

文章编号: 1002-0268 (2004) 01-0026-04

搅拌桩法加固长江漫滩软土地基 施工工艺研究

马在宏¹, 管同心¹, 缪林昌²

(1. 扬州市长江大桥暨接线高速公路建设指挥部, 江苏 扬州 225007;

2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 本文根据搅拌桩加固软土地基的机理和长江漫滩软土的特点, 研究了不同施工工艺的搅拌桩加固长江漫滩软土地基的成桩效果, 测试分析采用桩身取芯加标贯的方法判断搅拌桩的桩身质量, 同时进行三桩复合地基的承载力的测试, 研究确定了大面施工工艺, 从而使重点工程的工程质量得到保障。路基填筑施工沉降曲线表明软土地基是有效的。

关键词: 长江漫滩软土; 搅拌桩; 加固机理; 施工工艺

中图分类号: TU471.8

文献标识码: A

Research of Ground Improvement Technique of Yangtze River Backswamp Softsoil with Deep Mixing Piles

MA Zai-hong¹, GUAN Tong-xin¹, MIAO Lin-chang²

(1. Department of Yangzhou Expressway Constructin, Yangzhou 225004, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The different deep mixing piles with construction techniques for improvement of the Yangtze River Backswamp Soft Soil was studied based on the improvement mechanics of deep mixing piles and the features of the Yangtze River Backswamp Soft Soil. The quality of deep mixing piles was analyzed by cement-soil sampling, standard penetration test and the bearing capacity measuring of composite ground. The construction technique for extensive engineering construction was determined according to the test results, which would assure the engineering quality. The displacement real curves of filling subgrade illustrated that the construction technique of deep mixing piles of soft soil ground was effective.

Key words: Yangtze River Backswamp Soft soil; Deep mixing piles; Improvement mechanics; Construction technique

1 概述

软土地基上修建高等级公路主要要求是路基的工后沉降不能过大, 保证使用期间路面纵向平整。如软土地基的承载力不能满足要求, 若不采取加固措施, 将有相当长的软基段不能满足工后沉降的要求, 即一般路段工后沉降不应超过 30cm, 桥头连接段工后沉降不应超过 10cm, 过渡段不应超过 20cm, 对于不能满足要求的软土路段要作地基加固。深层搅拌法是一种化学加固地基的方法, 是加固软土地基最常用的处

理方法之一。润扬长江公路大桥是国家重点建设工程, 其北接线位处长江漫滩软土地区, 其工程特性较差, 承载力较低, 不能满足高速公路建设的要求, 设计采用深层搅拌桩加固原地基。为保证工程质量, 同时又要节约工程投资, 作者针对长江漫滩软土的工程特性, 对深层搅拌桩进行了系列试验, 以提高搅拌桩的成桩效果, 保证重点工程质量。

2 地质条件

长江下游属长江漫滩冲积平原工程地质亚区, 地

收稿日期: 2002-12-09

作者简介: 马在宏 (1962-), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 主要从事高速公路建设与管理工。

势低平、开阔，地形相对较复杂，地势起伏较大，地下水水位接近地表，地下水有孔隙潜水和孔隙承压水两种类型。孔隙潜水赋存于：①表层素填土；②粉质粘土，粉土-粉砂中，主要受大气降水和地表水补给影响，孔隙承压水赋存于粉砂层中，与长江有一定的归口联系。分布于沿江一带。其沉积物呈二元或多元结构，上细下粗，上层为亚粘土、亚粘土与粉砂互层，下层为砂层。

长江漫滩区地基土层属于特殊的区域性土，其土性主要有两大类：一是软土；二是砂土。软土主要是淤泥土、淤泥质粘土，大多属于中、高压缩性土，并具有欠固结性的特点，厚度变化较大，具有交互性，即淤泥质土与砂土、粉土形成交互形式出现，使得其变形特性更加复杂。搅拌桩试验区的土层分布情况如下：1-1：亚粘土，灰黄色，可塑，中等压缩，厚度 1~1.5m。2-2：淤泥质亚粘土，夹淤泥，灰色、黄灰色，局部混粉砂，流塑，高压缩性，厚度 2~3.2m。2c：粉砂，灰色，夹亚粘土，松散，饱和，厚度 1~3m。2-2：淤泥质亚粘土，灰色，夹粉砂薄层，流塑，高孔隙比，高压缩性，厚度 10~12.1m。2c-2：粉砂层，黄灰色，中密~稍密，饱和，未穿。

本区主要的不良地基土层为 2-2，其主要的物理力学指标见表 1。

土层 2-2 的主要物理力学指标 表 1

初始含水量 (%)	初始密度 (g/cm ³)	干密度 (g/cm ³)	比重 G _s	孔隙比 e	塑性指数 I _p	液性指数 I _L	凝聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	固线系数 (10 ⁻³ cm ² /s)
42.7	1.78	1.25	2.74	1.193	18.2	1.14	16	5.3	2.83

3 加固机理与施工工艺研究

由于长江漫滩地区淤泥质、淤泥软土及粉砂土夹淤泥质土层的厚度大，强度较低，压缩性多呈现中、高压缩性，承载力较低，不能满足高速公路建设的要求，通常情况都需要进行加固处理，处理后路基的沉降变形如何预测，是否满足工后沉降的要求；桥头过渡地段又如何有效的控制不均匀沉降，防止桥头跳车；对于桥梁桩基如何设计达到既经济又能满足承载力和抗震的要求等等。这些问题都必须进行研究解决，确定最佳、经济、实效的处理方案，以保证工程的安全稳定。

3.1 深层搅拌桩的加固机理

水泥系的深层搅拌桩是一种用于加固饱和粘性土比较好的方法，水泥加固土的物理化学反应与混凝土的硬化机理不同，混凝土的硬化主要是在粗填料中

进行水解和水化作用，所以凝结速度较快。水泥加固土的强度增长机理主要由于水泥的水解和水化反应，土颗粒与水泥水化物的作用和碳酸化作用。

从水泥土的加固机理分析来看，搅拌机械的切削搅拌不可避免地会留下一些未被粉碎的大小土团块，因此在水泥土中不可避免地会产生强度较大和水稳性较好的水泥石区和强度较低的土块区，如果在空间上相互重迭交替，形成独特的非均匀水泥土结构。所以，采用搅拌加固软土地基时，必须严格控制施工的工艺，如果能搅拌均匀充分，土块被粉碎得越细，水泥分布到土中就越均匀，水泥土结构强度的离散性就越小，其总体强度就高。

3.2 搅拌桩施工工艺试验

根据水泥土的加固机理和高速公路建设的要求，进行了搅拌桩成桩效果的试验研究，研究确定搅拌桩的施工工艺，从而保证整个工程的施工质量。针对长江漫滩软土的特点进行了 5 种不同工艺的试桩试验研究，这 5 种试桩分别如表 2 描述。成桩后 28d 进行桩身抽芯检测和静载荷试验。

试桩工艺说明表 表 2

试桩分区	掺灰量	工艺要求
1	50kg/m	2 喷 4 搅，先下钻搅碎原状土至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面，再下钻搅拌至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面。钻进、提升的速度控制在 0.8~1.0m/s。
2	50kg/m	2 喷 6 搅，先下钻搅碎原状土至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面，再下钻搅拌至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面。第三次下钻搅碎拌至设计深度，提升搅拌至停灰面。钻进、提升的速度控制在 0.8~1.0m/s。
3	50kg/m	2 喷 4 搅，加固桩头，先下钻搅碎原状土至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面，再下钻搅拌至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面。然后加固桩，在 4m 深度以内进行搅拌。钻进、提升的速度控制在 0.8~1.0m/s。
4	60kg/m	2 喷 6 搅，先下钻搅碎原状土至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面，再下钻搅拌至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面。第三次下钻搅碎拌至设计深度，提升搅拌至停灰面。钻进、提升的速度控制在 0.8~1.0m/s。
5	70kg/m	2 喷 6 搅，先下钻搅碎原状土至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面，再下钻搅拌至设计深度，提升喷浆搅拌至停灰面。第三次下钻搅碎拌至设计深度，提升搅拌至停灰面。钻进、提升的速度控制在 0.8~1.0m/s。

4 测试分析

4.1 桩身抽芯测试

上述不同施工工艺成桩的搅拌桩完工后 28d 进行桩身抽芯检测，以分析施工工艺对成桩质量的影响，此外又进行了搅拌桩三桩复后地基（桩间距为 1.5m）的静载荷试验研究。抽芯测试结果见表 3~表 7。

试桩 1 区抽芯测试结果 表 3

深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)	深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)
2.4~2.7	6	2.0~2.3	1.13	2.4~2.7	6	2.0~2.3	0.64
4.4~4.7	5	4.0~4.3	1.60	4.4~4.7	4	4.0~4.3	0.80
6.5~6.8	11	6.0~6.3	2.49	6.5~6.8	10	6.0~6.3	1.57
8.4~8.7	4	8.0~8.3	0.12	8.4~8.7	4	8.0~8.3	0.22
11.4~11.7	5	11.0~11.3	0.12	10.1~10.4	5	9.7~10.0	0.31
14.1~14.4	5	13.6~13.9	0.21				

评分 61.6 搅拌欠均匀, 合格* 评分 57.3, 搅拌欠均匀, 不合格

*不合格 (0~59分); 合格 (60~74分); 良好 (75~84分); 优 (>85分)

试桩 2 区抽芯测试结果 表 4

深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)	深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)
2.1~2.4	11	1.7~2.0	1.40	2.1~2.4	10	1.7~2.0	1.15
4.1~4.4	8	3.7~4.0	1.01	4.1~4.4	7	3.7~4.0	0.92
6.2~6.5	9	5.8~6.1	0.98	6.2~6.5	10	5.8~6.1	1.63
8.1~8.3	13	7.7~8.0	1.21	8.1~8.3	12	7.7~8.0	1.42
11.4~11.7	8	11.0~11.3	0.81	10.4~10.7	7	10.0~10.3	0.82
14.3~14.6	7	13.9~14.2	0.84				

评分 82.3 搅拌均匀, 良 评分 79.2, 搅拌均匀, 良

试桩 3 区抽芯测试结果 表 5

深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)	深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)
2.1~2.4	12	1.7~2.0	2.04	2.1~2.4	13	1.7~2.0	2.12
4.1~4.4	10	3.7~4.0	1.10	4.1~4.4	9	3.7~4.0	1.03
6.2~6.5	8	5.8~6.1	0.68	6.3~6.6	8	5.9~6.2	0.84
8.1~8.3	12	7.7~8.0	1.20	8.1~8.3	11	7.7~8.0	1.81
10.4~10.7	15	9.0~9.3	1.56	10.3~10.6	10	9.0~9.3	0.95
12.1~12.4	10	11.7~12.0	1.02	12.1~12.4	8	11.7~12.0	0.69
14.2~14.5	6	13.8~14.1	0.81	14.2~14.5	7	13.8~14.1	0.68

评分 80.6 搅拌均匀, 良 评分 70.2, 搅拌均匀, 合格

试桩 4 区抽芯测试结果 表 6

深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)	深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)
2.1~2.4	17	1.7~2.0	3.05	2.1~2.4	16	1.7~2.0	2.86
4.1~4.4	13	3.7~4.0	0.96	4.1~4.4	12	3.7~4.0	1.27
6.2~6.5	14	5.8~6.1	2.44	6.2~6.5	15	5.9~6.2	1.86
8.1~8.3	9	7.7~8.0	0.76	8.1~8.3	12	7.7~8.0	0.88
10.4~10.7	14	9.0~9.3	0.84	10.4~10.7	9	9.0~9.3	0.93
12.1~12.4	6	11.7~12.0	0.69	12.1~12.4	8	11.7~12.0	0.76
14.2~14.5	16	13.8~14.1	0.51	14.2~14.5	13	13.8~14.1	0.63

评分 85.2 搅拌均匀, 优 评分 87.4, 搅拌均匀, 优

试桩 5 区抽芯测试结果 表 7

深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)	深度 (m)	$N_{63.5}$	取样深度 (m)	q_u (MPa)
2.1~2.4	17	1.7~2.0	2.99	2.1~2.4	15	1.7~2.0	2.77
4.1~4.4	15	3.7~4.0	2.74	4.1~4.4	14	3.7~4.0	1.31
6.2~6.5	12	5.8~6.1	1.06	6.3~6.6	15	5.9~6.2	0.87
8.1~8.3	12	7.7~8.0	1.24	8.1~8.3	11	7.7~8.0	1.92
10.4~10.7	16	9.0~9.3	1.68	10.3~10.6	9	9.0~9.3	0.91
12.1~12.4	10	11.7~12.0	0.89	12.1~12.4	12	11.7~12.0	0.70
14.2~14.5	15	13.8~14.1	0.76	14.2~14.5	10	13.8~14.1	0.83
16.2~16.5	8	15.8~16.1	0.73	16.2~16.5	8	15.8~16.1	0.59

评分 90.6 搅拌均匀, 优 评分 88.7, 搅拌均匀, 优

4.2 静载试验分析

从抽芯检测的结果来看, 试桩 1 区的成桩质量较差一些, 其它 4 个试桩区的搅拌桩的成桩质量均达到优良。为了进一步验证搅拌桩成桩后形成的复合地基的承载力情况, 又进行了试验复合地基的承载力的测试, 考虑到试验经费的限制, 仅对试桩 1 区、2 区和 3 区进行承载力的测试。搅拌桩复合地基的承载力采用三桩复合地基测试, 测试结果见图 1~图 3。图 1 为试桩 1 区的静载试验 $P-S$ 曲线, 当荷载加至 200kPa 时, 沉降急剧加大, 且没有稳定的趋势, 其极限承载力 180kPa, 没有达到设计要求。图 2、图 3 分别为试桩 2 区和 3 区的静载试验 $P-S$ 曲线, 极限承载力均大于 260kPa, 达到了设计要求。

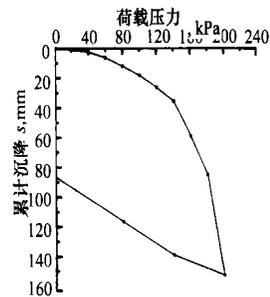


图 1 试桩 1 区的静载荷试验 $P-S$ 曲线

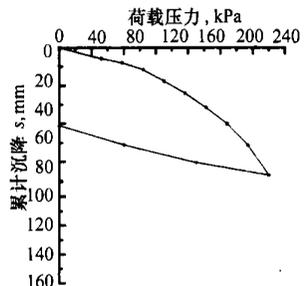


图 2 试桩 2 区的静载荷试验 $P-S$ 曲线

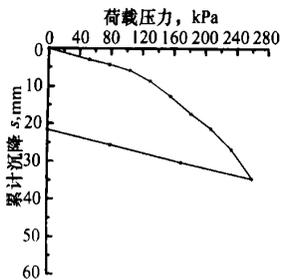


图3 试桩3区的静荷载试验 P-S 曲线

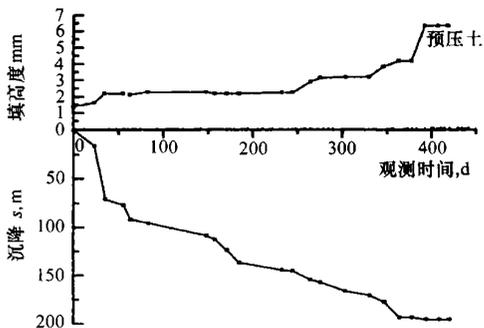


图5 k10+600 断面沉降观测曲线

测试结果表明, 试桩 2 区、3 区、4 区和 5 区, 成桩的质量较好, 同时能满足承载力的要求, 达到了设计的要求。综合考虑整个工程的投资和经济效益和工艺控制的便利, 建议采用试桩 2 区的施工工艺, 即 2 喷 6 搅, 先下钻搅碎原状土至设计深度, 提升喷浆搅拌至停灰面, 再下钻搅拌至设计深度, 提升喷浆搅拌至停灰面, 第三次下钻搅碎拌至设计深度, 提升搅拌至停灰面。钻进、提升的速度控制在 0.8 ~ 1.0m/s。对于试桩 1 区进行补桩处理, 以保证其承载力满足设计要求。

4.3 实测沉降数据分析

根据试桩结果, 会同设计决策部门下文同意采用试桩 2 区的施工工艺进行搅拌桩全面施工, 搅拌桩龄期 28 天后进行抽芯+标贯检测, 检测结果显示搅拌桩的优良率达到 94.2%, 合格率 100%。软基处理结束后便进行路基的填筑施工, 路基填筑施工的过程中同时进行沉降的动态观测, 沉降曲线表明路基的沉降量完全控制在设计范围内。图 4 为 k09+710 断面沉降观测曲线 (沉降板位于路基中央), 图 5 为 k10+600 断面沉降观测曲线 (沉降板位于路基中央), 沉降已趋于稳定。

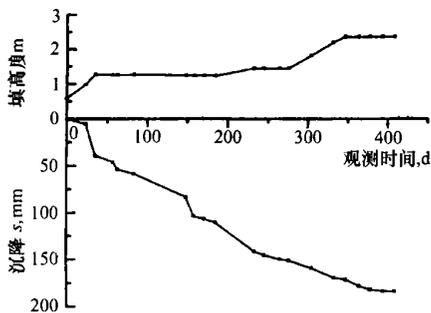


图4 k09+710 断面沉降观测曲线

5 结论

本文充分分析了搅拌桩加固软土地基的机理, 依据这些进行了施工工艺的工程实践研究。研究表明, 搅拌桩不同的施工工艺对成桩质量产生明显的影响。在搅拌桩的施工过程中一定要搅拌均匀, 同样掺灰量搅拌均匀的程度不同直接影响了工程的质量。如试桩 1 区由于搅拌的不均匀, 导致成桩质量和复合地基的承载力不能满足设计的要求。根据这一研究成果, 全线施工建议采用试桩 2 区的施工工艺, 即 2 喷 6 搅, 先下钻搅碎原状土至设计深度, 提升喷浆搅拌至停灰面, 再下钻搅拌至设计深度, 提升喷浆搅拌至停灰面, 第三次下钻搅碎拌至设计深度, 提升搅拌至停灰面。钻进、提升的速度控制在 0.8 ~ 1.0m/s, 使得润扬大桥北接线高速公路的软土地基施工质量达到了优良。后期的沉降动态观测曲线表明, 长江漫滩软土地基搅拌桩处理的施工工艺是切实可行的, 达到了设计的要求。

参考文献:

- [1] Yin J H, Lai C K. (1998). Strength and Stiffness of Hong Kong Marine Deposits Mixed with Cement [J]. Geotechnical Engineering Journal SAGE, 1998, 29 (1): 29-44
- [2] D T Bergado, L R Anderson, N Miura, et al Soft Ground improvement [M]. ASCE, Press.
- [3] 叶书麟, 主编. 地基处理工程实例应用手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [4] 中华人民共和国建设部. 建筑地基处理技术规范 (JGJ 79-91) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.