

【工程应用】

# 多向切割搅拌桩机的工作机理与搅拌桩性能研究

练财宗<sup>1</sup>, 刘全林<sup>2</sup>, 黄伟<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 上海强劲地基工程股份有限公司, 上海 201800)

**摘要:** 针对国内水泥土搅拌桩应用中存在的问题, 介绍了自行研制的多向切割水泥土搅拌桩机及其工作机理; 对搅拌桩机的土体破碎程度和搅拌均匀性进行量化分析, 并通过量纲分析, 建立了搅拌桩桩体无侧限抗压强度与成桩主要影响因素的相关经验函数。通过工程实例和试验数据分析, 对多向切割搅拌桩芯样的无侧限抗压强度计算值与实测值比较, 表明多向切割搅拌桩施工工艺能满足施工质量要求, 具有优越的工程特性。

**关键词:** 多向切割搅拌桩; 工作机理; 破碎程度; 搅拌均匀性; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)05-0408-06

## Research on working mechanism of the multidirectional cutting mixed column machine and performance of the mixed column

LIAN Cai-zong<sup>1</sup>, LIU Quan-lin<sup>2</sup>, HUANG Wei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2. Shanghai Qiangjin Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 201800, China)

**Abstract:** In view of the problems in the application of cement-soil mixed column in China, the multidirectional cutting cement-soil mixed column machine and its working mechanism are introduced. The soil fragmentation degree and mixing uniformity are quantitatively analyzed. Through dimensional analysis, the relevant empirical function between the unconfined compressive strength of the mixing column and the main influencing factors are established. Through the analysis of engineering examples and test data, the unconfined compressive strength of the multidirectional cutting mixed column core sample is compared with the measured value, which shows that the multi-directional cutting mixing construction technology can meet the requirements of construction quality and has excellent engineering characteristics.

**Key words:** multidirectional cutting mixed column; working mechanism; fragmentation degree; mixing uniformity; unconfined compressive strength

## 0 引言

水泥土搅拌桩是指利用水泥等材料作为固化剂, 通过特制的搅拌机械, 在地基中就地将软土和固化剂(浆液或粉体)进行强制搅拌, 软土与固化剂发生一系列的物理和化学反应, 使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥土搅拌桩。这种水泥土搅拌桩与桩周土体一起形成复合地基, 从而提高地基强度, 减小地基沉降<sup>[1-4]</sup>。

水泥土搅拌法加固软土技术有以下优点<sup>[5-6]</sup>: 最大限度地利用了原土; 搅拌时振动小、噪声小和无污染, 对周围原有建筑物及地下沟管影响很小; 施

工方式简单、工期较短、造价低。水泥土搅拌法最适宜于加固各种成因的饱和软黏土。国外使用深层搅拌法加固的土质有新吹填的超软土、沼泽地带的泥炭土、沉积的粉土和淤泥质土等。目前国内常用于加固淤泥、淤泥质土、粉土和含水量较高且地基承载能力标准值较低的黏性土等<sup>[7]</sup>。

工程实践证明, 搅拌桩是一种具有很大推广价值的软土地基加固技术, 目前已广泛应用于各种工程建设的地基处理中, 水泥土搅拌桩在加固软土地基中具有较多优越性, 但也暴露出其在应用上的一些弊端, 主要有表现在以下两方面:

(1) 原状土体切割破碎不充分与黏糊叶片<sup>[8]</sup>

搅拌叶片之间充填着土体,在旋转与上下移动过程中,没有其它的叶片来切割和破碎这部分土体,使得搅拌叶片上仍存在大量的原状土体;此外,搅拌叶片旋转带动土体沿叶片的旋转方向一起运动,将土体向四周外挤压,被挤压的土体又向孔内运动,叶片与土体之间没有相对切割与破碎的过程,土体挤压形成了土块。搅拌叶片之间塞满土体,搅拌轴和叶片均被黏性土包裹,无法有效破碎土体,搅拌叶片对孔外土体的挤压和扰动非常明显。

## (2) 固化剂浆液与土颗粒混合不均匀

钻杆进入土层后,上层土体因叶片切削作用变得松散,对下部约束作用减弱,水泥浆液在搅拌叶片螺旋升力、喷浆压力、钻杆钻进压力、土压力及超空隙水压力作用下,沿着钻杆上行,甚至出现地面冒浆,造成桩长范围内水泥含量上下分布不均,影响成桩整体性及质量<sup>[9-10]</sup>。传统单轴搅拌桩机仅上提时底部喷浆,浆液在土块之间及搅拌叶片外侧流动,使得与土体的混合不充分,形成的桩体不均匀以及桩端缺浆等现象。

传统的单轴搅拌桩技术制成的桩体存在着桩身均匀性差、强度低且完整性较低的缺陷,限制其在淤泥质地层使用的局面。为此,针对黏性土需要强制切割、破碎与充分混合固化剂才能形成均匀、完整搅拌桩体的要求,通过对单轴搅拌桩的搅拌叶片布置和喷浆方式的研究,研制了一种新型的多向切割单轴搅拌桩机具。

# 1 多向切割搅拌桩机的工作机理

## 1.1 多向切割破碎的技术原理

多向切割搅拌桩搅拌头是在钻杆上设置单向旋转搅拌叶片并设置上、下喷浆口,同时在钻杆外部嵌套一个可沿钻杆周向自由转动的三臂笼式钻具,并在三臂笼式钻具上设置搅拌叶片,其搅拌叶片与内钻杆搅拌叶片交错排列的一种搅拌头。多向切割搅拌桩是指搅拌头工作时,三臂笼式钻具嵌入土体中,不随内钻杆转动而转动,两组叶片形成相对逆向转动,正、反方向多向切割搅拌土体和固化剂浆液形成的搅拌桩。

多向切割搅拌桩搅拌头如图1所示。多向切割搅拌桩的设备改造灵活简单,只需将常规搅拌桩设备的搅拌头替换为多向切割搅拌桩搅拌头,同时在搅拌头的内钻杆上设置上、下喷浆口,并且根据需求使用相应功率的动力头,即可改造完成。多向切割搅拌头的两组搅拌叶片是交错排列的,使土体破

碎的更加充分;外部笼式钻具不随内钻杆转动而转动,两组叶片形成相对逆向转动,起到一定的压浆作用,保证固化剂的掺入量,使成桩的质量得到保证。

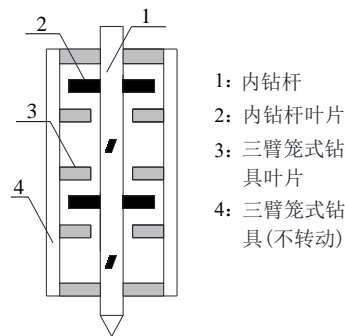


图1 多向切割搅拌头

Fig. 1 Multidirectional cutting and mixing head

与传统水泥土搅拌桩相比,多向切割搅拌桩的内钻杆搅拌叶片与外部三臂笼式钻具搅拌叶片相对逆向转动,对土体和固化剂浆液进行多向切割搅拌,具有以下优点:

(1) 三臂笼式钻具的搅拌叶片不随内钻杆转动,可以打断固化剂浆液在压力作用下的上升路径,起到一定的压浆作用,使固化剂浆液集中在内钻杆搅拌叶片和三臂笼式钻具搅拌叶片间,保证固化剂浆液的掺入量。

(2) 内钻杆搅拌叶片与三臂笼式钻具搅拌叶片以交错排列的方式分布,能互相切割搅拌叶片、笼臂和内钻杆的黏滞泥浆,大大减少了抱钻的泥浆量,避免出现土浆跟转的现象,显著提高了搅拌效果。

(3) 由于多向切割搅拌桩搅拌头的独特结构,固化剂浆液控制在两组搅拌叶片间,同时多向切割土体,土体被破碎得更小,固化剂浆液得以均匀地分布到土体中,使固化剂浆液和土体搅拌更加充分,保证桩体的均匀性,提高成桩质量。

(4) 由于是多向切割搅拌,“两搅一喷”施工工艺便可保证搅拌桩成桩质量,大大提高了施工效率。

## 1.2 搅拌桩机的土体破碎程度量化分析

在一般情况下,搅拌叶片破碎次数(BRN)的标准为不小于450次/m。破碎次数(BRN)通过以下公式计算得出:

$$BRN=(m+s) \times (N_u/v_u + N_d/v_d) \quad (1)$$

式中:BRN为叶片的破碎次数,次/m; $m$ 为叶片总数; $s$ 为外侧搅拌笼数量; $N_u$ 为提升时的叶片转速,r/min; $v_u$ 为提升速度,m/min; $N_d$ 为钻入时的叶片转速,r/min; $v_d$ 为钻入速度,m/min。

通过土体的破碎次数,取相应的影响系数来评价土体的破碎程度对搅拌桩强度的影响。当  $BRN$  大于 1200,取破碎切割影响系数  $k_n=1$ ; 750~1200 之间,取破碎切割影响系数  $k_n=0.75$ ; 小于 750,取破碎切割影响系数  $k_n=0.55$ 。

### 1.3 搅拌桩机的搅拌均匀性分析

当固化剂浆液数量充足时,采用高低喷浆口的搅拌喷浆,在低喷浆口以上的搅拌叶片数量  $m_1$ ,在高喷浆口以下的搅拌叶片数量  $m_2$ ,搅拌桩机的搅拌均匀指标  $BRE$  按下式计算:

$$BRE=m_2N_u/v_u+m_1N_d/v_d \quad (2)$$

式中:  $BRE$  为搅拌均匀指标;  $m_1$  为在低喷浆口以上的搅拌叶片数量;  $m_2$  为在高喷浆口以下的搅拌叶片数量。

通过搅拌均匀指标值,取相应的影响系数来评价搅拌均匀程度对搅拌桩强度的影响。当  $BRE$  大于 1000,取搅拌均匀影响系数  $k_e=1$ ; 750~1000 之间,取搅拌均匀影响系数  $k_e=0.8$ ; 小于 750,取搅拌均匀影响系数  $k_e=0.6$ 。

### 1.4 多向切割搅拌桩施工工艺

多向切割搅拌桩施工示意图如图 2 所示。

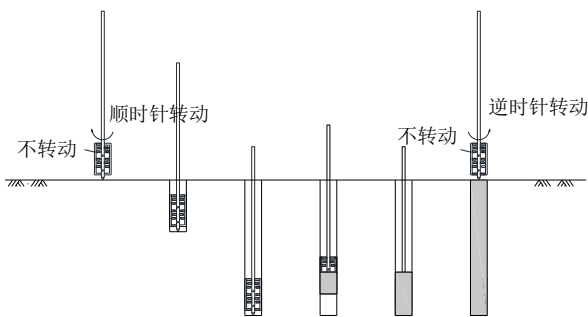


图 2 多向切割搅拌桩施工示意图

Fig. 2 Construction steps of multidirectional cutting and mixed column

其施工工艺步骤如下:

(1) 平整场地,定位、放线; (2) 钻机定位: 搅拌机对齐桩位点; (3) 切土下沉: 启动搅拌机,使搅拌机沿导向架向下切土,下沉时不开启送浆泵。外部三臂笼式钻具不转动,内钻杆顺时针旋转下沉,多向切割搅拌土体,直至设计深度; (4) 复搅: 当搅拌头到达设计深度后,提钻复搅至距桩底 5 m 处,开启下喷浆口,喷浆下沉至桩底后,关闭下喷浆口,打开上喷浆口,在桩底持续喷浆搅拌不少于 10 s; (5) 喷浆上提: 保持开启上喷浆口,外部三臂笼式钻具不转动,内钻杆逆时针旋转提升,

多向切割搅拌土体和固化剂浆液,搅拌提升至桩顶标高以上 0.5 m 处; (6) 清洗、移位。

## 2 搅拌桩桩体无侧限抗压强度与成桩质量因素的相关性分析

考察搅拌桩成桩质量的要素主要有: 原状土体的物理力学性能:  $\gamma, w, c, \varphi$ , 土体被切割破碎的影响系数  $k_n$ , 固化剂的掺入量  $\alpha$  和水灰比  $t$ , 及搅拌均匀影响系数  $k_e$ 。

水泥土的强度均按 28 d 龄期的无侧限抗压强度取值。通过考察成桩质量的主要影响因素,基于这些主要影响因素,先建立一个多因素函数,然后把这些因素的量纲代入,利用量纲分析法写出这个函数乘法显式,从而建立搅拌桩桩体无侧限抗压强度  $q_u$  的相关经验函数:

$$q_u=\alpha\gamma^b(a/t)^d(1+c/w)^f(\varphi/w)^gk_nk_e \quad (3)$$

式中:  $q_u$  为桩体芯样无侧限抗压强度, MPa;  $\gamma$  为原状土的重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $w$  为原状土的含水率, %;  $c$  为原状土的黏聚力,  $\text{kPa}$ ;  $\varphi$  为原状土的内摩擦角,  $^\circ$ ;  $k_n$  为土体被切割破碎的影响系数;  $\alpha$  为固化剂掺入量, %;  $t$  为固化剂水灰比;  $k_e$  为搅拌均匀影响系数;  $a, b, d, f, g$  为相关性系数。其中,相关性系数  $a, b, d, f, g$  将根据表 1 试验数据来确定。

表 1 搅拌桩桩体无侧限抗压强度与成桩主要影响因素的试验数据

Table 1 Experimental data of the unconfined compressive strength of mixed column and the main influencing factors

$q_u/\text{MPa}$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	$w/\%$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$t$	$\alpha/\%$	$k_n$	$k_e$
2.5	18.5	20	10	20	1.0	15	1.00	1.0
1.8	17.5	25	10	15	1.0	15	1.00	1.0
1.5	17.0	30	10	10	1.0	15	1.00	1.0
1.0	18.5	20	10	20	1.0	13	0.75	1.0
0.8	17.5	25	10	15	1.0	13	0.75	1.0
0.5	17.0	30	10	10	1.0	13	0.75	1.0
3.5	18.5	20	10	20	0.8	20	1.00	1.0
2.3	17.5	25	10	15	0.8	20	1.00	1.0
1.9	17.0	30	10	10	0.8	20	1.00	1.0
2.0	18.5	20	10	20	0.8	15	1.00	0.8
1.4	17.5	25	10	15	0.8	15	1.00	0.8
1.1	17.0	30	10	10	0.8	15	1.00	0.8
1.3	16.9	54	5	10	1.0	18	1.00	1.0
1.1	16.3	58	5	5	1.0	18	1.00	1.0
0.8	16.0	60	5	5	1.0	18	1.00	1.0

通过 MATLAB 拟合得到:

$$a=1.235\ 5, b=-0.882\ 9, d=0.961\ 8, f=0.866\ 7,$$

$g=0.212\ 7$ , 则  $R$  的相关经验函数为:

$$q_u=1.235\ 5\gamma^{0.882\ 9}(\alpha/t)^{0.961\ 8}(1+c/w)^{0.866\ 7}(\phi/w)^{0.212\ 7}k_nk_e \quad (4)$$

### 3 应用案例

#### 3.1 原状土的物理力学性质

实验地点位于上海市嘉定区某一工程施工场

地, 该场地位于长江三角洲入海口东南前缘, 属于湖沼平原I<sub>2</sub>区地貌类型。土层自上而下分述如下:

①层: 素填土, 松散, 高等压缩性, 由粉质黏土组成, 含植物根茎、碎石和碎砖块, 土质不均。②<sub>1</sub>层: 粉质黏土, 软-可塑状, 中等压缩性。②<sub>2</sub>层: 砂质粉土, 稍密, 中等压缩性。③层: 淤泥质粉质黏土夹黏质粉土, 流塑状, 高等压缩性。④<sub>1</sub>层: 粉质黏土, 硬塑状, 中等压缩性。④<sub>2</sub>层: 砂质粉土, 稍密-中密, 中等压缩性。④<sub>3</sub>层: 粉质黏土, 软塑状, 中等压缩性。⑤层: 砂质粉土, 密实, 中等压缩性。土层的主要物理力学指标如表 2 所示。

表 2 土层的主要物理力学指标

Table 2 Main physical and mechanical characteristics indexes of the soil layer

土层编号	土层名称	厚度/m	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	含水量 $w/\%$	孔隙比 $e$	液限指数 $I_L$	塑限指数 $I_P$	快剪	
								$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{°})$
①	素填土	1.0	—	—	—	—	—	—	—
② <sub>1</sub>	粉质黏土	1.1	18.4	32.3	0.924	0.72	15.4	19	19.0
② <sub>2</sub>	砂质粉土	3.7	18.7	27.9	0.808	—	—	5	31.0
③	淤泥质粉质黏土夹黏质粉土	2.8	17.8	39.8	1.105	1.15	15.6	14	18.0
④ <sub>1</sub>	粉质黏土	3.8	19.5	24.2	0.708	0.24	15.0	35	19.0
④ <sub>2</sub>	砂质粉土	6.0	18.6	29.2	0.840	—	—	5	31.5
④ <sub>3</sub>	粉质黏土	14.4	17.9	36.4	1.043	0.88	16.1	15	19.0
⑤	砂质粉土	7.2	18.6	29.1	0.835	—	—	4	34.0

#### 3.2 现场搅拌桩施工的主要参数

试验用桩共 6 根, 其中传统单轴水泥土搅拌桩 (搅拌叶片与多向切割搅拌头的内钻杆搅拌叶片一致, 为斜桨式搅拌叶片) 3 根, 多向切割水泥土搅拌桩 3 根, 都采用 2 搅 1 喷工艺施工。试验桩长均为 18 m, 桩径为 700 mm, 固化剂掺入量为 12%, 水灰比为 0.8。提升时的叶片转速  $N_u$  为 32 r/min, 提升速度  $v_u$  为 1 m/min; 钻入时的叶片转速  $N_d$  为 23 r/min, 钻入速度  $v_d$  为 2 m/min。

以下是多向切割水泥土搅拌桩的破碎切割影响系数和搅拌均匀影响系数的取值, 其中  $m=38, s=1, m_2=36$

$$BRN=(38+1)\times(32/1+23/2)=1\ 696.5>1\ 200$$

$$\text{取 } k_n=1$$

$$BRE=36\times 32/1=1\ 152>1\ 000$$

$$\text{取 } k_e=1$$

以下是传统单轴水泥土搅拌桩的破碎切割影响系数和搅拌均匀影响系数的取值, 其中  $m=20, m_2=18$

$$BRN=20\times(32/1+23/2)=870$$

在 750~1 200 内, 取  $k_n=0.75$

$$BRE=18\times 32/1=576<750$$

$$\text{取 } k_e=0.6$$

#### 3.3 试验结果

室内试验选择的是③淤泥质粉质黏土夹黏质粉土层土, 水灰比为 0.8, 固化剂掺量为 12%, 分别进行 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度试验, 结果如表 3 所示。

表 3 室内无侧限抗压强度试验结果

Table 3 Lab test results of unconfined compressive strength

固化剂掺量	水灰比	无侧限抗压强度/MPa	
		7 d	28 d
12%	0.8	2.09	3.12

现场对传统单轴水泥土搅拌桩和多向切割水泥土搅拌桩进行了取芯试验, 龄期为 28 d, 芯样加工后尺寸为  $\Phi 100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 。表 4 和表 5 分别为多向切割水泥土搅拌桩和传统单轴水泥土搅拌桩的取芯试验结果。

表4 多向切割水泥土搅拌桩的芯样无侧限抗压强度

Table 4 Unconfined compressive strength of the core sample of the multidirectional cutting cement-soil mixed column

土层名称	深度/ m	实测值 1/ MPa	实测值 2/ MPa	实测值 3/ MPa	计算值/ MPa
粉质黏土	2	1.42	1.47	1.23	1.70
砂质粉土	4	1.50	1.56	1.46	1.49
淤泥质粉 质黏土夹 黏质粉土	7	1.61	1.65	1.77	1.44
粉质黏土	11	2.26	2.31	2.50	2.50
砂质粉土	16	1.31	1.37	1.22	1.47

表5 传统单轴水泥土搅拌桩的芯样无侧限抗压强度

Table 5 Unconfined compressive strength of the core sample of the traditional uniaxial soil-cement mixed column

土层名称	深度/ m	实测值 1/ MPa	实测值 2/ MPa	实测值 3/ MPa	计算值/ MPa
粉质黏土	2	2.23	2.85	2.52	0.77
砂质粉土	4	1.89	1.95	2.11	0.67
淤泥质粉 质黏土夹 黏质粉土	7	0.68	0.75	0.62	0.65
粉质黏土	11	0.35	0.40	0.34	1.13
砂质粉土	16	0.16	0.16	0.17	0.66

取芯强度低于室内试验强度,多向切割搅拌桩的芯样强度折减系数为0.51~0.56,传统单轴搅拌桩的芯样强度折减系数为0.19~0.24。其主要原因为:施工搅拌过程中的浮浆和部分置换土体带走浆液;取芯和试件加工过程对芯样的扰动;搅拌的均匀性差异。

从表4中可以看出,多向切割水泥土搅拌桩芯样无侧限抗压强度主要集中在1.20~1.70 MPa之间,由于④<sub>1</sub>层土的物理力学性质与其它土层差异较大,所以该土层的芯样无侧限抗压强度与其他土层的相差较大,而不是搅拌不均匀所导致。芯样无侧限抗压强度实测值与计算值相差较小,由此可以看出,多向切割搅拌桩施工工艺可以保证固化剂浆液在桩体的分布,并且能搅拌均匀,可以保证搅拌桩的施工质量;经验函数能较为准确地预测成桩质量,并且在物理力学性质相差较大的土层间也适用。

从表5中可以看出,传统单轴水泥土搅拌桩芯样无侧限抗压强度在桩体较浅处较大,主要在1.90~2.85 MPa之间,而在桩体深处却很小,主要

在0.16~0.40 MPa之间,这是由于传统单轴搅拌桩施工时,固化剂浆液在搅拌叶片的螺旋升力、喷浆压力等外力作用下,沿着钻杆上升,所以上部桩体固化剂含量偏大,下部桩体固化剂含量偏小,导致上部桩体芯样无侧限抗压强度较高,下部桩体芯样无侧限抗压强度较低。传统单轴搅拌桩芯样无侧限抗压强度实测值与计算值相差较大,这是由于传统单轴水泥土搅拌桩施工时溢浆和搅拌不均匀导致的。

由于传统单轴水泥土搅拌桩的BRN值和BRE值均远小于多向切割水泥土搅拌桩,故而多向切割水泥土搅拌桩芯样的无侧限抗压强度计算值大于传统单轴水泥土搅拌桩芯样无侧限抗压强度计算值,从成桩质量也能反映出,多向切割水泥土搅拌桩对土体的破碎程度和搅拌均匀性优于传统单轴水泥土搅拌桩。

多向切割搅拌桩的芯样如图3所示,芯样多为表面光滑,搅拌纹理清晰,未见水泥粒块,且手按无指硬。传统单轴搅拌桩的芯样如图4所示,芯样多为表面粗糙,搅拌纹理不连续,且夹水泥块。

结合试验结果和芯样状态,表明多向切割水泥土搅拌桩的成桩质量优于传统单轴水泥土搅拌桩。



图3 多向切割搅拌桩芯样

Fig. 3 Core samples of the multidirectional cutting mixed column



图4 传统单轴搅拌桩芯样

Fig. 4 Core samples of the traditional uniaxial soil-cement mixed column

## 4 结 论

通过对土体破碎程度和搅拌均匀的量化分析,结合实验结果,表明多向切割搅拌桩施工工艺能够较好的破碎黏土,使固化剂与土体搅拌均匀,能够满足搅拌桩在软土地区的施工质量要求,其工程特性远优于传统单轴水泥土搅拌桩。提出的成桩强度经验公式可以较好地预测成桩后桩体芯样的无侧限抗压强度,这为搅拌桩成桩质量的验证提供了一定的参考。

### 参考文献

- [1] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 560-564.  
LIU Song-yu, XI Pei-sheng, CHU Hai-yan, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 560-564.
- [2] 刘慧芬, 郑伟锋, 程春香, 等. 水泥土搅拌桩加固软土地基施工质量控制[J]. 地基处理, 2020, 2(6): 527-532.  
LIU Hui-fen, ZHENG Wei-feng, CHENG Chun-xiang, et al. Construction quality control of cement mixing pile for soft ground treatment[J]. Journal of Ground Improvement, 2020, 2(6): 527-532.
- [3] 龙丽. 水泥土搅拌桩在软土地基处理中的应用[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(7): 146-147.  
LONG Li. Application of cement soil mixing pile in soft foundation treatment[J]. Building Technology Development, 2017, 44(7): 146-147.
- [4] 王立群, 任正安, 贺仲治, 等. 水泥土复合地基工程应用技术研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(增刊 1): 502-503, 445.  
WANG Li-qun, REN Zheng-an, HE Zhong-zhi, et al. Study of cement-soil composite foundation engineering technology[J]. Building Structure, 2010, 40(S1): 502-503, 445.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.
- [6] 宫悦, 周家荣. 水泥搅拌桩的设计与施工要点分析[J]. 四川建材, 2019, 45(7): 81-82.  
GONG Yue, ZHOU Jia-rong. Analysis of key points of design and construction of cement mixing pile[J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(7): 81-82.
- [7] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
GONG Xiao-nan. Manual of Ground Improvement[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [8] 陈晋中, 刘凤翰, 刘松玉. 双向水泥土搅拌桩技术及常见施工问题处理[J]. 建筑技术, 2011, 42(9): 808-810.  
CHEN Jin-zhong, LIU Feng-han, LIU Song-yu. Technology of bidirectional deep mixing cement-soil columns and treatment of common construction problems[J]. Architecture Technology, 2011, 42(9): 808-810.
- [9] 郝忠, 王馨玉, 焦慰. 单向和双向水泥土搅拌桩软基处理效果试验研究[J]. 江苏建材, 2015(6): 33-36.  
HAO Zhong, WANG Xin-yu, JIAO Wei. Experimental study on soft foundation treatment effect of unidirectional and bidirectional cement-soil mixing piles[J]. Jiangsu Building Materials, 2015(6): 33-36.
- [10] 刘松玉. 新型搅拌桩复合地基理论与技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 2014.  
LIU Song-yu. Theory and Technology of Composite Foundation with New Mixing Pile[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2014.