

软土地基加固技术综述

王 敏

云南省公路科学技术研究所

一九九〇年十月

软土地基加固技术综述

提 纲

前言

一、软土的特性

- 1、什么是软土
- 2、软土的物理力学性质及其成因
- 3、软土的地质分类

二、软土地基加固技术

三、软土地基加固技术现状

- 1、高压喷射注浆法
- 2、强夯法
- 3、真空排水预压法
- 4、振动水冲法
- 5、深层搅拌法
- 6、袋装砂井
- 7、塑料排水板
- 8、轻型填料
- 9、土工织物

四、结束语

软土地基加固技术综述

前言

公路工程在过去的实施中，常常遇到一些软弱地基，由于交通量不大，荷载小，加之经济不发达，为减少加固处理费用，降低工程造价，所以，在公路测设中遇软土地质地段，一般都采取了回避绕越的办法。随着我国城乡经济的繁荣，急需交通运输的发展和进步，把公路建设事业推向了新的发展阶段。由于公路技术标准的提高，不得不把公路建筑在软土地地区内，而路基的沉降和软基的处理技术，已逐步成为工程成败的关键，因而，关于地基加固理论与技术处理的方法，引起了土木工程界普遍的关注，促进了软土地基加固技术迅速的发展，软土加固技术由最早的采用填土缓速平衡碾压、生石灰桩、柴排树枝，浅层换填等发展到旋喷灌注、深层混合处理……，近年来又有用轻型填料，化学方法，土工织物等加固技术。国内外的软土地基加固方法已达几十种，目前仍然是采用老的软土地基处理方法和新的处理方法不断完善和发展的阶段。

本文根据有关资料，对国内外已推广的软土地基加固技术，及其在实践中摸索到且行之有效的措施，综合整理，作一简单的介绍，并提出一些看法供同行们参考。

一、软土的特性

1、什么是软土：

所谓软土是指内聚力小，抗剪强度低，孔隙比大，压缩性高，天然含水量大，渗透性小的淤泥，淤泥质土及其他高压缩性土。淤泥和淤泥质土大多是饱和的，其天然含水量(w)大于液限(W_L) (一般约大于40%—60%)，天然孔隙比(e)大于1，最大的可超过2，昆明滇池区淤泥达5.8。天然孔隙比小于1.5的粘土为淤泥质粘土，天然孔隙比大于1.5时为淤泥，在工程上简称为软土。地基的主要受力层由软土组成的称为软土地基。

2、软土的物理力学性质及其成因：

我国各类软土的物理力学性质指标及主要地区的主要物理力学性质见表1、表2。我省及贵州省的某些地区还存在山地型的软土，如我省广通至祥云有的软土就属丘陵谷地相沉积，碧鸡关至昆明西站地段有的软土属高原湖泊相沉积。主要成因是由泥灰岩、炭质页岩、泥砂质页岩等风化产物和地表的有机物质经水流搬运、沉积于低洼处，长期饱水软化或间有微生物作用而形成。沉积的类型属于坡洪积、湖沉积和冲积为主，其特点是分布面积不大，但厚度变化很大，软土的成因类型见表3。

表 2 我国主要软土地区的主要物理力学性质指标

地区	指标	土层埋深 或范围 (m)	含水量 w (%)	容重 γ (KN/m ³)	孔隙比 e	饱和度 S (%)	液限 WL (%)	塑限 WP (%)	塑性 指数 Ip	渗透系数 k (cm/s)	压缩系数 a_{1-2} (kPa ⁻¹)	内聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (度)
天津		7~14	34	18.2	0.97	95	34	19	17	1×10^{-7}	5.1		
塘沽		8~17 0~8 17~24	47	17.7	1.31	99	42	20	22	2×10^{-7}	9.7		
上海		6~7 1.5~6 >20	39	18.1	1.07	96	34	19	15		6.5		
			50	17.2	1.37	98	43	23	20	6×10^{-7}	12.4		
			37	17.9	1.05	97	34	21	13	2×10^{-7}	7.2		
杭州		3~9 3~19	47	17.3	1.34	97	41	22	19		11.7		
			35	18.4	1.02	99	33	18	15				
宁波		2~12 12~28	50	17.0	1.42	97	39	22	17	3×10^{-8}	9.5		
			38	18.6	1.08	94	36	21	15	7×10^{-8}	7.2		
舟山		2~14 17~32	45	17.5	1.32	99	37	19	18	7×10^{-6}	11.0		
			36	18.0	1.03	97	34	20	14	3×10^{-7}	6.5		
温州		1~35	63	16.2	1.79	99	53	23	30		19.3		
福州		3~19 1~3 19~25	68	15.0	1.87	98	54	25	29	8×10^{-8}	20.3	1~15	10~15
			42	17.1	1.17	95	41	20	21	5×10^{-7}	7.0		
广州		0.5~10	73	16.0	1.82	99	46	27	19	3×10^{-6}	11.8		
贵州		淤泥	54~127	13.0~17.0	17.0~ 28.8	99~100	56~71	26~34	26~38	$i \times 10^{-4} \sim -7$	6~26	6~63	3~21
		泥炭	140~264	12.0~15.0	16.0~ 59.00	96~121	77~263	48~236	26~246	$i \times 10^{-3} \sim -7$	21~129	2~42	9~23
昆明		淤泥	41~270	12.0~18.0	1.10~ 7.00				27~62				
		泥炭	68~299	11.0~15.0									

表 1 各类软土物理力学性质指标统计表

类 型	客 重 γ (kN/m^3)	天 然 含水量 w (%)	天 然 孔 隙 比 e	抗剪强度		灵敏度 St	压缩系数 a_{1-2} (kPa^{-1})
				内摩擦角 p (度)	内聚力 c (kPa)		
滨海淤积软土	15~18	40~100	1.0~2.3	1~7	3~20	2~7	12~35
河滩淤积软土	15~19	30~60	0.8~1.8	0~10	5~30		8~30
湖泊淤积软土	15~19	35~70	0.9~1.8	0~11	2~25	4~8	8~30
谷地淤积(残积)软土	14~19	40~120	0.52~1.5	0	5~19	2~10	>5

表 3 软土的成因类型

类 型	厚 度	特 征
海洋沿岸沉积	泻湖相沉积	2~25米可达60米
	溺谷相沉积	颗粒细、孔隙比大,强度低,常夹有泥炭薄层。
	滨海相沉积	孔隙大,结构疏松,含水量高,分布范围窄。
	三角洲相沉积	面积广,厚度大,夹有粉砂薄透镜体,孔隙大。
内陆湖盆地沉积	湖相沉积	分选性差,结构不稳定,粉砂薄层多,有交错层理,不规则尖灭层及透镜体夹层,结构疏松。
	河漫滩相沉积	软土颗粒成分高,呈放射状分布,层理均匀清晰。
	丘陵谷地相沉积	沉积零乱,岩性复杂,有中细砂交错层,呈透镜体分布。
		呈片状、带状分布,靠山边浅,谷中心深,具有较大的横向波,颗粒由山前到谷中心逐渐变细。

3、软土的地质分类

软土的地质分类可参考广(通)一大(理)铁路软土问题的探讨中,对软土地质的分类及野外鉴定的表4。

表 4 软土的地质分类

特 征 项 目		软粘性土		淤泥质土		泥炭质土		泥 炭
		软 粘 土 软砂粘土 软粘砂土	淤泥质粘土 淤泥质砂粘土 淤泥质粘砂土	淤 泥	泥炭质粘土 泥炭质粘砂土 泥炭质砂粘土			
野 外 鉴 定	颜 色	灰白、灰黄 褐灰、褐	灰、灰黄、 蓝灰、灰黑	深灰、蓝 灰、黑	黄褐、褐、 灰黑、黑	黄褐、褐 灰黑		
	手摸感觉	滑感极强近 似粘性土	滑 感 强	有滑感	滑 感 差	滑感很差、 甚至粗糙。		
	臭 味	无 臭 味	无臭或有微 臭 味	有臭味	有 臭 味	有恶臭味、		
	结 构	均 质	均 质	均质、部 份较粗糙	较粗糙、疏 松	肉眼可见很 粗糙、疏松。		
	夹 杂 物	含极少有机 质或不含， 常夹有砂、园 砾等夹杂物	含 少 量 有 机 质	有机质含 量增高， 有极少植 物残遗体 多已腐朽 分解。	可见植物残 遗体	有较多植 物残遗体 (叶、茎、 根)		
粘 结 性		很 强	较 强	有粘结性	差	很差		
重 量		接近一般粘性土		轻	较 轻	很 轻		
原 状 土 试 验	天然密度 $P(g/cm^3)$	16.0~19.0			11.0~16.0			
	天然含水量 $w(\%)$	30~60, 大于液限			60~353, 大于液限			
	天然孔隙比 e	0.80~1.20	1.20~1.80		1.80~4.00	4.0~7.79		
	液性指数 I_L	0.9~1.73 (个别达3.53)			0.68~2.46 (个别达 7.40~12.90)			
	塑性指数 I_P	6.20~52.00			18.50~86.50			
	饱和度 $S_r(\%)$	92.10~100			75.20~100			
	有机质含量 $(\%)$	<3或很少	3.00~19.00		12.00~44.5			
	压缩系数 $a_{0.1\sim0.2}$ (MPa^{-1})	>0.4			>1.5			
	天然凝聚力 (MPa)	0.006~0.033			0.005~0.019			
	快剪内摩擦角 (度)	$0^{\circ}00'\sim11^{\circ}26'$			$3^{\circ}43'\sim16^{\circ}07'$			
原 位 测 试	渗透系数 $K (cm/s)$	$1.6\times10^{-4}\sim9.4\times10^{-8}$			$1.1\times10^{-4}\sim7.0\times10^{-7}$			
	垂直固结系数 CV (cm^2/s)	$1.1\sim7.8\times10^{-4}\sim2.8\sim9.0\times10^{-5}$						
	十字板剪切灵敏系数 k_{cm}	2.20~16.20						
静力触探基本承载力 $P_0 (MPa)$	0.052~0.165	0.072~0.128						

表5 软土地基处理的方法和种类

施 工 方 法 说 明	目 的 和 效 果	适 用 地 基
1.5m深0.2~1.0m)回填优质砂砾垫层(厚0.5~1.2m) 化纤布、树脂网等柔性纺织物 中渗混生石灰、熟石灰、水泥等材料并进行碾压	防止地基剪切变形和沉降 改良地基防止地基剪切变形和沉降 补强地基防止地基变形、沉降 改良地基增加地基支承载力	粘土、泥炭地基 浅层地基处理 粘土泥炭地基 粘土地基
挖去,用凉干或掺和或换成优质材料然后夯实 爆破等方法除去软弱层、换成优质材料	改良地基防止滑动破坏和剪切变形 改良地基防止滑动和剪切变形	粘土泥炭及浅层地基 粘土、杂填土、湿陷性黄土地基
系数不够时,在填土的另一侧用土压填,以获得稳定 增加抗滑力矩,防止填土滑动破坏	防止滑动破坏、改善填土结构 改善填土结构,防止滑动破坏	软粘土、泥炭地基 软粘土,泥炭地基
加填土,减缓填土上升速度,待地基压密,以增强承受力后再加填,保证路 压密下沉,排除地基本水,促进固结,然后去掉荷载,再进行建筑物施工, 位,以增加其有效应力,使软弱层压密 薄膜减小下卧砂层内的空气压力,使大气压做为一种荷载代替填土作用于地	防止滑动破坏及剪切变形 促进压密沉降改良地基 改良地基,促进固结 促进压密,增加地基强度	软粘土,泥炭地基 有机质粘土、泥炭地 基 软粘土,泥炭地基 软粘土,泥炭地基
桩、缩短排水距离,促进排水压密,促进固结和增大地基强度 在软基内设置袋装砂井,缩短水平方向的固结排水距离 纸版、塑料板或其他柔性织物等代替砂 用经过特殊加工的麻绳或柔性织物绳代替砂排除地基孔隙水	促进压密沉降,增加地基强度及稳定性 促进固结改良地基,减少地基沉降增加稳定性 促进固结,改良地基,减少地基沉降增加地 基稳定性 促进固结,增加地基强度及稳定性,减小地基 沉降	软粘土 粘土 粘土 粘土
的砂桩,对周围土产生挤密作用以砂桩的支承载力提高地基强度	改善地基整体稳定性,减少沉降 促进压密下沉,改善地基稳定性	杂填土,粘土地基, 泥炭地基,砂土地基 粘土,泥炭砂土地基
插入振动棒,边振边注水,使地基密实 振动的管状机械设备,在高压水流下边振边冲成孔,再从孔内填入碎石、砂 ;桩柱与原地基土构成复合地基 时的冲击能重复夯打使地基压缩和压密	防止液化,减少总沉降量 提高地基承载力,减少压缩 防止液化	砂土地基 粘土地基,砂土地基 无粘性土,杂填土粘

由于软土具有强度低、压缩性大和透水性小等特点，因此在软土地基上修建公路，桥梁、房屋等构造物时，必须重视实地调查、研究，提出切实可行的技术措施；必须重视地基的变形和强度问题。软土地基的强度、变形随时间的变化而变化，其变化规律与土的类别、性质、边界排水条件、受荷载形式，时间等因素有关，要了解软土地基强度、变形的规律，主要的是要摸清与上述这些因素有关的如对地基中孔隙水压力随时间而消散，土就逐渐固结，地基应力相应的提高，沉降就越稳定的这些情况，都需要通过软土地基加固技术的应用来准确解决。

二、软土地基加固技术

要提高公路路面的强度和平整度，首先要提高路基的稳定性。在软土地基上修筑路基时，由于地基固结和剪切变形、会因强度不足而发生破坏，影响公路路基及路面的稳定性，影响公路建设的速度。软土地基的加固方法很多，从加固的原理上说不外乎挤密、换置、排水固结和改变土体化学成份的胶结等方法，要采用那一种方法效果较好、投资少、施工又方便，则需因地制宜考虑，根据当地的地质情况，施工机械设备，填筑材料等条件，采取有效的处理措施，加速固结排水、加速地基沉降。在施工过程中控制施工进度，也是建设公路成败的关键。

软土地基处理的方法和种类见表5。

三、软土地基加固技术现状

1、高压喷射注浆法：高压喷射注浆法是近几十年来发展起来的一项土体加固新技术，一般分为旋喷和定喷两种形式。60年代后期，日本在静压注浆法基础上引用水力采煤的先进经验，用高压单管旋喷浆法，用于地下铁道工程施工获得成功，并于1973年在莫斯科召开的第八届国际土力学协会上，正式宣布了这项旋喷注浆加固土新技术，引起了世界各国的重视。目前有意大利、西德、瑞典、苏联和英国等国家相继引用该项技术。我国1972年开始有铁道部科研院、冶金部建筑科研院、煤炭部科研院、交通部水运规划设计院等单位的试验研究及应用，用专用机具，以水泥浆液配方的旋喷工艺，应用于近百项工程的实践中，积累了较丰富的旋喷科研资料和经验，技术日益成熟。1978年曾获全国科学大会奖。我国旋喷加固地基应用见表6。

旋喷法是利用工程钻机将直径为25—42mm带有特殊喷咀的旋喷注浆管，先用常水压钻到预计的地基加固深度，通过钻杆旋转，将预先配置好的浆液，用20MPa左右的压力从2—3mm孔径的喷咀中，喷射浆液，冲击破坏土体，使土体中的土和浆液搅拌成混合物，在喷射浆液的同时，喷具慢慢旋转提升，使钻孔周围土体自下而上旋喷成胶糊状后凝固成一种新的具有一定强度的固体桩，其施工顺序可参见表7。

表 6 我国旋喷加固地基应用一览表 (1975~1982)

顺 号	日期	旋喷工程名称	地 层 土 质	加 固 性 质	旋 喷 方 法	浆 液 材 料	旋喷施工完成情况				主要施工单位	效 果
							根数	深度 (米)	平均长 度(米)	总旋喷 长度		
1	1975	北京某地下工程	砂卵石	新建加固	单管	水泥				100	00069部队	良 好
2	1976	海沟铁路三岔河大桥	粉 砂	事后加固	单管	水泥	50	12	9	450	郑州铁路局	效果明显
3	1977	兰州八冶五层宿舍楼	细 砂	中途加固	单管	水泥				85	铁道科学院 兰州铁路局	5 年观测没下沉
4	1976~ 1978	丰南煤矿竖井防水帷幕	粉细砂	中途加固	单管	水泥				530	铁道科学院 煤炭科学院	局部漏水, 经化学化浆形成帷幕
5	1977~ 1978	北京地铁工程	砂粘土 砂卵石	新建加固	单管	水泥				400	00069部队	质量良好
6	1977~ 1978	北京地铁立交桥	砂粘土 砂卵石	新建加固	单管	水泥				400	00069部队	质量良好
7	1978	兰州车站第一风雨棚	黄土 状土	新建加固	单管	水泥	146	17	16.4	2390	兰州铁路局 铁道科学院	质量良好
8	1978	广深铁路路基下沉	淤泥质 粘土	事后加固	单管	水泥	58	5~6	4~5	250	郑州铁路局	线路稳定 状态良好
9	1978	浙江大学第六教学楼	淤泥质 粘土	事后加固	单管	水泥	92			1526	浙江大学	质量良好
10	1979	杭州龙翔桥报刊门市部	淤泥质 粘土	事后加固	单管	水泥				60	浙江大学	质量良好
11	1979	太局铁三局浴池楼	粘性土	新建加固	单管	水泥	37		15	550	铁道部三局	良 好
12	1980	宝成铁路金砂寺桥	砂卵石 砂粘土	事后加固	单管	水泥				140	铁道部二院	良 好
13	1980	宝钢第一号铁皮坑	亚砂土	新建加固	三重管	水泥	695	12.7~ 17.2	4.5	3130	冶金建筑研 究院、廿冶	良 好

续表6

顺 号	日期	旋喷工程名称	地 层 土 质	加 固 性 质	旋 喷 方 法	浆液 材料	旋喷施工完成情况				主要施工单位	效 果
							根数	深度 (米)	平均长 度(米)	总旋喷 长度		
14	1980	哈尔滨民益街七层宿舍楼	粘性土	中途加固	单管	水泥	25		6~8	164	沈阳铁路局	良 好
15	1980	枝柳铁路祥秘隧道	软粘土	新建加固	三重管	水泥	22		10~25	314	铁道科学院 柳州铁路局	良 好
16	1980	槽壁预制墙缝隙防漏	亚砂土	新建加固	二重管	丙凝 尿醛	2	17	17	34	上海隧道公司	良 好
17	1980	柳州铁路水源井固壁	白云岩 破碎层	中途加固	单管	水泥	1	10~20	10	10	铁道科学院 柳州铁路局	质量良好构成
18	1980	四川某仓库立柱	人工填土 砂粘土	新建加固	单管	水泥				170	铁道部二院	良 好
19	1981	成都012工程楼房	砂粘土 粉细砂	新建加固	单管	水泥				600	铁道部二院	防止砂土硬化
20	1981	怀化机走线立交桥	砂粘土	中途加固	单管 二重管	水泥	20	20~26	7~16	220	广州铁路局 铁道部科学院	下沉停止正常使用
21	1981	上海灵石路抢险工程	细 砂	新建加固	二重管	丙凝	8		7.5	60	上海隧道公司	防漏效果好
22	1981~ 1982	阎潭水闸	砂类土 软粘土	新建工程	单管	水泥				2250	黄委会河务局	建成新水闸
23	1982	大渡河公路桥桩基	砂卵石	事后加固	单管	水泥				10	铁道部二院	采用新工艺成果好
24	1982	北京南汉河污水道	中 砂	新建工程	单管	水泥及 粉煤灰	568	7	1~1.8	752	郑州铁路局	防止了硬管时坍方
25	1982	阜淮铁路戴家湖大桥	黑粘土	事后加固	单管	水泥	126	21	7	947	沈阳铁路局	旋喷后十天架梁
26	1982	平齐铁路2.kM 立交桥	粘砂土	新建加固	单管	水泥	248	18	3~4.5	1000	沈阳铁路局	质量良好

续表6

顺 号	日期	旋喷工程名称	地 层 土 质	加 固 性 质	旋 喷 方 法	浆液 材 料	旋喷施工完成情况				主要施工单位	效 果
							根数	深度 (米)	平均长 度(米)	总旋喷 长度		
27	1982	阜淮铁路K32+643 小桥	粘性土	事后加固	单管	水泥	34	16	8.5	290	郑州铁路局	下沉终止
28	1982	阜淮铁路K30+946 小桥	粘性土	事后加固	单管	水泥	42	14	5.5	230	郑州铁路局	下沉终止
29	1982	京广铁路许家洞车站 路基	砂粘土	事后加固	喷灌 结合	水泥	7		16~60	227	广州铁路局	良 好
30	1982	煤研院宿舍楼	粘砂土	新建加固	单管	水泥	13		7	91	煤炭科学院	加固良好
31	1982	白羊墅车辆段办公楼	高填黄土	新建加固	单管	水泥	46	约10	9~13	486	铁道科学院 铁道部建厂局	加固良好
32	1982	白羊墅车辆段大锻锤 车间	高填黄土	事后加固	单管	水泥	19	6~12	6~12	201	铁道科学院 铁道部建厂局	加固良好
33	1982	白羊墅车辆段小锻锤 基础	高填黄土	新建加固	单管	水泥	3	10~11	10~11	37	铁道科学院 铁道部建厂局	加固良好
34	1982	白羊墅车辆段锻锤基 础	高填黄土	新建加固	单管	水泥	2	6~10	6~10	18	铁道科学院 铁道部建厂局	加固良好
35	1982	白羊墅车辆段利材库	高填黄土	事后加固	单管	水泥	20	6~12	6~12	235	铁道科学院 铁道部建厂局	加固良好
36	1982	白羊墅车辆段机械间	高填黄土	新建加固	单管	水泥	20	10~16	10~16	275	铁道科学院 铁道部建厂局	加固良好
37	1982	白羊墅车辆段食堂	高填黄土	事后加固	单管	水泥	39	10~14	10~14	511	铁道科学院 铁道部建厂局	加固良好
38	1982	南京汽车制造厂仓库	粘性土	事后加固	单管	水泥				6.000	浙江大学	加固良好

表 7 旋喷施工顺序表

顺序	内容	说 明
1	射水试验	钻机就位以后, 首先进行低压 (0.5 兆帕) 射水试验, 用以检查喷咀是否畅通, 压力是否正常。
2	钻进	震动器开始震动, 钻进后, 同时用低压 (0.5 兆帕) 射水以减少摩擦阻力, 防止喷咀堵塞。钻进速度与土质紧密程度有关, 如钻进阻力较大可以提高射水压力和转动钻杆, 加速钻孔进度。
3	接长钻杆	第一节钻杆钻进后, 停止射水和震动, 此时压力下降, 卸下并提起震动器, 接长钻杆, 再继续震动射水钻进。
4	旋喷注浆	钻进达到设计标高后, 停止震动及射水, 开始旋喷注浆。高压泵输送水泥浆液, 当压力升到 15~20 兆帕时, 钻杆开始旋转和提升。钻杆提升速度为 0.2 米每分, 转速为 20 转每分。少量浆液从钻孔冒出地面。由下而上进行旋喷注浆。
5	拆除钻杆	提出一根钻杆高度时, 停止压浆, 待压力下降后, 迅速拆除钻杆。然后再继续压浆, 当压力升到 15~20 兆帕时, 重新开始旋转, 提升。拆除钻杆时动作要迅速, 防止钻杆内水泥沉淀, 引起喷咀堵塞。
6	冲洗	钻杆提升达到标高时, 为充实固结体的顶部, 进行 1~2 分钟的低压 (5 兆帕) 补浆。补浆完成后, 提出钻头, 低压射水, 冲洗钻杆、喷咀。整个旋喷作业完成。 钻机移至新孔位再重复 1~6 次作业。

目前旋喷法已发展为除单管旋喷 (简称 ccj 工法) 以 20 MPa 左右的高压射流的浆液直接切削和搅拌土体, 而获得直径 0.6—1.0 m 的旋喷柱外; 还有双重旋喷法 (简称 JSJ 工法), 用双通二重管分别输送浆液及空气, 是在 20 MPa 左右高压喷射浆液的同时, 喷射 0.7 MPa 左右压力的压缩空气, 使之在浆液射流的周围形成气膜, 以减缓射液压力的衰减, 可获得 0.8—1.5 m 的旋喷柱; 及三重管旋喷法 (简称 CJP 工法) 用不相通的三个管子分别输送水、空气、浆液, 是采用超高压脉冲泵, 喷射清水, 以水流切土, 同时压入 0.7 MPa 压缩空气, 在水射流周围形成气膜, 以减缓射液压力的衰减, 土体搅拌成泥浆后, 再注入压力为 2—5 MPa 的浆液, 填充喷射流造成的空隙, 可获得 1.5—3 m 的旋喷柱, 以及多重管旋喷法 (简称 SSS—MAN 工法), 在砂性土中可获得 4 m 的旋喷柱。土体加固的强度主要取决于浆液, 土壤性质和凝固过程, 施工中要掌握这三者的关系, 取样分析, 以保证工程质量, 旋喷注浆见示意图 1、2 及 3、4。旋喷法的主要技术指标见表 8。

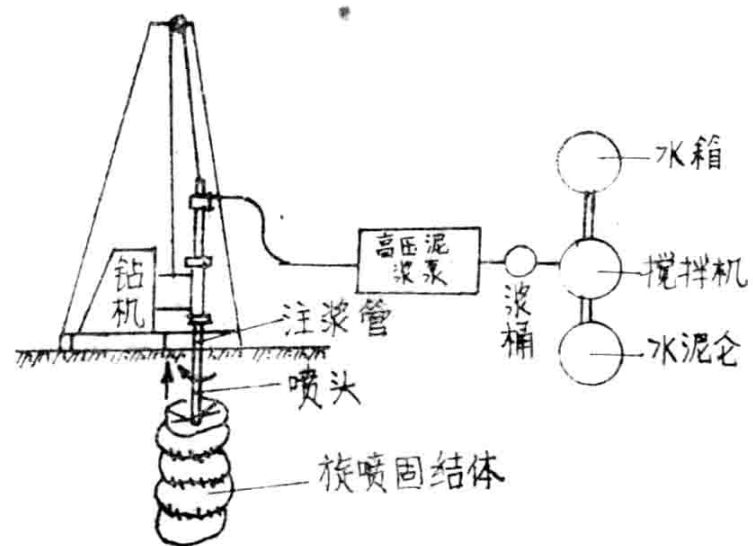


图 1 单管旋喷注浆示意图

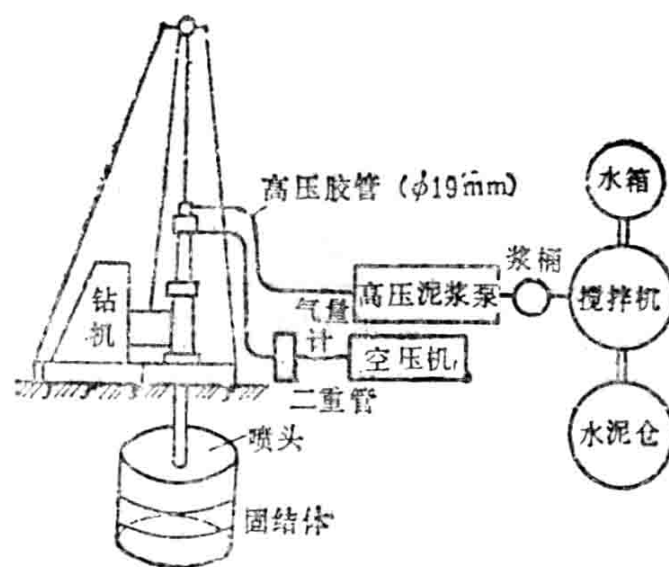


图 2 二重管旋喷注浆示意图

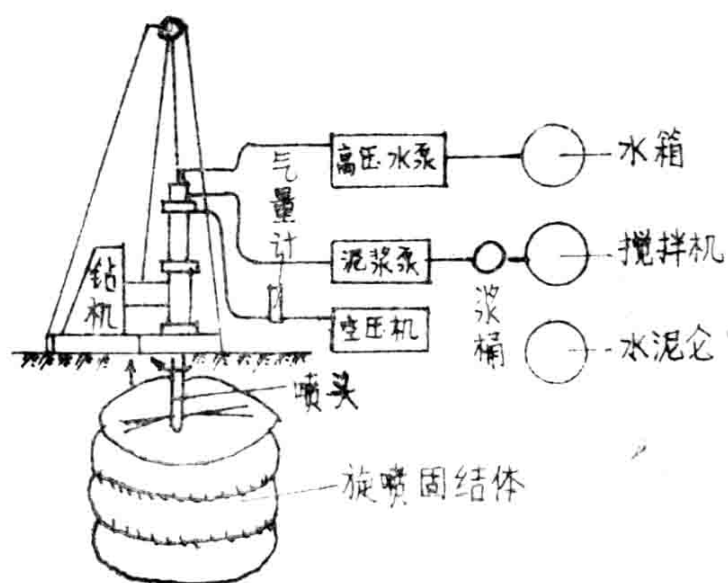


图 3 三重管旋喷注浆示意图

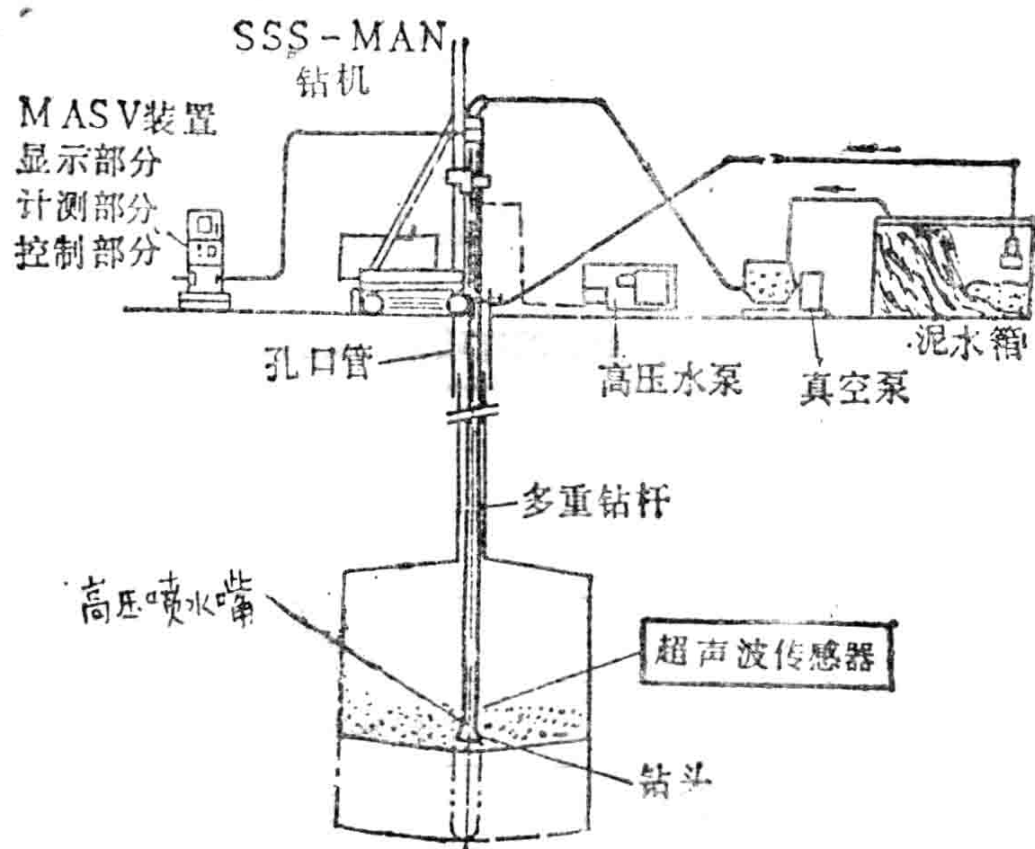


图 4 多重管旋喷示意图

表 8 各类旋喷法的主要技术指标

类 别		适用地层	灌注材料	喷射介质	钻具形式	成桩直径 (米)	固结体抗压强度 MPa
单管旋喷法 (CCp工法)		N<10 粘性土 N<15 砂质土	水泥浆	水泥浆	单层管	淤泥1 砂0.6~0.8 粘土0.7	粘性土3.5~4.0 砂质土4.0~6.0
双管旋喷法	JSP工法	N<20 粘性土 N<30 砂质土 砂 砾	水泥浆	水泥浆	双层管	0.8~1.5	4.0~10.0
	JGP工法	N<15 粘性土 N<40 砂质土 砂 砾		空气			
三重管旋喷法 CJP工法		N<10 粘性土 N<15 砂质土	水泥浆	清水 水泥浆 空气	三层管	1.5~2.5	粘性土1.5~5.5 砂质土5.0~15.0

旋喷法适用于砂土、粘土、黄土、人工填土等多种土质的软土地基加固，也可作为构造物的补强，防渗漏，防砂土液化，是一种设备简单，操作灵活，成本低、见效快、功能多的一种加固技术，浆液的材料随着工业的发展，适应旋喷注浆的材料越来越多，当前有以水泥为主及化学浆液两大类，但后者来源少，价格贵，限制了其大面积的采用。我国旋喷注浆液基本上是以水泥为主的硬化剂渗入不同的外加剂，常用的外加剂配方见表9及当前我国采用的高压喷射注浆参数表10。

表 9 国内常用的旋喷浆液配方表

配方类型	顺号	外加剂成分及百分比	浆液特性
促凝早强型	1	氯化钙 2~4	促凝早强灌性好
	2	铝酸钠 2	促凝强度增长慢稠密大
	3	水玻璃 2	初凝快、终凝时间长、成本低
	4	三乙醇胺, 0.03~0.05, 食盐1	有早强作用
	5	三乙醇胺, 0.03~0.05, 食盐1, 氯化钙 2—3。	促凝、早强可喷性好
	6	氯化钙(或水玻璃) 2, “NNO” 0.5	促凝、早强, 强度高, 浆液稳定性好
	7	氯化钠1 亚硝酸钠0.5 三乙醇胺0.03~0.05	防腐蚀、早强 后期强度高
填充剂型	8	粉煤灰25	调节强度, 节约水泥
	9	粉煤灰25氯化钙2	促凝、节约水泥
	10	粉煤灰25 氯化钙2 三乙醇胺0.03	促凝、早强、节约水泥
	11	粉煤灰25 硫酸钠1 三乙醇胺0.03	有早强、抗冻性好
	12	矿渣25	提高固结体强度、节约水泥
	13	矿渣25 氯化钙2	促凝、早强、节约水泥

表10 我国当前采用的高压喷射注浆参数表

高压喷射注浆的种类		单管法	二重管法	三重管法
高压喷射注浆参数值	水	压力 (MPa)	—	—
		流量 (L/min)	—	—
		喷嘴孔径 (mm) 及个数	—	—
	空气	压力 (MPa)	—	0.7
		流量 m^3/min	—	1~2
		喷嘴间隙 (mm) 及个数	—	1~2 (一或二个)
	浆液	压力 (MPa)	20	20
		流量 (L/min)	80~120	80~120
		喷嘴孔径 (mm) 及个数	$\phi 2 \sim \phi 3$ (二个)	$\phi 2 \sim \phi 3$ (一或二个)
		注浆管外径 (mm)	$\phi 42$ 或 $\phi 45$	$\phi 42, \phi 50, \phi 75$
适用土质		砂类土、粘性土、黄土、杂填土、小粒径砂砾		
浆液材料及配方		以水泥为主要材料, 加入不同外加剂后可具有速凝、早强、抗蚀、防冻等性能, 常用水灰比 1 : 1, 亦可用化学材料		

高压喷射注浆固结体的质量, 除与土层条件和喷射流破坏力有关外, 还受喷射持续时间, 注浆材质, 施工深度和地下水状态等因素的影响。高压喷射注浆固结体性质见表 11。

2、强夯法: 所谓强夯法是将一个巨大的重锤, 一般 80—400kN (最大已到 2000 kN), 从高 7—40m, 锤底面积为 4—6 m^2 , 自由落下, 对软土地基进行夯实, 夯实频率 1—3 次/分钟, 其夯击能量一般在 1500~5000kN—m, 特殊情况下达 10000—20000 kN—m, 加固深变为 10—40m, 是在重锤夯实法的基础上发展起来, 而又与重锤夯实法截然不同的一种新技术, 重锤夯实法是一锤压一锤的满堂整打, 一开始就将土的表层打密, 夯击效应不易向深层传递, 只能加固表面的土层。强夯法则具有一套独特的夯打工艺, 使夯击效应能传至较深的土层。该法 1970 年为法国梅那 (Louis Wénard) 首创, 第一次使用是用锤 100kN 下落高度超过 10m 的重锤夯实, 并定名为强夯法, 在其他国家

表11 高压喷射注浆固结体性质

固结体性质			喷注种类	单管法	二重管法	三重管法
旋喷有效直径 (m)	粘性土	$0 < N < 5$	1.2 ± 0.2	1.6 ± 0.3	2.2 ± 0.3	
		$10 < N < 20$	0.8 ± 0.2	1.2 ± 0.3	1.8 ± 0.3	
		$20 < N < 30$	0.6 ± 0.2	0.8 ± 0.3	1.2 ± 0.3	
	砂类土	$0 < N < 10$	1.0 ± 0.2	1.4 ± 0.3	2.0 ± 0.3	
		$10 < N < 20$	0.8 ± 0.2	1.2 ± 0.3	1.2 ± 0.3	
		$20 < N < 30$	0.6 ± 0.2	1.0 ± 0.3	1.2 ± 0.3	
	砂砾	$20 < N < 30$	0.6 ± 0.2	1.0 ± 0.3	1.2 ± 0.3	
单向定喷有效长度 (m)					1.0~2.5	
单桩垂直极限荷载 (t)			50~60	100~120	200	
单桩水平极限荷载 (t)			3~4			
最大抗压强度 (MPa)			砂类土10~20, 粘性土5~10, 黄土5~10, 砂砾8~20			
弹性模量 (MPa)			$K \times 10^3$			
干容重 (g/cm^3)			砂类土1.6~2.0, 粘性土1.4~1.5, 黄土1.3~1.5			
渗透系数 (cm/sec)			砂类土 $10^{-5} \sim 10^{-6}$, 粘性土 $10^{-8} \sim 10^{-7}$, 砂砾 $10^{-6} \sim 10^{-7}$			
c (MPa)			砂类土0.4~0.5, 粘性土0.7~1.0			
ϕ (角度)			砂类土30~40 粘性土20~30			
N (击数)			砂类土30~50 粘性土20~30			
弹性波数 (KM/Sec)	P波		砂类土2~3 粘性土1.5~2.0			
	S波		砂类土1.0~1.5 粘性土0.8~1.0			
化学稳定性能			较好			