

# 水泥搅拌桩工艺在海港软基处理中的应用研究

余先禄

福建省湄洲湾港口发展中心水运工程质量安全技术站

**摘要:** 海港工程常面临深厚淤泥、软土等不良地质条件,传统地基处理技术存在成本高、工期长等问题,水泥搅拌桩通过原位固化技术,可显著提升地基承载力并控制沉降,尤其适用于海港码头、防波堤等结构的基础加固。以福建省泉惠石化工业园区 A 地块及鲤鱼岛滞洪区生态建设工程为例,通过地基基础原状土室内试验、现场十字板剪切试验与标准贯入度试验获取了土层抗剪强度、密实度等关键力学参数,全面掌握了项目软基工程特性。并基于试验数据,对水泥搅拌桩加固该类型软土地基的适用性进行了论证,分析了桩体与周围土体的相互作用机理及复合地基承载特性。研究表明,水泥搅拌桩通过水泥固化反应改善土体结构,可有效提高软基强度并抑制变形,其工艺特性与海港软基工程需求具有良好适配性。

**关键词:** 水泥搅拌桩; 海港围堤工程; 地基处理; 施工工艺

**DOI:** 10.65976/3078-8145.2026.01.002

## 引言

水泥搅拌桩是改良软弱地基的一种常见方法。李明旭<sup>[1]</sup>深入分析了水泥搅拌桩在房屋建设工程中的实际应用;崔堂灿<sup>[2]</sup>、杨学文<sup>[3]</sup>分析了水泥搅拌桩施工技术在市政道路软基处理中的应用;李联波<sup>[4]</sup>、李晶晶<sup>[5]</sup>分析了路基软基处理中的水泥深层搅拌桩运用;高茂鸿<sup>[6]</sup>等分析桩长、桩身模量、桩间距、桩间土模量等计算参数对于桥头过渡段路基差异沉降的影响特性,提出了某高速桥头过渡段路基优化方案。杨秀丽<sup>[7]</sup>研究指出水泥搅拌桩施工技术对于软弱地基具有高效性、环保性、经济性等优点。

据研究调查,湄洲湾港“十四五”期间湄洲湾内航道锚地、港口码头疏浚物外弃量 4810.62 万 m<sup>3</sup>,而湄洲湾内总纳泥区容量可达 3486 万 m<sup>3</sup>的泉惠石化工业园区 A 地块及鲤鱼岛滞洪区生态建设工程与泉惠石化园区 E 地块回填工程将在未来作为湄洲湾航道锚地、港口码头疏浚物主要纳泥点<sup>[8]</sup>。据统计,湾内疏浚物主要类型有软土类、硬土类和礁石,其中软土类占 50% ~ 80%,硬土类占 20% ~ 30%<sup>[8]</sup>。疏浚物回填的软土地基天然含水量高、孔隙比大,抗剪强度低,难以承受上部荷载,易导致地基变形甚至破坏。本文基于泉惠石化工业园区 A 地块及鲤鱼岛滞洪区生态建设工程,研究讨论水泥搅拌桩施工工艺在海港围堤工程中的适用性。

## 1 工程概况

泉惠石化工业园区 A 地块及鲤鱼岛滞洪区生态建设工程建设内容包含回填工程、水利工程及道路工程三部分,其中回填工程包含 A1、A2 回填区,A1 回填

区 144.9 万 m<sup>2</sup>;水利工程包括新建许人溪下游左岸堤防 1.71km;新建鲤鱼岛滞洪区西侧堤防 0.88km;新挖一个滞洪区面积 3224 亩(含许人溪、鲤鱼岛滞洪湖和鲤鱼排洪渠);鲤鱼排洪渠长 3.869km;大屿排洪渠长 1.275km;道路工程包括新建乙烯南路连接线、乙烯南路、中化三路、中化西路、疏港一路和疏港二路等 6 条道路,总长度 13.07km。

## 2 地基工程土质分析

根据钻孔报告,自上而下、场地内分布的地层岩性有第四系人工填土,第四系全新统、上更新统海积、冲洪积成因的黏性土、淤泥、砂土、卵石等,下伏燕山期花岗岩及其风化层。场地地层结构中等复杂,属于滨海区深厚复杂软弱地层。为判断土层抗剪、抗压及液化性能,项目采用了室内试验成果、现场标准贯入试验、现场十字板剪切试验等,为后续软弱地基处理方案选取提供依据。

### 2.1 原状土室内试验

项目在施工代表场内范围内选取了一定的取样点,开展原状土室内试验,进行软土物理力学特性的室内试验,试验结果如表 1。

淤泥质软土的初始孔隙比平均值为 1.67,天然含水量平均值为 60.67%。孔隙比是软土中孔隙体积与固体颗粒体积的比值,一般情况下软土的孔隙比一般大于 1.0,这表明其结构非常疏松,孔隙比越大,土壤的压缩性就越高,在荷载作用下,孔隙更容易被压缩,并且承载力通常较低,容易发生剪切破坏;天然含水量直接展现了土壤的干湿状况。软土的含水率通常在 30% 以上,试验表明含水量平均值为 60.67%,说明在

表 1 淤泥质软土的物理力学指标详情表

物理力学参数	天然含水量 /%	初始孔隙比	压缩指数	渗透系数 / (cm/s)		固结试验 压缩模量 /MPa		固结系数 / (cm <sup>2</sup> /s)		三轴试验 (不固结不排水)		三轴试验 (固结不排水)	
				垂直	水平	Es <sub>1-2</sub>	Es <sub>2-4</sub>	垂直	水平	黏聚力 /KPa	内摩擦角 / (°)	有效黏聚力 /KPa	有效内摩擦角 / (°)
				统计个数	670	670	12	13	13	670	670	13	13
最大值	77.40	2.10	0.58	4.12E-08	3.32E-08	6.02	3.24	7.78E-04	6.17E-04	7.20	1.40	17.40	11.20
最小值	52.20	1.50	0.26	1.67E-08	1.12E-08	1.47	2.11	2.76E-04	1.76E-04	5.30	0.90	12.40	8.10
平均值	60.67	1.67	0.35	2.74E-08	2.04E-08	1.76	2.61	4.75E-04	3.55E-04	6.31	1.18	14.86	9.35
标准差	4.57	0.12	0.09	0.00E+00	0.00E+00	0.20	0.18	0.00E+00	0.00E+00	0.57	0.17	1.47	0.91
变异系数	0.075	0.069	0.244	0.319	0.375	0.114	0.069	0.346	0.401	0.090	0.141	0.099	0.097
修正系数			1.128	1.160	1.187	0.992	0.995	1.173	1.201	0.953	0.926	0.948	0.949
标准值			0.40	3.17E-08	2.43E-08	1.75	2.59	5.57E-04	4.27E-04	6.01	1.09	14.09	8.87

荷载的作用下，软土会产生较大的沉降，而且沉降稳定所需要的时间也比较长。

项目通过固结试验，分别采用 100~200kPa 及 200~400kPa 的压力测得常规浅基础与深厚软土层或高填方工程评估土层变形特性。表 1 显示淤泥质土的 Es<sub>1-2</sub> 与 Es<sub>2-4</sub> 修正后均小于 5MPa，垂直方向与水平方向固结系数均在 10<sup>-4</sup>~10<sup>-7</sup>，表明淤泥质软土在荷载作用下固结速度缓慢，极易导致后期地基沉降。同时，由表 1 可知淤泥质土层垂直渗透系数 3.17 × 10<sup>-8</sup>，水平渗透系数 2.43 × 10<sup>-8</sup>，淤泥质软土层渗透性差，强度较低。

通过室内三轴试验，测验土体抗剪强度。短期稳定性分析采用 UU 试验（不固结不排水）测试 CU 标

准值为 6.01；长期稳定性分析采用 CU 试验（固结不排水）测试 C' 标准值为 14.09。上述数据表明淤泥质土层抗剪强度较弱，需进一步采用现场十字板剪切试验验证。

2.2 现场十字板剪切试验

项目通过十字板剪切试验计算土体的不排水抗剪强度。根据现场不同地段 17 个钻孔的十字板剪切试验成果如表 2 所示。

淤泥自地表以下 H ≤ 5m 深度内：原状土 Cu 介于 3.90~23.50kPa，平均值为 15.27kPa；扰动土 Cu' 介于 1.60~7.60kPa，平均值为 4.01kPa；灵敏度 St 介于 1.63~9.17，平均值为 4.09。自地表以下 5 < H ≤ 10m 深度内：原状土 Cu 介于 9.80~31.10kPa，平均值为 21.34kPa；扰动

表 2 十字板剪切试验不排水抗剪强度和灵敏度代表值统计

土层深度 (m)	H ≤ 5			5 < H ≤ 10			H < 10		
	原状土 Cu(kPa)	扰动土 Cu'(kPa)	St	原状土 Cu(kPa)	扰动土 Cu'(kPa)	St	原状土 Cu(kPa)	扰动土 Cu'(kPa)	St
统计个数	48			50			44		
最大值	23.50	7.60	9.17	31.10	9.10	6.89	43.10	10.80	5.07
最小值	3.90	1.60	1.63	9.80	2.50	2.28	21.90	5.30	3.06
平均值	15.27	4.01	4.09	21.34	5.31	4.20	30.69	7.99	3.86
标准差	4.54	1.54	1.46	5.35	1.70	0.99	5.38	1.32	0.49
变异系数	0.297	0.384	0.357	0.250	0.320	0.237	0.175	0.165	0.126
修正系数	1.074	1.095	1.089	1.061	1.078	1.058	1.045	1.043	1.033
标准值	16.4	4.4	4.5	22.6	5.7	4.4	32.1	8.3	4.0

土  $Cu'$  介于 2.50~9.10kPa, 平均值为 5.31kPa; 灵敏度  $St$  介于 2.28~6.89, 平均值为 4.20。自地表以下  $H>105m$  深度内: 原状土  $Cu$  介于 21.90~43.10kPa, 平均值为 30.69kPa; 扰动土  $Cu'$  介于 5.30~10.80kPa, 平均值为 7.99kPa; 灵敏度  $St$  介于 3.06~5.07, 平均值为 3.86。各区段各部位软土所受历史应力各不相同, 抗剪强度差异较大, 一般呈自上而下抗剪强度渐增的趋势。

2.3 标准贯入度试验

项目对第四系全新统海积层及第四系全新统冲洪积层的中砂层分别开展标准贯入度试验, 进行液化判别, 试验结果如表 3 所示。

通过对中砂层的液化判别, 判别深度为 15m 时, 液化指数  $I_{LE}$  在 0~5 之间属于轻微液化等级; 判别深度为 20m 时, 液化指数  $I_{LE}$  在 0~6 之间属于轻微液化等级。本项目标准贯入度试验判别深度为 15m 或 20m, 第四系全新统海积层与第四系全新统冲洪积层中砂平均液化指数分别为 3.94 及 1.79, 均属于轻微液化等级, 但仍可能导致基础的轻微不均匀沉降, 在基础设计时, 可适当增加基础的刚度和整体性。

3 水泥搅拌桩地基处理试桩分析

通过上述试验可知, 该工程所在地基软弱。采用水泥搅拌桩法, 能够极大增强土体抗剪强度、抗变形能力, 减少地基沉降量。项目拟采用“四搅两喷”双向搅拌施工工艺。

为了更科学地指导施工, 获取符合设计要求且便于现场实施的工艺控制数据, 以便指导本项目水泥搅拌桩大面积施工, 项目在施工前按设计要求进行工艺性试桩试验。

3.1 技术要求

试桩前进行室内配合比试验注浆试配, 水泥掺量 16%、18%、20% 三组配合比 7d 无侧限抗压强度均能满足设计的强度要求, 可进行试桩试验验证室内配合比试验结果。

根据设计要求, 水泥搅拌桩桩径 0.6m, 等边三角

形布置, 桩间距 1.5m, 搅拌桩长度暂按 17.7m 控制, 桩底要求打穿软土层进入下卧硬土层不少于 0.5m。水泥搅拌桩成桩 28 天后, 进行抽芯检测无侧限抗压强度, 要求强度不得低于 0.8MPa, 并进行复合地基载荷实验, 复合地基承载力特征值不小于 100kPa。

3.2 试桩参数

(1) 施工机械: 双向搅拌桩机, 总功率  $2 \times 55kW$  (双轴), 搅拌头回转数 44r/min, 搅拌头叶片数为 8 枚。同时配备 1 套输送泵、搅拌机、水泥浆搅拌池、下料称重设备、水泥罐、泥浆比重计。

桩机配置自动化监控系统, 可以记录桩位标号、施工时间、施工电流、深度、喷浆量、段灰量、上下搅速度等参数。

(2) 水灰比: 0.55。

(3) 水源: 自来水。

(4) 水泥掺入比: 采用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 进行 16%、18% 和 20% 三种不同掺入比试验。

(5) 施工工艺: 四搅两喷、均下沉喷浆。

(6) 下钻速度: 80cm/min。

(7) 提升速度: 120cm/min。

(8) 段灰量、喷浆量: 根据试桩前的配合比试验和理论计算, 确定的各工艺的段灰量和浆液流量如表 4 所示。

表 4 典型试验段灰量、喷浆流量参数

水泥掺入比	段灰量 (kg/m)	下沉喷浆流量 (L/min)
16%	81.4	28.5
18%	91.6	32.1
20%	101.7	35.6

(9) 喷浆压力: 介于 0.4~0.6MPa, 按 0.5MPa 控制。

(10) 分三种水泥掺入比 16%、18% 和 20%, 每种水泥掺入比各打设 6 根桩, 共计 18 根。

3.3 试桩检测情况

在满足成桩 28 天后, 每种水泥掺入比随机抽取 2 根桩, 分别进行取芯、复合地基承载力试验。

表 3 液化判别汇总表

土层名称	统计项目	Ni/Ncri	土层液化指数	钻孔液化指数	土层液化等级	钻孔液化等级
第四系全新统海积层中砂	统计个数	71	31	31	轻微	轻微
	最大值	1.46	14.41	14.41		
	最小值	0.48	0.25	0.25		
	平均值	0.88	3.94	3.94		
第四系全新统冲洪积层中砂	统计个数	73	31	31	轻微	轻微
	最大值	1.86	9.11	9.11		
	最小值	0.32	0.05	0.05		
	平均值	0.97	1.79	1.79		

3.3.1 取芯及无侧限抗压强度

在搅拌桩龄期到达 28d 后,从水泥掺入比 16%、18%、20% 中选取一根桩,进行现场钻孔取芯,如图 1 所示,并经检测单位依据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2012)<sup>[9]</sup> 和设计要求,进行试验检测,检测结果如表 5 所示,其中水泥掺入比 16% 及 20% 取芯率小于 90%,不满足设计要求,掺入比 18% 取芯率 91.7% 满足设计要求;无侧限抗压强度三组均满足设计要求。

3.3.2 复合地基承载力

施工结束 28d 后,从水泥掺入比 16%、18%、20% 中选取一根桩,进行现场静荷载试验,试验采用堆载法,试验采用荷载板边长为 1.40m 的方形刚性承压板,面积约 1.96 m<sup>2</sup>。设计水泥搅拌桩复合地基承载力大于等于 120kPa,根据《建筑地基基础工程施工质量验收标准》(GB 50202-2018)<sup>[10]</sup> 规定,工程验收检测荷载试验最大加载量不应小于设计承载力特征值的 2 倍,最大荷载取 240kPa,逐级等量加载。每加一级荷载前后均应各读记承压板沉降量一次,后续每半个小时读记一次,当一小时内沉降量小于 0.1mm 时,即可加下一级荷载。当需观测弹性回弹值时,对土体每级卸荷量为加荷增量的 2 倍,应每隔 30min 观测一次,每级荷载观测 1h,荷载全部卸除后继续观测 3h,观测时间间隔为 30min。图 2 为复合地基荷载试验 P-S 曲线。

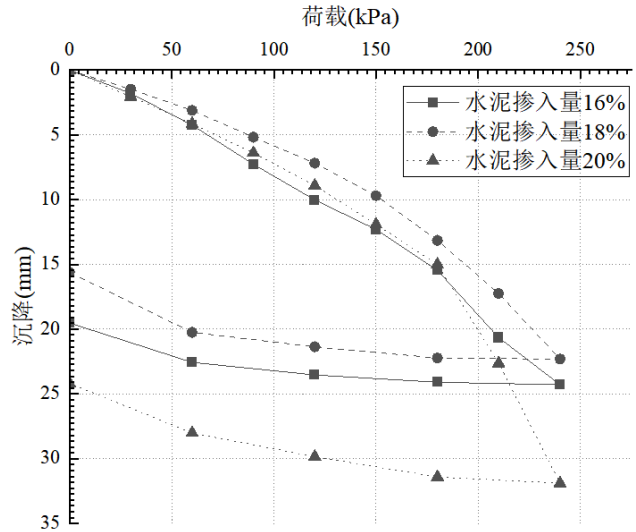


图 2 复合地基荷载试验 P-S 曲线

所检 3 个点(水泥掺入比 16%、18%、20%) 在最大试验压力作用下均未达到极限状态,周围土体未见明显隆起,故按相对变形值确定地基承载力特征值。本工程取  $s/b=0.08$  所对应荷载为该复合地基承载力特征值,  $s$  为累计沉降量,  $b$  为荷载板的边长,  $b=1400\text{mm}$ 。由 P-S 曲线可知,水泥掺入比 16%、18%、20%,桩体复合地基承载力特征值分别为 147.3kPa、170.9kPa、152.1kPa,均大于最大加载量(240kPa)的一半。

3.4 试桩结果分析

通过上述取芯、静载两种试验检测可得水泥掺入比 16%、18%、20% 复合地基承载力、无侧限抗压强度均满足设计及规范要求,但仅水泥掺入比 18% 的取芯率满足要求,特别注意水泥掺入比 20% 仅为 81%,



图 1 现场取芯照片(从左到右水泥掺入比依次为 16%、18%、20%)

表 5 试桩取芯及抗压强度统计表

水泥掺入比	桩身均匀性描述	设计取芯率 (%)	实际取芯率 (%)	设计抗压强度 (MPa)	抗压强度代表值 (MPa)
16%	均匀性差	90	88.0	0.8	2.10
18%	均匀性良好		91.7		2.79
20%	均匀性差		81.0		1.68

为三组试验结果最小。经过研究分析可能存在如下原因:

(1) 搅拌不均匀。水泥掺入比提高后,对搅拌工艺的要求也更高。在施工过程中,搅拌机的搅拌速度、提升速度等参数没有根据水泥掺入比的变化进行合理调整,可能导致水泥与土搅拌不均匀。高水泥掺入比情况下,局部水泥浆聚集,而有些部位水泥浆不足,从而影响桩体的整体质量,导致取芯率不合格。

(2) 土层特性影响。施工现场的土层分布不均匀,不同深度的土层性质差异较大。在水泥掺入比为 20% 时,可能由于桩体强度增加,对土层的适应性反而降低。例如,遇到较硬的土层时,搅拌难度增大,桩体容易出现缺陷;或者在软土层中,高水泥掺入比导致桩体收缩变形较大,产生裂缝等缺陷,进而影响取芯率。

(3) 地下水作用。地下水位较高或地下水具有腐蚀性等情况,对高水泥掺入比的桩体影响更为明显。20% 水泥掺入比的桩体可能因水泥水化反应更剧烈,产生的孔隙水压力更大,在地下水的作用下,桩体更容易出现裂缝、软化等现象,降低桩体的完整性和强度,导致取芯率不合格。

因此,从试桩施工质量与经济性上看,选取水泥掺入比为 18% 较为合适,后续大面积施工应加强对于水泥搅拌桩的质量控制与检验验收管理。

#### 4 结论

(1) 淤泥质软土结构非常疏松,在荷载作用下,孔隙更容易被压缩;淤泥质软土垂直渗透系数  $3.17 \times 10^{-8}$ ,水平渗透系数  $2.43 \times 10^{-8}$ ,渗透性差,强度较低;各区段各部位软土抗剪强度差异较大,一般呈自上而下抗剪强度渐增的趋势;中砂层平均液化指数分别为 3.94 及 1.79,均属于轻微液化等级。

(2) 配合比试验和现场试桩试验揭示:采用“四搅两喷”双向搅拌的施工工艺(施工工艺流程:水泥搅拌机就位,调平→下钻喷浆搅拌至喷桩底标高(桩端喷浆搅拌 30s)→上提停浆搅拌提升至停浆面→重复搅拌带浆下沉至喷桩底标高→重复停浆搅拌提升至地面→移位至下一根桩),在水泥浆水灰比采用 0.55、水泥掺量为 18% 的情况下,水泥搅拌桩的取芯率(91.7%>90%)、无侧限抗压强度(2.79MPa>0.8MPa)、复核地基承载力( $\geq 120$ kPa)等均满足设计要求。因此,水泥搅拌桩工艺在海港软基处理中的应用是可行的。

(3) 根据现场试验情况,取芯率与设计要求的比较低,大面积施工时可考虑适当降低钻机下钻和提升速度。交(竣)工验收测量和检测应符合《水运工程质量检验标准》(JTS 257-2008)<sup>[11]</sup>及《水运工程测量规范》(JTS 131-2012)<sup>[12]</sup>《水运工程测量质量检验标准》(JTS 258-2008)<sup>[13]</sup>的有关规定。

(4) 海港工程多位于沿海滩涂、河口等区域,广泛分布着含水量高、压缩性大、承载力低的深厚软土层,水泥搅拌桩施工隐蔽性强,在地质复杂、腐蚀环境等不良施工条件下,导致质量控制难。若将智慧监控技术引入水泥搅拌桩施工全过程,实现对关键工序参数的实时、连续、自动监控,将进一步提升海港工程质量管控水平。

#### 参考文献:

- [1] 李明旭. 深层水泥搅拌桩施工质量控制及特殊情况的处理 [J]. 中华建设, 2024(11):151-152.
- [2] 崔堂灿. 水泥搅拌桩施工技术在市政道路软基处理中的应用 [J]. 四川水泥, 2021(6):59-60.
- [3] 杨学文. 水泥搅拌桩技术在市政道路软基处理中的应用 [J]. 江西建材, 2015(13):159.
- [4] 李联波. 路基软基处理中的水泥深层搅拌桩运用研究 [J]. 四川水泥, 2019(1):19.
- [5] 李晶晶. 路基软基处理中水泥深层搅拌桩的应用 [J]. 四川水泥, 2018(10):299.
- [6] 高茂鸿, 王志斌, 王选仓, 等. 水泥搅拌桩处治桥头过渡段路基沉降控制技术研究 [J]. 公路, 2023, 68(6):177-185.
- [7] 杨秀丽. 水泥搅拌桩施工技术在软弱地基改良工程中的应用 [J]. 四川水泥, 2024(11):154-156.
- [8] 林婧. 湄洲湾港港航项目疏浚物综合利用分析 [J]. 福建交通科技, 2023(12):113-117.
- [9] 建筑地基处理技术规范 [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012.
- [10] 建筑地基基础工程施工质量验收标准 [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018.
- [11] 水运工程质量检验标准 [S]. 中华人民共和国交通运输部, 2008.
- [12] 水运工程测量规范 [S]. 中华人民共和国交通运输部, 2012.
- [13] 水运工程测量质量检验标准 [S]. 中华人民共和国交通运输部, 2008.