

富水砂卵石地层盾构施工滞后沉降成因及 处置措施研究

陈 云

(中铁十七局集团市政建设有限公司, 江苏 无锡 214111)

摘 要: 成都地区已完工隧道工程实践证明, 只要对滞后沉降未给予足够认识和充分重视, 且发现异常后未及时采取措施, 必然会造成滞后沉降, 从而引发地表塌陷事故。为解决盾构施工造成地层滞后沉降所引起的地表塌陷问题, 结合在成都富水砂卵石地层地铁施工的盾构法施工案例, 通过分析产生滞后沉降的原因, 并借鉴以往工程施工经验, 提出了富水砂卵石地层滞后沉降排查和处置措施, 并进行了实际应用, 有效避免了滞后沉降造成的地面塌陷。

关键词: 富水砂卵石地层; 滞后沉降; 地面塌陷

中图分类号: U458

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0316-04

Research on Causes and Disposal Measures of Lagging Settlement during Shield Construction in Water-rich Sandy Gravel Strata

CHNE Yun

(R17BG Municipal Construction Co., Ltd., Wuxi 214111, China)

Abstract: The practice of completed tunnel projects in Chengdu has proved that if the sufficient recognition and attention are not given to lagging settlement, and timely measures are not taken upon discovering anomalies, it will inevitably lead to lagging settlement so as to trigger surface collapse accidents. To address the issue of surface collapse caused by lagging settlement in the strata resulting from shield construction, combined with a case study of shield method construction in the water-rich sandy gravel strata of subway construction in Chengdu, by analyzing the causes of lagging settlement and referring the previous engineering construction experience, the investigation and disposal measures for lagging settlement in water-rich sandy gravel strata are proposed, and are applied in practices, which effectively avoids the ground collapse caused by lagging settlement.

Keywords: water-rich sandy gravel stratum; lagging settlement; ground collapse

0 引 言

滞后沉降是指盾构刀盘上刀具开挖土体一段时间后(可能是几小时、几天、几个月甚至几年), 原开挖面上方地表发生的沉降。这种沉降可以是几毫米、几厘米或几米, 严重时可能导致地表塌陷或建筑物损坏。在砂卵石地层中, 由于地层的特殊性, 滞后沉降的现象尤为显著, 如果处理不当, 极有可能引发地面塌陷, 严重影响周边环境安全, 会给施工企业带来十分恶劣的影响^[1]。

成都轨道交通17号线二期工程浣花里站—省骨

科医院站区间主要下穿地层为<2-9-4>卵石土(密实), 卵石含量大于70%, 卵石粒径2~20 cm, 渗透系数 K 值取25 m/d, 为典型的富水砂卵石地层。通过汇总浣花里站—省骨科医院站区间滞后沉降部位, 对重点部位使用图表进行分析, 并结合周边环境制定相对应的处置措施, 可减少盾构施工对环境的影响, 保障盾构施工的安全性。

1 工程概况

浣花里站—省骨科医院站区间右线长800.905 m、左线长800.733 m。区间隧道拱顶最大埋深约19.3 m, 最小埋深约11.5 m, 场地范围主要地层为卵石层及少部分泥岩地层。

按地下水含水介质岩类和含水空隙特征, 场地主要地下水为孔隙潜水, 受地形和上覆土层控制, 具

收稿日期: 2025-08-12

基金项目: 中铁十七局集团有限公司科研课题(2020-32)

作者简介: 陈云(1988—), 男, 本科, 高级工程师, 从事隧道及地下工程技术管理工作。

微承压性。地下水埋深一般为 4.3 ~ 4.9 m,平均埋深在 4.64 m 左右,标高一般为 498.42 ~ 499.90 m。通过对成都地区水文地质状况的深入探究以及相关工程资料的系统梳理,发现在目标场地范围内,卵石土层的渗透系数 K 在 22~30 m/d 区段内,表明该卵石土层属于具备较强透水能力的强透水地层。

该区间左线盾构 ZDK82+750~ZDK82+795 侧穿武侯皮革城公司,为 5 层钢筋混凝土框架结构,采用 300 mm×300 mm 预制桩基础,桩与隧道水平净距约 4.45 m;在 ZDK82+635~ZDK82+710 侧穿恒宾园,该楼带 1 层地下室,地面 5 层,钢筋混凝土结构,独立基础,地下室与隧道水平间距为 3.3 m。

2 滞后沉降原因分析及总结

2.1 异常情况排查处置台账

项目根据盾构掘进施工过程及发生异常状况的事件,结合成都地铁砂卵石地层盾构掘进经验,将滞后沉降区分为 12 个风险较大区域,每条区间建立异常情况排查处置台账,进行动态管控。

12 个风险较大区域为:盾构始发端头处;盾构接收端头处;盾构开仓位置;联络通道位置;盾构穿越重大风险源区域;下部泥岩、上部砂卵石复合地层区域;沿线降水区域;超挖多出渣区域;监测预警位置;盾构掘进参数及施工异常区域;长时间停机超 24 h 区域;频繁纠偏区域^[2]。

在盾构施工过程中,应认真记录好施工异常点位及处置台账,以便后期及时发现处置不及时或遗漏位置。

2.2 重点部位分析

根据成都地铁砂卵石地层盾构掘进经验,滞后沉降重点区域为“多出渣区域”(特别是掘进过程中超方量少或者连续几环超方部位)^[3]。在掘进期间,超方少区域可能会出现处理不及时甚至不处理现象,经过长时间地层雨水冲刷后地层重组,地面可能会出现塌坑或空洞^[4]。项目重新梳理了盾构掘进原始记录表,将单环超方大于 5 m³、连续 3 环超方大于 10 m³ 区域列为重点管控部位,形成超方点位处置统计表(见图 1),根据图表确定需重新处置点位。

2.3 一表一图

根据区间异常情况排查处置台账,将梳理的 12 个异常区域在区间平面排环图上绘制异常点位处置图,形成“一表一图”,结合动态管控。图中信息包括异常点位原处置措施、现处置措施、监测数据、地质

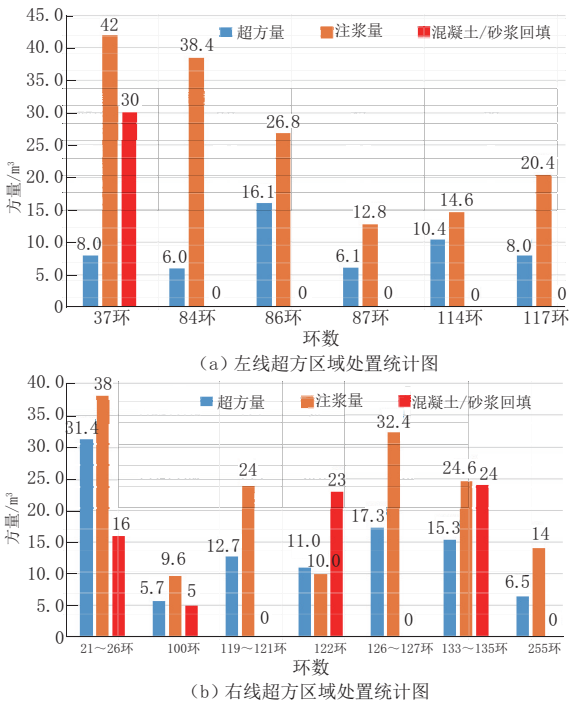


图 1 浣花里站—省骨科医院站区间超方区域处置表

雷达扫描等信息。绘制异常点位处置图,可清楚地显示异常点位具体位置、处置情况,用于分析异常点位安全是否可控。

2.4 地表塌陷过程分析

当盾构掘进过程中发生超挖,且同步注浆效果不佳,未有效填充超挖部位,该部位将形成空洞。在空洞上方局部土体掉落,由于卵石地层自身稳定性较强,新形成的半球形穹顶具有一定的自稳能力,短时间内不会发生塌陷部位扩大现象,如图 2 所示。

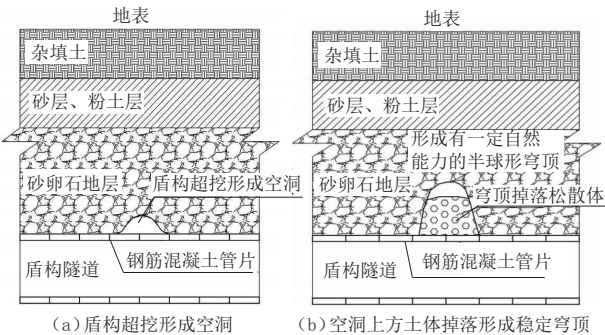


图 2 空洞自稳示意图

若空洞处未及时发现并处置,随着时间的推移,在地面荷载和地下冲刷的影响下,空洞处顶部自稳面将不断上移,直至到达地面形成贯穿通道,造成地面塌陷^[3],如图 3 所示。

因此,为避免盾构掘进超方产生空洞、引起地面塌陷,需在空洞贯穿地面之前,及时排查、发现空洞或异常区域所在位置,并进行填充处理。

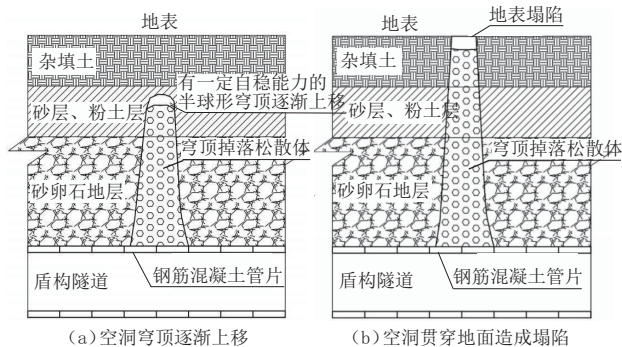


图3 地面塌陷示意图

3 滞后沉降排查措施

3.1 地质雷达探测

根据成都地铁滞后沉降排查要求,为加强区间沿线盾构滞后沉降隐患排查工作,建立按月对地下空洞、12个风险较大区域滞后沉降的排查机制,项目需委托有资质的专业单位按区间贯通第1个6月内每月1次、第2个6月内每2月1次、第3个6月内每3月1次的频率开展地下空洞探测、盾构滞后沉降排查(汛期需每月开展),建立隐患排查处置台账,对高风险区域及敏感区域进行长期监测和巡查。

3.2 微动探测

地质雷达扫描是盾构施工过程中滞后沉降排查的重要手段,但经长期现场实际使用发现,地质雷达扫描存在一定的局限性。特别是探测深度,一般为地面以下5 m范围,对于空洞埋深较大区域其探测效果不佳。

微动技术是一种利用地表微小振动信号来探测地下结构和病害的地球物理方法。它通过记录和分析由自然或人为源产生的微弱地面振动信号,来推断地下介质的物理性质和结构特征。在砂卵石地层中,其有效探测深度为30 m^[4]。一般针对掘进异常重点区域,在已采用地质雷达探测、日常监测、日常巡查后未发现空洞时,再采用微动技术进行定点探测排查。

3.3 施工监测

隧道洞通后,重新梳理区间监测点位,保证监测点完整。持续加强隧道上方及周边滞后沉降监测,针对重点区域加密布点。施工监测单位按照全线2周1次的观测频率进行滞后沉降监测,重点区域则加大监测频率,并出具对应报告^[5]。项目根据实时的监测报告分析数据,制定相应的处置方案。

3.4 日常巡查

每日上午、下午、晚间,项目部针对所施工区域

进行日常巡查;下雨天做好雨中、雨后巡查,将巡查信息及时进行情况汇报。如发生较大雨情,应分别增加对雨中、雨后的巡视,必要时再增加当日的巡查频次。巡查过程中发现异常情况,及时启动应急响应,组织地面处置。

3.5 地质勘探

地质勘探采用工程地质调绘、钻探、原位测试(采取标准贯入试验、重型动力触探等多种手段相结合的方法进行^[6])。为了保证地下管线的安全,勘探期间采用先管线探测,再挖探,之后进行钻探的方法,所有钻孔在开孔时均由人工挖(掏)至填土层以下原状土层,并保证挖探深度不小于3 m。

3.6 排查措施对比

地质雷达的电磁波受深度、地下水以及土层密度影响较大,主要适用于地下水位较深的中密及以下砂卵石地层,探测范围主要为地下5 m范围内;微动探测范围深度较大,且准确性较高,但探测费用昂贵,主要适用于已经能够基本确定存在空洞但埋深较大的小范围地层;施工监测适用于已经布置过监测点的区域,对于没有采集初始值的区域无法进行监测;日常巡查仅能观察表面情况;地质勘探适用于任何地层,但占用地面时间较长且费用相对较高,不适用于城市范围内交通繁忙位置。

4 异常区域处置措施

4.1 异常区域排查原则

(1)联络通道降水区域。由于联络通道施工前长时间进行降水抽排,易产生隐患,需加强对该区域的排查,加大监测以及人工巡查、地质雷达探测频率,保证能够及时发现隐患。

(2)在施工过程中,由于地层反应的原因,通常当一个监测点单次沉降3 mm以上,或者累计沉降达12 mm以上时,说明该区域地层较为松散,后期可能存在空洞风险。针对此类情况,需要采用地质雷达加大探测频率。

(3)盾构掘进过程中出现超方情况。一般单环超方量达5 m³或者连续3环超方10 m³时,通常判定该区域出渣量过多,地层极有可能出现空洞^[7]。但地质情况不同,空洞可能临近隧道上方,或因地层不稳定,空洞向上发展,空洞深度不易确定。为准确找到空洞,需要通过微动探测、地质勘探措施进行排查。

(4)当发现明显异常区域,且地质雷达、微动探

测、监测数据等措施无法探测地层具体情况时,则需采用地质勘探措施。区间开挖直径达8.6 m,探测范围较大,需根据现场实际情况,明确制定孔位数量和布置形式,包括沿隧道中心布置或梅花形布置等,确保钻孔数量满足现场处置需求,直至找到空洞或地层松散情况。

4.2 异常区域处置方式

发现地层存在空洞或松散区域后,主要以地面引孔钻孔注浆为主,结合砂卵石地层的特性,选择袖阀管注浆处置方式^[8]。

开始处置前,需与现场管理人员联系确认周边管线情况,需经现场管理人员排查现场分布情况后,在不影响周边管线的情况下再进行地面处置。

4.2.1 施工工艺流程

施工材料机具准备→人工探挖→钻孔→安装袖阀管→配置浆液→注浆→注浆完成。

4.2.2 施工工艺要点

4.2.2.1 隐患点位的处置流程

在确定区域为隐患之后,应立即开展抢险工作,通常采用临时围挡将该区域临时封闭,如果该区域掘进缓慢或者异常频次较高,通常使用永久围挡封闭。

钻孔点位通常根据同断面的监测点沉降来确认,一般沉降较大的点位风险较高,呈抛物线形的沉降数据是较为理想的隐患点位状态,不过大部分监测数据并不这样分布,这时需要结合前后几个断面的监测数据,拟合抛物线状的沉降数据,根据拟合抛物线在实地确认隐患点。

隐患点确认后由人工探挖3 m,再采用钻机钻至所需深度(由隧道埋深决定,一般在隧道上方3 m),埋设注浆管后进行注浆加固。如钻孔发现空洞,应及时回填处理,回填采用C20细石混凝土或砂浆。考虑运输和天气原因,一般采用坍落度为230~250 mm这类流动性较好的混凝土。回填结束后,待混凝土强度达到初凝状态时,应重新钻孔至所需深度,埋设注浆管后进行注浆加固^[9]。

4.2.2.2 注浆加固要点

注浆加固采用水:水泥=1:0.6的浆液,采用液压注浆泵注浆。注浆时,应自注浆加固范围周边向中间进行。为避免出现孔位间浆液串通的情况,推荐采用跳钻的方式逐个施钻^[10]。

在正式进行注浆作业前,需要开展注水试验,以检测管路的密封性,确定地层的可注性,并初步评估

注浆参数。将止浆塞置于待测盾构区间下端管路,封闭下端管路并缓慢注水,观察压力变化和流量。初始阶段控制压力为0.1~0.3 MPa,观察地层吸水情况是否与勘察报告相符;稳压阶段逐步旋转压力调节手柄(溢流阀),将压力提升至设计试验压力5 MPa,稳压10 min,若压力无明显下降,则说明管路密封性能良好。通过这一试验,拟定最终注浆压力不超过5 MPa,确保注浆效果达到最佳。

在注浆作业推进过程中,要着重强化对地面的观测和记录工作。具体需密切关注并详细记录的指标为:地面水平位移状况、冒浆点具体位置,以及地面沉陷幅度等关键信息,为后续施工分析和质量把控提供可靠依据^[11]。

注浆全过程应做好技术资料 and 基础数据记录、整理、分析工作。各孔注浆量应依据探测异常情况以及周边环境的敏感性进行差异化注浆,对于注浆量较大的区域,当该部位连续注浆超过10 m³却仍不见注浆压力提升时,需要考虑更换注浆浆液^[12]。一种简单的方式是提高浆液浓度,稍微复杂点的工艺是加水玻璃进行双液注浆;仍不见效时可采取间歇注浆。在注浆作业开展期间,需对注浆区段周边临近的河流侧壁以及各类管线井展开持续观测。一旦观测到有浆液渗出的情况,应即刻终止注浆操作,并迅速依据现场实际状况采取针对性的有效措施^[13]。

注浆总体可分为3个阶段。在开始注浆的第1阶段,一般采用低压力注浆,将压力逐渐控制在1 MPa左右,从而能够充分发挥浆液的渗透性,保证浆液能够渗透进地层中,全面填充土层的空隙,提高上部土层的稳定性^[14];第2阶段为中压注浆,当注浆浆液渗透到了较深的土层时,需要增加注浆压力,以加强注浆的渗透能力,通常情况下,注浆压力可在1~2 MPa之间;第3阶段是高压注浆,当土层较硬或注浆物质需要强力渗透时,需要采用较高的注浆压力,此方式可确保注浆物质对土层缝隙实现充分填塞,使土层内部形成均匀、致密的结构形态,从而显著增强地基的密实性和稳定性,一般情况下,注浆压力可达到3~5 MPa或更高^[15]。

5 结 语

(1)重点排查12个风险较大区域,可为滞后沉降缩小排查范围,减少排查费用。

(2)采用地质雷达探测、微动探测、地质勘探,结合施工监测和地面巡视,可及时、全面探测地层存在

(下转第353页)