

# 地下水渗流下大断面黄土地铁隧道 浅埋暗挖施工技术研究

牛婷婷

中铁二十局集团南方工程有限公司

**摘要:**为保证大断面黄土地铁隧道在地下水渗流工况下的暗挖施工安全,避免破坏周边环境,以西安6号线地铁某浅埋暗挖区间工程为研究背景,在研究地下水渗流作用下黄土变形机理的基础上,综合分析过往工程现场经验,指出隧道暗挖施工引起周边环境破坏的安全风险,提出进一步采用WSS全断面工法注浆止水措施,设计注浆方案,重点探讨注浆浆液配比,深入研究大断面黄土隧道暗挖施工注浆技术。施工实践表明:WSS全断面注浆技术可以很好地应用于存在地下水渗流情况的大断面黄土隧道工程。

**关键词:**黄土地层;大断面地铁隧道;浅埋暗挖;渗流作用;WSS全断面注浆

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.23.053

## 引言

近年来在黄土地区修建隧道,经常会出现周边环境的破坏情况,比如肉眼可见的变形,甚至地表沉降和建筑倾斜,各式各样的小问题也层出不穷。水分是影响黄土性质和工程安全的关键因素之一。通过分析不同空间、不同时间、不同方法黄土含水率测试结果,得到渗流变化情况下软塑黄土含水率时空变化规律。降水在保证城市地铁隧道工程施工自身安全的重要措施,但降水引起的周边建筑出现过大大沉降及破坏的风险不容忽视。因此,十分有必要对产生的地下水渗流工况下大断面黄土隧道浅埋暗挖施工展开研究,保证地铁隧道施工安全,避免破坏周边环境。

基于此,本文依托于西安地铁六号线暗挖工程,分析黄土在地下水渗流作用下的变形机理,并指出地表降水对周边环境造成的影响,提出应对措施,围绕WSS全断面注浆加固技术展开研究,提出一些对类似浅埋暗挖隧道施工具有参考价值的结论。

## 一、工程概况

### (一)工程简介

以西安地铁6号线某区间暗挖段为例,该区间采用盾构法施工+浅埋暗挖法施工,其中左线区间843.999m采用浅埋暗挖法施工。

### (二)工程地质概况

拟建场地区间的地貌单元属黄土梁洼地带,二三级冲湖积台地,地形基本东高西低。根据设计勘察地层岩性,本区间地层自上而下为:人工填土;上更新统风积新黄土、残积古土壤、洪积粉质黏土;中更新统风积老黄土、冲积粉质黏土及砂类土等。

### (三)水文地质概况

#### (1)第四系孔隙潜水

地下水属潜水类型,地下水位埋藏较浅,水位埋深为9.20~14.70m,高程为390.25~397.42m。

#### (2)含水层与隔水层的分布

该区间场地潜水赋存于上更新统粉质黏土层及其中的砂层夹层中。

#### (3)潜水的补给、径流及流速

地下水补给主要为区外径流补给;区间场地地下水宏观流向与地形总体坡度一致,主要流向为由东南流向西北流向。地下水流速约5.00m/d。

此外,拟建场地地下水还具有弱腐蚀性。

#### (四)地表降水措施

暗挖区间降水为隧道结构外侧地面降水井点降水,提前降水时间为15天,水位降至隧道底板以下1.0m,降水井中心距结构外边缘不小于5m。考虑现场地质条件、地下水位变化以及拟建项目结构和施工条件,根据计算结果和施工经验,在竖井及横通道布置18口,左线暗挖隧道布置26口,右线暗挖隧道布置12口,因中间涉及共用降水井,所以钟楼站~大差市站盾构区间(暗挖段)降水井总数量共计49口,采用开槽暗埋敷设方式连接到就近市政雨水井进行排水。

## 二、地下水渗流作用下黄土变形机理分析

### (一)渗流场的产生及影响

地表降水无疑会引起地铁隧道内外出现水头差,进而产生地下水渗流,在隧道周围形成复杂的渗流场。由于渗流场的动态变化,以及与应力场的相互作用,共同使得黄土土体发生渗流。因渗流而引起的物理力学作用和化学作用等进一步导致黄土抗剪强度等出现变化。

### (二)黄土在渗流作用下的力学行为

无渗流作用时,黄土在剪切中需要克服内摩擦角和颗粒之间的黏聚力。渗流对土体的物理力学作用主要体现在改变土体中孔隙压力分布,无渗流作用时土体中孔隙水压力的波动相对较小,随着渗透作用的施加,孔隙水压力波动幅度开始增大。

有渗流作用时,黄土中颗粒在渗流水下其不连续面的摩阻力会减小。不仅如此,其颗粒间的离子交换作用也改变了黄土的孔隙结构以及渗透性,从而使得黄土强度降低。水的作用带走了黏土团粒之间的盐分,改变了胶结物结构,因此也降低了黄土的黏聚力。

相关研究表明,黄土在渗透作用下,明显降低了黄土的强度,尤其是黄土黏聚力降低,其降幅达5.24%~63.35%错误!未找到引用源。

### 三、地表降水下的周边环境破坏风险分析

在繁华城市地带修建地铁隧道,保证周边环境的安全是重中之重。在地下水的影响下,采取降水措施,是业内常见的保障隧道施工自身结构安全的有效措施。然而,在黄土地区修建地铁,需深刻意识到黄土在受到地下水长期作用下,由上一章节可知,黄土大孔隙特征使得其对水具有强烈的敏感,极易出现较大变形。因此当采取

降水及开挖时，在修建的区间沿线周边地表极有可能快速出现大幅度的沉降，甚至地表塌陷。总的来说，在此工况下会对周边环境设施造成较大威胁。地表变形风险在繁华的城市地带发生，是难以接受的，必然会对周边建构物或者管线造成不利影响，甚至不可逆的破坏。

钟楼站~大差市站区间为浅埋暗挖工程，设计要求在黄土地区应满足无水施工。根据西安地区黄土层降水经验，并结合地表降水沉降计算，降水影响范围广、沉降值大。降水引起地面沉降导致的后果无法预估，存在安全风险。钟楼站~大差市站区间段右线隧道距离建筑物较近，并且地下涉及的管线密集，施工降水井较为困难，因此提出WSS全断面注浆止水措施。

**四、WSS全断面注浆加固技术**

通过对目前业内出现的前进式孔口管、袖阀管、WSS工法、后退式双液注浆（TSS）工法的四类常用的注浆工艺的特点及优、缺点进行详细分析。

结合上述几种常用注浆工艺，经过一番研究和分析，认为WSS全断面注浆加固技术可采用超前小导管+二重管注浆联合的方式止水加固。

超前注浆小导管采用φ42钢焊管，t=3.5mm，L=3/3.5m，纵向间距1/1.5m，外插角10~30°左右，环向间距400mm，拱部150°范围布设，注水泥-水玻璃双液浆，浆液比例1:1。在隧道拱部插打，管前端制为尖头，尾端采用加强箍，管身布满泄浆孔，其中风镐顶入施工方法具体为：将小导管前端加工成尖锥形，人工配合风镐将小导管顶入土体，导管尾部与格栅钢架焊接在一起。小导管的注浆从两边朝着中间行进，从下到上逐孔进行，如有必要可采用间隔注浆。

**(一) WSS全断面注浆止水原理**

通过注浆增大土层的黏结力和内摩擦角，降低透水性，从而形成相对隔水层。注浆加固后土体渗透系数小于1×10<sup>-6</sup>cm/s。

**(二) 注浆方案设计**

WSS全断面注浆管间距为600×600mm，钟楼站~大差市站盾构区间（暗挖段）两端出车站端头约150m采用止水模式，10~15m一个循环，预留2m止水墙，采用洞内辐射程控注浆工艺，浆液采用AC、AB组合浆液。

注浆浆液采用注WSS工法AC液和少量化学浆液AB液，回抽注浆过程中采用两种浆液，AB、AC液交替使用。

结合现场实际情况选择适宜的悬浊型浆液（A、C液组成）（备注：A液为硅酸钠溶液，B液为Gs、P、H、C剂及水等组合液，C液为水泥、外加剂、水等组合液）或溶液型浆液（A、B液组成），根据现场实际地质条件调整配合比及比例。注浆孔直径可取42mm，扩散半径建议值为1m，注浆压力建议值为0.3~1Mpa，具体参数应根据试验结果调整，保证加固效果满足矿山法开挖要求。

**(三) 注浆浆液配比**

**1. 注浆浆液材料特性**

注浆浆液具体特点表现为渗透性好、固化时间易调整，注浆液强度高；地层中有流动流水的情况下也具有很高的固结性能，且不会引起污染等等。

注浆浆液的采用分为超高强度型的CW-3A，高强度型的CW-3B，普通型的CW-3C。

**2. 浆液试验配比**

WSS全断面注浆浆液试验配比详见表3。

**表1 WSS全断面注浆浆液试验配比**

名称	内容	密度	体积 (L)	质量 (kg)	备注
A液	硅酸钠（水玻璃）	200kg			500L
	稀释剂				
C液	水泥	200kg			500L
	H剂	ρ=1	31.18	31.18	
	C剂	ρ=1.45	10.34	15	
	P剂（XPM）	ρ=1	26	26	
	稀释剂	ρ=1	232.48	232.48	
B液	H剂	ρ=1	69.8	69.8	500L
	C剂	ρ=1.45	38.28	55.5	
	Gs剂	ρ=1	78.5	78.5	
	稀释剂	ρ=1	313.42	313.42	

注浆材料为AB液（水玻璃-磷酸）、AC液（水玻璃-水泥浆）。水玻璃模数2.6，水泥为P.042.5普通硅酸盐水泥。

其中各项体积比为水玻璃/磷酸17:1，水玻璃/水泥浆1:1，水泥浆水灰比1:1（重量比）。

**(1) 一般选用浆液配比**

AB混合液中水玻璃：磷酸（体积比）=17:1；AC混合液中水玻璃：水泥浆（体积比）=1:1；水泥浆液水灰比水：水泥（重量比）=1:1；AC液的凝结时间一般选45s。

**(2) 特殊情况调整的浆液配比**

调整原则：结合进浆量和注浆压力等指标的具体变化情况，对应时刻变化浆液配比。当注浆压力在一定时间周期内未发生变化，且注浆量一直保持较大数值，应考虑调高AC液（水玻璃-水泥浆）中的前者，实现减少凝结时间，接着再提高水玻璃-水泥浆液中的后者。

**3. 浆液注浆终压**

**(1) AB浆液**

根据WSS无收缩注浆原理可知，AB液（水玻璃-磷酸）注浆是把土与土之间颗粒内的水主动排出，并将浆液填充进去完成固结。通过联系现场实际情况，最终确定AB液（水玻璃-磷酸）的注浆终压为1.7MPa。

**(2) AC浆液**

一般来说AC浆液注浆终压按照地下水静水压力的两到三倍计算，最大为三五倍。

**(四) 计算注浆量**

浆液注浆量的确定受注浆扩散的半径以及土体空隙影响，但这两项一般难以明确，因此一般来说，都是结合现场实际情况以及注浆材料综合估算，计算公式如下：

$$Q = An \alpha (1 + \beta)$$

式中：Q为注浆总量，（m<sup>3</sup>）；A为注浆范围体积，（m<sup>3</sup>）；n：孔隙率，%；α：浆液填充系数（0.7~0.9）；β：注浆材料损耗系数。

公式中nα（1+β）统称为填充率，根据实际现场地质条件查表确定填充率按30~40确定。

**(五) 注浆参数**

最终确定注浆加固参数，具体详见下表。

表2 注浆加固参数表

序号	参数名称	设定参数
1	注浆压力	1.0MPa
2	每米注浆量	0.94m <sup>3</sup>
3	扩散半径	1m
4	注浆分段长度	0.3m
5	注浆速度	10L/min
6	施工顺序	先后后外, 先上后下

以上参数在注浆结束后必须保证注浆压力达到1.0MPa且每米注浆量达0.94m<sup>3</sup>方可停止注浆。

(六) 施工工艺

钻孔完毕后, 先注AB浆液, 待钻杆外壁无流水溢出, 即可停注AB液, 再注AC浆液, 在终浆压力下, 注浆压力骤升后, 该孔注浆即可完毕, 可移至下一个注浆孔位钻注作业。WSS全断面注浆施工工艺流程图如图1所示。

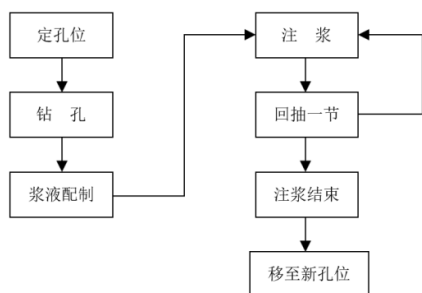
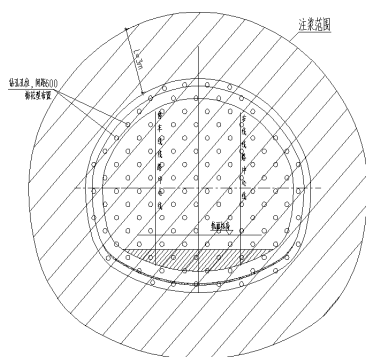


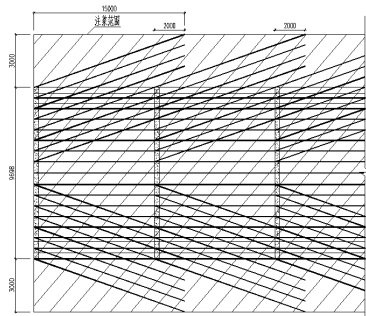
图1 WSS全断面注浆施工工艺流程图

(1) 定孔位

按照设计图纸的要求, 先放样, 再钻孔。其中钻孔需采用不同的入射角度, 并且偏差应≤1°, 孔位的误差不超过3cm, 注浆孔断面布置图详见图2。待钻机移动到规划位置后, 再调整钻杆。



(a) 注浆孔横断面布置图



(b) 注浆孔纵断面布置图

图2 注浆孔断面布置图

(2) 钻孔

当钻第1个孔时, 需先试探性以较慢的速度运行, 以了解地层对钻机的适应程度, 再进一步确定钻进参数。在钻孔的时候应实时注意出水的情况, 必要时可立即停钻, 采取相应措施缓解后再继续开钻。值得注意的是在匀速回抽钻杆时, 应注意提升幅度, 不超过15-20cm。

(3) 浆液配比及注浆控制

借助计量工具, 现场应严格按照浆液配比配料。注浆孔直径42mm, 在注浆时应实时注意注浆量, 同步控制调整注浆压力, 当其骤然上升或是出现浆液溢出时, 应立即停止, 并立刻找出原因采取应对措施, 如调整参数或是移动位置等等。

五、现场监测分析

本次主要从地表沉降和拱顶沉降2个监测指标展开分析, 评价WSS工法注浆止水加固土体效果。现场实测数据表明, 地表沉降监测累计最大沉降值未超过监测预警值为21mm, 拱顶沉降累计峰值也未超过规范允许值30mm。

由此可见, 提出的采用超前小导管+二重管注浆联合的方式止水加固的技术措施, 有效加固了黄土地层, 并降低了隧道结构自身的拱顶沉降以及周边环境的地表沉降, 各项数据累计最大值均未超过规范限值, 保障了暗挖施工及周边环境的安全。

六、结论

通过分析地下水渗流作用下黄土变形机理, 指出地表降水对周边环境破坏的风险性, 基于此提出进一步采用洞内注浆止水措施, 从WSS工法注浆机理出发, 设计注浆方案, 结合现场实测分析, 在西安市地铁富水黄土暗挖隧道中成功应用。工程实践表明, 提出的WSS工法注浆切实有效, 相关实测数据表明隧道结构及周边环境变化均在合理范围内。WSS全断面注浆技术可以很好地应用于存在地下水渗流情况的大断面黄土隧道工程, 成功保障了周边建筑物安全以及降低了对周边地面交通的不利影响, 社会效益客观, 积累的施工经验可供后续类似工程参考。

参考文献

[1] 沈安乐. 湿陷性黄土地区城市大断面浅埋暗挖隧道双侧壁导坑法施工技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(S2): 196-200+203.

[2] 樊纯坛, 梁庆国, 房志群等. 施工方法对黄土隧道围岩结构相互作用的影响[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(11): 81-87.

[3] 张晓宇, 毕焕军, 曹峰等. 渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(04): 41-47.

[4] 赵永虎, 罗浩洋, 苗学云, 等. 黄土隧道围岩含水率变化及拱架受力特征研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(4): 128-131.

[5] 范增国, 冯超, 杨团军. WSS工法注浆止水在富水黄土隧道中的应用[J]. 中国铁路, 2011(03): 69-7

作者简介: 牛婷婷, 1986.07, 女, 山西长治, 汉, 工程师, 研究方向: 地铁施工、公路施工, 科室: 工程技术管理部, 学历本科。