水泥土搅拌桩复合地基综合试验

沈锦儒
（江苏省电力设计院,南京，210024）

提　要　本文介绍了××发电厂工程的水泥土搅拌桩综合试验成果，根据成果资料可见水泥土搅拌桩桩间土的物理力学性能发生了变化，桩间土承载力折减系数 β 可取 1.0，甚至 1.0 以上。

一　概　况

近年来，国家在长江下游陆续建设了几个火力发电厂，××发电厂就是其中之一，该厂厂址在长江南岸，天然地基无法满足厂内辅助建筑对地基承载力和变形的要求，需进行地基加固处理。经过多方案比较和论证，决定采用水泥土搅拌桩加固地基。为了获取该地区采用水泥土搅拌桩加固地基的设计参数和施工参数，在施工图设计前进行了较大规模的原体试验。试验分两个区，厂前区（A 区）及煤场区（B 区）。厂址地貌单元为长江河漫滩。由于受人类活动影响，原有的地形地貌已被破坏。厂区内沟、塘密布，地形较为破碎。地势较低，地面标高一般为 2.90～5.50m（1985 国家高程基准）。厂区内地基岩土主要由第四系全新统—上更新统地层和上白垩统侵入岩组成。

在勘探深度范围内地基岩土自上而下分别描述如下：

层①素填土（Q_4^{ml}）：黄褐色、灰黄色，湿—稍湿，主要成分为粉质粘土，结构松散，为人工开挖堆积而成。

层②粉质粘土（Q_4^{al}）：黄褐色、灰黄色，等级中，湿—很湿，以软塑为主。

层③—1 淤泥质粉质粘土（Q_4^{al+l}）：灰色、褐灰色，等级中，很湿，流塑，局部软塑。

层③—2 淤泥质粉质粘土夹粉土（Q_4^{al+l}）：淤泥质粉质粘土为灰色、褐灰色，等级中，很湿，流塑；粉土为灰色、青灰色，主要成分为长石。

层④粉质粘土（Q_3^{al+l}）：上部为灰绿色、绿灰色，下部为黄色、灰黄色，等级中—重，稍湿，可塑—硬塑。厂前区该层缺失。

层⑤—1 花岗闪长岩（K_2）：杂色，主要有灰绿色、灰黄色、肉红色、白色等色，主要矿物成分为正长石、斜长石、石英，含有少量黑云母和金云母碎屑，粒状结构、块状构造，强风化。随着深度的增加，风化程度逐渐降低。

层⑤—2 花岗闪长岩（K_2）：主要为肉红色、灰白色等色，主要矿物成分为正长石、斜长石、石英，含有少量黑云母和金云母碎屑，金晶质斑状或粒状结构、块状结构，上部为中风化，下部逐渐过渡为微风化。层厚较大，本次未钻穿。

B 区各土层的物理力学性质指标见表 1。限于篇幅 A 区不再列出。

表 1　地基土主要设计参数推荐值

土层号		1	2	3-1	3-2	4	5-1
土层名称		素填土	粉质粘土	淤泥质粉质粘土	淤泥质粉质粘土夹粉土	粉质粘土	花岗闪长岩
含水量 ω（%）			37.8	44.0	41.3	24.0	
重度 γ（kN/m^3）		18.20	17.87	17.26	17.33	19.40	
孔隙比 e			1.000	1.227	1.117	0.710	
塑性指数 I_p			15.00	14.15	11.60	13.90	
液性指数 I_L			0.39	1.49	1.66	0.36	
压缩系数 $a_{1\text{-}2}$（MPa^{-1}）			0.552	0.864	0.706	0.198	
压缩模量 $E_{1\text{-}2}$（MPa）		4.0	4.1	2.5	3.2	8.5	
直接剪切	凝聚力 C_q（kPa）		22.0	12.0	18.0	50.0	
	内摩擦角 ϕ_q（o）		5.5	3.0	7.0	15.0	
标贯试验击数 $N_{63.5}$（击）			2.5	1.0	2.0	22.0	110.0
静力触探	锥尖阻力 q_c（MPa）	0.77	0.44	0.38	0.49	2.07	
	侧摩阻力 f_s（MPa）	0.038	0.015	0.008	0.011	0.048	
承载力标准值 f_k（MPa）		100	75	60	70	260	

二　试验桩的设计与施工

每个区有搅拌桩 56 根，桩距为 1m，正方型布置，桩径均为 0.6m，采用普通硅酸盐水泥作固化剂，水灰比 0.5，采用木钙作外掺剂，用量为水泥量的 0.2%。

表 1　试验工作量一览表

试验区		A 区（厂前区）		B 区（煤场区）	
水泥掺入量（%）		18		18	15
水泥标号		425	525	425	
有效桩长（m）		6.5～7.0		14	
持力层层号		5－1		3－2	
试验项目	单桩静荷载试验（组）	3	3	3	3
	复合地基静荷载试验（组）	3	3	3	3
	轻便动力触探试验（孔）	10	10	10	10
	桩身静力触探试验（孔）	6	—	4	2
	无侧限抗压强度试验（孔/件）	3/15	3/15	3/15	3/15
	桩间土静力触探试验（孔）	3	3	3	3
	桩间土标贯试验（孔/次）	3/15	3/15	3/15	3/15
	室内土工试验（孔/样）	3/15	3/15	3/15	3/15
	基桩低应变动力测试（根）	6	6	4	6

A 区 28 根桩采用 425 号水泥，另外 28 根桩采用 525 号水泥，掺入量均为 18%。桩顶标高为 2.00m，相当于地面下 1.5m，即层 3－1 淤泥质粉质粘土的层面处。桩底为层 5－1 花岗闪长岩的层面，由于该层面有起伏，故有效桩长在 6.5～7.0m 的范围内。

B 区的搅拌桩均采用 425 号水泥，其中 28 根桩掺入量为 18%，另外 28 根桩掺入量为 15%。桩顶标高为 1.00m，相当于地面下 2.5m，即层 3—1 淤泥质粉质粘土的层面处。桩底标高为—13.0m，即层 3—2 淤泥质粉质粘土夹粉土层内，有效桩长 14m。水泥土搅拌桩采用 SJB—1 型搅拌机施工，施工工艺为四搅二喷。试验内容及工作量列于表 2 中。桩位布置和各种试验项目的位置见图 1。

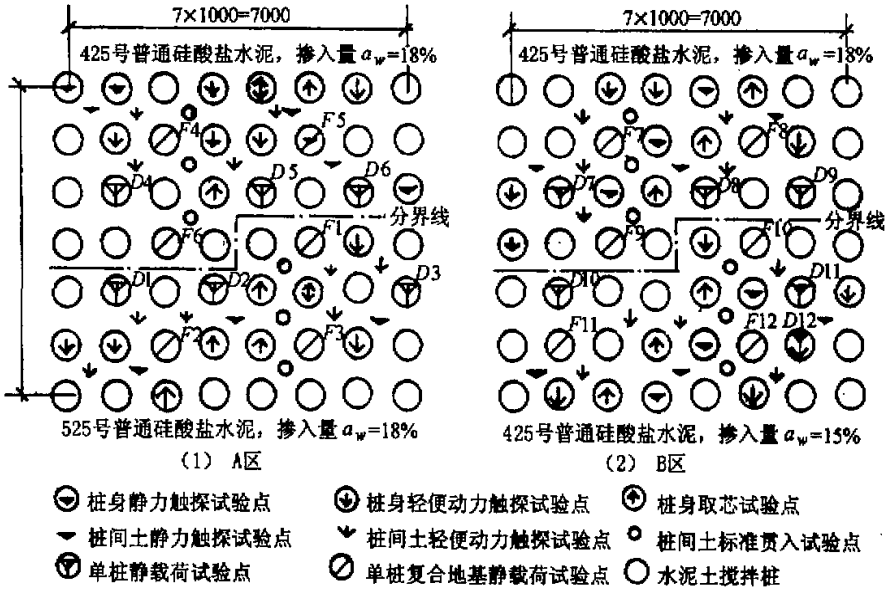


图 1　试验区桩位和试验点布置图

三 桩间土的各项试验

从桩间土的各项试验数据分析可知，随着水泥土搅拌桩的置入及硬凝，桩间土的物理力学性能发生了不同程度的改变，表现为天然含水量降低，天然孔隙比减小，液性指数变小，压缩性改善，标贯击数增加。这些变化说明了桩间土的物理性能改善，力学性能提高。在 A、B 试验区所作的桩间土的静力触探、标准贯入、室内土工试验和轻便动力触探等项试验的成果列于表 3～4。

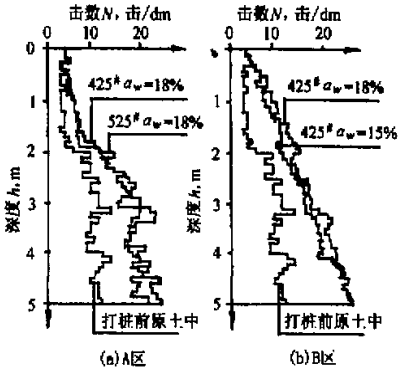


图 2　打桩前后土中轻便动力触探试验成果对比

表3 桩间土静力触探、标准贯入试验数据统计分析

土层序号	试验区	打桩前地基土的值			打桩后地基土的值			打桩后/打桩前		
		q_c (MPa)	f_s (MPa)	$N_{63.5}$ (击)	q_c (MPa)	f_s (MPa)	$N_{63.5}$ (击)	q_c	f_s	$N_{63.5}$
1	A	0.68	0.039		0.74	0.043		1.008	1.103	
	B	1.12	0.049		1.06	0.060		0.946	1.224	
2	A	0.38	0.015		0.58	0.011		1.526	0.733	
3—1	A	0.25	0.006	1.0	0.28	0.008	1．8	1.120	1.333	1．8
	B	0.31	0.008	1.0	0.39	0.009	2.4	1.258	1.125	2.4
3—2	A	0.37	0.009	1.5	0.56	0.017	3．0	1.514	1.889	2．0
	B	0.54	0.012	2.0	0.63	0.014	3.0	1.167	1.167	1.5

注：表中打桩前静力触探的 q、f 值均采用试验场地最邻近试验孔的数据。

表4 打桩前后地基土的物理力学指标对比

试验区	土层序号		天然含水量 ω(%)	重力密度 γ (kN/m³)	天然孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩系数 $a_{1\text{-}2}$ (MPa⁻¹)	压缩模量 $E_{1\text{-}2}$ (MPa)	凝聚力 c_q (kPa)	内摩擦角 ϕ_q (°)
A	3-1	桩前	40.7	17.5	1.153	14.0	1.27	0.704	3.5	10.0	2.0
		桩后	34.4	18.1	0.983	12.9	0.89	0.531	3.8	7.62	8.8
	3-2	桩前	42.2	17.5	1.165	13.4	1.54	0.820	2.5	14.0	3.0
		桩后	40.5	17.6	1.129	13.3	1.31	0.702	3.1	8.37	8.4
B	3-1	桩前	44.0	17.3	1.227	14.2	1.49	0.864	2.5	12.0	3.0
		桩后	41.8	17.3	1.191	15.2	1.23	0.754	3.0	5.74	6.4
	3-2	桩前	41.3	17.3	1.117	11.6	1.66	0.706	3.2	18.0	7.0
		桩后	37.9	17.3	1.127	14.0	1.11	0.702	3.1	8.66	7.3

为了便于对比，现将打桩前后地基土和桩间土轻便动力触探的试验成果汇于表 5 中。轻便动力触探曲线见图 2。从图 2 中可见，不论是 A 区还是 B 区，地基土中打入水泥土搅拌桩后桩间土的击数都比打桩前有不同程度的提高。显然，搅拌桩虽没有挤土作用，不会像碎石桩那样使桩间土受到挤密，但由于水泥浆在土中受到地下水的渗透扩散，致使水泥分子渗入桩间土中，使桩间土的物理力学性能发生变化。我们在其他工程所作的水泥土搅拌桩试验中也有过类似的情况。

表5 地基土和桩间土轻便动力触探击数统计

项目	轻便动力触探击数 N_{10} 的平均值（击/dm）				
从地面下 1.5m 起的深度（m）	0～1	1～2	2～3	3～4	4～5
打桩前	3.8	4.0	10.2	10.7	12.3
A 区打桩后（桩身采用 425 水泥）	4.9	8.2	18.0	18.3	23.4
A 区打桩后（桩身采用 525 水泥）	4.5	8.3	16.3	21.2	21.7
B 区打桩后（桩身水泥掺量 18%）	7.2	13.2	16.9	22.6	26.6
B 区打桩后（桩身水泥掺量 15%）	6.4	10.8	15.5	20.0	25.7

四　静载荷试验

本次共做单桩静载荷试验 12 组，单桩复合地基静载荷试验 12 组，单桩复合地基静载荷试验的压板为 1000mm×1000mm，置换率为 0.2827；单桩静载荷试验的压板直径与桩径相同，为 ϕ600mm。静载荷试验的 $Q-S$ 曲线分别绘于图 3～4。

根据单桩和单桩复合地基静荷载试验 $Q-S$ 曲线图，按国家行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ79－91 规定的方法确定 A、B 区的复合地基承载力标准值列于表 6 中。

表 6　水泥土搅拌桩复合地基承载力基本值

水泥标号和水泥土配合比	A 区		B 区	
	425#水泥 18%	525#水泥 18%	425#水泥 15%	425#水泥 18%
单桩 R_k^d（kN）	70	80	60	70
单桩复合地基 f_{spk}（kPa）	120	130	110	120

从表 6 中可知，不论是 A 区还是 B 区，复合地基承载力标准值中桩间土承担了 50kPa，按置换率 0.2827 计算，桩间的承载力为：50/(1－0.2827)=69.7≈70(kPa)。

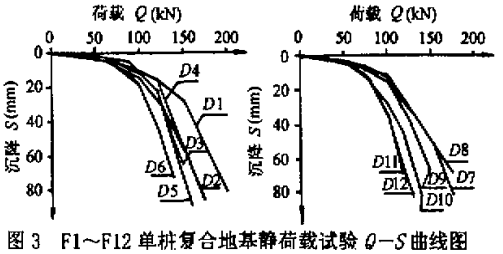


图 3　F1～F12 单桩复合地基静荷载试验 $Q-S$ 曲线图

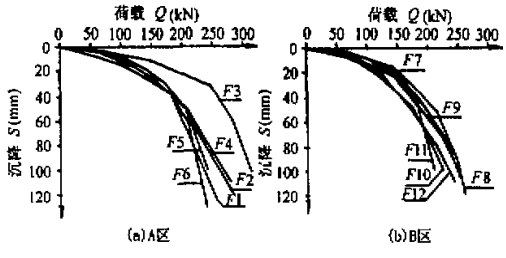


图 4　D1～D12 单桩复合地基静荷载试验 $Q-S$ 曲线图

此结果比打桩前的地基承载力(层 3－1 的 f_k=60kPa)还高些，可见《建筑地基处理技术规范》中公式(9.2.2－1)中的桩间土折减系数 β 可取≥1。究其根由，可以认为有两个方面的原因。其一，上一节列出的桩间土各项试验数据足已证明桩间土的物理力学性能得到改善；其二，虽然 A 区搅拌桩的桩端已达层 5－1 花岗岩，但由于搅拌桩机的特点，搅拌头不可能进入层 5－1，因此桩底下还有一薄层的淤泥质土。换言之，A 区的搅拌桩桩端土仍是软土，故不应该按硬土考虑。

五　桩身强度试验

桩身强度试验共做了桩身静力触探、取芯强度试验和桩身轻便动力触探等项试验。桩身静力触探试验数据的分析列于表 7。桩身静力触探和桩身轻便动力触探试验都是在桩体龄期为 24～36h 内进行，若桩体龄期过长就难以钻进。由表 7 中的数据可见，桩体的 q_c 值是地基土的 1.28～2.11 倍，平均为 1.65 倍；f_s 的比值为 1.55～3.67，平均为 2.04 倍。

表 7　水泥土搅拌桩桩身静力触探与原地基土静力触探试验数据之比较

试验地段	A区		B区			
水泥及配合比	425#水泥，18%		425#水泥，18%		425#水泥，15%	
静力触探试验参数	q_c	f_s	Q_c	f_s	q_c	f_s
层3－1	1.40	3.67	1.28	1.57	2.11	1.63
层3－2	1.70	1.78	1.68	2.02	1.70	1.55

注：A区525#水泥的搅拌桩24h的强度已经非常高，静力触探的探头无法钻进。

为了与试验时的条件相同，我们在所有工程中规定了桩身轻便动力触探的检测龄期也为24～36h，检测标准应按试验成果确定。这样方可与静载荷试验相匹配。换言之，只要在24～36h所作的轻便动力触探的击数达到检测标准所规定的值，则这批水泥土搅拌桩的强度就能达到静载荷试验时所得到的强度值。就本工程而言，采用普通硅酸盐425#水泥，a_w=15%，桩距1m，正方形布置时水泥土搅拌桩在24～36h所作的轻便动力触探的击数达到9击/dm以上，则复合地基承载力标准值就可达到120kPa。若小于9击/dm就需要采取必要的措施予以补强或进行静载荷试验来验证。

桩身钻孔取芯是在成桩一个月时进行。取芯结果表明，两区搅拌桩的喷浆量和搅拌比较均匀，上部略优于下部。将取出的岩芯制成试件进行无侧限抗压强度试验。试验数据表明桩身强度与原地基土特性、水泥标号和水泥掺入量有关，经分别对不同试件的试验数据进行统计，取算术平均值归纳如下：

A区：425#水泥，a_w=18%：q_u=0.79MPa；525#水泥，a_w=18%：q_u=1.08MPa；

B区：425#水泥，a_w=18%：q_u=0.82MPa；525#水泥，a_w=15%：q_u=0.58MPa。

六　结　语

通过本次水泥土搅拌桩的综合试验，结合其他工程试验的成果，可得到如下体会：

(1)在长江边的软土地基中采用水泥土搅拌桩复合地基可以得到满意的成果；

(2)水泥土搅拌桩置入地基中后，原地基土物理力学性能有一定的改善，桩间土承载力βf_{sk}=70kPa，即桩间土承载力折减系数β可取1.17；

(3)水泥土搅拌桩桩身轻便动力触探检测的龄期宜与试验时相同，检测标准（击/dm）应由试验成果确定。笼统地以15击/3dm为标准，即使达到这个标准，也不能确定承载力，本工程的试验数据表明，最低的击数为9击/dm，即27/3dm，远大于15击/3dm，若以15击/3dm为标准，显然低于试验成果，其相应的承载力必然低于120kPa。