

S-TRD 工法机在高速公路改扩建深层软基就地固化处理中的应用

王新宇

(广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510623)

摘要: 就地固化作为一种软基处理方式,将固化材料和软土在原位进行搅拌,使之直接形成足够承载力的混合土体。传统的就地固化采用强力淤泥搅拌头进行原位搅拌,处治深度一般在 4 m 以内;而采用 S-TRD 工法机能够将处治深度提高至 8 m,在此深度范围内可以完美地替代预应力管桩。在通过试验段施工后,从取芯检测、轻型动力触探和沉降监测等方面,逐一验证其施工合理性。经验证,确定 S-TRD 工法机可以作为 8 m 内深层软基的处理方式,其施工效果与水泥掺量有关,在 6%~10% 的水泥掺量范围内,在同等条件下,水泥掺量越多,施工后土基的承载力越高。

关键词: 就地固化;深层软基;S-TRD;水泥掺量

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0315-05

Application of S-TRD Construction Machine in Deep Soft Base In-situ Curing Treatment in Expressway Reconstruction and Expansion

WANG Xinyu

(Guangdong Provincial Freeway Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: As a soft base treatment method, the in-situ curing is used to mix the cured material and soft soil in situ to directly form a mixed soil with sufficient bearing capacity. The traditional in-situ curing is used to adopt a strong silt mixing head for in-situ mixing, and the treatment depth is generally within 4 m. The use of S-TRD construction machine can increase the treatment depth to 8 m, which can perfectly replace the prestressed pipe piles in this depth range. After the construction of the test section, the construction rationality is verified one by one from the aspects of coring detection, light dynamic penetration and settlement monitoring. After verification, it is determined that the S-TRD construction machine can be used as a treatment method for deep soft base within 8 m, and its construction effect is related to the cement content, that is in the range of 6%~10% cement content. Under the same conditions, the more cement content, the higher the bearing capacity of the soil foundation after construction.

Keywords: in-site curing; deep soft base; S-TRD; cement content

0 引言

就地固化处理是针对软土地基进行加固的一种处理方法,其施工原理是在原位上将固化材料和软土进行混合搅拌,使之直接形成具有一定深度和强度的硬壳层,以满足路基路面承载的设计和施工要求。能够做到零弃方、零借方,实现地基土资源利用最大化,工程造价较低,没有环境污染。

就地固化系统一般由三维强力淤泥搅拌头、挖掘机、固化剂供料系统、储料设备和控制系统等组

成。通过后台自动定量供料系统控制进出料,在将料仓内的固化剂混合后,通过安装于挖掘机上的强力淤泥搅拌头的粉喷或浆喷装置输出;在搅拌头的强力搅拌下,将输出的固化剂与土体均匀拌和,从而达到就地固化的目的^[1]。

传统就地固化施工采用三维强力淤泥搅拌头对原位土进行均匀搅拌,固化浅层软土深度一般不超过 4 m^[2]。根据现场土样含水率的高低以及固化剂形式,施工采用垂直上下搅拌固化的方式,搅拌设备直插式对原位土进行搅拌^[3],搅拌设备正向运行逐渐深入搅拌并喷射固化剂,直至达到固化设计底部,然后搅拌设备反向运行缓慢提升搅拌并喷固化剂^[2],处理形式采用边固化边推进的形式进行^[4]。

收稿日期: 2024-06-25

作者简介: 王新宇(1992—),男,硕士,工程师,从事高速公路改扩建建设管理工作。

1 S-TRD 及 S-TRD 工法机介绍

S-TRD 工法,即 Super Trench cutting Re-mixing Deep wall method,是一种改良的、加深了软土处治深度的原位混合搅拌壁式地下连续墙工法。

S-TRD 工法机是一种新型的就地固化施工机械,采用链条式搅拌头,固化软土的深度可达到 8m。施工时先将链条刀具移动至施工位置,用输浆管将灰浆泵与 S-TRD 机接通,开动电动机,链条刀具旋转顺畅,借设备自重,以 0.5~1 m/min 的速度沉至要求的加固深度,再以 1~2 m/min 的均匀速度提起搅拌机,与此同时开动水泥浆泵,将水泥浆从 S-TRD 机喷浆管不断压入土中,由链条头部水泥浆与深层处的软土搅拌^[5],边搅拌边喷浆直到提至地面,即可完成一次固化过程^[6]。处理深度在 4 m 以内的浅层软土时,可采用 N 型搅拌横向移动搅拌,100~250 mm/min 的均匀速度即可完成土壤加固。处理深度在 4~8 m 以上浅层软土时采用竖向单孔咬合搅拌,孔位间距=刀具宽度-200 mm,搅拌时要均匀,以 1~2 m/min 的均匀速度提起搅拌机,孔位之间可采用不喷浆复搅方式,防止出现未搅拌土层。

1.1 固化原理

S-TRD 工法是采用挖掘机作为主动力+链条式动力刀具,按照一定的流动性进行竖直或水平方向的搅拌,同时挖掘机连续水平移动,通过链条将水泥类固化材料和土壤改良类材料混合搅拌,在地基深处将软土和固化剂强制搅拌^[7],利用固化剂与软土发生物化反应,使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的地基^[8]。

1.2 适用性

适用于 $N < 20$ 击的地层,如人工填土、粘土、淤泥、淤泥质土、粉土、砂土、碎石土等^[9],对于复杂地质条件应通过实验确定其适用性,墙体施工厚度 550~850 mm,施工处理土层深度 8 m 以内的工程。施工占用空间较小,宽度、高度大于 5 m 以上均可施工,工作效率较高,水泥土搅拌量约 400~500 m³/8 h。

1.3 优点

可以对不同地层的地基进行均质改良;施工过程低振动、低噪声;施工速度快,过程中不需要清理土方;对周边地基影响小,可以邻近建筑物、铁路施工;驾驶室内施工管理装置实时监测施工状态,增加施工质量的可靠性;具有很好的机动性和低空间作业性。

由于 S-TRD 工法机固化深度可达 8 m,因此可以

有效地替代处治深度在 8 m 以内的预应力管桩加固软土地基,一定程度上降低工程造价。

2 工程概况

2.1 工程背景

本工程为长春至深圳国家高速公路河源热水至惠州平南段改扩建工程,由于路基沿线经过地区水塘、鱼塘、低洼地较多,占压不可避免。由于塘、池底部的淤泥厚度不等,且其腐殖质含量较大,压缩性高,土质力学指标差,故在路基填筑前均应对其进行合理处治^[10]。

原设计软基处理的原则是在淤泥、淤泥质土层底埋深 $h < 2$ m 时,采用换填处理;在淤泥、淤泥质土层底埋深 $2 \text{ m} \leq h \leq 4$ m 时,采用原位就地固化方案;在淤泥、淤泥质土层底埋深 $h > 4$ m 时,采用预应力管桩复合地基。

采用 S-TRD 工法机施工时,可在淤泥、淤泥质土层底埋深 $2 \text{ m} \leq h \leq 8$ m 时,采用原位就地固化方案。

2.2 地质情况

就地固化施工场地主要土层为杂填土、黏土、淤泥、淤泥质土为主,相关工程参数见表 1。

2.3 试验段参数设计

考虑到拟采用的新型 S-TRD 工法机搅拌施工深度可达 8 m,为验证其在软土埋深 8 m 内的处治效果,在不同段落分别开展了以下两大类就地固化试验段施工:

(1)在淤泥、淤泥质土层底埋深 4~8 m 的软基路段,采用 S-TRD 工法机开展就地固化施工。固化试验段共 3 处,分别编号从 1 至 3,固化深度分别为 7.8 m、7.6 m 和 8 m。

(2)在淤泥、淤泥质土层底埋深 2~4 m 的软基路段,采用传统强力淤泥搅拌头开展就地固化施工。固化试验段 1 处,编号为 4,固化深度为 4 m。

上述四处试验段的固化尺寸均为 27 m×5 m,各试验段主要参数见表 2。

2.4 施工注意事项

(1)施工前应清除地表面灌木、树根、杂草、块石等杂物,存在硬壳时宜利用挖掘机等预先松土,必要时设置临时围堰与外部隔离,做好场地平整,低洼处宜用素填土填平并做好场地排水。

(2)就地固化浅层处理宽度为路堤坡脚外延伸 2.0 m。

(3)固化深度超过 1 m 时,搅拌头上下搅拌不应少于 2 次,提升进度不应大于 4 m/min,搅拌头连接杆的垂直度偏差不宜大于 2%。

表 1 沿线软土主要物理力学性质指标表

层号	土层名称	项目	基本物理性指标					液塑限		直接快剪		固结试验		有机质 0 m/%
			含水率 W/%	湿密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土粒比 重 G_s	孔隙比 e	饱和度 S_r /%	液限 W_L /%	塑限 W_P /%	凝聚力 c_q /kPa	内摩擦 $\varphi_q/$ ($^{\circ}$)	压缩系数 a_v /MPa $^{-1}$	压缩模量 E_s /MPa	
2-1-1	淤泥	最大值	130.00	1.54	2.65	3.5	99.12	111.0	57.1	4.7	10.20	3.168	2.17	6.23
		最小值	69.00	1.29	2.50	1.9	94.00	65.1	34.4	3.4	1.40	1.200	1.41	6.23
		平均值	89.18	1.46	2.60	2.4	96.26	82.2	44.4	4.1	5.80	1.849	1.86	6.23
		个数	4	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4	1
2-1-2	淤泥 质土	最大值	55.30	1.84	2.67	1.5	100.0	53.6	32.7	14.9	11.49	1.679	4.67	9.10
		最小值	39.10	1.63	2.62	1.0	89.30	36.8	20.1	7.6	4.20	0.400	1.49	2.72
		平均值	42.86	1.75	2.66	1.2	96.23	41.6	23.4	11.2	7.85	0.734	3.53	4.40
		个数	5	5	5	5	5	5	5	2	2	5	5	4
2-2-1	粉质 黏土 (软 塑)	最大值	40.90	1.87	2.70	1.2	96.81	45.5	25.9	22.5	9.80	0.860	5.46	
		最小值	28.70	1.68	2.65	0.9	83.28	31.1	16.3	12.1	6.30	0.346	2.24	
		平均值	34.61	1.79	2.68	1.0	90.91	38.6	20.6	17.5	7.64	0.572	3.77	
		个数	8	8	8	8	8	8	8	7	7	8	8	
		标准差	4.512	0.066	0.018	0.14	5.08	5.173	3.143	3.595	1.187	0.167	0.959	
		变异 系数	0.130	0.037	0.007	0.132	0.056	0.134	0.153	0.205	0.155	0.293	0.254	
		修正 系数	0.912	0.975	0.995	1.089	1.038	0.910	0.897	0.848	0.885	0.802	0.828	
		标准值	31.56	1.74	2.67	1.1	94.34	35.1	18.5	14.9	6.76	0.459	3.12	

表 2 就地固化试验段主要参数

固化区	水泥掺量/%	水灰比	固化尺寸/ (m×m)	固化方式
试验段 1	6	1.5	27×5	S-TRD 工法机
试验段 2	8	1.5	27×5	S-TRD 工法机
试验段 3	10	1.5	27×5	S-TRD 工法机
试验段 4	6	1.5	27×5	强力淤泥搅拌机

(4)就地固化土搅拌初步平整后进行表面养生,养护时间宜在 7 d 以上;养护时如遇雨天宜在固化场地表面铺设塑料薄膜,同时加强场地排水,减少雨水影响^[2];养护完成后,对固化土表层进行整平;固化层作为路基时应整平和碾压,其压实度及平整度应满足设计要求^[11]。

3 现场试验

3.1 总体要求

(1)固化深度(mm):要求不小于设计值,通过抽芯方式检测,纵向每 100 m 抽 1 处且不少于 3 处。实测情况详见 3.2 节。

(2)固化宽度(mm):要求不小于设计值,通过尺量方式检测,长度方向不少于 3 处、宽度方向每 30 m 测 1 处、且不少于 3 处。实测情况略。

(3)承载力:要求符合设计值,通过轻型动力触探的方式检测,每 3 000 m²或 300 m 不少于 3 处。实

测情况详见 3.3 节。

(4)开展动态监测,沉降标准为沉降速率每昼夜不大于 15 mm,当沉降或位移超过标准时,应立即停止路基填筑。监测情况详见 3.4 节。

3.2 钻芯法检测

经检测,试验段均达到设计要求固化深度。钻芯结果见表 3。钻芯结果显示,各试验段均能达到设计固化深度,说明各试验段水泥掺量均足够,局部地段做了处治深度在 9m 内的效果验证,但考虑到位于极重交通路段的高速公路改扩建工程对软土处治的严苛要求,并未开展大规模验证。

3.3 轻型动力触探检测

现场试验发现,就地固化表层即可达到设计承载力要求。因此,项目的试验检测单位在开展轻型动力触探检测时,采用当钻芯单位钻芯至一半固化深度后再开展检测的方式,只要当次承载力满足设计要求,即认为就地固化检测合格。

固化试验段分为 4 段,检测部位均选取位于加宽路段的偏内侧、中部位置和偏外侧三点,检测深度均为 30 cm。试验表明,动力触探试验锤击数均在 50 ~ 55 之间,实测承载力值均大于 220 kPa,满足设计承载力要求(不小于 156 kPa);在同样水泥掺量(6%)的情况下,S-TRD 工法机处治深度在 8 m 内的软土和传统强制淤泥搅拌机处治深度在 4 m 内的软土的效

表3 就地固化试验段钻芯检测结果

固化段	孔号	固化检测长度/m	固化层下地层钻取深度/m	钻孔深度/m	固化段质量情况	评价
试验段 1	1 孔	7.80	0.75	8.55	灰黄色,硬塑-坚硬状,主要由粉质粘土和水泥混合而成,搅拌均匀,有水泥气味	满足设计要求
	2 孔	7.80	0.50	8.30		满足设计要求
	3 孔	7.80	0.70	7.50		满足设计要求
试验段 2	1 孔	7.60	0.55	8.15		满足设计要求
	2 孔	7.75	0.65	8.40		满足设计要求
	3 孔	7.60	0.55	8.15		满足设计要求
	4 孔	7.65	0.60	8.25		满足设计要求
试验段 3	1 孔	8.10	0.73	8.83		满足设计要求
	2 孔	8.10	0.78	8.88		满足设计要求
	3 孔	8.00	0.70	8.70		满足设计要求
试验段 4	1 孔	4.10	0.50	4.60		满足设计要求
	2 孔	4.20	0.65	4.85		满足设计要求
	3 孔	4.00	0.60	4.60		满足设计要求

果基本相同;在不同水泥掺量(6%、8%、10%)的情况下,试验段3的锤击数要大于试验段2,试验段2的锤击数要普遍大于试验段1和3,这表明水泥掺量越多,锤击数相对越多,反映出承载力越高。

3.4 沉降监测

在就地固化开始施工后的连续6个月,通过布设

观测点,开展连续观测。由于现场施工原因,除每段试验段均布设了边桩测点外,仅试验段1和3布设了沉降板,监测结果见表4。根据监测结果,各试验段现场在就地固化处治施工后的半年内,均未见明显位移发展,沉降速率均满足设计要求,说明就地固化施工后路基状况良好。

表4 边桩位移监测结果

固化区			固化后第1月	固化后第2月	固化后第3月	固化后第4月	固化后第5月	固化后第6月
试验段 1	边桩测点	水平位移	距离/mm -2.9 ~ 2.2	-3.4 ~ 3.1	-3.6 ~ 3.0	-2.2 ~ 2.1	-5.2 ~ 5.3	-2.5 ~ 2.5
		速率/(mm·d ⁻¹)	-0.1 ~ 0.07	-0.11 ~ 0.1	-0.12 ~ 0.1	-0.07 ~ 0.07	-0.17 ~ 0.18	-0.08 ~ 0.08
		竖向位移	距离/mm -3.2 ~ 0.8	-0.2 ~ 1.6	-3.9 ~ 0.3	-2.2 ~ 1.3	-8.2 ~ 0.2	-2.3 ~ 1.8
	沉降板测点	速率/(mm·d ⁻¹)	-0.11 ~ 0.03	-0.01 ~ 0.05	-0.13 ~ 0.01	-0.07 ~ 0.04	-0.27 ~ 0.01	-0.08 ~ 0.06
		竖向位移	距离/mm -0.68 ~ -0.52	-1.03 ~ -0.97	-0.56 ~ 0.24	-1.08 ~ -0.89	-0.66 ~ -0.46	-3.8 ~ -2.73
		速率/(mm·d ⁻¹)	-0.02	-0.03	-0.02 ~ 0.01	-0.04 ~ -0.03	-0.02 ~ 0.00	-0.13 ~ -0.09
试验段 2	边桩测点	水平位移	距离/mm -2.1 ~ 4	-0.6 ~ 3.3	-5.6 ~ 2.3	-2.8 ~ 0.1	-3.6 ~ 2.6	-2.3 ~ 2.9
		速率/(mm·d ⁻¹)	-0.07 ~ 0.13	-0.02 ~ 0.11	-0.19 ~ 0.08	-0.09 ~ 0.00	-0.13 ~ 0.09	-0.08 ~ 0.1
		竖向位移	距离/mm -3.2 ~ 0.7	-1.2 ~ 0.9	-2.1 ~ 1.4	-2.6 ~ 0.8	-5.7 ~ -1.9	-1.7 ~ 0.5
	沉降板测点	速率/(mm·d ⁻¹)	-0.11 ~ 0.04	-0.04 ~ 0.03	-0.07 ~ 0.05	-0.09 ~ 0.03	-0.06 ~ 0.19	-0.06 ~ -0.02
		水平位移	距离/mm -4.2 ~ 4.7	-2.6 ~ 2.1	-3.3 ~ 3.1	-2.9 ~ 2.6	-5.6 ~ 5.7	-1.8 ~ 1.9
		速率/(mm·d ⁻¹)	-0.14 ~ 0.16	-0.19 ~ 0.15	-0.11 ~ 0.1	-0.1 ~ 0.09	-0.19 ~ 0.19	-0.13 ~ 0.14
试验段 3	边桩测点	竖向位移	距离/mm -2.3 ~ 0.8	-0.8 ~ 0.9	-3.8 ~ 0.0	-2.1 ~ 1.6	-8.1 ~ 8.2	-1.8 ~ -0.2
		速率/(mm·d ⁻¹)	-0.08 ~ 0.06	-0.06 ~ 0.06	-0.13 ~ 0.00	-0.07 ~ 0.05	-0.27 ~ 0.27	-0.13 ~ 0.01
	沉降板测点	竖向位移	距离/mm -1.2 ~ -0.09	-0.99 ~ -0.13	-1.71 ~ -0.23	-3.08 ~ -0.33	-0.85	-1.41
		速率/(mm·d ⁻¹)	-0.07 ~ -0.01	-0.07 ~ -0.01	-0.06 ~ -0.01	-0.1 ~ -0.01	-0.03	-0.1
	边桩测点	水平位移	距离/mm -1.4 ~ 4.5	-3.5 ~ 1.6	-3.1 ~ 5	-2.7 ~ 2.2	-7.2 ~ 5.9	-2.1 ~ 2.8
		速率/(mm·d ⁻¹)	-0.05 ~ 0.15	-0.12 ~ 0.05	-0.1 ~ 0.17	-0.09 ~ 0.07	-0.24 ~ 0.2	-0.07 ~ 0.09
试验段 4	边桩测点	竖向位移	距离/mm -1.7 ~ 0.6	-2.6 ~ 2.1	-3.1 ~ -0.2	-2.3 ~ 1.4	-9.5 ~ 4.8	-0.8 ~ 1
		速率/(mm·d ⁻¹)	-0.06 ~ 0.02	-0.09 ~ 0.07	-0.1 ~ -0.01	-0.08 ~ 0.05	-0.03 ~ 0.16	-0.03 ~ 0.03

4 结 语

经过分析上述章节主要结论如下:

(1)采用S-TRD工法机开展4~8 m深的就地固化处治,效果和传统强力淤泥搅拌头开展2~4 m深

的就地固化处治相当。无论是钻芯检测、轻型动力触探检测,以及工后长达半年的沉降观测,均达到了预期施工效果。这预示着采用S-TRD工法机开展深层就地固化处治,施工效果稳定可靠,能够很好地替代预应力管桩处治深度不大于8 m的深层软基。

(2)考虑到应用项目为位于极重交通路段的高速公路改扩建工程,软土处治要求极高,须保证处治后稳定且安全。因此,该项目并未大规模实施在软土深度大于 8 m 时采用 S-TRD 工法处治,仅局部地段经过验证初步确定可处治深度不大于 9 m 的软土,在深度大于 8 m 的软土地段仍采用预应力管桩处治这一传统方式。具体 S-TRD 工法能否有效处治深度更大的软土、工后沉降能否保持在可控范围内,还有待后续在其他项目作进一步验证。

(3)水泥掺量在 6%~10% 的范围内,均能满足设计承载力要求,工后沉降在可控范围内;相同条件下,上述掺量范围内的水泥掺量越多,固化土的强度越高,处治后的地基承载力越高。

(4)无论是边桩测点的水平位移、竖向位移,还是沉降板测点的竖向位移,均表明通过 S-TRD 工法机施工 4~8 m 的深层就地固化,其工后沉降速率能够满足设计要求。

参考文献:

- [1] 徐亮,唐彤芝,白兰兰,等.就地固化技术处理浅层软土的应用及机理研究[J].水利水运工程学报,2021(2):109-116.
- [2] 赖俊庭.软土就地固化技术在红旗河堤防工程中的应用[J].建筑安全,2022,37(5):15-17.
- [3] 王海苗,郑先奇.深厚层淤泥浅表层就地固化施工技术应用[J].四川建筑,2021,41(2):231-234.
- [4] 郑重.就地固化技术处理道路软基的施工研究[J].区域治理,2019(10):215-216.
- [5] 陈辉.水泥土搅拌桩在地基加固处理中的应用[J].建筑工程技术与设计,2016(27):933-934.
- [6] 李新.水泥搅拌桩施工技术浅谈[J].建材与装饰:下旬,2011(3):132-133.
- [7] 华正阳.深基坑开挖对近距离建筑的安全影响研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [8] 王彦辉.水泥搅拌桩在软土路基处理中的应用[J].交通世界(运输·车辆),2013(9):175-176.
- [9] 张平.浅谈高速公路软弱地基处理设计[J].城市建设理论研究(电子版),2012(34):24-26.
- [10] 李士敏,肖滨,高德强.CFG 桩在软土地基深层处治中的应用[J].哈尔滨职业技术学院学报,2011(3):119-120.
- [11] 刘卓.淤泥质渣土固化技术及其路用性能研究[D].西安:长安大学,2022.

(上接第 310 页)

- [7] 王庆菲.SMA 智能混凝土的裂缝监测与自修复理论研究[D].天津:中国民航大学,2019.
- [8] 张亚楠,李军超,王庆菲,等.SMA 智能混凝土材料裂缝监测与修复机理和试验研究[J].固体力学学报,2020,41(2):170-181.
- [9] 郭殿军.混凝土梁桥自监测裂缝自闭合试验研究[J].四川建筑科学研究,2013,39(1):89-91.
- [10] 狄生奎.基于动力参数的损伤识别及嵌入 SMA 的钢筋砼结构自监测与自修复研究[D].兰州:兰州理工大学,2011.
- [11] 谢恩连.基于智能材料吊杆安全实时监测与远程报警技术研究[Z].2020.
- [12] 李惠.土木工程结构智能监测与控制的形状记忆合金(SMA)系统

- [Z].2009.
- [13] 狄生奎,韩全治,李慧,等.SMA 在结构健康监测中的应用研究[J].低温建筑技术,2008(4):58-60.
- [14] 韩全治.SMA 复合混凝土梁智能自监测自修复试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2008.
- [15] 狄生奎,李慧,杜永峰,等.SMA 混凝土梁的裂缝监测及自修复[J].建筑材料学报,2009,12(1):27-31.
- [16] 邓国民.形状记忆合金材料对 OGFC 性能和变形恢复影响的研究[J].上海公路,2017(4):86-88;93.
- [17] 许严.温度对应用形状记忆合金沥青混凝土的力学性能测试研究[J].上海建设科技,2018(6):49-53.