软土地基路桥设计参数试验项目

（路　基）

软土地基处理施工工艺及质量检验方法研究

中期报告

２００３年１２月

本报告组成内容

1、 《软土地基处理施工工艺及质量检验方法研究》中期报告

2、 分报告之一《复合地基处理施工工艺及质量检验方法研究》中期报告

3、 分报告之二《排水固结地基处理施工工艺及质量检验方法研究》中期报告

目　录

1 概述……1
1.1 研究依据……1
1.2 研究目的及意义……1
1.3 主要研究内容及方法……2
1.4 主要研究单位及分工……3
2 试验概况……4
2.1 试验段设计概况……4
2.2 试验段工程地质概况……4
3 试验段软基处理方法调研……8
3.1 水泥搅拌桩处理软基……8
3.2 塑料排水板排水固结法处理软基……8
3.2.1 塑料排水板联合超载预压……8
3.2.2 塑料排水板真空—堆载联合预压……9
3.3 砂桩处理软基……9
4 水泥搅拌桩处理软基施工工艺及质量检验……11
4.1 水泥土室内试验……11
4.2 水泥搅拌桩施工工艺及参数试验……12
4.2.1 施工工艺及参数研究方案……12
4.2.2 喷搅工艺及参数试验……12
4.2.3 工艺参数试验小结……12
4.2.4 施工工艺及参数验证研究……13
4.3 水泥搅拌桩质量检验方法……20
4.3.1 质量检验研究目的与方法……20
4.3.2 质量检验研究……20
4.4 桩体水泥土特性与龄期及掺入比关系……29
4.4.1 桩体水泥土无侧限抗压强度与掺入的比关系……29

4.4.2 桩体与室内水泥土特性对比分析……30
4.5 小结……31
5 塑料排水板排水固结法处理软基施工工艺及质量检验……33
5.1 塑料排水板试验概况……33
5.2 塑料排水板施工工艺及质量检验……33
5.2.1 试验选用材料、机械及人员配备情况……33
5.2.2 塑料排水板施工工艺及工艺流程……33
5.2.3 塑料排水板施工质量控制……34
5.2.4 塑料排水板施工及质量检验方法研究……34
5.3 塑料排水板真空—堆载联合预压处理软基施工工艺及质量检验……35
5.3.1 概况……35
5.3.2 塑料排水板真空—堆载联合预压处理软基施工工艺……36
5.3.3 塑料排水板真空—堆载联合预压施工控制……36
5.3.4 真空泵数量对真空度的影响……37
5.4 小结……38
6 砂桩联合等载预压处理软基施工工艺及质量检验……39
6.1 砂桩试验概况……39
6.2 试验现场机械配置……39
6.3 砂桩施工工艺……39
6.3.1 工艺参数试验……39
6.3.2 砂桩施工工艺比较……42
6.4 砂桩质量检验……43
6.4.1 质量检验内容……43
6.4.2 砂桩质量检验分析……44
6.4.3 砂桩质量检验时间的研究……47
6.5 小结……47
7 环境保护及其它研究……50
7.1 水泥搅拌桩处理软基……50
7.2 塑料排水板排水固结法处理软基……50

7.3 砂桩联合等载预压处理软基……51
8 初步结论与建议……52
8.1 水泥搅拌桩处理软基……52
8.2 塑料排水板排水固结法处理软基……52
8.3 砂桩联合等载预压处理软基……53

1　概述

1.1 研究依据

(1)《软土地基路桥设计参数试验项目－试验研究大纲》、《软土地基路桥设计参数试验项目－试验研究实施细则》。

(2)《软土地基路桥设计参数试验项目》总说明书、软试施（路）修－01～02 等设计图。

(3)《京沪高速铁路设计暂行规定》(上册)、《高速铁路路基工程施工及验收暂行规定》、《高速铁路路基工程质量检验评定暂行标准》。

(4)《铁路路基施工规范》(TB10202-2002)。

(5)《软土地基路桥设计参数试验项目第 1 试验段实施性施工组织设计》、《软土地基路桥设计参数试验项目第 2 试验段实施性施工组织设计》

1.2 研究目的及意义

高速铁路对路基工程的变形要求远远高于普通铁路，就路基工程而言，由以往的强度控制设计思想转变为变形控制的设计思想。尽管针对软基问题做了大量的科研工作，对各种软土地基处理方案的设计、施工及质量控制与检测方面也积累了不少经验，但由于软土自身的复杂性及高速铁路工后沉降控制标准的严格性，在软土地区修建高速铁路仍然面临很多新问题，必须对有关设计、施工问题进行进一步研究和探索。具体表现在：

(1)通过水泥土室内配比试验及桩体水泥土钻探取芯结合室内试验研究，分析水泥土的力学特性（无侧限抗压强度、压缩性能、剪切强度）与加固料等级、掺入比、水泥浆的水灰比、试件龄期、试件成型方法（干法、湿法）的关系，确定满足高速铁路软土地基处理设计要求的施工掺入比及水泥土力学指标值。

(2)对浆体水泥搅拌桩(以下简称浆喷桩)、粉体水泥搅拌桩(以下简称粉喷桩)、砂桩、塑料排水板、真空预压等软土地基处理方法的施工机械配置、施工方法、施工工艺参数、过程质量控制手段等进行调研及工程试验，总结出满足京沪高速铁路软土地基处理设计要求的施工工艺、施工方法及机械配置，并为制订相关施工规程提供依据。

(3)对浆喷桩、粉喷桩、砂桩、塑料排水板、真空预压等地基处理方法的施工质量检测方法（常规方法和综合物探方法）的适用范围、控制参数进行研究，提出满足京沪高速铁路软土地基处理质量要求的地基处理方法、质量检测手段、合理组合及频度要求，得出

合适的京沪高速铁路路堤工程软基加固施工的质量控制措施及质量检验手段。

1.3 主要研究内容及方法

围绕研究目的开展了一系列的研究工作，主要研究内容及方法如下：

(1)资料调研

系统调研国内外道路工程有关软土地基处理的施工机具、施工工艺、施工方案设计，及地基处理技术发展情况等相关资料。

(2)室内水泥土及桩体水泥土力学特性试验研究

按照《细则》要求，现场采集土样，使用不同标号的水泥，分别制作不同龄期的水泥土试件，进行无侧限抗压强度、抗剪强度、压缩指标试验，研究室内水泥土力学特性随掺入比、龄期、水灰比、水泥标号的变化规律，以及桩体水泥土力学特性与室内水泥土力学特性之间的相关关系。

在试验段水泥搅拌桩施工时，对不同龄期的桩体进行钻探取芯，进行室内无侧限抗压强度、抗剪强度、压缩特性试验，研究桩体水泥土力学特性随掺入比、龄期、水灰比、水泥标号的变化规律。

(3)施工工艺及参数试验研究

在借鉴以往水泥搅拌桩、塑料排水板、真空预压、砂桩施工经验的基础上，通过工艺性试验初步确定施工工艺及参数，再按照确定的工艺及参数进行试验段水泥搅拌桩、塑料排水板、真空预压、砂桩施工，进一步验证研究施工工艺及参数和施工控制方法，并通过对检测数据的进一步研究与分析，总结出满足设计要求的水泥搅拌桩、塑料排水板、真空预压、砂桩施工工艺及参数。

通过真空预压系统、填土堆载实施工序的工程试验、施工监测等，研究真空联合堆载预压加固措施的合理施工工序、主要控制参数及系统配制，辅助进行真空预压加固机理、加固效果的研究。

对振动成桩法与双管锤击成桩法进行关键控制参数的工程试验研究，并就成桩过程对土强度影响、各方法成桩效果、工效等方面进行研究。

(4)试验段软土地基处理质量检测方法、检测频率及标准的研究

采用钻探取芯结合室内试验、静力触探试验、轻型动力触探试验、标准贯入试验、载荷试验、现场足尺开挖强度试验、低应变试验及综合物探方法检测水泥搅拌桩软土地基处理的质量，并研究各种方法的适用性和可靠性。

试验段部分地基处理采用可测深塑料排水板，对可测深塑料排水板的施工工艺、深度检测方法进行研究。

砂桩检测包括桩体深度、桩体连续性、桩体密实度等。检测方法采用钻探结合标准贯入试验或重型动力触探、静力触探法、荷载试验进行。对三种检测方法质量控制效果、检测方法的合理组合及检测频度进行研究。并采用综合物探方法对砂桩处理软土地基前后及不同预压时间进行测试。

(5)通过对水泥搅拌桩、塑料排水板、砂桩处理软土地基地段的变形等观测，研究分析水泥搅拌桩、塑料排水板、砂桩施工机械及施工工艺对软土地基变形的影响(该部分内容将在最终报告中完成)。

1.4 主要研究单位及分工

本项目参加单位及分工如下：

主持单位：铁道第四勘察设计院。主要研究工作：

现场水泥搅拌桩、塑料排水板真空－堆载联合预压、塑料排水板联合堆载预压、砂桩处理地基试验施工组织。编写研究总报告。

参加单位：铁二十局。主要研究工作：

(1)现场粉喷桩、浆喷桩处理地基试验施工组织及实施。

(2)编写《复合地基（粉喷桩、浆喷桩）地基处理施工工艺及常规质量检验方法研究分报告》专题研究报告，参与研究总报告编写讨论。

参加单位：铁四局。主要研究工作：

(1)现场塑料排水板真空－堆载联合预压、塑料排水板联合堆载预压、砂桩处理地基试验施工组织及实施。

(2)编写《排水固结法（塑料排水板真空－堆载联合预压、塑料排水板联合堆载预压、砂桩）施工工艺及常规质量检验方法研究分报告》，参与研究总报告编写讨论。

参加单位：铁科院。主要研究工作：

进行不同软土地基处理方案物探检验，编写《不同软土地基处理方案物探检验方法研究分报告》，参与研究总报告编写讨论。

参加单位：铁正公司。主要研究工作：

参与软土地基不同处理方法常规质量检验，配合中铁二十局、中铁四局参与编写《不同软土地基处理方案常规检验方法研究分报告》。

2　试验概况

2.1 试验段设计概况

试验工点地处江苏省昆山市，属太湖湖积平原，地形平坦，有人工鱼塘分布，地面标高 2.5m 左右。试验工点范围为 0+000~0+850，线路长度 850m，其中：0+000~+38.40、0+833.95~+850 为桥梁桩基试验段，0+38.40~+833.95 为路基试验段。

试验段线路为双线，路基面宽 13.8m，考虑路堤本体沉降及软土地基工后沉降，每侧加宽 0.2m，线间距 5.0m。路堤填土高 4.35~5.95m，路堤边坡坡率为 1：1.5，边坡坡面采用三维土工网垫固土后喷播植草防护。在路堤填筑过程中，在边坡 2.5m 宽度范围内每隔 0.3m 铺一层土工格栅。

高速铁路对路基工后沉降的要求要比普通铁路高得多，这就对地基处理方式、方法、达到的效果提出了更高的要求。本试验段地基处理分别采用了浆喷桩、粉喷桩、塑料排水板联合超载预压、塑料排水板联合真空预压、砂桩联合等载预压等地基加固措施，详见表 2－1。

表 2－1　软土地基加固设计措施

里程	地基处理类型	间 距(m)		深度(m)	附注
		路肩	边坡		
0+38.4～+51.98	浆喷桩	1.0	1.2	18.0	桩径 0.5m,排间距 1.0m
0+51.98～+155	浆喷桩	1.2	1.4	15.0～17.5	桩径 0.5m,排间距 1.2m
0+155～+276.51	粉喷桩	1.2	1.4	12.5～16.5	桩径 0.5m,排间距 1.2m
0+276.51～+515	塑料排水板联合真空预压	1.2		14.5～18.5	塑料排水板梅花形布置
0+515～+587.755	塑料排水板联合超载预压	1.8		7.0～15.0	梅花形布置,超载土柱高 1.8m
0+589.245～+708.255		1.2			塑料排水板梅花形布置,超载土柱高 1.2m
0+709.745～+819.55	砂桩联合等载预压	2.0		15.0	砂桩桩径 0.4m,梅花形布置
0+819.55～+833.95				25.5	砂桩桩径 0.4m,梅花形布置,加固范围为桥路过渡段

2.2 试验段工程地质概况

试验段地基属第四系全新统冲湖积层，表层为黏土，灰黄色，软~硬塑，层厚 0.76~3.60m；其下为淤泥质粉质黏土，深灰色，流塑，含少量腐植物，局部夹有薄层粉砂，具高压缩性、低强度、高触变性的特点，厚 3.2~16.5m；下卧层为粘土、粉土及粉质粘土，软～硬塑。

试验段地基主要由黏土,淤泥质粉质黏土，粉质黏土及粉砂等地层组成。各地层岩性

自上而下分述如下：

(1)黏土，灰黄色，软～硬塑，夹有少量铁锰结核，表层 0.2～0.5m 为种植土，含有植物根系，该层厚 0.76～3.60m，属中等压缩性土。

(2)淤泥质粉质黏土，深灰色，流塑，含少量腐植物，局部夹有薄层粉砂，具高压缩性、低强度的特点，且大多数灵敏度超过 16，具高触变性，厚 3.2～16.5m。

(3)黏土，粉质黏土，粉土，局部夹薄层粉砂，呈交错断续沉积，层理清晰，具体分布如下：

(3)-1 粉质黏土夹薄层粉砂，绿灰色，软塑，厚 0～4.1m，分布于 0+000～0+475。具中等压缩性。

(3)-2 黏土，深灰色～浅灰色，硬塑，厚 0～8.1m，呈透镜体分布于 0+090～+315。属中等偏低压缩性土。

(3)-3 黏土，灰绿色，黑灰色，软塑～硬塑，厚 0～7.4m，分布于 0+405～0+845，层位较为稳定。属中等偏低压缩性土。

(3)-4 粉质黏土局部夹薄层粉砂或黏土,灰黄色,软～硬塑,厚 0～5.4m,分布于 0+405～0+845，层位较为稳定。属中等偏低压缩性土。

(3)-5 粉质黏土，浅灰色，灰黄色，软塑，厚 0～9.8m，分布于 0+405～0+845，层位较为稳定。属中等压缩性土。

(4)粉砂，可分为上下两层，上部夹有薄层黏性土，具体分述如下：

(4)-1 粉砂，褐黄色，中密，饱和，厚 0～6.7m，不均匀夹有薄层黏土，分布于 0+035～0+535，其 N63.5=5～45 击，算术平均值 21.5 击。

(4)-2 粉砂，褐黄色，深灰色，中密~密实，饱和，厚大于 10m，工点范围广泛分布，其 N63.5=19~48 击，算术平均值 24.4 击。

地基土物理力学指标统计分析见表 2－2。从表中可得出，试验段地层的含水量及孔隙比较高，特别是第 2 层淤泥质粉质黏土层（也是本试验段的控制地层）其平均值分别达到了 44.4%和 1.23，灵敏度较高，属典型软土。试验段土层的固结系数在 10-4～10-3 量级左右，次固结系数在 10-3～10-2 量级左右，渗透系数在 10-8～10-7 量级范围内，变化范围较小。

表 2－2　试验段土体物理力学指标统计一览表

项目		单位	地层						
			1	2	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
天然含水率 W		%	31.9	44.4	35.0	26.0	24.5	35.5	36.4
容重 γ		kN/m^3	19.2	17.8	18.8	19.9	20.3	18.7	18.7
天然孔隙比 e			0.89	1.23	0.97	0.70	0.69	0.98	0.99
液限 W_L			40.9	35.8	33.2	33.5	36.2	33.9	34.8
塑限 W_p			19.7	19.9	19.8	16.4	17.1	21.9	20.4
塑性指数 I_p			21.1	16	15.5	17.0	19.1	12.7	14.4
快剪	凝聚力 C	kPa	24.5	8.4	29.0	30.5	57.3	15.6	14.7
	内摩擦角 Φ	°	8.7	6.3	10.6	7.9	16.7	15.0	15.3
固结快剪	凝聚力 C	kPa	14.0	3.7	4.0			3.0	14.0
	内摩擦角 Φ	°	15.5	18.9	26.7		21.6	23.2	23.6
无侧限抗压强度		kPa	92.9	34.3	92.6		248.7	54.0	119.7
压缩系数 a_v		MPa^{-1}	0.39	0.89	0.21	0.33	0.18	0.25	0.40
压缩模量 Es		MPa	4.61	4.35	8.77	5.70	13.86	10.01	6.08
压缩指数 C_C			0.25	0.30	0.14	0.25	0.14	0.2	0.33
前期固结压力		kPa	204.3	86.5	226.0	281.5	253.69	290	253.67
回弹指数 C_S			0.03	0.04	0.009	0.02	0.06	0.02	0.02
次固结系数 C_a			0.006	0.0086		0.0029	0.0019		0.0047
固结系数	$Ch_{100\sim200}$	$10^{-3}cm^2/s$	1.45	3.37			9.46	12.86	9.31
	$Cv_{100\sim200}$	$10^{-3}cm^2/s$	2.09	1.92	4.95	3.85	5.47	11.38	7.82
渗透系数	$kh_{100\sim200}$	$10^{-7}cm/s$	0.4	1.44			1.12	2.32	
	$kv_{100\sim200}$	$10^{-7}cm/s$	0.52	0.68	0.57	0.71	0.63	1.70	1.24

试验段工程地质纵断面见图 2－1。

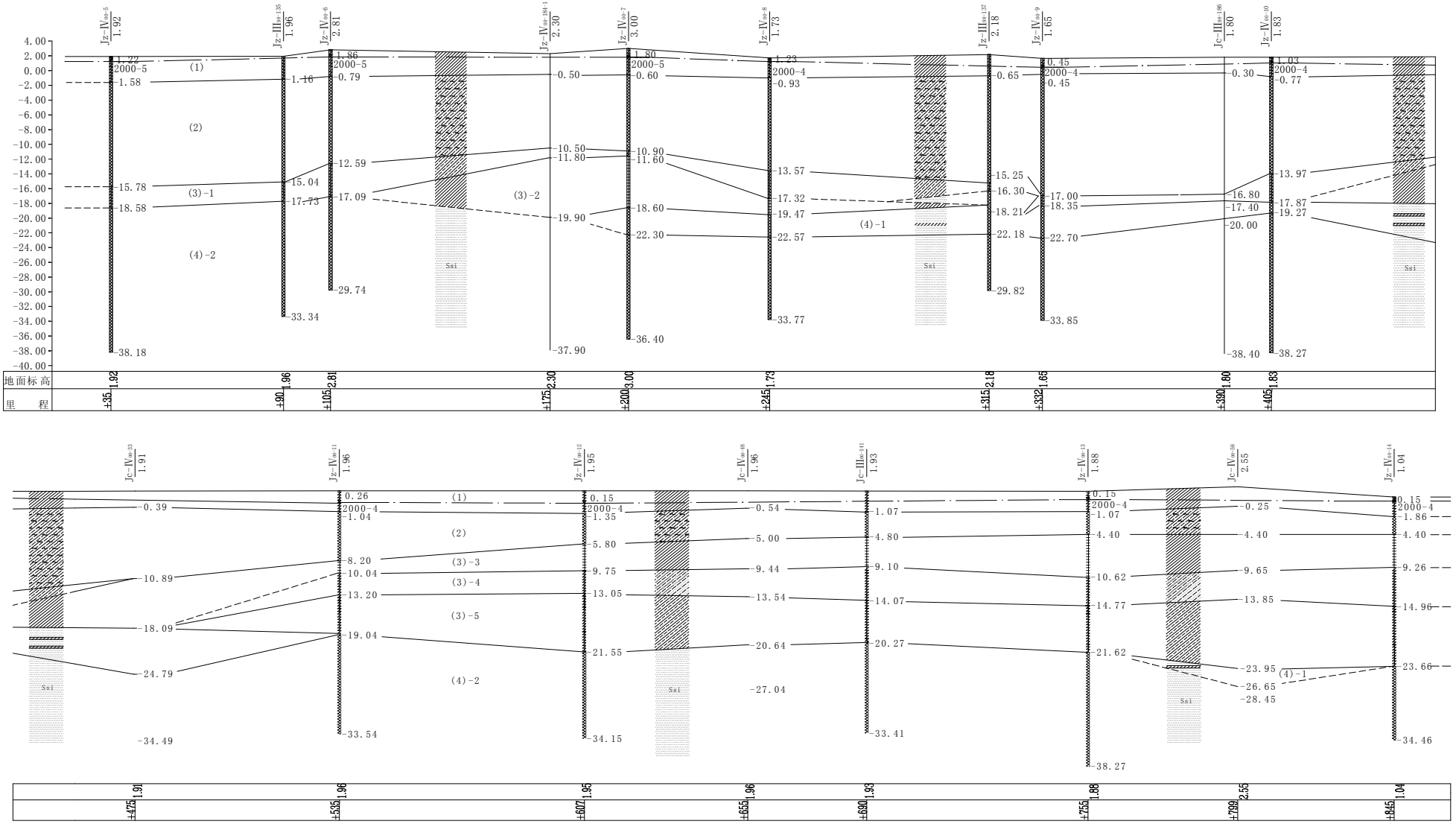


图 2—1　　试验段工程地质纵断面图

3　试验段软基处理方法调研

3.1 水泥搅拌桩处理软基

深层搅拌桩最初来源于美国二次世界大战后开发的就地搅拌桩（简称 MIP）。1953 年日本清水建设株式会社从美国引进此法，1974 年日本港湾技术研究所等单位研究开发了水泥搅拌固化法（CMC），1970 年前苏联成功研究开发一种类似美国 MIP 的淤泥水泥土桩。

1977 年 10 月我国冶金部建筑研究总院和交通部水运规划设计院引进、开发双轴水泥浆液搅拌技术和机械研究；1984 年铁道第四勘察设计院和铁道部武汉工程机械研究所试制 PH-5 型粉喷桩机并投入实践；1988 年铁道第四勘察设计院和上海探矿厂联合研制成功 GPP-5 型粉喷桩机并很快投入批量生产。国内常用的 GPP-5B 和 PH-5 型机械技术参数见表 3－1。

表 3－1　GPP-5B 和 PH-5 技术参数

技术参数		单位	PH-5B	PH-5D	GPP-5B
加固深度		m	18	18	12.5、15、18
最大扭矩		kN · m	21	55	23.5
提升速度	正	m/min	0.228、0.386、0.679、1.081、1.665	0.116、0.461、0.690、1.035、1.497	0.228、0.368、0.679、1.081、1.665
	反	m/min	0.268、0.455、0.800、1.272、1.960	0.137、0.543、0.949、1.355、1.761	0.268、0.445、0.800、1.272、1.960
主电机功率		kW	37	45	37

水泥搅拌桩质量主要通过抽样钻探取芯进行无侧限抗压强度(28d)、单桩承载力及复合地基承载力载荷试验综合评价。

3.2 塑料排水板排水固结法处理软基

3.2.1 塑料排水板联合超载预压

塑料排水板联合堆载预压是排水固结法之一，利用塑料排水板通道作为竖向排水系统，铺设水平垫层作为横向排水系统。排水固结法的机理是通过预压荷载，使被加固土体的孔隙水经由排水系统排出，从而减小土体中孔隙体积，增大密实度，提高土体强度，最终提高地基承载力，减少工后沉降。其中预压荷载一般有三大类：一是建（构）筑物本身的重量，二是外加荷载，三是通过减小地基土的孔隙水压力而增加固结压力的方法。

塑料排水板法是在 Kjellman 于 1934 年发明的纸板上发展而来的。

1980 年河海大学研制出我国第一块塑料排水板，1981 年天津港湾工程研究所研制成功第一台塑料排水板插板机，并于 1982 年第一次在天津塘沽新港码头堆场软基加固工程

中开始使用。由于塑料排水板具有性能好、质量可靠、施工方便、工效高、工程费用低、对土体的扰动小、可用轻型机械施工等优点，迅速在国内得到推广，大有代替砂井、袋装砂井作为排水固结法垂直排水体的趋势。

塑料排水板需要用专门的机械插设，目前国内很少有定型产品，大部分是施工单位自行制造或改装而成的。施工方法分静压式与振动式两种。静压式施工是靠液压力将套管压入土中，其拔出利用链条拉力；振动式施工是靠振动锤的激振力将套管打入土中，其拔出套管一般利用卷扬机及振动力。

3.2.2 塑料排水板真空—堆载联合预压

1952 年，瑞典皇家地质学院的杰尔曼教授提出了真空排水预压法加固软土地基的原理，但当时受材料、机械和施工工艺等方面原因影响，这一技术发展较慢。1958 年美国费城机场软土的地基处理，采用了井点降水与排水砂井相结合的方法，在每一深井中安装一台立式涡轮真空泵，利用地层中的薄砂层做横向排水体，袋装砂井为竖向排水体，进行抽真空，真空度达到了 50kPa，实现了预期的目标。20 世纪 70 年代，日本东北地区新干线在第七号谷地的软基处理，采用真空预压法，并第一次在加固区内打设了垂直排水体（纸板），取得了成功，把真空预压法的加固技术向前推进了一大步。

1957 年，我国 807 部队和哈尔滨军事工程学院在室内、室外做过真空预压试验，其后又有几家单位做这方面的研究，但都未能进入应用阶段。20 世纪 80 年代，以交通部第一航务工程局为主，天津大学、南京水利科学院土工所联合组成攻关小组，对该项技术又重新进行了探索、研究。解决了机械、材料等关键问题，从而使该项技术的施工工艺有了突破性进展，能满足大面积施工要求。

真空-堆载联合预压是近几年来在真空预压与堆载预压基础上发展起来的一种软土地基加固新技术，具有真空预压和堆载预压的双重加固效果，两者都是属于排水固结法，通过真空压力（负压）和堆载（正压）使土体中的孔隙水排出，从而使土体产生固结变形。真空-堆载联合预压尤其适用于铁路、公路等本身就有堆载的工程，在抽真空时就可进行上部路堤的填筑，没有卸载工序，既能缩短施工工期，又能提高加固效果。目前国内高速公路的建设中应用此技术较多，且取得了很好的加固效果。

3.3 砂桩处理软基

采用砂桩联合堆载预压法加固软黏土地基，主要有置换作用和排水作用。

砂桩在 19 世纪 30 年代起源于欧洲，但长期缺少实用的设计计算方法和先进的施工工艺及施工设备，砂桩的应用和发展受到很大的影响。自上世纪 50 年代后期，日本采用的

振动式和冲击式的施工方法，并采用了自动记录装置，提高了砂桩的施工质量和施工效率，处理深度也有较大幅度的增大，处理深度最大可达 30m 左右。

砂桩技术自上世纪 50 年代引进我国后，在工业、交通、水利等建设工程中得到了应用。目前国内外砂桩常用的成桩方法有振动成桩法和冲击成桩法。国内砂桩施工中常用的沉拔桩机的生产厂家主要分布在江浙一带，其中具有代表性的有两家分别是江阴振冲器厂和浙江瑞安燎原建筑工程机械有限公司。

4　水泥搅拌桩处理软基施工工艺及质量检验

4.1 水泥土室内试验

室内试验具体方案详见表 4-1。

表 4-1　水泥土室内配比成型方案

序号	成型方法	试验项目	水泥掺入比（%）	龄期（d）	数量
1	干法	无侧限抗压强度	8、10、12、15、18、20（P.032.5 级水泥）	7、28、90、180	48 组
2	湿法（水灰比 0.5）	无侧限抗压强度	8、10、12、15、18、20（P.0 32.5 级水泥）	7、28、90、180	48 组
3	干法	直剪	10、12、15（P.0 32.5 级水泥）	28、90、180	18 组
4	干法	固结	10、12、15（P.0 32.5 级水泥）	28、90、180	18 组
5	湿法（0.4、0.6、0.8、1.0）	无侧限抗压强度	15（P.0 32.5 级水泥）	7、28、90、180	12 组
6	湿法（水灰比 0.5）	直剪	10、12、15（P.032.5 级水泥）	28、90、180	18 组
7	湿法（水灰比 0.5）	固结	10、12、15（P.032.5 级水泥）	28、90、180	18 组
8	干、湿法（湿法水灰比 0.5）	无侧限抗压强度	12、15（P.0 42.5 级水泥）	7、28、90、180	8 组
9	干、湿法（湿法水灰比 0.5）	固结	12、15（P.0 42.5 级水泥）	7、28、90、180	8 组

注：1.无侧限抗压强度试验、固结试验 3 个试件为一组，剪切试验 4 个试件为一组；

无侧限抗压强度与龄期关系见图 4-1、图 4-2。由图可知，随着水泥土龄期的增长，其无侧限抗压强度随之增强。在龄期较小时(7d 内)强度增长较快，在 28d-90d 龄期内强度增强均匀，水泥土龄期-强度关系曲线呈直线形状。这说明水泥土强度 28d 后仍在继续增长、且保持 28d 前的增长速度。90d 龄期后，无侧限抗压强度仍有一定的增长。

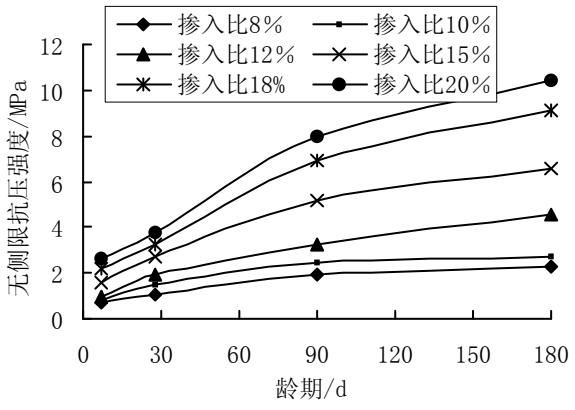


图 4-1　水泥土 q_u 与龄期关系曲线(干法)

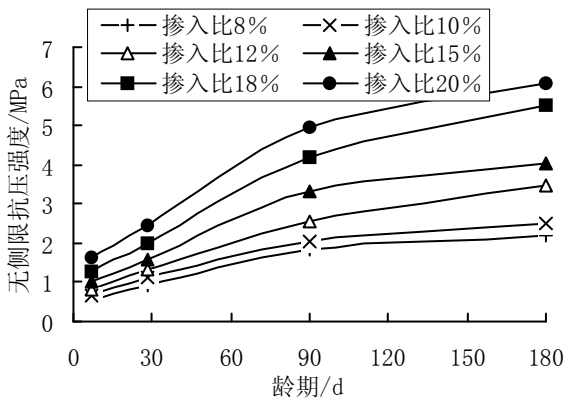


图 4-2　水泥土 q_u 与龄期关系曲线(湿法)

通过统计，随着水泥掺入比变化(8%-20%)，水泥土龄期（7d、28d、90d）与无侧限抗压强度间有下列近似关系。干法试件：q_u(180d)＝(1.1～1.4)q_u(90d)＝(1.8～2.9)q_u (28d)＝(3.4～4.6)q_u(7d)；龄期为 7d 时： q_u(20%)＝3.96 q_u(8%)；龄期为 28d 时；q_u(20%)＝3.7q_u(8%)；龄期为 90 时：q_u(20%)＝4.1q_u(8%)；掺入比为 15％时，q_u(180d)＝1.3q_u(90d)＝2.4q_u (28d)＝4q_u(7d)。湿法试件：q_u(180d)＝（1.2～1.4）q_u(90d)＝（2.2～2.8）q_u(28d) ＝（3.7～4.3）q_u(7d)；龄期为 28d 时；q_u(20%)＝2.6 q_u(8%)；龄期为 90 时：q_u(20%)＝2.7q_u(8%)；龄期为 90 时：q_u(20%)＝2.8q_u(8%)。掺入比为 15％时，q_u(180d)＝1.2q_u(90d)＝2.6q_u(28d)＝3.9q_u(7d)。

4.2 水泥搅拌桩施工工艺及参数试验

根据试验段加固深度及复搅深度，选用 PH-5B 型、PH-5D 型深层搅拌机进行试验，研究上述机型实际钻进、复搅深度，以及设备对成桩质量的影响。最后确定出满足京沪高速铁路设计要求的施工机具。

4.2.1 施工工艺及参数研究方案

水泥搅拌桩工艺及参数试验分两个阶段进行研究，第一阶段是通过工艺性试桩研究，初步确定喷粉工艺及参数和喷浆工艺及参数。第二阶段是通过试验工程桩进行工艺及参数的验证及研究，以及喷粉与喷浆工艺加固软土效果的对比研究，确定满足高速铁路要求的水泥搅拌桩施工工艺及参数。

水泥掺入比根据水泥土室内无侧限抗压强度选择 13.5%和 15%。预搅下钻速度和提升搅拌速度分别选择Ⅲ挡和Ⅳ挡进行成桩质量对比研究，以及两种不同机型的施工性能对成桩质量的研究。

4.2.2 喷搅工艺参数试验

(1)试验设备

搅拌桩机械设备：PH-5B 和 PH-5D 型深层搅拌机。

(2)工艺参数控制方法

控制内容包括桩位放样、搅拌机就位并对位、桩身垂直度控制方法、预搅下沉、水泥粉到达桩尖时间的测定、水泥浆的制备、提升搅拌、复搅等。

4.2.3 工艺参数试验小结

通过工艺性试验桩进行的工艺及参数试验研究，初步小结如下：

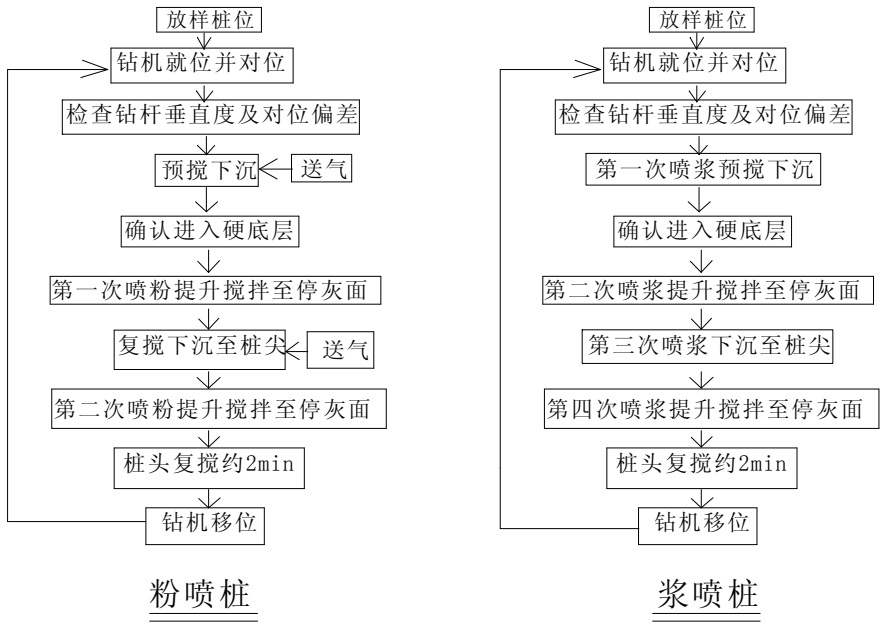


图 4-3　搅拌桩施工工艺流程

(1)PH-5B 型深层搅拌机实际复搅深度达到 11m，PH-5D 型深层搅拌机采用喷粉工艺时复搅深度达到了 16.5m，采用喷浆工艺时达到了 18m。

(2)水泥掺入比宜采用 15%，水泥浆水灰比采用 0.5。

(3)搅拌桩施工推荐复搅工艺。工艺流程见图 4－3。

(4)桩体垂直度控制分析

通过两种方法的对比，现场采用锤球法比经纬仪法简单实用。

(5)钻进速度

在下钻时 PH-5B 型钻机采用Ⅱ挡，PH-5D 型钻机采用Ⅲ挡。下钻到一定深度（一般 2m）后改变挡位，PH-5 型钻机用Ⅲ～Ⅳ挡。

(6)提升速度

PH-5D 机型提升及下钻搅拌速度宜为Ⅳ挡，PH-5B 机型提升及下钻搅拌速度宜为Ⅲ挡。

(7)桩尖进入硬地层的判断：根据设计桩长及钻机电流表示数值 70A 双控。

(8)从送粉开始到开始提升搅拌的时间不得少于 6s。

由于进行工艺参数试验的桩数量较少，推荐的工艺及参数有待于路基工程桩进行验证，形成水泥搅拌桩处理软土地基工艺参数及控制方法，指导今后京沪高速铁路软土地基处理的设计与施工。

4.2.4 施工工艺及参数验证研究

为了验证工艺参数试验推荐的施工工艺及参数，以及喷粉、喷浆工艺处理软土地基的

效果，选择 0+038.4～+155 段路基进行浆喷桩试验，0+155～+276.51 段进行粉喷桩试验。

(1)验证试验方案

考虑到 GPP-5B 型搅拌机在工程中应用较多，因此在试桩的工艺参数、施工设备的基础上，增加 GPP-5B 型深层搅拌机进行试验，同时将复搅深度分为 10m 复搅和全程复搅两种情况，研究复搅的合适深度，具体试验方案见表 4-2。

表 4-2　工艺参数验证方案表

类型	序号	分段里程	机械型号	间距		根数(根)	桩长（m）	复搅深度(m)	备注
				路肩	边坡				
浆喷桩	1	0+38.73～+62.53	PH-5D	1-1.2	1.2-1.4	617	17.6～18	全程	1 桩径：0.5m。2 排距：1.2m。
	2	0+62.53～+93.73	PH-5D	1.2	1.4	650	16～17.7	全程	
	3	0+93.73～+123.73	PH-5D			625	15.6～17.1	10m	
	4	0+123.73～+154.93	GPP-5B			650	15.5～16.0	10m	
粉喷桩	5	0+155.25～+173.25	PH-5B	1.2	1.4	375	13.7～15.5	10m	
	6	0+173.25～+191.25	PH-5B			375	13.7～15.5	10m	
	7	0+191.25～+209.25	PH-5B			375	14.0～14.6	10m	
	8	0+209.25～+226.05	PH-5B			350	13.7～15.5	10m	
	9	0+226.05～+251.25	GPP-5B			525	14.6～16.6	全程	
	10	0+251.25～+276.45	PH-5D			525	16.0～16.5	全程	

(2)验证试验研究

为了确保以后进行大规模水泥搅拌桩施工的质量，在验证试验中，主要从以下 5 个方面对工艺参数以及其主要的控制方法进行研究。

1)搅拌桩桩位控制研究

采用坐标法与钢尺法相结合的办法确定桩位。

a 根据设计桩位，用全站仪在路基断面内每 20m-30m 放样每排的中间桩和坡脚桩，作为其它桩的定位控制桩。

b 钻机长根据桩位图及控制桩用钢尺逐桩放样对位。

c 一排桩施工完后，进行下一排桩施工前，用钢尺相互校核控制桩位，确定无误后，然后逐桩放样对位。

d 指挥对位人员应站在两个互相垂直的方向进行指挥，夜间对位应进行照明。

按照这种方法进行控制，成桩后用坐标法放样检查，桩偏差在±50mm 以内，满足规范要求。

2)提升搅拌速度的进一步研究

为了进一步提高水泥搅拌桩桩体强度的均匀性，以提高整体强度，验证试验中，浆喷桩和粉喷桩在原先选用的提升搅拌速度的基础上，提高 1 档搅拌速度各试验 3 根桩，降低 1 档搅拌速度各试验 3 根桩，然后进行静力触探测试。但在实际试验中，粉喷桩、浆喷桩

增加 1 档搅拌速度时，喷灰、浆反复多次才可以达到设计用量，成桩难度大，仅有一台 PH-5B 粉喷机试验的 2-19#桩勉强试验成桩，降低 1 档搅拌速度时，喷灰、浆困难，仅有一台 PH-5D 浆喷机试验的 32-19#桩勉强试验成桩。

对粉喷 2-19#桩及浆喷 32-19#桩进行静力触探(7d)检测，其结果和按照未进行速度调整验证试验的桩比较，无明显的强度、均匀性变化。

3)提升搅拌与送灰时间匹配性的研究

钻机提升喷搅时，送灰或浆量由送灰或浆的操作人员根据电脑记录仪的显示掌握，司钻根据钻机上的电脑显示，也可判断是否已经开始喷灰或浆，判断喷出量，以喷出量为原则进行配合，所以应选择责任心强的技术工人操作钻机及喷灰或喷浆设备，并在开钻以前，应进行协调沟通，加强提升搅拌与送灰时间相互匹配性。

4)粉喷桩喷粉到达桩尖时间的研究

验证试验时，按照 6s 控制。成桩 7d 或 28d 后，通过钻探取得桩底芯样，检测芯样无侧限抗压强度，结果比较良好，所以验证试验时采用向管内送水泥 6s 进行控制完全可以保证喷粉到达桩尖。

5)对复搅次数的进一步研究

为了研究复搅次数对成桩质量的影响，在验证试验中对 3 根浆喷桩及 3 根粉喷桩共 6 根桩，在原工艺参数的基础上再增加一次复搅（3-10m 深度范围），并进行静力触探检测(7d)，见图 4-4。从中可知，进行静力触探(7d)检测时，粉喷桩复搅工艺试验的桩增加一次复搅后比未增加复搅的桩全桩平均锥尖阻力大 0.1MPa，10m 以上小 0.013 MPa；浆喷桩复搅工艺试验的桩增加一次复搅后比未增加复搅的桩全桩平均锥尖阻力大 0.76MPa，10m 以上大 1.515 MPa，但锥尖阻力均匀性无明显的变化。由于增加一次复搅，成桩时间长，工效低，结合均匀性变化等因素，考虑没增加一次复搅的桩体强度已达到设计强度要求，仍按照一次复搅工艺进行施工。

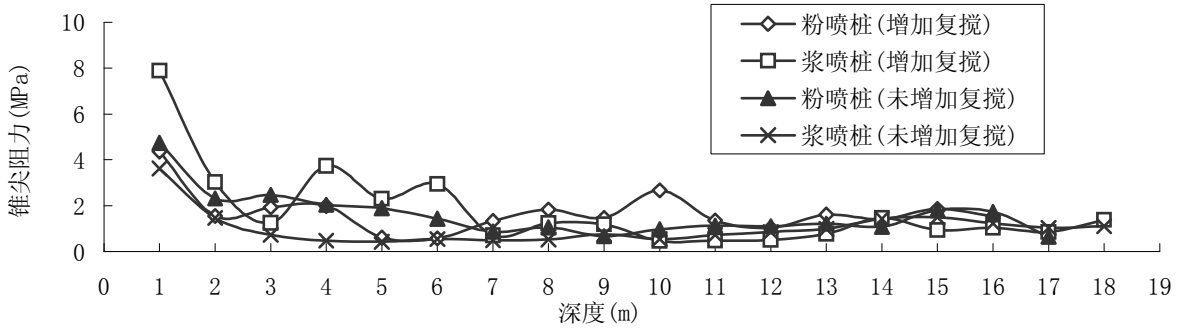


图 4-4　静力触探锥尖阻力汇总曲线图

(3)工艺及参数的验证分析

为了验证推荐的工艺及参数、以及采用该工艺及参数试验的机型是否能保证成桩的质量，以确定合适的满足京沪高速铁路要求的施工工艺及参数和与其匹配的机型，在验证试验过程中进行了大量的静力触探(7d)、轻便动力触探及钻探取芯(28d)、低应变、载荷试验。结合试验过程的详细记录对工艺及参数从以下方面验证分析。

1)不同工艺（喷粉和喷浆）成桩的无侧限抗压强度验证分析

14 根粉喷桩不同深度及层次无侧限抗压强度最小值平均为 0.98MPa(10～11m)，最大值平均为 2.40 MPa(11～12m)，全桩平均值为 1.63 MPa；22 根浆喷桩不同深度及层次强度最小值平均为 0.26MPa(17～18m)，最大值平均为 1.51 MPa(2～3m) ，全桩平均为 0.92 MPa；结合路堤外的试验桩试验结果，无侧限抗压强度大多数满足设计要求，因此认为采用 15%的水泥掺入比能保证设计无侧限抗压强度。

通过对比，总的来看，相同的掺入比浆喷桩无侧限抗压强度比粉喷桩低 0.59 MPa。根据这两个统计表的数据，绘制无侧限抗压强度与深度的关系曲线图，如图 4-5。

从图中可以明显的看到，除个别点外粉喷桩的无侧限抗压强度比较均匀，浆喷桩的无侧限抗压强度随深度的变化而逐渐减小。粉喷桩 10m 以上的无侧限抗压强度平均值为 1.628MPa，10m 以下为 1.64MPa；浆喷桩 10m 以上的无侧限抗压强度平均值为 1.146MPa，10m 以下为 0.638MPa。

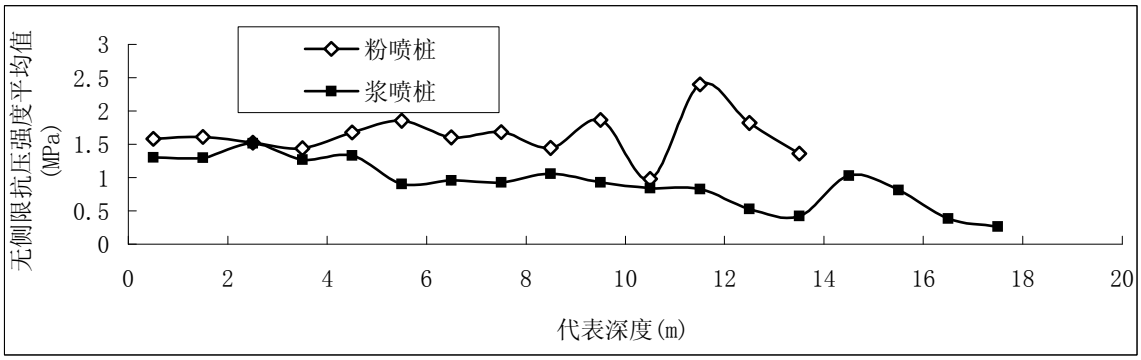


图 4-5　搅拌桩 q_u-h 关系图(28d 以 1.0m 统计)

粉喷桩在 10m 以下、浆喷桩在 13m 以下出现个别无侧限抗压强度值的变化，这主要原因可能是在该深度以下，随着土体反压的增大，搅拌桩施工的可控性降低，搅拌桩桩体的不均匀性增大了。因此，从钻探取芯结合室内试验的结果来分析，无论是粉喷桩还是浆喷桩，其无侧限抗压强度均能够达到设计的要求。但在 10m 左右以下其无侧限抗压强度均出现了波动，搅拌桩施工的可控性相对降低了。因此，认为对搅拌桩长度在 10m 以内的施工质量可靠性较高。

2)不同地质层次的无侧限抗压强度验证分析

为了验证水泥搅拌桩所采用的工艺及参数在不同地层的桩体无侧限抗压强度是否满足设计要求，分析其变化规律，按照不同地质层次进行了统计。

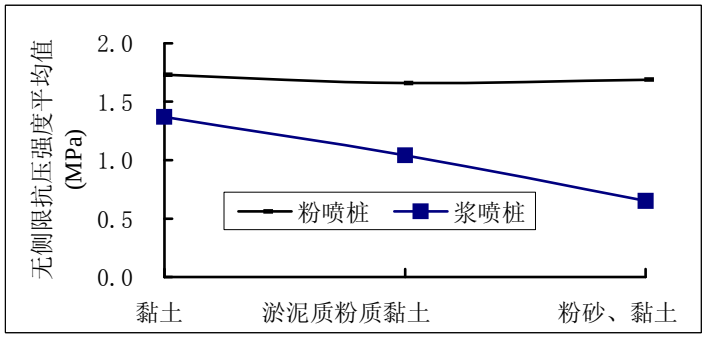


图 4－6　不同地层搅拌桩无侧限抗压强度图

图 4－6 为不同地层搅拌桩无侧限抗压强度图。从图中可知，粉喷桩在淤泥质黏土层无侧限抗压强度较低，为 1.66MPa，而浆喷桩由于含水量对桩体无侧限抗压强度的影响，在底层粉砂、黏土层中最低，为 0.65MPa。其深度越深，无侧限抗压强度越低。

3)不同复搅深度桩体的无侧限抗压强度验证分析

对 10m 复搅的桩和全程复搅的桩的检测结果分开进行了统计，10m 复搅及全程复搅的粉喷桩无侧限抗压强度统计结果见表 4－3，10m 复搅及全程复搅的浆喷桩无侧限抗压强度结果见表 4-4。

表 4-3　粉喷桩 10m 复搅及全程复搅 28d 无侧限抗压强度统计表（以 1m 统计）

代表深度(m)		无侧限抗压强度均值(MPa)	标准差(MPa)	变异系数%	总点数	删除点数	备注
0～1		1.39/1.59	0.67/0.18	47.78/11.56	8/2	1/0	桩数12根/桩数2根
1～2		1.69/1.28	0.66/0.85	39.40/66.29	8/2	0/0	
2～3		1.47/1.26	0.59/0.68	40.17/53.87	14/2	1/0	
3～4		1.45/1.36	0.53/-	36.32/-	9/1	1/0	
4～5		1.68/-	0.59/-	35.08/-	10/-	0/-	
5～6		1.87/1.80	0.51/0.71	27.33/39.28	10/	0/0	
6～7		1.40/2.60	0.36/-	25.50/-	6/	1/-	
7～8		1.68/-	0.58/-	34.73/-	6/-	1/-	
8～9		1.26/2.00	0.39/-	31.37/-	11/-	2/-	
9～10		1.86/-	0.84/-	44.86/-	10/-	0/-	
10～11		0.94/1.03	0.37/0.89	39.40/86.50	3/2	0/0	
11～12		2.40/-	0.28/-	11.79/-	2/-	0/-	
12～13		2.27/1.15	0.81/1.12	35.83/97.15	3/2	0/0	
13～14		-/1.36	-/1.47	-/108.15	-/2	-/0	
平均	10m 以上	1.575/1.70					
	10m 以下	1.87/1.18					

注：“a /b”前面 a 代表 10m 复搅粉喷桩的数据，后面 b 代表全程复搅粉喷桩的数据。

表 4-4　浆喷桩 10m 复搅及全程复搅 28d 无侧限抗压强度统计表（以 1m 统计）

代表深度(m)		无侧限抗压强度均值(MPa)	标准差(MPa)	变异系数%	总点数	删除点数	备注
0～1		1.91/0.94	0.85/0.42	44.42/44.53	5/13	0/0	桩数6根/桩数16根
1～2		1.50/1.18	0.55/0.44	36.56/37.70	6/12	0/1	
2～3		1.45/1.60	0.480.85	33.32/53.03	3/2	0/0	
3～4		1.60/1.18	0.630.71	39.51/60.11	3/12	0/0	
4～5		1.15/1.39	0.471.11	40.68/79.70	3/9	0/0	
5～6		1.31/0.72	0.310.38	23.80/52.98	3/7	0/0	
6～7		1.33/0.79	0.370.56	27.47/71.68	4/10	0/1	
7～8		1.14/0.87	0.620.68	54.58/77.32	2/8	0/0	
8～9		1.13/0.98	0.380.53	33.26/53.86	5/5	0/0	
9～10		1.19/0.99	0.36/0.62	30.04/62.52	3/8	0/1	
10～11		0.94/0.82	0.42/0.64	45.13/78.31	2/9	0/1	
11～12		0.84/0.82	0.37/0.53	44.05/65.04	4/8	0/0	
12～13		0.68/0.45	0.16/0.21	23.89/45.93	4/6	0/1	
13～14		/0.42	/0.25	/59.95	/5	/0	
14～15		0.92/1.14	/	/	1/1	0/0	
15～16		0.30/0.99	/0.84	/85.43	1/3	0/0	
16～17		0.38/0.38	/	/	1/1	0/0	
17～18		0.26/0.26	/	/	1/1	0/0	
平均	10m 以上	1.37/1.06	/	/	/	/	
	10m 以下	0.62/0.66	/	/	/	/	

注：“a /b”前面 a 代表 10m 复搅粉喷桩的数据，后面 b 代表全程复搅粉喷桩的数据。

由表 4-3、4 可以得出， 12 根 10m 复搅的粉喷桩全桩无侧限抗压强度平均值为 1.64 MPa，2 根全程复搅的粉喷桩全桩无侧限抗压强度平均值 1.54 MPa；6 根 10m 复搅的浆喷桩全桩无侧限抗压强度平均值为 1.06 MPa，16 根全程复搅的浆喷桩全桩无侧限抗压强度平均值 0.88 MPa；10m 复搅的粉喷桩无侧限抗压强度比全程复搅的高 0.1MPa，10m 复搅的浆喷桩无侧限抗压强度比全程复搅的高 0.18MPa。10m 复搅的粉喷桩，10m 以下无侧限抗压强度比全程复搅的高，10m 以上无侧限抗压强度比全程复搅的低，但由于其它因素，检测的桩数量较少，可比性差；10m 复搅的浆喷桩 10m 以下无侧限抗压强度比全程复搅的低，10m 以上无侧限抗压强度比全程复搅的高。10m 复搅与全程复搅桩体强度相差不大，10m 复搅桩施工工效高，结合初步变形的观测资料，两种工艺处理的地基沉降差别不大，因此，推荐水泥搅拌桩的复搅采用 10m 复搅。

4)同一机型不同机组成桩的无侧限抗压强度分析

为了验证不同的试验人员及操作对水泥搅拌桩的质量具有一定的影响，在工程地质条件基本相同的情况下，对同一机型不同机组试验的桩的无侧限抗压强度分别进行统计，得出图 4-7、图 4-8。

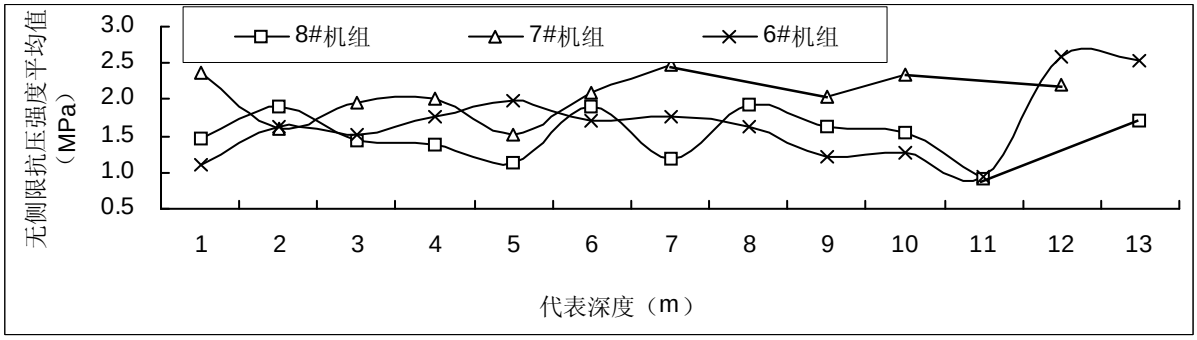


图 4－7　不同粉喷桩施工机组无侧限抗压强度与深度关系曲线

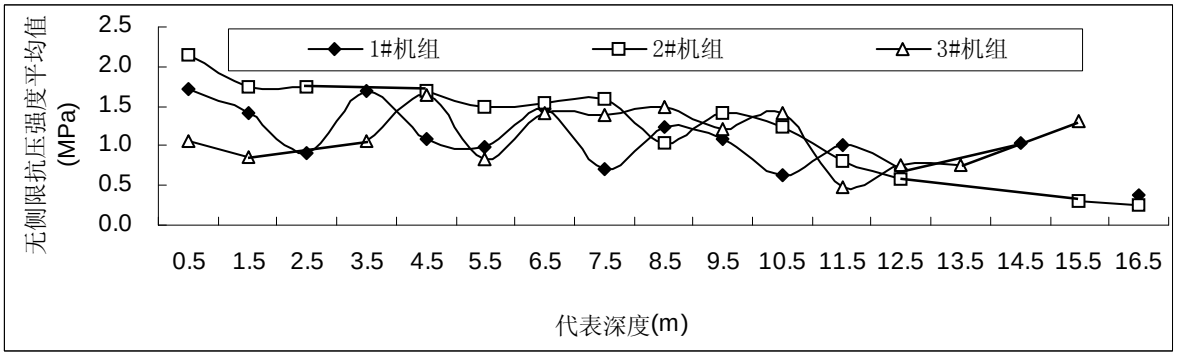


图 4－8　不同浆喷桩施工机组无侧限抗压强度与深度关系曲线

图 4－7 为不同粉喷桩施工机组无侧限抗压强度与深度关系曲线，图 4－8 为不同浆喷桩施工机组无侧限抗压强度与深度关系曲线。从图中可以明显的看出，不同机组，成桩的无侧限抗压强度存在一定的差异。可以看出，水泥搅拌桩的质量受操作人员的素质影响，人为因素影响较大，在施工前选择队伍尤需慎重，在施工中要加强控制，不断培训，提高操作人员的操作水平，加强操作人员的相互配合。

5)桩体承载力验证分析

水泥搅拌桩单桩竖向设计承载力标准值为 94kN，单桩复合地基、双桩复合地基设计承载力标准值均为 121kPa。粉喷桩单桩竖向极限承载力平均值为 193kN、单桩复合地基承载力特征值为 135kPa、双桩复合地基承载力特征值为 142.5kPa；浆喷桩单桩极限承载力值为 137kN、单桩复合地基承载力特征值为 160kPa。由此可见，实测桩体承载力满足设计要求。

以上的验证分析可知，粉喷桩采用复搅工艺及参数施工能满足设计的强度和承载力的要求，且桩体强度比较均匀，PH-5D 机型和 PH-5B 机型成桩的质量差别不大；浆喷桩采用复搅工艺及参数施工同样能满足设计的强度和承载力的要求，且桩体强度比较均匀，PH-5D 机型成桩的质量比 GPP-5B 机型要好；采用浆喷工艺试验的桩比采用粉喷工艺试验的桩强度低。

4.3 水泥搅拌桩质量检验方法

4.3.1 质量检验研究目的与方法

由于水泥搅拌桩质量受诸多因素的影响、造成了桩体强度的较大离散性，而目前使用的检测方法还存在各自的局限性。为此，本试验段对水泥搅拌桩检测常规方法的可靠度、适用范围、控制参数进行研究，得出合适的高速铁路路堤工程软基加固施工的质量控制措施及质量检测手段。

本项目搅拌桩质量检测方法有：钻探取芯试验检测、静力触探试验检测、轻便动力触探（N10 ）试验检测、开挖检查及足尺 qu 试验检测、低应变试验检测、单桩及复合地基荷载试验、标准贯入试验。搅拌桩测点布置及检验顺序见图 4－9。

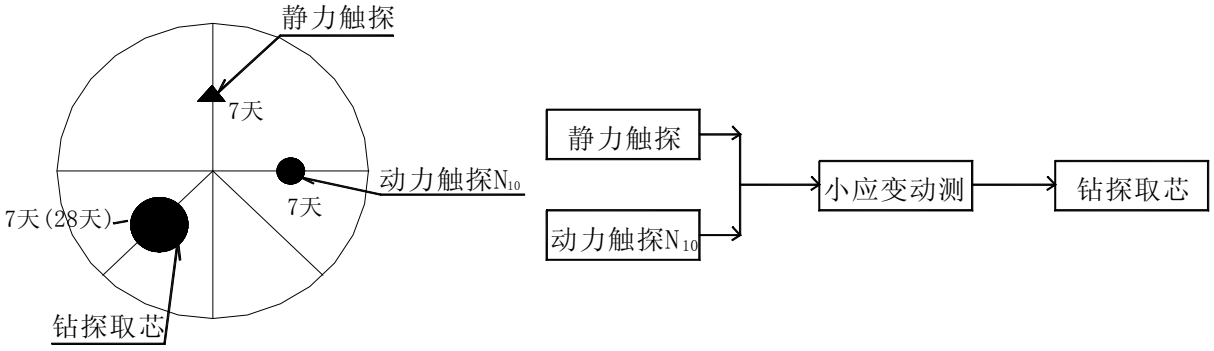


图 4-9　　搅拌桩测点布置及检测顺序

4.3.2 质量检验研究

(1)钻探取芯试验检测

1)检测内容

a.连续性、桩身水泥含量、水泥土均匀程度检测。

b.全桩长钻探取芯结合室内无侧限抗压强度试验、压缩试验。

2)结果分析

通过钻芯取样试验可以直观的判定桩体的长度、桩体的连续性、桩体均匀性；并通过取出的芯样长度及芯样的现场目测具体描述来判定桩体的好坏。进一步配合试验室完成室内水泥土的试验，得出桩体的强度，确定水泥土的强度与龄期及水泥掺入比的关系。

钻探取芯试验检测工艺的关键过程是：钻头直径的选择、水钻与干钻的选择、下钻速度的选择、立轴（钻杆）转速的选择、芯样提取方式选择。本试验段认为：水泥搅拌桩钻探取芯钻头选用Φ89㎜硬质合金钢钻头、水钻、下钻速度一般由钻杆自身重量控制（对于芯样较硬的桩可用油泵来增加下钻速度）、立轴（钻杆）转速常选用 338 转/min、芯样提取前应先封口（直径较大的芯样更有必要）。

表 4-5 搅拌桩 28d 强度统计表(以 1.0m)

代表深度(m)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15	15~16	16~17	17~18	平均
①强度均值(MPa)	1.58	1.61	1.52	1.44	1.68	1.86	1.60	1.68	1.45	1.86	0.98	2.40	1.82	1.36					1.63
①标准差(MPa)	0.44	0.7	0.51	0.49	0.59	0.51	0.58	0.58	0.57	0.84	0.52	0.28	1.01	1.47					0.32
①变异系数%	27.9	41.9	33.7	34.3	35.1	27.4	36.6	34.7	39.2	44.9	53.19	11.79	55.38	108.2					19.6
总点数	10	10	14	10	10	12	7	6	12	10	5	2	5	2	14				14
删除点数	2	0	1	1	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0				0
②强度均值(MPa)	1.3	1.29	1.51	1.27	1.33	0.90	0.95	0.93	1.06	0.92	0.84	0.82	0.53	0.42	1.03	0.82	0.38	0.26	0.92
②标准差(MPa)	0.76	0.49	0.55	0.70	0.97	0.45	0.56	0.64	0.44	0.51	0.58	0.47	0.21	0.25	0.16	0.77	0	0	0.35
③变异系数%	58.6	38.1	36.5	54.9	73.0	49.7	58.7	69.1	41.6	54.8	69.4	56.6	38.9	60.1	15.1	94.4	0.00	0.00	38.04
总点数	18	18	5	15	12	10	14	10	10	11	11	12	10	5	2	4	2	2	18
删除点数	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0

注：①表示粉喷桩、②表示浆喷桩

表 4-5 为搅拌桩桩 28d 无侧限抗压强度统计表。由表可以可知，粉喷桩、浆喷桩 28d 无侧限抗压强度（以米统计）的平均值分别为 1.63MPa（标准差为 0.32 MPa、变异系数为 19.6%）、0.92 MPa（标准差为 0.35 MPa、变异系数为 38.04%），粉喷桩强度高于浆喷桩；从变异系数比较，浆喷桩无侧限抗压强度离散性比粉喷桩大（相对偏差大），说明浆喷桩无侧限抗压强度检测结果沿桩深方向离散性大，同时由于浆喷桩芯样强度较低，在钻取过程中更易造成芯样被破坏也是强度离散性大的原因之一。

粉喷桩、浆喷桩 28d 无侧限抗压强度同一深度（1m 内）的变异系数也较大，说明钻芯取样法测出的无侧限抗压强度存在一定的离散性。粉喷桩 0-10m 范围内无侧限抗压强度较为均匀、10-12m 出现了离散性较大的两点（2.40 MPa、0.99 MPa），原因之一是样本量较少；浆喷桩 0-5m 无侧限抗压强度较高、5-12m 强度较为均匀且接近全桩长无侧限抗压强度的平均值、12-18m 内出现了无侧限抗压强度大小变化现象，样本量较少也是造成变化的原因之一。

钻探取芯检测方法可以通过芯样的颜色、气味、手感硬度直观反映桩体的均匀性，结合室内试验还可以得到整个桩长范围内的强度值，只要选择好钻探工艺、操作手严格控制各关键因素，钻探取芯检测方法具有较好的代表性。

建议成桩 28d 后在桩径方向 1/4 处、全桩长范围内垂直钻芯取样进行无侧限抗压强度试验，抽检比例为 2‰。由于搅拌桩钻探取芯的结果有一定的离散性，且同一机型不同机组成桩的无侧限抗压强度存在一定的差异，考虑搅拌桩无侧限抗压强度值的变异系数值，参考《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001) 对每层土钻探取芯试样个数的规定，建议每

台搅拌桩机械施工的桩体至少检验 1 处、且每层土中的搅拌桩至少保证取 6 个样。

另外，从本试验段搅拌桩的取芯率达到 85%左右，考虑搅拌桩桩体的强度特性介于土体与岩石之间，而《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)、《建筑工程地质钻探技术标准》(JGJ87-92)规定，完整岩层岩芯采取率不宜小于 80%，破碎岩层岩芯采取率不宜小于 65%。建议搅拌桩取芯率不宜低于 70%。

(2)静力触探检验

1)检测内容

a.桩长、桩体连续性、桩体水泥土均匀程度检测；

b.全桩长桩体强度检测，粉喷桩及浆喷桩分别进行 3d（10 根）、5d(10 根)、7d(30 根)龄期的检测。

2)结果分析

粉喷桩 3d、5d、7d 静力触探锥尖阻力的平均值分别为 1.0MPa、1.0MPa、1.4 MPa（方差分别为 0.4 MPa、0.5MPa、0.6 MPa,变异系数分别为 36.5%、49.0%、43.0%)；浆喷桩 3d、5d、7d 静力触探锥尖阻力的平均值分别为 0.8 MPa、1.0 MPa、0.8 MPa （均方差分别为 0.4 MPa、0.5MPa、0.4MPa,变异系数分别为 42.3%、47.3%、43.4%)。

从上述可知,粉喷桩各龄期（3d、5d、7d）静力触探锥尖阻力的平均值约大于浆喷桩动力触探击数的平均值，可以判定粉喷桩桩身强度(7d 内)高于浆喷桩。

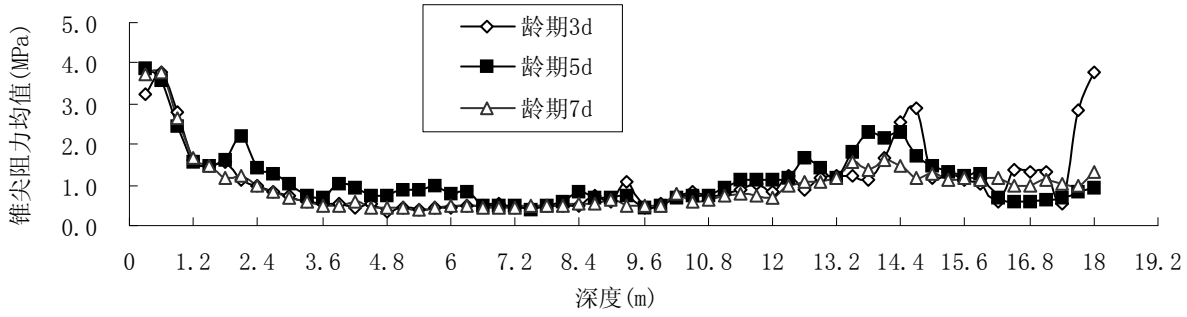


图 4-10　浆喷桩静力触探锥尖阻力与深度关系曲线图(以 0.3m 统计)

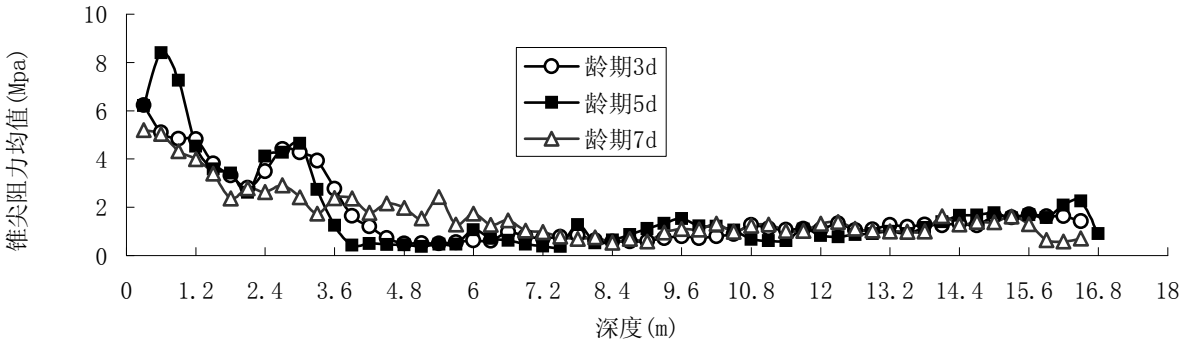


图 4-11　粉喷桩静力触探锥尖阻力与深度关系曲线图(以 0.3m 统计)

图 4-10、图 4-11 分别为浆、粉喷桩静力触探锥尖阻力与深度关系曲线图。从图中可知：粉喷桩从 3m-14m 范围内静力触探锥尖阻力较小；浆喷桩从 3m-12m 范围内静力触探锥尖阻力较小，说明了在不同土质内桩体强度的变化。粉、浆喷桩静力触探锥尖阻力随龄期增长规律性较差。

从本试验的静力触探结果分析，静力触探虽能够对整个桩长范围的强度和均匀性进行检验，但测出的试验数据规律性较差。主要原因在于桩体本身不均匀性和检测方法的局限性。因此，该方法用于搅拌桩的检验有待于从检测原理、检测工艺、检测方法上予以改进，就目前的技术水平，静力触探检验结果还不能作为评价水泥搅拌桩质量的依据，故此方法检测数据只能作为参考。

(3) 轻便动力触探（N10）及取样检验

1)检测内容

轻便动力触探 N10 采用附带的勺钻取样目测搅拌均匀程度及成桩状态，强度分别进行 3d（24 根）、5d(28 根)、7d(66 根)龄期的 N10 检验，检测深度在桩顶下 4m 范围内。

a.取样检查桩芯水泥含量、均匀程度

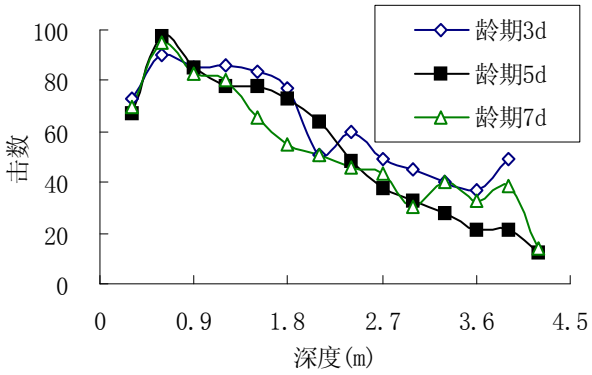
b.通过击数 N_{10} 确定桩身强度，检测频度每 1 次/0.3m

2)结果分析

通过水泥土搅拌桩的轻型动力触探试验，可以判定桩顶下 4m 范围之内桩的强度，经取芯可以进一步判定桩头一定范围内的成桩情况及搅拌桩的水泥的大体用量和土层的颜色等的一些表面现象。

粉喷桩 3d、5d、7d 动力触探击数的平均值分别为 63.64 击、53.31 击、53.06 击（方差分别为 19.41 击、27.65 击、22.84 击,变异系数分别为 30.5%、51.9%、43.0%）；浆喷桩 3d、5d、7d 动力触探击数的平均值分别为 40.23 击、45.43 击、51.77 击（均方差分别为 12.66 击、12.03 击、16.85 击,变异系数分别为 31.5%、26.5%、32.5%）。

粉喷桩各龄期（3d、5d、7d）动力触探击数的平均值皆大于浆喷桩动力触探击数的平均值，可以判定粉喷桩桩身 4m 范围之内强度高于浆喷桩；从变异系数比较，粉喷桩之值皆大于浆喷桩，说明前者在桩顶下 4m 范围之内强度均匀性较差。



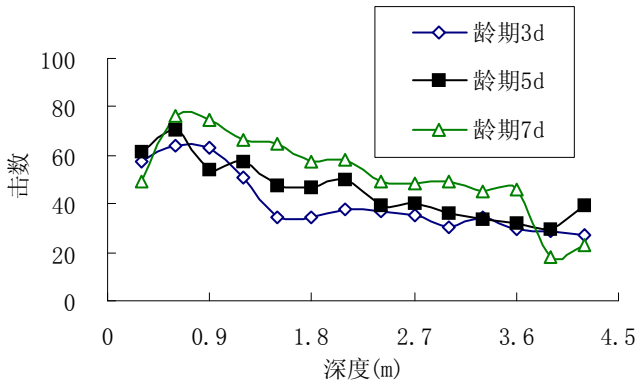


图 4-12　粉喷桩动力触探击数与深度关系　　**图 4-13　浆喷桩动力触探击数与深度关系**

图 4-12、图 4-13 分别为粉、浆喷桩动力触探击数与深度关系曲线图。从中可见：水泥搅拌桩在 4m 范围之内强度随着龄期的增长而增大，且浆喷桩增加的幅度比粉喷桩大、均匀性好。水泥搅拌桩在 4m 范围之内强度随着深度的增大而减小，粉喷桩减小的幅度较大。

从图 4-12～13 中可以得出，轻便动力触探随着龄期的变化规律性较差，与静力触探检测方法相似，且该方法只能检验桩头 4m 左右范围的强度。因此，轻便动力触探方法检验效果不佳。

(4)开挖检查及足尺 qu 试验

1)检测内容

a.检查桩体直径、搅拌均匀程度。

b.对桩顶上部桩体（0.5m、1.0m、1.5m）进行现场足尺无侧限抗压强度试验、立方体无侧限抗压强度试验（加工后），并与钻芯取样的无侧限抗压强度试验进行比较（龄期为 28d）。

在选定桩停灰面以下（约 0.5m、1.0m、1.5m）处依次各采取一个试样，浆、粉喷桩在淤泥质粘土层内成桩质量是关键，为了保证在该层内的足尺无侧限抗压强度与室内试验进行对比分析（室内试验土样取在淤泥质粘土层内），具体采样方法为：先将桩体一侧剥离至淤泥质粘土层内 1-2m，然后用挖机依次分断取样（每段长约 70～100cm），保证最后一段样全部处在淤泥质粘土层内。

2)结果分析

粉喷桩、浆喷桩足尺试样无侧限抗压强度试验、相应立方体试件无侧限抗压强度试验结果见表 4-6。

表 4-6 水泥搅拌桩足尺开挖试验结果统计表

桩类	桩号	龄期	取样深度	试件	试件尺寸	q_u(MPa)	E_{50}(MPa)	E_{50}/ q_u
浆喷桩	60-14#	28d	0.5m	足尺	Ø48.2cm	1.002	250.00	249
				立方体	10^3cm^3	1.532	205.48	134
			1.8m	足尺	Ø50.3 cm	0.858	165.00	291
				立方体	10^3 cm^3	1.052	152.64	153
			3.5m	足尺	Ø49.3 cm	0.656	110.00	168
				立方体	10^3 cm^3	0.984	110.00	112
粉喷桩	23-19#	28d	0.5m	足尺	Ø49.7 cm	1.931	591.46	306
				立方体	10^3 cm^3	2.465	642.23	243
			1.9m	足尺	Ø49.8 cm	1.387	383.33	275
				立方体	10^3 cm^3	1.742	457.95	256
			3.8m	足尺	Ø50.1 cm	1.093	280.00	256
				立方体	10^3 cm^3	1.375	320.50	233
试验桩(浆喷)	9#	28d	1.8m	足尺	Ø49.8 cm	0.73	40.91	56.0
			3.5m	足尺	Ø49.8 cm	0.59	30.61	51.9
试验桩(粉喷)	1#	28d	0.5m	足尺	Ø50.3 cm	1.312	133.88	102
				立方体	10^3 cm^3	2.382	86.37	36
			1.7m	足尺	Ø50.0 cm	1.195	106.70	89
				立方体	10^3 cm^3	1.898	64.36	34
			3.6m	足尺	Ø50.2 cm	1.127	98.30	87
				立方体	10^3 cm^3	1.699	54.31	32

从表中可知，立方体试件 q_u 试验结果一般为现场足尺 q_u 的 1.2～1.5 倍。 立方体试件 q_u 与现场 q_u 均按桩体深度的增加而递减。浆喷桩室内立方体试件 q_u 与室外足尺 q_u 值均小于相应深度的粉喷桩 q_u 值。由于水泥搅拌桩的强度不同，其变形特性、破坏形式、裂缝分布及大小均不同。

由于现场足尺开挖对路基土体破坏太大，影响到相邻桩土的质量，只能检验桩头的强度，如果有硬壳层，则不易取出软土中的桩体，且足尺芯样加工繁琐、准确性较差，因此，不宜应用于搅拌桩的检验。

(5)低应变动测法检验

1)检测内容

研究波反射信息及波速判定桩体长度、连续性、桩截面变化、水泥土均匀性、桩体强度的对应关系及可靠性。

低应变动测法为全桩长检验，龄期与钻探取芯相对应，粉喷桩及浆喷桩分别进行 7d 及 28d 龄期检测。

2)结果分析

水泥搅拌桩不同龄期低应变检测结果见表 4-7。

表 4-7　水泥搅拌桩低应变波数统计表

桩类型	桩数（根）	龄期（d）	平均波速（m/s）
粉喷桩	8	28	982.750
浆喷桩	5	28	1039.200
粉喷桩	7	7	1177.571
浆喷桩	1	7	898.000

一般而言，随着搅拌桩强度的增加，低应变检测出的波速也增大，但从表中可知，粉喷桩 7d 龄期的波速比 28d 龄期的波速要大，与实际的情况相反。且大约有一半的桩检测不到桩底反射，而钻探取芯及其它方法检验的结果，桩下部也有较高的强度。因此，从本试验段的研究结果分析，低应变检验的结果存在一定的偏差。由于低应变通常应用于桩身材料与桩间土相差很大的桩检验，用于搅拌桩的检验还需要更多的工程实践。

(6)荷载试验检验及其桩长度效应的研究

本次试验中采用模拟柔性基础工作性状的复合地基试验方法（采用碎石垫层及薄砂垫层找平）与常规方法进行对比试验，对两种方法的检验效果进行评价。

由于荷载板尺寸相对路堤底部宽度相差较为悬殊，其影响深度也有较大差异，造成荷载试验无法准确评价搅拌桩整体质量。通过不同尺寸荷载板与不同深度桩长的试验，对荷载试验合适检测深度提出建议，试验桩采用粉喷桩，布置在路堤范围之外。粉喷桩载荷试验数量见表 4－8。

载荷试验结果见表 4－9～10。从中可知，无论是单桩承载力、单桩复合地基承载力、双桩复合地基承载力均大于相应的设计承载力（单桩设计承载力标准值 94kN，单桩、双桩复合地基设计承载力标准值 121kPa)。工程实践表明，载荷试验能直观、综合反映水泥搅拌桩处理软土地基的效果，在搅拌桩检验中得到大量的应用。

表 4-8　粉喷桩载荷试验数量一览表

试验类型	桩顶垫层试验方法		桩长效应			
	垫砂	垫碎石	桩长 5m	桩长 8m	桩长 10m	桩长 15m
单桩载荷试验/根	3		2	2	2	2
复合地基载荷试验/组	3	6	1	1	1	1

注：1.其中桩长效应研究中桩长 15m 及桩顶基础试验方法中的桩均采用工程桩；

2.板下垫砂复合地基载荷试验分别做单桩、双桩各一组，其余复合地基荷载试验均做单桩载荷试验。

搅拌桩复合地基载荷试验承载力特征值也有一定的离散性，因此，载荷试验的检验数量不宜太少，结合《暂规》的规定，建议载荷试验建议数量为沿线路纵向每 100m 检查 1 处，每工点不少于 3 组。

对于桩长效应研究，由于研究的样本数量有限，得出的结果规律性不显著。从单桩承

载力来分析，5m、8m、10m、15m 的相差不大；对于单桩复合地基， 5m、8m 的值相差不大，而 10m 的值有一定的提高。

表 4-9 单桩载荷试验结果汇总表

载荷试验类型	样本数	极限值	
浆喷桩单桩	3	137kN	平均值
粉喷桩单桩	4	193kN	平均值
粉喷桩 5m 单桩尺寸效应	3	160kN	平均值
粉喷桩 8m 单桩尺寸效应	2	180kN	平均值
粉喷桩 10m 单桩尺寸效应	1	160kN	
粉喷桩 15m 单桩尺寸效应	2	170kN	平均值

表 4-10 复合地基载荷试验结果汇总表

载荷试验类型	样本数	特征值的平均值(极限值)	
浆喷桩单桩复合地基	1	160kPa	
粉喷桩单桩复合地基	2	123kPa	垫砂找平
粉喷桩单桩复合地基	1	147kPa	垫碎石
粉喷桩单桩复合地基	3	165kPa	垫碎石加格栅
粉喷桩双桩复合地基	1	146kPa	垫砂找平
粉喷桩双桩复合地基	1	139kPa	碎石加格栅
粉喷桩 5m 单桩复合地基尺寸效应	1	110kPa	
粉喷桩 8m 单桩复合地基尺寸效应	1	101kPa	
粉喷桩 10m 单桩复合地基尺寸效应	1	169kPa	

(7)标准贯入试验

1)检测内容

通过贯入器全桩长取芯观察水泥土的均匀程度、连续性、成桩状态、端承条件。依据贯入锤击数与水泥土强度相关关系，判定桩身强度。浆喷桩、粉喷桩(7d)各 3 根，28d 各 10 根。

2)结果分析

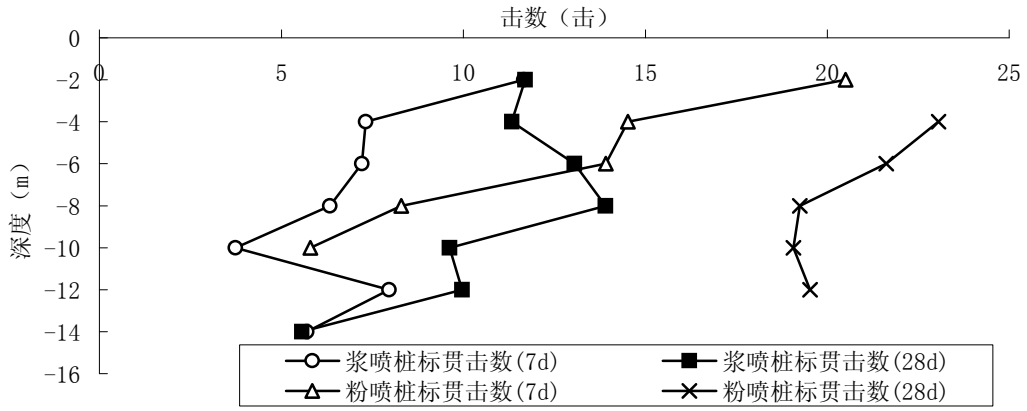


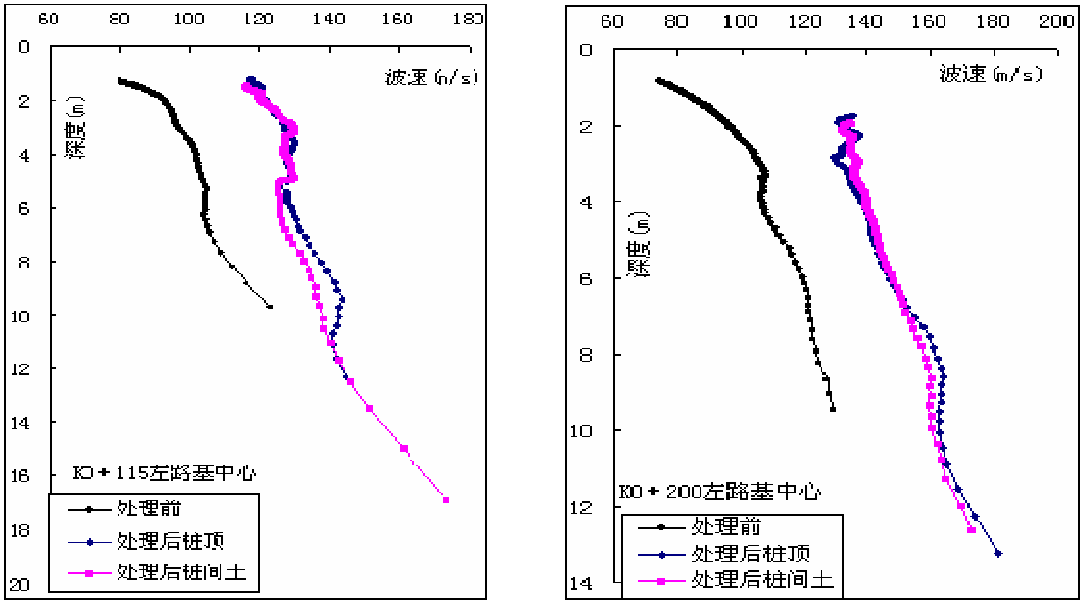
图 4-14 标准贯入击数与深度关系曲线图

图 4-14 为水泥搅拌桩标准贯入击数平均值与深度关系曲线图。从中可以看出，随深度的增加，无论是 7d 还是 28d 的水泥搅拌桩标准贯入击数均呈下降趋势；粉喷桩桩体的贯入击数高于同龄期浆喷桩，且击数随深度增加而减少的变化关系较为明显；粉喷桩 28d 的贯入击数较 7d 的增加幅度明显高于浆喷桩，说明粉喷桩 7d 至 28d 承载力增长的速度较浆喷桩明显。

从图中可知，标准贯入击数平均值随深度的变化有一定的离散性，规律性不佳。在 2m、14m 处浆喷桩 28d 的贯入击数与 7d 的几乎相同，与实际情况相差较大。

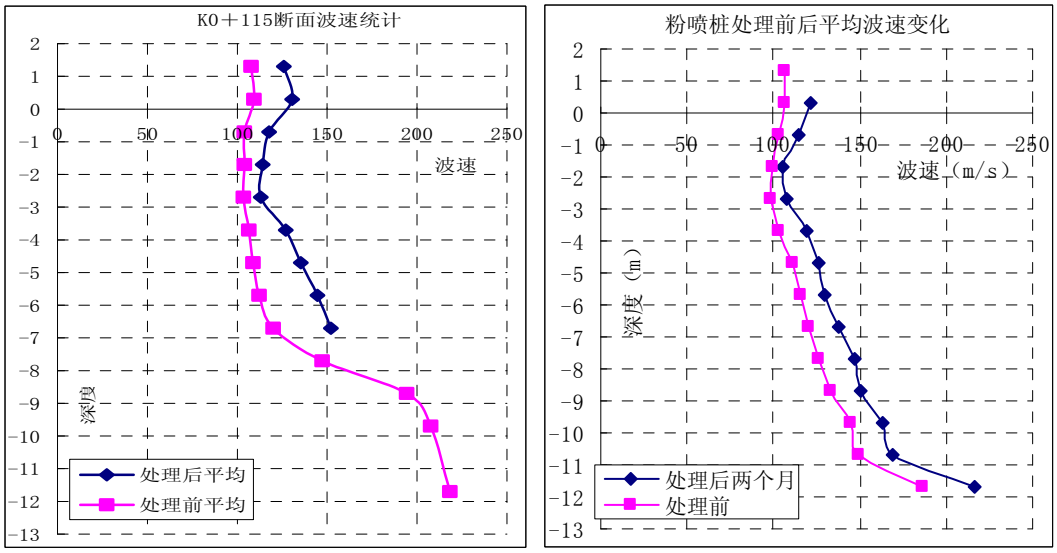
(8)综合物探检验

本次物探检测方法研究对弹性波检测法中的瞬态瑞雷波（瞬态 R 波）勘探法和跨孔波速法进行了试验研究。初步检验结果见图 4－15～16。



a.浆喷桩　　b.粉喷桩

图 4－15　　瞬态 R 波测试试验频散曲线



a. 浆喷桩 0+115 断面　　b. 粉喷桩 0+200 断面

图 4－16　　搅拌桩地基跨孔波速测试值变化曲线

物探方法在检验搅拌桩地基处理整体质量上有一定的作用，但无法确定某根桩体的质量，因此，其应用有一定的局限性。

4.4 桩体水泥土特性与龄期及掺入比关系

4.4.1 桩体水泥土无侧限抗压强度与掺入比关系

在路堤外按照 6 种不同掺入比（以 12%、15%为主），分三个龄期各施工 12 根粉喷桩、12 根浆喷桩，试验桩桩长为 15m，到龄期后分别进行低应变试验、钻探取芯结合室内 qu 试验。不同龄期及掺入比见表 4-11。

表 4-11　不同龄期及掺入比试验桩试验

掺入比（%）	8	10	12	15	18	20
桩数(根)	1	3	3	3	1	1
龄期（d）	28	28、90、180	28、90、180	28、90、180	28	28

注：1. 粉喷桩及浆喷桩各做 1 组；
2. 结合室内对应掺入比及龄期试样的无侧限抗压强度试验。

图 4－17 为试验桩与室内水泥土无侧限抗压强度对比曲线。从中可知，无论是粉喷桩还是浆喷桩，其无侧限抗压强度随着水泥掺入比、龄期的增加而增大。掺入比为 15%、龄期为 90d 时，粉喷桩的无侧限抗压强度平均值为 2.37MPa，浆喷桩为 1.68MPa。考虑到现场取芯时部分强度较低的桩体破碎程度较高，试验所得的无侧限抗压强度值可能为强度较高值的平均值。因此，虽然得到的无侧限抗压强度值大于设计值 1.2MPa 较多，仍然推荐搅拌桩的掺入比为 15%。试验桩无侧限抗压强度随着水泥掺入比的增加而增大，粉喷桩强度高于浆喷桩强度约 41.8%。浆喷桩试验桩在水泥掺入比大于 15%时，曲线较陡，强度增长较快；小于 15%时曲线平缓，强度增长较慢。粉喷试验桩水泥掺入比小于 12%时，曲线陡峭，

强度增长较快；在大于 12%时，曲线平缓,强度增长较慢。

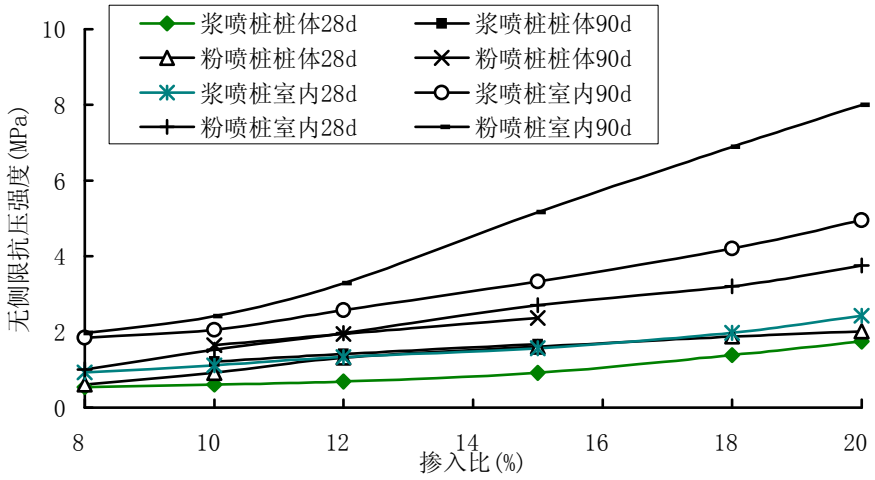


图 4-17　试验桩与室内水泥土无侧限抗压强度对比曲线

4.4.2　桩体与室内水泥土无侧限抗压强度对比分析

表 4-12　桩体与室内水泥土特性对比表

分类	无侧限抗压强度（MPa）			无侧限抗压强度比值（%）		抗剪强度(28d)	
	28d	90d	180d	28d/90d	90d/180d	凝聚力（kPa）	内摩擦角（°）
干法水泥土	2.70	5.16	6.54	0.523	0.799	625	41.5
粉喷桩体	1.63	2.37	2.85	0.688	0.832	125	26.5
桩体/水泥土(%)	0.604	0.459	0.364		/	20.0	63.9
湿法水泥土	1.57	3.33	4.04	0.471	0.824	407	42.5
浆喷桩体	0.92	1.68	1.98	0.554	0.848	80.0	27.0
桩体/水泥土(%)	0.586	0.505	0.490		/	19.7	63.5

注:1. 水泥掺入比皆为 15%，干法与粉喷桩对应，湿法与浆喷桩对应；
2. 室内试验数据来源于水泥土标准试件试验的结果；
3. 桩体 28d 无侧限抗压强度值是 112 组粉喷桩、176 组浆喷桩钻芯取样检测试验结果的平均值、桩体 7d 无侧限抗压强度值对应是试验桩的 7d 强度；
4. 剪切试验数值为 8 组桩芯样的平均值。

由表 4-12 可知，龄期 28d 时，粉喷桩桩体：q_u(桩体)=0.604q_u(室内)；浆喷桩桩体：q_u(桩体)=0.592q_u(室内)；龄期 90d 时，q_u(桩体)=0.459q_u(室内)；浆喷桩桩体：q_u(桩体)=0.505q_u(室内)。水泥掺入比为 15%的桩体水泥土无侧限抗压强度与龄期存在下列近似关系：粉喷桩桩体：q_u(180d)＝1.20q_u(90d)=1.77q_u(28d)；　浆喷桩桩体：q_u(180d)＝1.17q_u(90d)=2.15q_u(28d)。由于施工现场存在的客观原因和施工因素的影响，造成了实际桩体的 28d 强度只有室内水泥土强度的 60%左右，实际桩体的 90d 强度只有室内水泥土强度的 45-50%,实际桩体的 180d 强度只有室内水泥土强度的 36-49%,这也是搅拌桩设计时，根据室内配方试验提出的桩身强度应考虑的折减系数。

4.5 小结

通过水泥土室内试验、搅拌桩室外试验，初步总结形成水泥搅拌桩施工工艺及质量检验方法，结论如下：

(1)搅拌桩施工工艺及参数

1)宜采用 10m 复搅工艺，工艺流程如图 4-3。

2)水泥掺入比宜采用 15%，粉喷桩单位喷粉量 53kg/m，浆喷桩喷浆量 45L/m，水泥浆水灰比采用 0.5。

3)开始下钻速度：PH-5D 型≤0.679m/min（Ⅲ档）； PH-5B 型≤0.386m/min（Ⅱ档）；GPP-5B 型≤0.228m/min（Ⅰ档）；

4)搅拌提升速度：0.8(Ⅲ档)～1.355m/min (Ⅳ档)。

5)搅拌下沉速度：0.679(Ⅲ档)～1.081m/min (Ⅳ档)。

6)管道压力：粉喷桩送粉时管道压力：0.2～0.45MPa；空压机参数:1.6～2.0 m3/min。浆喷桩送浆时为 0.25～0.8MPa。

7)喷粉时粉料到达桩尖时间：≥6s。

(2)搅拌桩施工机械型号选择

根据国内搅拌桩机械情况及试验结果，应根据设计桩长选用机型，水泥搅拌桩桩长≥10m 时宜选用 PH-5D、GPP-5B 机型，桩长≤10m 时可选用 PH-5D、PH-5B、GPP-5B 机型。

(3)施工工艺参数控制方法

1)搅拌桩桩位控制方法

采用坐标法与钢尺法相结合的办法确定桩位。

2)搅拌桩桩身垂直度控制方法

采用水平尺调平底盘及在钻机钻架上设置吊线垂来控制。

3)拌制水泥浆液

拌合时先向搅拌筒内加入 250kg 水，然后加入 10 袋水泥搅拌 60～90s，加入外加剂后继续搅拌 60s，并用比重计测定比重，符合要求后储存在储浆桶备用。水泥浆随拌随用，备用浆不得超过 2h。

4)提升搅拌与送灰时间匹配性控制

一是钻机提升喷搅时，送灰或浆操作人员和钻机司机根据各自的电脑记录仪的显示，以量为原则进行配合，二是选择责任心强的技术工人操作钻机及喷灰或浆设备，在开钻以前，进行协调沟通训练，加强提升搅拌与送灰时间匹配性。

5)钻到硬地层的控制

接近设计桩长时，旁站人员要监督钻机电流表数值达到确定的 70A 以上，控制桩尖进入到硬地层。

6)桩头部位质量控制

最后一次喷水泥浆或粉结束后对桩头约 80cm 部位再增加一次搅拌，提高桩端质量。

(4)粉喷桩整个桩长范围内的无侧限抗压强度比较均匀，浆喷桩的无侧限抗压强度随深度的变化而逐渐减小。掺入比 15%的搅拌桩采用试验段的施工工艺能够满足设计的无侧限抗压强度要求。搅拌桩在 10m 左右以下个别点无侧限抗压强度均出现了降低，搅拌桩长度在 10m 以内的施工质量可控性较高。

(5)同一机型不同机组的成桩强度存在一定的差异，施工队伍的素质至关重要。

(6)水泥龄期为 28d 时，相同水泥掺入比的搅拌桩桩体无侧限抗压强度是室内水泥土的 0.6 倍。因此，在进行搅拌桩设计时，应根据室内配方试验提出的桩身强度考虑桩身强度折减。

(7)质量检验方法

桩体质量检验可选用钻探取芯检验法与载荷试验检验方法相结合。建议成桩 28d 后在桩径方向 1/4 处、全桩长范围内垂直钻芯取样进行无侧限抗压强度试验，抽检比例为 2‰，每台搅拌桩机械施工的桩体至少检验 1 处、且每层土中的搅拌桩至少保证取 6 个样；搅拌桩复合地基承载力检验方法采用载荷试验，检验数量为沿线路纵向每 100m 检查 1 处，每工点不少于 3 组。

(8)钻探取芯工艺

钻探取芯试验检测工艺的关键过程是：钻头直径的选择、水钻与干钻的选择、下钻速度的选择、立轴（钻杆）转速的选择、芯样提取方式选择。水泥搅拌桩钻探取芯钻头选用Φ89mm 硬质合金钢钻头、水钻、下钻速度一般由钻杆自身重量控制（对于芯样较硬的桩可用油泵来增加下钻速度）、立轴（钻杆）转速常选用 338 转/min、芯样提取前应先封口。取芯率不低于 70%。

5　塑料排水板排水固结法处理软基施工工艺及质量检验

5.1 塑料排水板试验概况

试验段塑料排水板施工分真空联合堆载预压段和超载预压段两部分。根据试验需要，塑料排水板施工采用静压式与振动式两种工艺。板材也选用两种，一种为滤膜上印制刻度的，间距 0.5m；一种为可测深塑料排水板，其滤膜接合处包贴有金属丝。由于试验段软土层厚度差异很大，塑料排水板设计打设深度相差甚大，不同断面处施打深度按相邻两断面设计深度渐变来控制。

综合考虑试验细则要求和现场施工机械，试验段对塑料排水板试验段落做了如下划分，见表 5-1。试验现场按线性渐变确定排水板打设深度。

表 5-1　　塑料排水板试验区段划分

真空预压段					超载段	
静压段	振动段	静压段	振动段	静压段	静压段	
0+276～0+355	0+355～0+380	0+380～0+420	0+420～0+456	0+480～0+515	0+515～0+587.755	0+589.245～0+708.255
板间距 1.2m					板间距 1.8m	板间距 1.2m

5.2 塑料排水板施工工艺及质量检验

5.2.1 试验选用材料、机械及人员配备情况

试验段采用的塑料排水板外型尺寸 100×6mm，有带刻度和带铜丝两种型号。

试验机械共两台。一台由 CAT320 挖掘机改装而成的静压式插板机，最大打设深度 19m，静压力为 30kN；一台为振动式插板机，最大打设深度 19 m，激振力为 35kN。两台走行部均为履带式。

5.2.2 塑料排水板施工工艺及工艺流程

塑料排水板施工工艺流程见图 5-1。

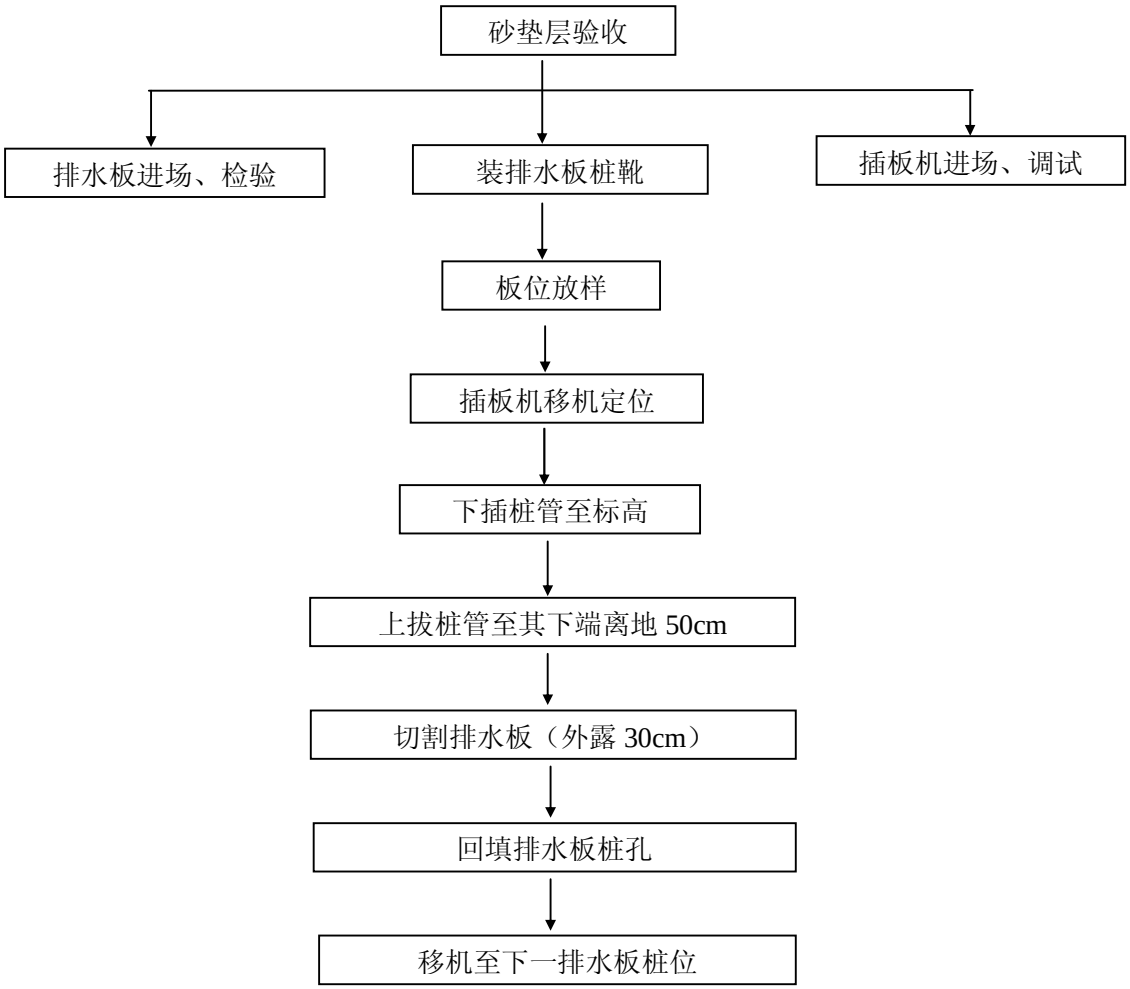


图 5-1　塑料排水板施工工艺流程图

5.2.3 塑料排水板施工质量控制

塑料排水板施工主要应从排水板的打设垂直度、平面位置误差和打设深度三个方面来控制每根排水板的施工质量。通过试验段施工，总结塑料排水板施工质量控制主要有板材控制、深度控制、垂直度控制、板位控制、回带控制、板头污染处理、施工后场地处理、施工过程现场管理等。

5.2.4 塑料排水板施工及质量检验方法研究

(1)塑料排水板施工时所引起的沉降分析

为了研究振动式和静压式塑料排水板施工机械施工沉降的差异，在真空联合堆载加固区 0+276.51～0+456 段进行了布点及观测。

经过观测可知，振动式塑料排水板打设沉降比静压式的稍大。总的来看，无论采用静压式或振动式塑料排水板打设机械，在施工期间的沉降为 7cm 左右，施工完成后沉降减少较快。

(2)可测深塑料排水板施工工艺及检测方法研究

为了对塑料排水板施打深度可控性进行研究，试验现场采用两种塑料排水板，一种为带刻度的，另一种为带金属丝的，带刻度的滤膜采用双面线缝，带金属丝的采用胶合。在施工工艺方面两者区别不大，可测深塑料排水板（带金属丝）的相对繁琐，在施工过程中增加了焊接金属丝的过程。

1)可测深塑料排水板（带金属丝）深度检测

在 0+400 里程进行了塑料排水板深度检测共抽检了三根，实打深度均为 16.3m，但测试读数分别为 16.15m、19.4m、100m。测试精度较低，经分析主要原因是测试仪器不配套、焊点的可靠性、材料的均匀性、地下水的影响。

通过对目前塑料排水板的市场调查看，使用可测深塑料排水板(带金属丝)已很少，一般更倾向于采用带加密刻度的塑料排水板或施工过程中采用自动记录仪。

2)带刻度的塑料排水板深度检测

带刻度的塑料排水板现场深度控制主要是看刻度，试验所用的是每 50cm 一个刻度的，将来大规模施工，最好可采用 20cm 一个刻度的。施工时操作手可以从机架上看刻度，从而控制深度，检查人员也可以从导管口看刻度，深度控制更加准确。监理可以通过现场记录来检测深度，另外所用塑料排水板均为 200m 一卷，可以通过卷数来控制，检测深度。

5.3 塑料排水板真空－堆载联合预压处理软基施工工艺及质量检验

5.3.1 概况

塑料排水板真空—堆载联合预压试验段分 0+276.51～0+456、0+476～0+515 两区段，加固面积分别为 7673m^2、1365m^2。0+276.51～0+456 段于 2003 年 4 月 26 日开始抽真空，抽真空约两个月后进行路堤的填筑；0+476～0+515 于 6 月 12 日开始抽真空，一周后进行路堤的填筑。真空预压段地质条件特点是淤泥质粉质黏土较厚，厚度达 14～16.5m。

塑料排水板真空—堆载联合预压试验段采用塑料排水板作为竖向排水路径，水平排水系统采用砂垫层，厚度为 80cm，其中膜下为 50cm，膜上为 30cm，砂垫层采用中粗砂（含泥量≤3%）。

密封系统采用二布二膜，上、下层土工布均采用 250g/m2 无纺土工布，两布之间设两层密封膜，每层厚度 0.14mm，并分次逐层铺设。加固区四周挖密封沟，沟深 1.5～2m。

抽真空系统：真空管网分主管和支滤管，主管采用Φ82.9mm 的加筋 PVC 管，支滤管为Φ55mm 的加筋 PVC 管，支滤管上用渗透系数不低于塑料排水板的土工滤膜包裹。主管和支滤管间用变径三通和四通连接，同管径的对接采用钢丝胶管连接。全部管网均埋入膜下砂

垫层中，埋深不小于 25cm。真空泵采用射流真空泵，功率不小于 7.5kW，沿加固区一侧共设 7 台。

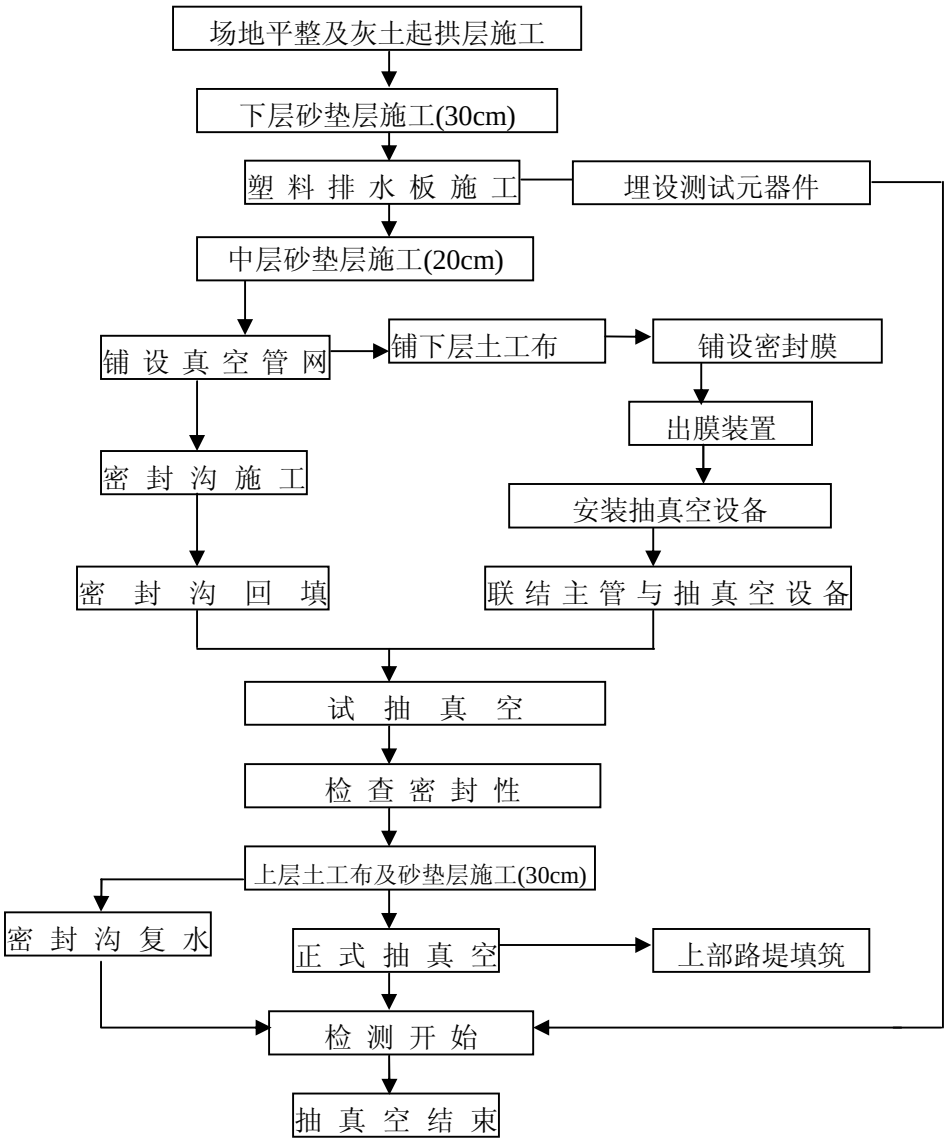


图5－2　真空预压施工工艺流程

加固区内水塘回填采用细粒土分层填筑,并掺 5%的石灰进行改良,便于回填施工。真空预压段上部填土在试抽真空稳定后(大于 80kPa)按路堤本体的压实要求进行施工。

5.3.2 塑料排水板真空—堆载联合预压处理软基施工工艺

施工工艺流程见图 5－2。

5.3.3 塑料排水板真空—堆载联合预压处理软基施工控制

真空滤管网质量控制、密封性质量控制。密封性质量控制见图5-3。

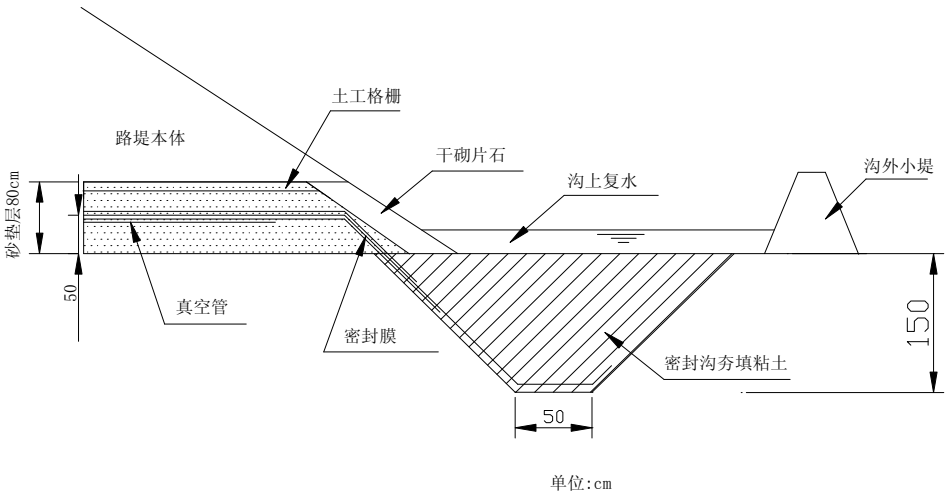


图5-3　真空膜周边密封示意图

5.3.4 真空泵数量对真空度的影响

0+276.51～0+456 段真空预压区，面积为 7673m2，按 1 台泵控制 1000 m2 左右，需 7 台泵，间隔均匀地布置于线路左侧。

(1)真空泵数量对膜下真空度的影响

试抽时间段膜下真空度、泵数量与时间关系曲线见图 5-4。

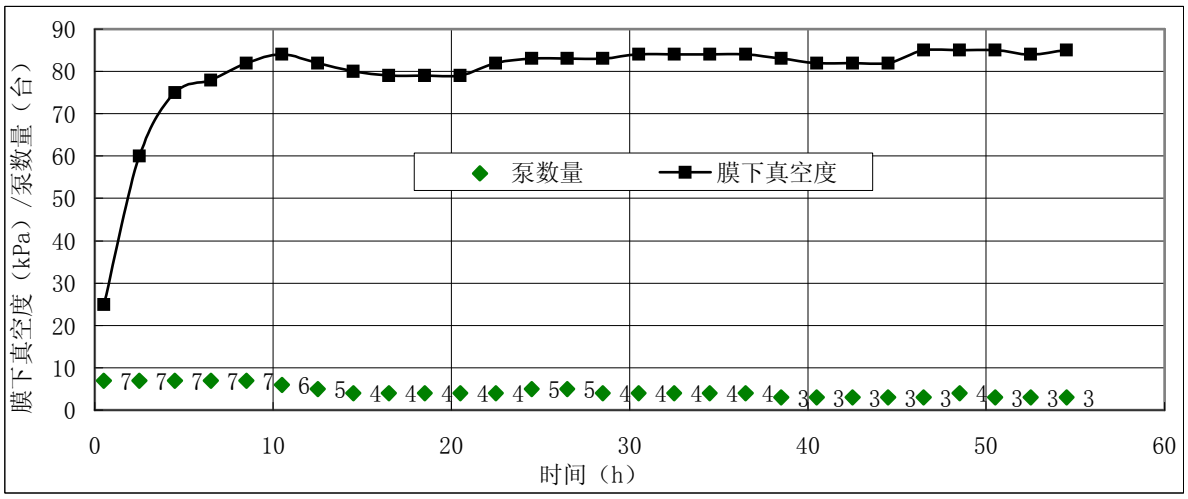


图 5－4　试抽时间段膜下真空度、泵数量-时间关系曲线

从图中可知：

1)在抽真空的不同阶段，1 台泵所能控制的面积是不一样的，真空度上升到 80kPa 后，随着抽真空的持续，1 台泵能控制的面积将会越来越大（维持真空度在 80kPa 以上）。

2)膜下真空度在没有升到 80kPa 以上时，对泵的数量非常敏感，会随着泵的增减而出

现波动，几乎没有滞后时间。

(2)真空泵数量对淤泥层中真空度的影响

在淤泥层中埋了 3 组真空度测头，每组 7 个测头，分别在 2m、4.5m、7m、9.5m、12.5m、15.5m 和 18.5m 的深度。在抽真空初期，淤泥层中真空度变化没有规律，如埋在 4.5m 深的真空度测头能测出真空度，但在 2m 处的却没有读数。直到 4 天后才呈显出一定规律，这可能是不同深度的真空度测头埋设在同一孔中,出现了串孔现象。

真空度变化呈现出沿深度增加而减小的规律性，但对真空泵数量的增减不敏感。

5.4 小结

通过试验段塑料排水板排水固结法的施工工艺及质量检验试验可得到以下初步结论：

(1)在塑料排水板施工机械中，静压式插板机无论在工效上，还是在经济成本、环境影响上都大大优于振动式插板机，但振动式打设机械对地层的穿透能力大于静压式。因此，在两者都能够穿透的地层打设塑料排水板时，优先选用静压式；在静压式打设困难的地层，采用振动式塑料排水板机械打设。

(2)材料建议优先选用带刻度的非再生料制作的塑料排水板。在深度检测上最好配备有性能可靠的自动记录仪。

(3)真空-堆载联合预压试验段采用的施工方案及工艺是可行的，真空度能达到设计 80kPa 的要求。

(4)采用真空-堆载联合预压法加固铁路软基，加固效果明显，抽真空不仅使土体固结，而且加固区始终处于负压状态，土体产生向内的收缩变形，可以加快填土速率，缩短工期。试验段观测期间测得最大日沉降速率 4～6cm/d。

6　砂桩联合等载预压处理软基施工工艺及质量检验

6.1 砂桩试验概况

试验段 0+709.745～0+833.95 软土地基处理采用砂桩联合等载（等载土柱 1.0m）预压加固。设计桩径 40cm，桩长 15.0m 和 25.5m（25.5m 加固范围为桥路过渡段）两种，桩间距 2.0m，梅花型布置。

试验段砂桩采用目前常用的振动重复拔压式砂桩和双管（芯管密实）冲击式砂桩两种施工工艺。试验段落划分见表 6-1。

表 6－1　施工区段划分

里程	桩长(m)	工程量(根/延米)	施工工艺	施工机械
0＋709.745～＋770	15	558/8370	振动重复拔压管法	DZKS90
0＋770～＋800		233/3495	双管锤击法	DZKS60(2.5t 柴油锤)
0＋800～＋819.55		201/3015	振动重复拔压管法	DZKS75
0＋819.55～＋833.95	25.5	124/3162	振动重复拔压管法	

6.2 试验现场机械配置

试验段先后共进场沉拔桩机四台，全部产自瑞安建筑机械厂及其改制后的瑞安燎原建筑工程机械有限公司。

15m 双管振动冲击沉拔桩机一台，配备 DZKS60 中空双电机振动打桩锤，2.5t 柴油锤，桩架采用 ZJ60 打桩机架，整机于 1995 年生产。

25.5m 振动沉拔桩机一台，桩架采用 ZJ90 打桩机架，配备 DZKS75 中空双电机振动打桩锤，整机于 1998 年生产。该机施工顺利，且性能稳定，噪声小。

6.3 砂桩施工工艺

6.3.1 工艺参数试验

试验段针对不同的成桩工艺进行了工艺性试桩，以掌握对该场地的成桩经验及各种操作技术参数。

(1)15.0m、25.5m 振动重复拔压管砂桩工艺参数试验

1)施工工艺

工艺流程图见图 6-1。

2)拟定工艺参数

a.充盈系数

灌砂量按 0.185m³/m 控制，折合充盈系数β=1.48，上海地区β取值范围为 1.2～1.5。

b.提管速度

1.5m/min。

c.拔压管高度

拔管 1.0m，压管 0.3m。

d.悬振时间

拔管后悬振 15s。

e.投料方法

第一次 0.8m³，以后采用料斗空中投料，每次 0.2m³。

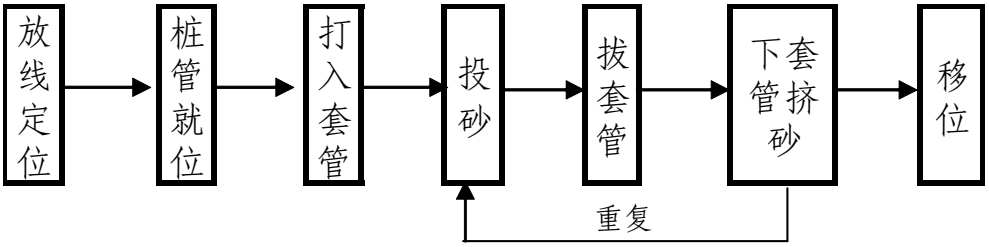


图6-1　振动重复拔压管砂桩施工工艺流程图

3)工艺性试桩

试验段 15m 砂桩试桩 4 根，3d 后检测结果表明上述施工工艺和工艺参数能满足施工要求，但有几个问题：

a.灌砂量随着地层的不同而异，软～硬塑土层用砂量在 0.16m³/m～0.18m³/m，流塑土层用砂量在 0.19 m³/m～0.20 m³/m。

b.在软～硬塑土层中较容易成桩，在流塑土层中较难成桩，原因主要在于流塑态淤泥质黏土灵敏度高、强度低、侧向约束力小，需要在原位反复拔压多次才能成桩，同时要适当增大反压深度。

c.在流塑土层中，下砂相对较难且易堵管。分析主要有两个原因：管内砂体在饱和情况下经过太长时间（约 5min 以上）振动之后，砂体与钢管壁间摩阻力大大增大，使砂料不能顺利滑出桩管；桩管提升后，在桩管内砂料没有及时回填桩孔的情况下，桩周淤泥质黏土可能会回灌桩孔。提管悬振加大了对桩周土体的扰动破坏，而这一扰动破坏反过来又增大了淤泥回灌的可能性。

d.按上述投料方法加料比较费时,可否在桩管内砂料饱和状态以下增加单次投砂量来减少投砂次数以赢得施工时间。

为此，试验段 15m 砂桩又做了 9 根调整工艺参数的试桩。试桩工艺参数：单桩平均充

盈系数取 1.48（折合单桩灌砂量 2.8m3、26 斗车），按不同地层不同的用砂量折合成不同地层的充盈系数，软～硬塑土层取 1.3～1.4，流塑土层取 1.5～1.6。

除 2 根桩堵管外其它桩现场顺利成桩。

检测结果表明：

a.从 9 根试桩的实测曲线来看，6#桩较其它桩效果要好；从分层平均统计值来看，P_s 和 $N_{63.5}$ 平均值相对均匀，且较大。

b.在流塑态淤泥质黏土层中，无留振时间桩（3、6、9#试桩）,其 P_s 和 $N_{63.5}$ 均好于悬振工艺，其中以拔管 1.5m、压管 0.6m、无悬振时间的工艺（6#试桩）更佳。

c.在软～硬塑土层中，5#、7#、8#桩体质量较好，悬振对密实度有影响，可适当设置悬振时间。

d.投料方法对桩体质量的影响不大，但一次性灌砂太多，容易造成堵管（1#、4#桩）。

e.拔压管高度可以在“拔 1.0m 压 0.3m”的基础上有所提高。

4)工艺小结

根据上述 15m 砂桩工艺性试桩，建议振动式砂桩施工工艺参数如下：

a.充盈系数

单桩平均充盈系数取 1.48。软～硬塑土层取 1.3～1.4，流塑土层取 1.5～1.6。施工中按灌砂量来控制，软～硬塑土层为 0.16m^3/m～0.18m^3/m，流塑土层为 0.19 m^3/m～0.20 m^3/m。

b.提管速度

1.5m/min。

c.拔压管高度

软～硬塑层拔管 1.5m，压管 0.3～0.4m；流塑土层拔管 1.5m，压管 0.5～0.6m。

d.悬振时间

软～硬塑土层中拔管后悬振 15s，流塑土层中不悬振。

e.投料方法

桩管沉到设计深度后，砂料分次用料斗灌入，除第一次投砂量可以稍大（不宜超过 1.8m^3）外每次灌砂不宜超过 0.4m^3，并且应在前次灌砂成桩 1.5m～2.0m 后再投料。

(2)15.0m 双管（芯管密实）冲击式砂桩参数试验

1)施工工艺

工艺流程图见图 6-2。

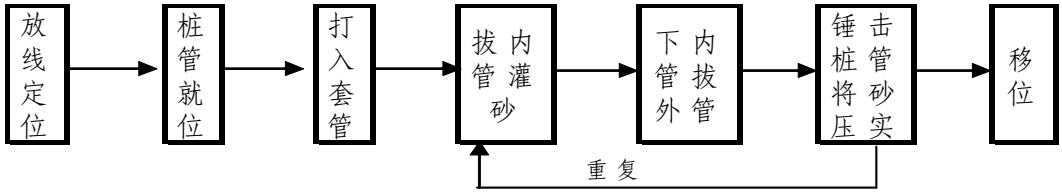


图 6-2　双管锤击式砂桩施工工艺流程图

2)工艺参数

参照振动式砂桩试桩及施工，拟定如下试桩工艺参数：

a.充盈系数

单桩平均充盈系数取 1.48。软～硬塑土层取 1.3～1.4，流塑土层取 1.5～1.6。

b.单次灌砂量

每次投砂 0.3m^3，软～硬塑土层每次锤击压管 0.8m，成桩 1.7m，流塑土层每次锤击压管 0.9～1.0m，成桩 1.5～1.6m。单桩 2.8m^{3}砂料分 9 次投入。

c.桩管贯入度

软～硬塑土层最后一锤桩管沉落量 2～4cm，流塑土层最后一锤桩管沉落量 6～10cm。

3)试桩过程

试验段共试桩 2 根。1#桩严格按上述工艺参数，成桩顺利，但成桩用时长（施工一根桩需 103min，主要原因在于每次投料都要将内管提升至料斗口，这一过程平均每次需用时 10min 左右）、功效低，后改变了 2#桩的试桩工艺参数。工艺参数改为分 6 次投料，每次锤击 1.4m，成桩 2.8m。改变参数后因出现严重堵管而没有提高功效，分析堵管原因主要是一次灌砂太多，外管内潮湿的砂料在桩锤和内管自重（约 4.5t）的作用下，部分砂在外管内被压密实。同时由于每次成桩过长，在桩周土体侧向约束力很小的情况下，很容易发生桩体鼓胀现象，有损于桩体质量。

4)工艺小结

试桩检测结果表明 1#桩质量稳定，能满足施工要求，拟定的工艺参数可以指导施工。但鉴于砂桩机械没有贯入度自动检测装置，使得现场贯入度控制人为因素较大，决定施工时以单次灌砂量和单次成桩长度控制为主，贯入度控制为辅。

6.3.2 砂桩施工工艺比较

试验段严格按试桩施工工艺和工艺参数组织施工，现就两种施工工艺的成桩效果和施工工效比较如下：

(1)成桩效果

从砂桩静力触探结果可知，在该地质情况下两种方法施工的砂桩桩体质量是相当的。1.0m 以下振动法成桩的砂桩比贯入阻力最小值$\overline{P}_{smin}$=1.08MPa，$\overline{P}_{s}$=3.25 MPa；双管冲击法成桩的砂桩比贯入阻力最小值$\overline{P}_{smin}$=1.06MPa，$\overline{P}_{s}$=3.19Mpa。两者的$\overline{P}_{smin}$均在淤泥质粉质黏土层中，距离砂桩顶 6.0m 附近，该位置处于淤泥质粉质黏土层与硬塑黏土层交界附近。从动力触探检测也得到相似的结果。

振动式砂桩出现上述情况的主要原因是：振动拔压管容易在淤泥层中及其下层界面附近造成“缩孔”和“断桩”。为避免“缩孔”和“断桩”的发生，施工中要做到：① 因提管悬振对淤泥质黏土的有扰动破坏容易引起塌孔，所以要求施工时该层不悬振。② 在流塑层要适当增大反压深度。

冲击式砂桩桩体较振动式砂桩桩体连续，但由于流塑态淤泥质黏土侧向支持力很低，容易造成桩体发生严重“鼓胀”现象，并且鼓胀以下部分还不密实的不良后果。施工中要求严格控制每次的灌砂量和每次成桩长度，不能一次成桩过长。

(2)施工工效

两种工艺在施工劳动组织上差不多，但振动式砂桩施工工效较冲击式砂桩施工工效高。施工 15.0m 振动式砂桩需要 35min 左右，而施工 15.0m 冲击式砂桩需要 110min 左右。

6.4 砂桩质量检验

6.4.1 质量检测内容

砂桩检测包括桩体深度、连续性及密实度等，采用钻探结合标准贯入检测、静力触探检测及载荷试验方法。砂桩施工质量各检测方法及数量见表 6-2。图 6-3 为砂桩检测点布置及检测顺序图。

表 6-2　　砂桩检测方法及数量表

检测方法		数量(根)	主要试验方法及目的
钻探结合标准贯入试验		30	1.桩长、桩身连续性进行检查 2.对砂桩进行标贯试验检查桩体密实度
静力触探		30	1.对桩长、桩身连续性进行检查 2.通过强度指标对砂桩桩体密实度进行检测
载荷试验	单桩	3	检验单桩及复合地基的承载力（未经预压固结）

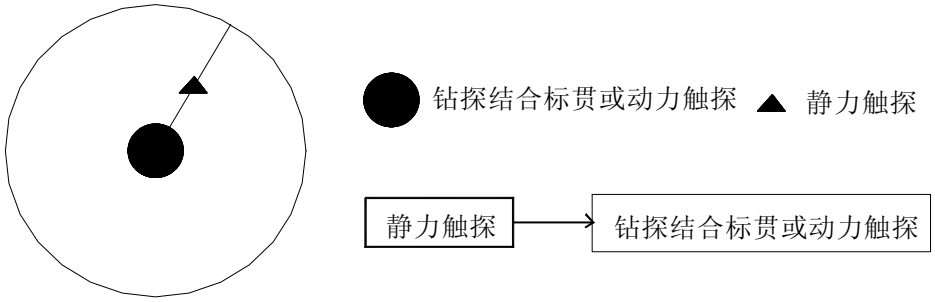


图 6-3　　砂桩检测点布置及检测顺序图

6.4.2 砂桩质量检验分析

(1)检验资料整理及分析

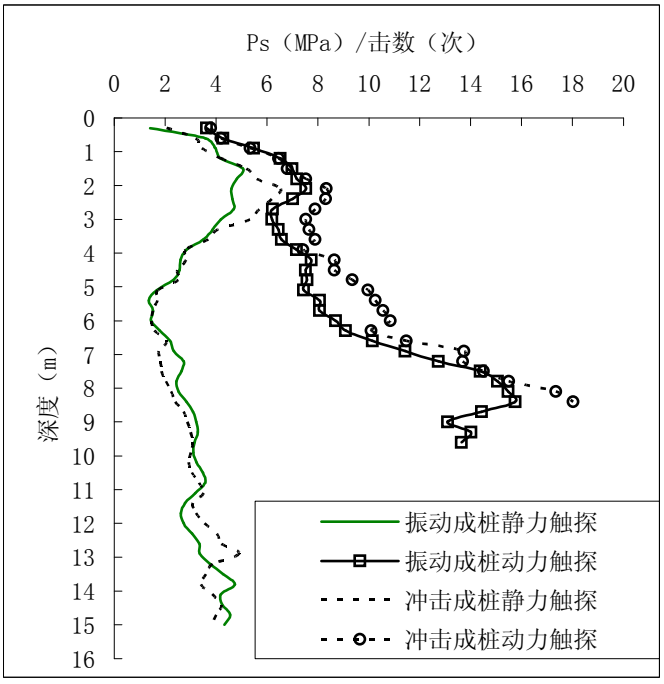


图 6-4　　砂桩比贯入阻力和标贯击数沿深度变化曲线

振动及双管冲击成桩静力触探 $\overline{Ps}$-h、动力触探 $\overline{N}_{63.5}$-h 成果图见图 6-4。

根据上述实测数据按检测方法分别采用以 0.3m 和地质层为区段进行了数据平均统计，具体情况如下：

1)静力触探数据整理及分析

振动及双管冲击成桩 15m、25.5m $\overline{Ps}$ 值见表 6-3。

表 6-3　　各土层的$\overline{Ps}$值

施工工艺	土层名称	土层平均厚度(m)	$\overline{Ps}$ (MPa)	$\overline{N}_{重探}$(击)
振动成桩	软～硬黏土层	2.50	4.09	6.3
	淤泥质粉质黏土层	3.85	2.51	7.6
	硬塑黏土层	4.25	2.98	13.5
	黏砂土混粉砂层	4.35	3.65	/
双管冲击	软～硬黏土层	2.50	4.61	6.7
	淤泥质粉质黏土层	3.85	2.80	9.2
	硬塑黏土层	4.25	2.51	15.0
	黏砂土混粉砂层	4.35	3.55	/

a 桩体连续性

从总体来看，桩体$\overline{P}_s$值均大于桩周土体的$\overline{P}_s$值，由此可以得出桩体是连续的。

b 桩体密实度：

1.0m 以下振动法成桩的砂桩$\overline{P}_{smin}$=1.08MPa，$\overline{P}_s$=3.25 MPa；双管冲击法成桩的砂桩$\overline{P}_{smin}$=1.06MPa，$\overline{P}_s$=3.19Mpa。两者的$\overline{P}_{smin}$均在淤泥质粉质黏土层中，距离砂桩顶 6.0m 附近，该位置处于淤泥质粉质黏土层与硬塑黏土层交界附近。

两种工艺的砂桩静力触探曲线与地层变化紧密相关，周围土体硬，砂桩易挤密实；土体软，砂桩不易挤密实。从曲线变化较直观地看出,在 2.5、6.3、10.6m 附近曲线均有明显拐点，这三处均处于地层变化位置，特别是在 6.3m 附近，曲线变化形式呈台阶式，地层由流塑淤泥质粉质黏土层向硬塑黏土层变化，$\overline{P}_s$值由小突然增大。在不同土层中，特别是土性变化较大时，$\overline{P}_s$值反应桩体密实度是相对概念,就 Ps 值而言,不同土层应有不同的判定标准。因此在检测结果判定时，当地质条件基本相同时，$\overline{P}_s$值越大，桩越密实，当地质条件不同时，则须具体分析。

另外，在 2m 附近$\overline{P}_s$值明显高于其它区段，6m 附近$\overline{P}_s$值明显小于其它区段，其原因为在淤泥质黏土层施工中，受淤泥质粉质黏土强度低等特性影响，下砂困难。因此，工艺相同时下砂量就少，而每根砂桩的灌砂量是固定的，剩余的砂经反复拔压，相对集中在 2m 附近，就造成上述现象。

2)动力触探数据分析

振动及双管冲击成桩$\overline{N}_{重探}$-h 成果图见图 6-4、表 6-3。

1.0m 以下振动法成桩的砂桩修正后的$\overline{N}_{重探min}$=6.1 击，距离砂桩顶 2.8m 处，在淤泥质粉质黏土层中，1.0m 以下其$\overline{N}_{重探}$=9.7 击；双管冲击法成桩的砂桩修正后的$\overline{N}_{重探min}$=6.6 击，位于砂桩顶下 1.2m 处,在黏土层中，1.0m 以下其$\overline{N}_{重探}$=10.3 击。无论是软～硬土层还是淤泥质黏土，其动力触探的击数基本相同。

从图 6－4 可知，在 0～6m 锤击数普遍较低，在同一层中，从上至下锤击数有增大趋势，其原因为砂桩主要靠砂自重作为荷载，在振动中得以密实，在地表附近上部已没有砂作为荷载，因此表层密实程度差，愈向下，荷载愈大，密实效果愈好。类似工程也表明，深度对锤击数有一定影响。在 6m 后锤击数普遍突然增大，其原因是地基 6m 附近流塑淤泥质粉质黏土进入硬塑黏土层，桩体易密实。除施工工艺对桩体密实度起决定影响外，地质情况、深度等因素对锤击数有较大影响，在判定过程中必须考虑这些因素的作用。

另外动力触探存在着设备笨重、工效较低（2 桩/ d)、操作较难、打入 8～10m 以下位置时就难以上拔等问题，同时对设备破坏较严重，其适用范围深度宜小于 8～10m。

3)载荷试验及分析

载荷试验结果见表 6-4。

表 6-4　载荷试验统计表

桩号	检测日期	桩长	桩型	单桩/复合	荷载板面积(m^2)	承载力特征值(kPa)	总加载(kPa)	总下沉量（mm）
3413	4.22	15	振动	单桩	0.13	156	508	41.84
0809	3.14	15	振动	单桩	0.13	(极限)160	160	10.42
1205	3.15	15	振动	单桩	0.13	(极限)160	160	3.83
6813	5.6	25.5	振动	单桩	0.13	155	550	28.04
6803	5.9	25.5	振动	复合	3.46	110	270	143.93
3913	5.5	15	冲击	复合	3.46	(出现裂缝)150	210	121.87
5607	4.23	15	振动	复合	3.46	120	210	114.25

从单桩承载力来看，其特征值离散性大，变异系数为 38.2%。复合地基承载力特征值离散性较小，变异系数为 16.4%，从试验段砂桩的桩长和工艺对复合地基承载力影响不明显。大量的工程实例均采用复合地基载荷试验作为砂桩检测项目之一，也反映出复合地基承载力适合于砂桩检验。

4)标准贯入试验

标准贯入试验结果见表 6-5。

表 6-5　　标准贯入试验结果统计表

深度/m / 桩号	1	2	3	4	5	6	7	备注
1	12	17	19	21	/	/	/	
2	14	19	17	22	13	15	36	
3	6	/	6	/	13	/	/	
4	16	19	/	27	无法进行			泥浆护壁
5	/	17	/	15	无法进行			泥浆护壁

由于实际检验过程中，标准贯入试验通常在 2～4m 部位钻探成孔相对容易，标准贯入能完成，但 2m 左右开始已有塌孔现象，在 4m 以下部位成孔逐步变得困难，在套管保护下，

并反复取砂，套管底部不断塌孔，无法进行检验。后采用套管跟进，在地下水位附近，反复取砂，不断塌孔，也难以成孔。

又采用泥浆护壁法进行，实际操作中，难以护壁成功。一方面由于粗颗粒沉淀和较高水压对桩体的影响，造成标贯试验结果失真；另一方面泥浆在将桩体中砂带出的同时，也对桩体造成污染，影响砂桩的排水作用。

标准贯入检验效果较差，不宜应用于砂桩的检验。

6.4.3 砂桩质量检验时间的研究

为研究砂桩施工后何时检测，即保证检测数据的真实可靠、又不影响工期，在本试验对不同检测时间做了分析。

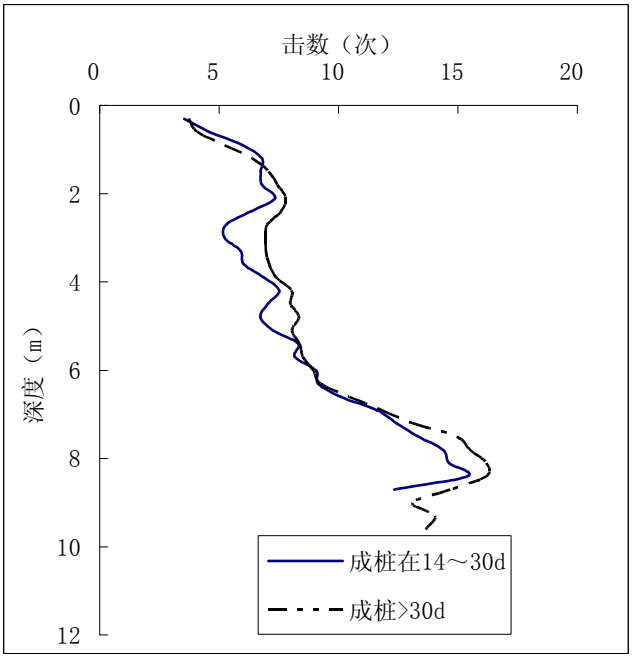


图 6-5　　动力触探击数随时间深度变化曲线

图 6－5 为砂桩施工完成后 14d～30d 和大于 30d 的动力触探击数沿深度的变化。从图中可知，两者的差别不大，因此，可以认为《暂规》规定在软土中，检验时间应在该砂桩施工完成两周后进行是合适的。

6.5 小结

振动式和冲击式砂桩施工机械在地层穿透能力上基本一样，国内常用的 DZKS 系列振动锤配冲击锤完全可以满足穿透不同硬壳层的要求。成桩效果上两者相当且主要问题都集中在流塑态淤泥质黏土层中。从施工工效上振动式砂桩明显优于冲击式砂桩，而且冲击式砂桩施工时噪音大，不适合城市和夜间施工。为此，推荐砂桩施工采用振动重复拔压管砂

桩施工工艺，其施工工艺及工艺参数，施工质量控制、注意事项和施工组织管理如下：

(1)施工工艺及工艺参数

施工工艺流程见图 6-1。

通过试验段的试验，在本工程地质情况下，充盈系数软～硬塑层取 1.3～1.4，流塑土层取 1.5～1.6。振动重复拔压管法软～硬塑土层贯砂量为 0.16m^3/m～0.18m^3/m，流塑土层为 0.19 m^3/m～0.20 m^3/m；双管锤击法每次贯砂量为 0.3m^3。

(2)施工质量控制

1)桩位控制

根据线路中心桩测设加固范围两侧边线控制桩位，做好控制桩位标记，再根据桩位平面布置图放设每个桩的位置，并用短竹木片将桩标示出来。

2)桩管垂直度控制

桩管对准桩位后，用拨杆和吊线锤来检查桩管的垂直度。锤球线不得少于 2m，并根据现场桩架高度做好 1.5%的倾斜标记。利用与桩架相连的两个斜撑来调节桩管垂直度。要求桩管倾斜不大于 1.5%。

3)灌砂量控制

现场所有砂料按标定后的斗车来计量。施工中灌入按充盈系数计算所需的所有砂量。成桩结束后测定所剩砂量，保证灌砂量不小于设计值的 95%，否则应原位补打。

4)提管速度控制

提管速度是根据桩机配套提管卷扬机的卷扬绳速和提管钢丝绳的根数来确定的。所以桩机组装时一定要计算好满足提管速度所需的钢丝绳根数。

5)拔压管高度控制

施工前在桩架上用红油漆做好满足工艺参数要求的拔压管高度控制线，现场指定一人监控拔压管控制线来指挥操作手操作。

(3)施工注意事项

1)打桩顺序

为减少施工对土体的影响，施工时应采用从路基中间向两侧间隔跳打的顺序施工。

2)堵管及其预防措施

施工过程中，一旦堵管就极易导致桩体不连续。尤其是在淤泥质流塑态土层中，如果提管后没有砂料及时回填桩孔，桩周流塑态淤泥质黏土就会回灌桩孔（通常所说的缩孔现象），导致桩体不连续起不到很好的排水效果。为防止堵管要求做到以下几点：

a.桩管就位时，管底铺 0.05m³左右的砂，防止淤泥挤入桩底活瓣缝隙和内外管间间隙。

b.雨天施工，由于现场砂料含水量大，暂留在桩管内的砂容易在激振力作用下达到密实而不易下料。要求一次性灌砂量不超过 1.8m³。

c.现场装载机铲运砂时，难免会带入少量泥团到砂料里。要求灌砂前一定要将泥团清理出来。

3)桩管回带淤泥及其清理措施

成桩结束后，桩管会回带部分淤泥。为防止回带的淤泥封堵砂桩口而影响砂桩的排水效果，要求及时安排人员清理淤泥，要求清到完全露出桩顶为止。

(4)施工组织管理

目前，国内砂桩机械还不完善，没有自动记录装置，这就使砂桩施工质量的控制存在很大的人为因素，因此，加强砂桩施工现场管理工作显得尤为重要。结合试验段施工经验建议采用“旁站+巡视”的管理模式。指定分管砂桩的工程技术人员对现场所有桩机全过程巡视。

(5)建议砂桩质量检测方法组合及频次

1)检验项目：连续性、密实度、复合地基承载力。

2)检验方法：采用静力触探对整桩进行检测，同时对原状土、桩周土进行对比；采用重型动力触探对桩体 8～10m 以上部位进行检测。

3)检验频次：桩体静力触探、重型动力触探检验数量为 2%。

4)复合地基的承载力检验，检验频次：沿线路纵向每 100m 抽样检验 1 处，每工点不少于 1 处。

5)检验时间(饱和黏土中)，宜在成桩桩体 2 周后进行。

7　环境保护及其它研究

7.1 水泥搅拌桩处理软基

水泥搅拌桩地基处理对环境的影响，主要是指在搅拌桩施工时对周边居民生活的影响。

(1)环境保护措施

1)浆（粉）喷桩在施工前，应挖一个废浆池，对废浆应排入池内，不得直接排入河流、水源、农田。

2)粉喷桩施工送粉排气时，应将排气管引入水池，不得直接排入空气。

3)当钻头提升至地面时，应压桩，防止水泥浆（粉）排入地面或空气。

4)钻机、发电机使用的油料、润滑油，严格按规定存放，废油不得随意排放，回收后定点处理。

5)废旧电线、气管、配件、水泥袋，应回收集中处理。

(2)安全保证措施

1)H-5B 型、PH-5D 型钻机长 5.5m，宽 3.2m，钻架高度 20m 左右。施工时钻机重心高，稳定性差。钻机移动前，应充分了解地面情况，对过软地面或软硬不均地面，采取在移动架下垫方木方式移动。移动时钻架左、右倾斜度不得超过 5°，前后应尽量平稳，钻架不得向前倾斜。

2)应经常检查电路系统，对不合格线路，应及时更换，防止出现漏电伤人事故。

3)经常检查输浆软管的安全性，软管不得强拖、强拉、机械碾压。

4)粉喷部分设备属压力容器，应在每根桩施工前，检查压力表读数是否正常，对异常现象，及时处理。

5)不得超负荷使用机械，防止出现扭断钻杆、打坏齿轮、拉断链条等事故。

6)钻机施工时，其他人员不得站在钻机正前方，以防出现伤人事故。

7.2 塑料排水板排水固结法处理软基

塑料排水板排水固结法地基处理对环境的影响，是指在塑料排水板施工及真空预压施工时对周边居民生活的影响及真空预压期间对周围结构物的影响。

(1)环境保护措施

施工场地所遗留下的废弃物，如塑料包装带，割断的塑料排水板等，派专人负责及时

清理并运送到指定地点抛弃，严禁焚烧；塑料排水板机、发电机使用的油料、润滑油，严格按规定存放，废油不得随意排放，应回收后定点处理。为防止对地下水源造成污染，建议在塑料排水板使用及检验过程中，杜绝使用有害回收旧料制作的塑料排水板。

(2)安全保证措施

要加强安全教育，树立安全第一思想，建立安全检查制度；机械操作手必须持证上岗，严禁违规操作；作业人员上下机架时须佩戴安全帽及安全带；对于静压式插板机，禁止人员长时间站立在链条旁，防止链条拉断伤人；对于振动式插板机，须经常检查电路电缆，防止漏电。

(3)应在真空预压施工前，考虑真空预压对周围环境的影响，采取处理措施。

7.3 砂桩联合等载预压处理软基

砂桩地基处理对环境的影响，主要是指在搅拌桩施工时对周边居民生活的影响。

(1)环境保护措施

施工场地应保持清洁，并做好防排水设施；桩机、发电机使用的油料严格按规定存放，废油不得随意排放到，回收后定点处理；施工现场的砂料堆放整齐。

(2)安全保证措施

禁止非操作人员操作桩机；桩机工作时，除本机操作人员外，其他人员必须离开桩机一定距离，以免桩机部件坠落伤人；所有施工人员一定要带安全帽，高空作业人员要系安全带，雨天要穿防滑靴；电器一定要有接地装置，以免发生漏电现象；遇有六级以上大风时，禁止高空作业； 桩机关键部位之螺栓、螺帽应用不同颜色标出紧固定位线，便于在螺帽松动时能及时发现；桩机及其他设备及时检修与保养，不得带故障作业，一般每工作一周全机检查保养一次。

(3)在居民区要注意夜间砂桩施工时的噪音影响。

8 初步结论与建议

8.1 水泥搅拌桩处理软基

(1)根据目前国内的施工机械情况及试验段试验结果，建议搅拌桩桩长≥10m 时宜选用 PH-5D、GPP-5B 机型，桩长≤10m 时可选用 PH-5D、PH-5B、GPP-5B 机型。

(2)搅拌桩喷搅工艺宜采用 10m 复搅，试验段搅拌桩采用 15%的掺入比可以满足设计要求(设计水泥土 90d 无侧限抗压强度≥1.20MPa)。

(3)相同机械型号不同机组的成桩强度存在一定的差异。

(4)建议对高速铁路搅拌桩处理，桩体质量检验可选用钻探取芯检验法与载荷试验检验方法相结合。建议成桩 28d 后在桩径方向 1/4 处、全桩长范围内垂直钻芯取样进行无侧限抗压强度试验，抽检比例为 2‰，每台搅拌桩机械施工的每层土中的搅拌桩至少保证取 6 个样；搅拌桩复合地基承载力检验方法采用载荷试验，检验数量为沿线路纵向每 100m 检查 1 处，每工点不少于 3 组。取芯率不宜低于 70%。

(5)钻探取芯试验检测工艺的关键过程是：钻头直径的选择、水钻与干钻的选择、下钻速度的选择、立轴（钻杆）转速的选择、芯样提取方式选择。水泥搅拌桩钻探取芯钻头选用Φ89mm 硬质合金钢钻头、水钻、下钻速度一般由钻杆自身重量控制（对于芯样较硬的桩可用油泵来增加下钻速度)、立轴（钻杆）转速常选用 338 转/min、芯样提取前应先封口。

(6)搅拌桩强度在 10m 左右以下个别点的无侧限抗压强度出现了降低，搅拌桩长度在 10m 以内的施工质量可控性较高，施工质量可以保证。鉴于我国目前的机具设备条件，加固深可到 15m，其上 10m 的范围质量完全可以保证，10~15m 的范围一定要加强管理，必须保证桩长、喷灰量或浆量、复喷或复搅次数，因此施工队伍的素质极其重要。

8.2 塑料排水板排水固结法处理软基

(1)在塑料排水板施工机械中，静压式插板机无论在工效上，还是在经济成本、环境影响上都大大优于振动式插板机，但振动式打设机械对地层的穿透能力大于静压式。因此，在两者都能够穿透的地层打设塑料排水板时，优先选用静压式；在静压式打设困难的地层，采用振动式塑料排水板机械打设。

(2)材料建议优先选用带刻度的非再生料制作的塑料排水板。在深度检测上最好配备有性能可靠的自动记录仪。

(3)真空-堆载联合预压试验段采用的施工方案及工艺是可行的，真空度能达到设计80kPa 的要求。

(4)采用真空-堆载联合预压法加固铁路软基，加固效果明显，可以加快填土速率，缩短工期，试验段观测期间测得最大沉降速率 4～6cm/d。

8.3 砂桩联合等载预压处理软基

(1)针对本试验段地质及试桩情况推荐振动式成桩方法。

(2)通过试验段的试验，在本工程地质情况下，充盈系数软～硬塑土层取 1.3～1.4，流塑土层取 1.5～1.6。振动重复拔压管法软～硬塑土层贯砂量为 0.16m^3/m～0.18m^3/m，流塑土层为 0.19 m^3/m～0.20 m^3/m；双管锤击法每次贯砂量为 0.3m^3。

(3)检测方法上采用静力触探、重型动力触探、复合地基载荷试验相结合。

(4)静力触探分别对原状土、桩周土、桩体检测，综合检验桩体连续性、密实度（该法主要评定黏土中砂桩的连续性、砂土中桩的连续性、密实度）,静力触探宜选用自动采集系统。动力触探检验上部 8～10m 桩体的密实程度。复合地基载荷试验检验砂桩处理后复合地基承载力的变化情况。

(5)检验时间(饱和黏土中)：

宜在成桩桩体 2 周后进行。

(6)检验数量(饱和黏土中)：

a.静力触探、重型动力触探：桩体检验比例为 2%；

b.复合地基载荷试验：沿线路纵向每 100m 检查 1 处，且每工点不少于 1 处。

以上初步结论有待于今后对路基变形观测资料进行综合分析，最终推荐满足京沪高速铁路的要求软土地基处理施工工艺及质量检验方法。