直；②将试件放置在试验机承压板的中心，调整球形座使试件端面均匀接触；③一般以每秒 0.2~0.5 MPa 的加荷速率施加荷载，直至试件破坏，记录破坏荷载，精确到 0.1 N。

## 4 试验结果分析

通过对二轴、三轴和五轴搅拌桩分别进行 7, 14, 28 d 的取芯强度试验, 由试验结果来看, 套打桩的强度值高于非套打桩并不十分明显, 故试验结果分析时, 取 201, 202, 203 号桩位的平均值作为二轴 7 d 的桩身强度值代表值, 取 204, 205, 206 号桩位的平均值作为二轴 14 d 的桩身强度值代表值, 取 207, 208, 209 号桩位的平均值作为二轴 28 d 的桩身强度值代表值, 以此类推。试验结果见图 4~6 以及表 3~5。

如图 4~6 所示, 从不同龄期来看, 二轴和三轴搅拌桩无侧限抗压强度值基本的变化趋势是沿桩长逐渐变小, 而五轴搅拌桩无侧限抗压强度值沿桩长变化则相对较平缓, 且五轴搅拌桩的强度普遍高于三轴搅拌桩, 略高于二轴搅拌桩。其中某些值的过高、过低, 那是因为对于软土地基深层搅拌桩加固技术来说, 在施工工程中, 由于机械的切削搅拌作用, 实际上不可避免地会留下一些未被粉碎的大小不一的土团, 在拌入水泥浆后将出现水泥浆包裹土团的现象, 而土团之间的大孔隙基本上已被水泥颗粒填满, 所以加固后的水泥土中, 形成一些水泥较多的微区, 而在小土团内则没有水泥, 水泥不能与土团内部的土体进行化学反应。只有经过较长的时间, 土团内的土颗粒在水泥水解产物渗透作用下, 才逐渐改变其性质。因此, 在水泥土中会产生强度较高、稳定性较好的水泥石区, 同时也不可避免地会产生强度较低的土块区, 即在桩体内产生不同土团水泥掺入比不等的现象<sup>[13]</sup>。根据当地的地质条件和水泥土搅拌桩的荷载传递规律<sup>[14-15]</sup>可知, 要使桩长达到同一强度发挥度, 应该要求水泥搅拌桩的强度沿桩逐渐减小, 即意味着合理的水泥掺入量应该是沿桩身逐渐减小。而五轴桩搅拌设备的智能化, 便可以很好地解决沿桩长均匀地改变水泥掺入量的这个困难。

如表 3~5 所示, 从不同土层桩身强度以及变异系数来看, 各土层中, 五轴搅拌桩的强度比二轴搅拌桩稍高, 并明显高于三轴搅拌桩, 其中由于二轴搅拌桩的桩长较短、土层较少, 其桩身强度的变异系数变动较大, 但与三轴相比, 五轴的变异系数较小, 说明五轴搅拌桩的智能化施工机械, 搅拌较均匀, 能让水泥与土充分作用, 形成较厚的水泥石骨架, 提高水泥土的强度。相反, 三轴搅拌桩的施工机械搅拌土体不均匀, 各未搅拌开的土团内水泥掺入比将不同程度地小于设计掺入比, 桩体各部位强度差异很大。

从室内抗压强度试验结果来看, 二轴搅拌桩、三轴搅拌桩和五轴搅拌桩的 28 d 平均强度值分别为

0.41, 0.29, 0.52 MPa, 考虑到日本搅拌桩 28 d 强度控制值采用 0.5 MPa, 故搅拌桩取芯强度值普遍较低, 这通常是由于取芯强度试验周期长, 受试样扰动等因素影响较大, 并且水泥土搅拌凝固后变得松脆, 导致其取样和仪器切割制作试块的困难性增大。但总体来说, 三轴搅拌桩的强度值较低, 且离散性较大, 二轴搅拌桩的强度较好, 但不同龄期的离散性变化较大, 而五轴搅拌桩的强度值最高, 离散性也较小。

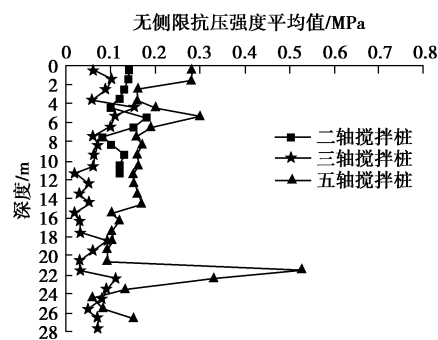


图 4 搅拌桩无侧限抗压强度平均值 (7 d)

Fig. 4 Average values of 7-day unconfined compressive strength of mixed piles

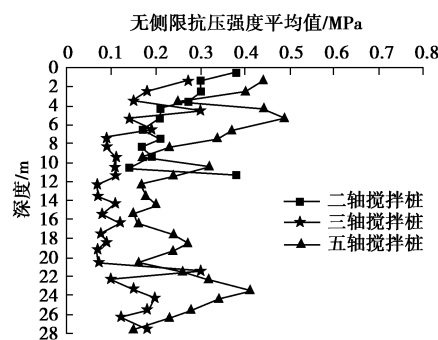


图 5 搅拌桩无侧限抗压强度平均值 (14 d)

Fig. 5 Average values of 14-day unconfined compressive strength of mixed piles

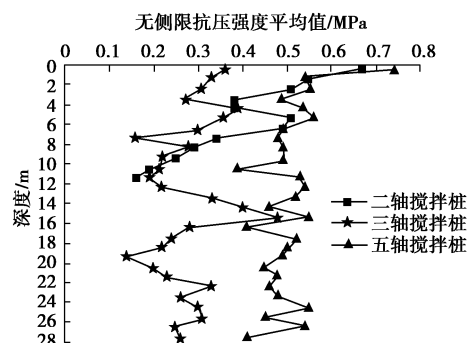


图 6 搅拌桩无侧限抗压强度平均值 (28 d)

Fig. 6 Average values of 28-day unconfined compressive strength of mixed piles



表 3 搅拌桩试验结果统计表（7 d）  
Table 3 7-day test results of mixed piles

土层	土层名称	土层厚度/m	无侧限抗压强度平均值/MPa			变异系数		
			二轴	三轴	五轴	二轴	三轴	五轴
① <sub>1</sub>	填土	2.60	0.13	0.08	0.24	0.33	0.38	0.24
② <sub>1</sub>	粉质黏土	0.90	0.11	0.07	0.13	0.26	0.57	0.48
② <sub>3</sub>	砂质粉土	3.30	—	0.10	0.21	—	0.41	0.33
④	淤泥质黏土	8.20	0.12	0.06	0.16	0.37	0.64	0.21
⑤ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	7.40		0.05	0.18		0.78	0.71
⑤ <sub>2</sub>	黏质粉土夹粉质黏土	12.60		0.08	0.15		0.67	0.62
无侧限抗压强度平均值/MPa			0.12	0.07	0.18			
多层土中水泥搅拌桩强度平均值的变异系数			0.08	0.25	0.23			

表 4 搅拌桩试验结果统计表（14 d）  
Table 4 14-day test results of mixed piles

土层	土层名称	土层厚度/m	无侧限抗压强度平均值/MPa			变异系数		
			二轴	三轴	五轴	二轴	三轴	五轴
① <sub>1</sub>	填土	2.60	0.35	0.23	0.42	0.15	0.27	0.15
② <sub>1</sub>	粉质黏土	0.90	0.29	0.16	0.32	0.06	0.31	0.24
② <sub>3</sub>	砂质粉土	3.30	—	0.20	0.39	—	0.30	0.21
④	淤泥质黏土	8.20	0.20	0.11	0.25	0.23	0.43	0.37
⑤ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	7.40		0.10	0.23		0.69	0.33
⑤ <sub>2</sub>	黏质粉土夹粉质黏土	12.60		0.15	0.29		0.36	0.36
无侧限抗压强度平均值/MPa			0.28	0.16	0.32			
多层土中水泥搅拌桩强度平均值的变异系数			0.27	0.32	0.24			

表 5 搅拌桩试验结果统计表（28 d）  
Table 5 28-day test results of mixed piles

土层	土层名称	土层厚度/m	无侧限抗压强度平均值/MPa			变异系数		
			二轴	三轴	五轴	二轴	三轴	五轴
① <sub>1</sub>	填土	2.60	0.53	0.33	0.61	0.23	0.16	0.20
② <sub>1</sub>	粉质黏土	0.90	0.38	0.29	0.52	0.08	0.19	0.08
② <sub>3</sub>	砂质粉土	3.30	—	0.33	0.52	—	0.25	0.12
④	淤泥质黏土	8.20	0.33	0.26	0.49	0.41	0.35	0.13
⑤ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	7.40		0.26	0.48		0.39	0.12
⑤ <sub>2</sub>	黏质粉土夹粉质黏土	12.60		0.29	0.48		0.21	0.13
无侧限抗压强度平均值/MPa			0.41	0.29	0.52			
多层土中水泥搅拌桩强度平均值的变异系数			0.25	0.11	0.10			

效加固深度。

(2)通过试验发现,搅拌桩强度不但与龄期有关,还与土层性质有关。在同等条件下,除去填土层,砂质粉土搅拌的水泥土试块强度较其它土层的水泥土试块强度高,同时取芯强度试验周期长,受试样扰动、仪器切割制作试块等因素影响较大,通常试验结果偏小,离散性较大,二轴、三轴搅拌桩 28 d 取芯强度值小于 0.5 MPa,而五轴搅拌桩的强度值在 0.52 MPa。

(3)五轴搅拌桩不仅具备二轴搅拌桩和三轴搅拌

5 结 论

(1) 由试验结果可得,不考虑试验方法等误差,相比较而言,各土层中,五轴搅拌桩的桩身强度比二轴搅拌桩稍高,并明显高于三轴搅拌桩,且比三轴搅拌桩的强度值变异系数小。在实际工程应用上,与二轴搅拌桩相比,五轴搅拌桩更适用于地基加固、基坑开挖较深的围护中;与三轴搅拌桩相比,五轴搅拌桩有效地提高搅拌均匀性、消除地面冒浆现象、增加有

桩的优点,还具有机械化程度高、成本低、工期大大缩短、环境污染少等特点,是一种保安全、保质量、国家提倡的绿色环保新工法,有可观的社会经济效益,具有较大的推广意义和良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong, Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture Building Press, 2009. (in Chinese))
- [2] MASA AKI TERASHI. The state of practice in deep mixing methods[C]// Proceedings of the third International Conference on Grouting and Ground Treatment. New Orleans, 2003: 25 - 49.
- [3] PORBAHA A. Recent advances in deep mixing research and development in the USA[C]// Ground Modification and Seismic Mitigation, GeoShanghai. Reston, 2006: 45 - 50.
- [4] 何开胜, 陈宝勤. 超长水泥土搅拌桩的试验研究和工程应用[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2): 80 - 86. (HE Kai-sheng, CHEN Bao-qin. Experimental study and application of cement deep mixing piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(2): 80 - 86. (in Chinese))
- [5] 徐超, 董天林, 叶观宝. 水泥土搅拌桩法在连云港海相软土地基中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 495 - 498. (XU Chao, DONG Tian-lin, YE Guan-bao. Application of cement deep mixing method in Lianyungang marine soft soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 495 - 498. (in Chinese))
- [6] 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 deep mixing column for soft ground improvement in expressway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2272 - 2280. (in Chinese))
- [7] 梁志荣, 李忠诚, 刘江, 等. 三轴水泥土搅拌桩强度分析及试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊 2): 1562 - 1567. (LIANG Zhi-rong, LI Zhong-cheng, LIU Jiang, et al. Strength analysis and experimental research on soil-cement mixed pile made by triaxial stirring machine[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1562 - 1567. (in Chinese))
- [8] 梁志荣, 李忠诚, 刘江. 三轴水泥土搅拌桩强度检测试验分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 475 - 478. (LIANG Zhi-rong, LI Zhong-cheng, LIU Jiang. Strength tests on soil-cement mixed piles by triaxial stirring machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 475 - 478. (in Chinese))
- [9] 梁志荣, 李忠诚, 刘江. 水泥土搅拌桩取芯与取浆两种强度检测分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 435 - 439. (LIANG Zhi-rong, LI Zhong-cheng, LIU Jiang. Strength analysis on soil-cement mixed piles by trials of drilling core and taking soil-cement grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 435 - 439. (in Chinese))
- [10] 黄立伟, 谢曙东, 谢益飞, 等. 一种多轴水泥土连续搅拌桩装置及施工方法: 中国专利, 201110428532.1[P]. 2012-06-13. (HUANG Li-wei, XIE Shu-dong, XIE Yi-fei, et al. A multi-axis continuous cement-soil mixed pile device and construction method: Chinese Patent, 201110428532.1[P]. 2012-06-13. (in Chinese))
- [11] 谢晓东, 卢寿根, 谢益飞, 等. 一种五轴水泥土搅拌桩装置及施工方法: 中国专利, 201210014492.0[P]. 2012-07-04. (XIE Xiao-dong, LU Shou-gen, XIE Yi-fei, et al. A five-axis cement-soil mixed pile device and construction method: Chinese Patent, 201210014492.0[P]. 2012-07-04. (in Chinese))
- [12] 黄立伟, 谢曙东, 谢益飞, 等. 一种多轴水泥土连续搅拌桩装置: 中国专利, 201120534324.5[P]. 2012-09-05. (HUANG Li-wei, XIE Shu-dong, XIE Yi-fei, et al. A multi-axis continuous cement-soil mixed pile device: Chinese Patent, 201120534324.5[P]. 2012-09-05. (in Chinese))
- [13] 潘殿琦, 陈勇. 深层搅拌桩强度的影响因素与改善措施[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1954 - 1958. (PAN Dian-qi, CHEN Yong. Influence factors on strength of deep-mixing pile and improvement measure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1954 - 1958. (in Chinese))
- [14] 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩的荷载传递规律[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 1 - 8. (DUAN Ji-wei, GONG Xiao-nan, ZENG Guo-xi. Load transfer behavior of cement treated soil column[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(4): 1 - 8. (in Chinese))
- [15] 何开胜, 徐立新. 超长水泥土搅拌桩的荷载传递特性[J]. 建筑结构, 2000, 30(5): 17 - 19. (HE Kai-sheng, XU Li-xin. Load transfer behavior of super-long cement mixing piles[J]. Building Structure, 2000, 30(5): 17 - 19. (in Chinese))