

WSS 注浆在市政道路地基处理中的应用

刘 东

(上海市政工程设计研究总院集团浙江市政设计院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘 要: WSS 注浆较普通地基处理方式具有诸多优点, 应用领域愈加广泛。现依托绍兴市某市政道路地基处理实际工程, 从注浆材料选择与配比, 注浆压力、施工工艺等方面对 WSS 注浆设计及施工关键参数进行了探讨。其成果可为类似工程地基处理提供一定的参考。

关键词: 无收缩双液注浆; WSS 注浆; 注浆压力; 地基加固

中图分类号: TU472

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)12-0228-05

0 引 言

注浆是工程中常用的一种地基处理方法。该工艺最早使用时间可追溯到 1802 年, 已有两百多年历史。WSS 注浆是指无收缩双液注浆, 是注浆技术的一种。近年来, 该工艺在地铁加固及止水工程中得到广泛使用, 并积累了丰富的工程经验。但是, 在市政工程不良地基处理中应用案例相对较少。

绍兴某市政道路局部路段地下水位较高, 地质条件较差, 存在孔洞。综合考虑加固效果、施工工期、经济性等因素, 采用 WSS 注浆处理。依托该工程实例, 从原理及特点、注浆效果评价、关键参数及施工工序等方面, 对 WSS 注浆在市政道路不良地基处理中的设计及施工要点进行了分析和探讨。其成果可为类似工程提供参考。

1 基本原理及特点

从力学角度, 软土中的注浆体主要有渗透、挤压、劈裂和填充四种运动。在土体中注浆往往都会在注浆孔附近产生劈裂现象, 即便是一些渗透注浆的工程, 往往也伴有劈裂。只有当产生劈裂现象时, 才能使浆液更有效地渗透到土体中。从这个意义上讲, 渗透和压密都可以看成劈裂现象的前期阶段。

对于该工程 WSS 注浆, 在注浆过程中, 处于出浆孔附近的浆液随着浆液的注入不断扩大, 压力逐渐增大, 部分浆液会渗入到土体孔隙内, 填充到较大的空隙中。当压力增大到一定程度, 土层软弱结构

面发生劈裂, 浆液沿破坏面前进、扩散。

外部注浆压力将会导致土体中有效应力减小, 此时最大、最小有效主应力 $\sigma'_1 = \sigma_1 - \gamma_w h_w - P$, $\sigma'_3 = \sigma_3 - \gamma_w h_w - P$ 。其中: σ_1 为最大总主应力, σ_3 为最小总主应力, h_w 为地下水位高度, γ_w 为水的重度, P 为注浆压力。随着注浆压力 P 增大, 有效摩尔应力圆半径不变, 圆心位置向破坏包线方向平移, 当圆与破坏包线相切时, 表明土体已经发生劈裂(见图 1)。

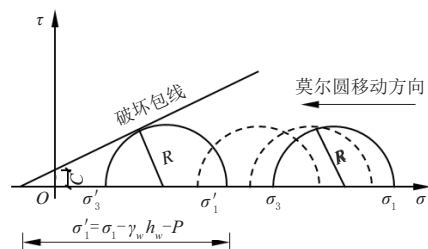


图 1 极限条件示意图

WSS 注浆采用的浆液材料有三种, 分别为 A 液($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, 俗称水玻璃)、B 液(凝胶剂及外加剂)和 C 液(水泥浆)。A 液先后与 B 液、C 液通过二重管端头的浆液混合器充分混合, 分别合成溶液型浆液(水玻璃与凝胶剂及外加剂组成, 简称 AB 液)、悬浊型浆液(水玻璃与水泥浆组成, 简称 AC 液)。其原理是在不改变地层组成的情况下, 先通过 AB 液将土层颗粒间的水强迫挤出, 再利用 AC 液使该土层粘结力和内摩擦角值增大, 从而使地层粘结强度及密实度增加, 起到加固作用; 颗粒间隙中充满了不流动而且固结的浆液后, 使土层透水性降低, 从而形成相对隔水层^[1]。

二重管无收缩双液注浆主要有以下特点^[2-3]:

(1) 能够实现定向、定量、定压注浆, 渗透力强。

收稿日期: 2022-02-25

作者简介: 刘东(1990—), 男, 工学硕士, 工程师, 从事道路交通设计工作。

(2) 注浆范围和凝结时间可根据实际工程需要灵活调整,工程适应性强。

(3) 二重管端头配备浆液混合器,可使浆液混合充分且均匀。

(4) 可实现垂直注浆、水平注浆、倾斜注浆等自由角度的注浆。

(5) 注浆材料选择较多,材料来源广泛。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

绍兴某市政道路,其等级为城市快速路,总长度约 6.2 km,主线采用高架形式,辅道采用地面形式,主线为双向六车道,辅道为双向四车道,标准横断面布置见图 2 所示。

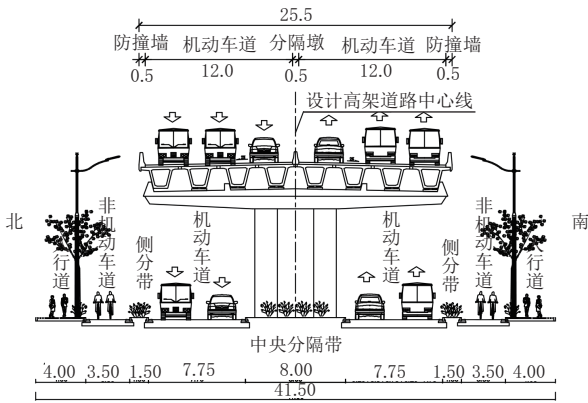


图 2 高架标准横断面布置图(单位:m)

2.2 地质及水文概况

自上而下,场地土层分布情况如下:

(1) 素填土:灰~灰黄色为主,松散~稍密状,主要由块石、碎石、砂和黏性土组成,骨料成分为中~微风化凝灰岩,上部 0.2 m 沥青层,河道部位为淤泥混碎石,均匀性较差。该层全场分布,层厚约 0.3 ~ 6.3 m。

(2) 黏土层:灰色,软塑状,高压缩性。含有较多有机质及泥碳,成份以粉、粘粒为主,局部变相为淤泥质粉质黏土或粉质黏土,土质均匀性差。该层为全新统滨海组上段湖沼相沉积,主要有粘土层、粉质黏土层、含砾砂粉质黏土。层厚约 0.2 ~ 7.8 m。

(3) 淤泥质黏土:灰色,流塑状,高压缩性。含少量有机质,成份以粉、粘粒为主,局部变相为淤泥或淤泥质粉质黏土,土质均匀性尚可。该层为全新统滨海组上段湖沼相沉积土层。该层局部缺失,层厚约 0.9 ~ 24.6 m。

(4) 凝灰质砂岩:黄褐~紫灰色,极软岩,风化裂隙很发育,成份主要由长石、石英和微量金属矿物被

火山灰胶结而成,砂状结构,厚层状构造,岩体破碎,呈碎块状,为白垩系下统朝川组风化基岩,风化程度为中~强风化。该层分布场地东侧,层厚 0.2 ~ 20 m。

该区域地下水可以分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水,可分为三层,

(1) 全新统上段湖沼相粉质黏土,黏质粉土含水组,含水岩性为灰黄~黄灰色,厚度约 2.5 ~ 19.5 m 左右,水位埋深 0.2 ~ 3.2 m,含水极为丰富,透水性较好。

(2) 上更新统冲湖积、冲积空隙承压含水层,上部为薄层~中厚层的粉质黏土,黏土层,下部为粉砂、含黏性土砂砾层,厚约 2.4 ~ 14.6 m,水位埋深约 4.6 ~ 5.2 m。含水性受下部粉砂、含黏性土砾砂层的厚度和分布范围控制,微承压,水量中等,透水性一般。

(3) 基岩裂隙水,由风化带网状裂隙水组成,富水性主要有岩性,地形地貌,风化程度,风化带厚度及地表植被发育程度等因素决定。

该路段典型地质剖面图如图 3 所示。

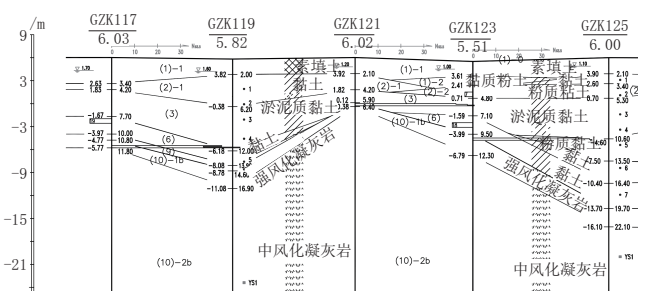


图 3 典型地质剖面图

2.3 特殊路段物探

局部路段(长度约 300 m)地质情况较为复杂,地下水位埋深较浅。该路段西侧与南侧均临河,地下多为原道路回填的大体积块石,探明其集配不良,在渗流作用下,块石间细颗粒流失,导致此处地下土体逐渐发展形成空洞。

针对此特殊情况,对该区域进行了进一步探测。根据现场实际情况,共布置完成地质雷达测线 5 条,高密度电阻率法剖面 4 条。

地质雷达法测线编号为 LD1~LD5,测线长度均为 350 m,高密度电阻率法测线编号为 1 线~4 线,测线长度均为 350 m,测线统计详见表 1 所列。

根据地质雷达探测结果,结合现场勘查及地质勘查资料分析,共圈定 21 处剖面病害异常,总长 1 025 延米,划分为 14 处病害异常区域,病害相关性较强。异常区域主要集中于道路两侧,主要以疏松

表 1 物探测线统计表

序号	工作方法	测线编号	测线长度 /m	合计 /m
1	地质雷达法	LD1	350	1 750
2		LD2	350	
3		LD3	350	
4		LD4	350	
5		LD5	350	
6	高密度电阻率法	1 线	350	1 400
7		2 线	350	
8		3 线	350	
9		4 线	350	

区、空洞为主。其中,较为严重的疏松区域,路基含水量高,内部空洞、不密实情况较为发育。病害情况统计见表 2 所列。

表 2 病害情况统计表

序号	测线编号	病害里程	病害类型	病害长度 /m	病害深度 /cm
1	LD1	15 ~ 35	中等疏松区	20	1.5 ~ 13
2	LD1	50 ~ 75	严重疏松区	25	2 ~ 15
3	LD1	95 ~ 105	中等疏松区	10	3.5 ~ 14
4	LD1	120 ~ 130	严重疏松区	10	2.6 ~ 15
5	LD1	160 ~ 290	严重疏松区	130	1.6 ~ 16
6	LD1	300 ~ 350	严重疏松区	50	1.5 ~ 16
7	LD2	5 ~ 55	严重疏松区	50	1.5 ~ 15
8	LD2	60 ~ 70	空洞	10	9 ~ 14
9	LD2	70 ~ 80	严重疏松区	10	5 ~ 15
10	LD2	150 ~ 260	严重疏松区	110	3 ~ 16
11	LD2	280 ~ 340	严重疏松区	20	5 ~ 16
12	LD3	5 ~ 30	中等疏松区	25	4 ~ 11
13	LD3	60 ~ 170	严重疏松区	110	3 ~ 15
14	LD3	220 ~ 250	严重疏松区	30	3.8 ~ 16
15	LD3	305 ~ 345	严重疏松区	40	4.6 ~ 15
16	LD4	60 ~ 140	中等疏松区	80	6 ~ 11
17	LD4	180 ~ 330	严重疏松区	150	4.5 ~ 13
18	LD5	20 ~ 80	中等疏松区	60	4 ~ 13
19	LD5	140 ~ 170	严重疏松区	30	4 ~ 15
20	LD5	185 ~ 210	严重疏松区	25	3.7 ~ 13
21	LD5	320 ~ 350	严重疏松区	30	4 ~ 15

测线及病害分布位置见图 4 所示。

通过分析地质雷达剖面图及高密度视电阻率断面图,结合场地工程地质勘察资料,探测结论如下;该路段路基回填土压实度不够,原状土层较为疏松,中间抛石较多,孔隙较大;道路南侧临河,地下水位呈两侧高中间低的特征;路基土体富水性较强,易形成软路基,土体粘性颗粒在水力作用下发生移动,使土体疏松程度加剧,造成路基土颗粒流失,路基上部

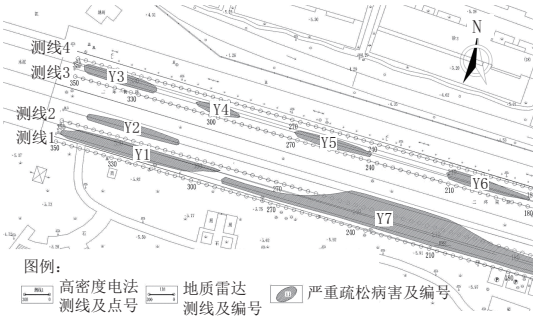


图 4 物探综合平面成果图

逐渐发展为空洞,较易发生坍塌、冒落现象,导致路基承载力降低。

2.4 处理方案

因篇幅限制,为了简明扼要阐述依托工程 WSS 注浆处理思路,方案介绍时进行适当简化处理。

由于病害数量较多,较为分散,为保证路基整体稳定性,考虑该路段全局处理。根据物探及检测报告,需要采取止水措施以防止渗流作用下继续发生土颗粒的流失。同时,需对土体进行加固以满足地基承载力要求。综合前文所述 WSS 注浆主要优点,考虑采用 WSS 注浆对该地质不良区域进行处理。对地质不良中心区域采用普通注浆,正三角形布桩,设计注浆孔扩散半径 0.4 m,注浆孔间距 2 m,桩长 6 m(桩长由地基承载力及变形要求控制);四周采用 WSS 注浆,为双排咬合桩,设计注浆孔扩散半径 1.0 m,注浆孔间距 1.6 m,平均桩长 10 m(穿透淤泥质黏土层),主要作用是形成止水墙,延长渗流路径,同时有效地减少中间区域注浆过程中的漏浆。

图 5 为地基处理平面设计图,图 6 为简化后 WSS 注浆平面布置示意图。

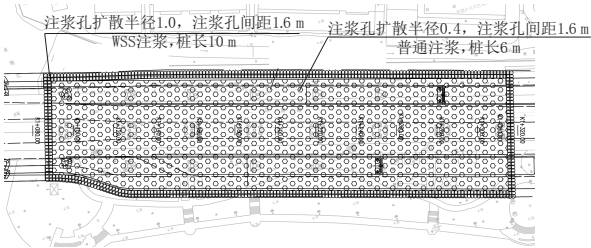


图 5 地基处理平面设计图

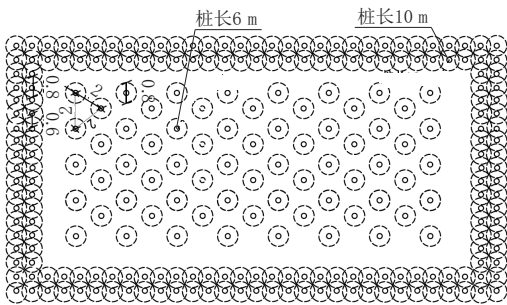


图 6 WSS 注浆平面布置示意图(单位:m)

3 质量检验标准

依托工程采用WSS注浆进行地基处理,主要目的在于提高地基承载力和降低土体渗透系数。因此,要求处理范围内选取不少于3点进行复合地基静载荷试验,应满足复合地基承载力 ≥ 90 kPa;同时,要求选取注浆孔总数的5%~10%进行压水试验,渗透系数要求 $\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s。

现场测试复合地基承载力可达到设计强度,经压水试验测得的渗透系数小于设计要求值。同时,通过随机选定加固区域直接开挖,观察浆液充填情况。图7为注浆后现场之实景。利用公式(1)反算浆液填充率。反算出的浆液充填率大于85%。

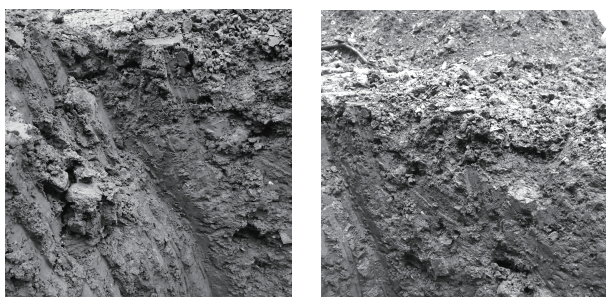


图7 注浆后现场实景(开挖后)

$$\alpha = \frac{Q}{nV(1+\beta)} \quad (1)$$

式中: Q 为现场实际注入的总浆液量, V 为加固土体体积, n 为孔隙率, α 为浆液填充率, β 为浆液损失率。

4 关键参数分析

材料选择与配比,注浆压力,注浆孔布置及扩散半径等均是影响地基处理效果的关键因素。

4.1 材料的选择与配比

浆液中的外加剂一方面改良浆液,增强浆液的可注入性;另一方面降低浆液凝固后的收缩性,确保注浆和止水效果^[4]。

溶液型浆液(AB液)加固后的土体的强度较低,但驱水效果好。结合工程经验及现场试验,水玻璃与磷酸体积比为30:1(磷酸浓度为85%),效果较好。悬浊型浆液(AC液)主要起加固作用,浊型浆液(AC液)性能取决于水泥浆水灰比,水玻璃模数值,浆液养护条件。浊型浆液中,水玻璃与水泥浆体积比为1:1,水泥浆水灰比1:1,加固土体效果较好。水玻璃的模数值是二氧化硅与氧化钠百分百分率之比, SiO_2 对土起到的胶结作用。试验研究表明,模数值 $\leq$

1时,水玻璃加固土强度很小,不适合加固土的要求,1<模数值 ≤ 3.3 时,加固土的强度随着模数值的增大而提高,当模数值 > 3.3 时,加固土的强度随着模数值的增大反而降低^[5]。因此,水玻璃模数值范围宜为1~3.3。

4.2 注浆压力

注浆压力是注浆施工中的重要参数,注浆压力对施工质量,以及工程造价具有直接的影响。

劈裂注浆压力理论公式如下:

$$P = \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)(1+K)}{2} - \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)(1+K)}{2 \sin \varphi'} + c' \cos \varphi \quad (2)$$

式中: γ 为土的重度; h 为注浆段高度; K 为主应力比; c' 为有效粘聚力; φ 为内摩擦角; φ' 为有效内摩擦角。

实际工程中,按照公式(2)计算注浆压力所需要的参数往往难以准确获得,注浆压力目前较多依靠工程经验确定,初步设计阶段注浆压力可通过以下计算方法确定。

假设注浆孔底部埋深为 H ,地下水埋深为 h_1 ,孔底静水压力计算公式如下:

$$u = r_w \cdot (H - h_1) \quad (3)$$

设计注浆压力(终压值) $P_{\max}$ 一般为静水压力的2~3倍,最大可达到3~5倍^[6],即:

$$(2 \sim 3)u \leq P_{\max} \leq (3 \sim 5)u$$

4.3 扩散半径

对于WSS扩散半径相关规范中未给出明确的计算公式或取值范围。扩散半径与注浆压力、浆液浓度、地层的渗透系数等多个参数有关。结合工程经验,WSS浆液扩散一般取值范围为1.0~1.2 m。

4.4 施工工序

首先设备定位,然后进行钻孔,同步进行浆液制备。先注入溶液型浆液,达到要求注浆压力并持续一段时间,判断钻杆外是否有水溢出,以确定是否可以开始注入悬浊型浆液。注入悬浊型浆液过程中观察是否有冒浆、窜浆等异常情况,若出现异常需查明原因后重新注浆。主要施工工序见图8所示。

5 结 语

WSS注浆具有较强的工程适用性,通过合理确定浆液材料配合比、注浆压力及扩散半径等关键参数,采用该工艺可有效填充地基内部空隙,明显降低

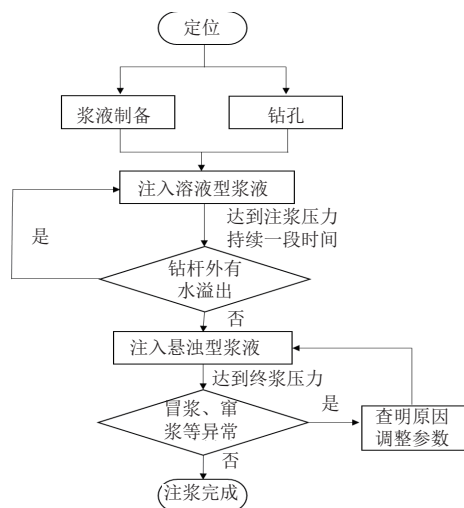


图 8 WSS 注浆施工工序图

土体渗透系数，在地基加固和止水方面可取得较好的效果。

参考文献：

[1] 康佐.西安地铁盾构端头加固技术综合分析[J].大连大学学报,2011,32(3):66-71.

[2] 王磊,黄书敏.超前注浆技术在过街通道工程中的应用[J].城市道桥与防洪,2007(9):107-110,211.

[3] 喻栓旗.城市立交泵站扩容改造时的深基坑围护施工技术[J].城市道桥与防洪,2013(5):172-175,8.

[4] 李昌友.淤泥质地层地下通道暗挖施工风险分析与地层加固研究[D].长沙:中南大学,2014.

[5] 工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[6] 孙明彪.宜万铁路野三关隧道 602 溶腔处治[J].现代隧道技术,2010,47(1):91-98.

(上接第 207 页)

污染规律研究[J].生态环境学报,2020,29(8):1634-1644.

[3] 曾思育,董欣.城市降雨径流污染控制技术的发展与实践[J].给水排水,2015,51(10):1-3.

[4] GB 50014—2021,室外排水设计标准[S].

[5] 项宁,李连文,詹健,等.模型分析下的汇水区划分方式对水文模拟结果的影响研究[J].中国农村水利水电,2020(4):87-91.

[6] 陈思颢.基于 SWMM 的 LID 与雨水调蓄池联合运行方案功效研究[D].重庆:重庆大学,2017.

[7] 刘兴坡,王志强,李璟.基于 BP 神经网络的 SWMM 参数全局灵敏度分析方法[J].中国给水排水,2021,37(9):122-129.

[8] 杨鹏. SWMM 模型在城市小流域降雨径流面源污染中的应用研究[D].武汉:华中科技大学,2017.

[9] 焦春蛟.北方沿海城市居民区径流污染及内涝研究与控制[D].青岛:青岛理工大学,2019.

[10] 李连文,刘加强.基于 SWMM 的调蓄池对城市面源污染削减作用研究[J].水电能源技术,2022,10(40):57-61.

[11] 刘文波.基于水质目标的雨水径流污染控制研究[D].西安:西安理工大学,2020.

[12] 丁玥.基于遥感和 HYSWMM 的城市地表径流与面源污染及 LID 控制效果模拟研究[D].青岛:青岛理工大学,2021.