

盾构隧道接缝渗漏水成因分析及治理

司焰中

(中交第一航务工程局有限公司)

摘要: 地铁盾构隧道穿越中风化和微风化砂岩硬岩地层时,由于地层裂隙发育、透水性强、水量丰富且具有承压性,隧道防水控制面临巨大挑战。为有效解决连接块渗漏水问题,以广州地铁十二号线某盾构区间管片渗漏水治理为例,通过数据分析发现连接块纵缝密封圈止水条错位、连接块纵向接缝宽度过大及管片壁后同步注浆不饱满是导致渗漏的关键因素。针对这些问题,提出并实施了具体的控制措施,包括优化密封圈安装工艺、调整接缝宽度控制标准及改进同步注浆技术。通过后续跟踪落实,盾构隧道连接块渗漏水问题得到了显著改善,验证了所提措施的有效性。研究结果不仅为类似工程施工提供了参考,还展示了工艺创新在解决复杂地质条件下隧道防水问题中的重要作用。

关键词: 连接块; 渗漏; 硬岩地层; 密封圈; 接缝宽度; 同步注浆

0 引言

近年来,城市轨道交通建设的持续大规模发展,随着先进设备不断更新换代,施工管理更加信息化、智能化,地铁建设速度也越来越快,涌现出诸多优秀的施工企业,而如何在诸多企业中脱颖而出,提高企业竞争力,还要回归到工程质量本身。

地铁盾构隧道管片渗漏依然是业主、设计和施工单位关注的重点,围绕管片渗漏问题,从项目规划到结构设计再到施工,进行了多维度综合预防。文章依托承建的广州地铁盾构隧道项目部在管片渗漏水治理方面的成功经验,从施工角度分析归纳总结了特定地层下地铁盾构隧道渗漏水原因及预防措施,可为类似地质条件下盾构隧道渗漏水难点治理提供借鉴。

1 工程概况

1.1 区间线路及地质条件

广州市轨道交通十二号线位于广州市海珠区,区间全长约 1.8 km,隧道采用盾构法施工,管片设计外径 6.4 m,内径 5.8 m,管片宽度 1.5 m,分 6 块,1 块连接块,2 块临接块,3 块标准块,区间隧道整体呈“V”坡,最大纵坡 2.892%,最小坡度 0.2%,隧道埋深 11.9~32.73 m。前 200 环隧道洞身主要位于<2-3>淤泥质粉细砂、<6>全风化砂岩层。200 环之后隧道洞身所处地层主要为<7-3>强风化砂岩、<8-3>中风化砂岩、<9-1>微风化含

砾砂岩和<9-3>微风化砂岩层,岩石节理裂隙发育,在里程 DK39+000—DK39+827.5 段中的<8-3>地层中存在溶蚀现象,发育溶隙,透水性中等,水量较丰富,且具有承压性。

1.2 水文地质

区间地表水主要有赤沙涌、大滘涌、马落沙涌,河岸堤防均为泥土,赤沙涌、大滘涌为珠江的前航道,与珠江有直接的水力联系,主要靠珠江潮汐及大气降水补给,水位随潮汐及季节变化而变化,变幅为 1~2 m,且与地下水存在直接的水力关系、补给关系。

勘察范围内的地下水按赋存方式划分为第四系松散层孔隙水和块状基岩裂隙水。其中第四系松散层孔隙水主要赋存于人工填土<1>、淤泥质粉细砂、粉细砂<2-2>及中粗砂<2-3>层中,含水较丰富,属中等透水层,为主要含水层。上层砂层水一般为承压水,局部为孔隙潜水。而基岩裂隙水主要富存于裂隙发育的基岩强风化带、中等风化带中,地下水的赋存条件与岩石风化程度、裂隙发育程度有关,裂隙发育地段地下水丰富,裂隙不发育的地段地下水贫乏。

本场地地下水水位总体埋藏相对较浅,局部较深,根据本次勘察,初见水位埋深 0.10~7.20 m (高程 1.81~6.67 m),稳定水位埋深 0.20~7.60 m (高程 1.41~6.66 m)。地下水位的变化与地下水的赋存、补给及排泄关系密切,每年 4—9 月为雨

季, 大气降雨充沛, 水位会明显上升, 而在冬季因降水减少, 地下水位随之下降, 水位年变化幅度为 2.5~3.0 m。基岩裂隙水发育于强风化—中等风化带中, 主要接受构造裂隙水补给以及越层孔隙裂隙水补给。

表 1 隧道渗漏情况统计表

| 环号 | 数量/环 | 所处地层 | 隧道埋深/m | 渗漏总数/环 | 百分比/% | 连接块渗漏数量/环 | 连接块渗漏占比/% |
|-------------|------|-------------|-----------|--------|-------|-----------|-----------|
| 1 号—120 号 | 120 | <2-3>、<6> | 13.9~20.2 | 16 | 13.3 | 4 | 25.0 |
| 121 号—265 号 | 145 | <9-1> | 20.2~26.3 | 27 | 18.6 | 10 | 37.0 |
| 266 号—600 号 | 335 | <8-3>、<9-1> | 26.3~32.7 | 78 | 23.3 | 51 | 65.4 |
| 601 号—760 号 | 160 | <9-3> | 29.1~32.7 | 39 | 24.4 | 28 | 72.0 |

根据统计情况可以看出, 盾构掘进环穿越<2-3>中粗砂和<6>全风化细砂岩地层后开始进入<9-1>微风化含砾砂岩地层, 成型隧道管片渗漏水开始增多。随着隧道埋深不断增大, 管片渗漏数量也逐渐增加。说明本区间管片渗漏与地质和隧道埋深有较大关系。通过对渗漏点的部位进行统计, 其中隧道拱顶连接块渗漏出现频率较高, 施工前期对此进行了针对性治理, 但效果不佳, 且在堵漏后仍会出现复漏。因此, 连接块渗漏水是本工程渗漏治理的难点, 应重点对连接块渗漏水问题进行原因分析并制定针对性措施, 通过实践验证措施的可行性。

3 盾构隧道渗漏水分析

通常隧道防水体系主要由管片自身防水、衬砌接缝防水和壁后注浆 3 方面构成。根据设计要求, 本工程采用强度等级为 C50, 抗渗等级为 P12 的混凝土预制管片。根据管片抗渗试验检测得出, 管片在分级加压至 0.80 MPa, 恒压 3 h, 管片各个端面未出现渗漏。区间隧道最大埋深 32.73 m, 最大水压约为 0.33 MPa, 完全满足抗渗条件。因此着重对管片接缝密封圈和壁后注浆施工质量及过程控制进行跟踪调查分析, 初步得出以下几个影响连接块渗漏水的因素。

3.1 接缝密封圈止水条错位

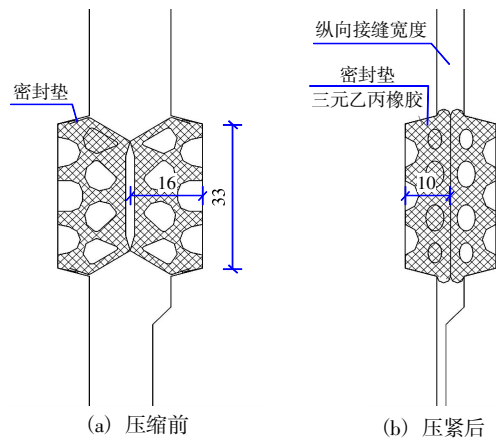
管片采取错缝拼装方式, 连接块拼装完成后, 通过拼装机抓举移动至连接块拼装位置 2/3 处, 剩余 1/3 范围通过油缸和拼装机纵移油缸同步运动将连接块推入, 推入过程中连接块和临接块纵密封圈向止水条发生摩擦, 当摩擦力加大或接触面不顺滑时使止水条出现错位, 影响纵缝和环缝所形成“T”字区的密封效果, 导致渗漏水。

2 渗漏水关键问题调查

为探明区间隧道渗漏水特点, 对区间前右线 760 环管片渗漏情况进行了统计, 并根据地质情况和隧道埋深区分对比, 形成隧道渗漏情况统计表, 如表 1 所示。

3.2 连接块纵向接缝宽度过大

接缝防水采用在密封垫沟槽内设置密封垫的方法。弹性密封垫的材料选择首先应能满足防水要求的各项技术指标。可采用的材料大体分为 3 种: 氯丁橡胶遇水膨胀橡胶复合型、遇水膨胀橡胶和三元乙丙橡胶, 本工程从结构防水材料的耐久性和耐腐蚀性角度出发, 选用三元乙丙橡胶弹性密封垫, 同时考虑区间岩溶地形发育, 为适应更大的接缝变形量采用了加厚的弹性密封垫。密封垫压紧前后示意图如图 1 所示。



注: 本工程管片设计构造使得管片纵向接触面完全贴合后迎水面纵缝形成 4 mm 的孔隙, 试验统计的纵缝大小忽略管片间拼装角度的影响。

图 1 密封垫压紧前后示意图(mm)

弹性密封垫通过被压缩挤密实现防水功能。在盾构推进油缸作用下, 上百吨的压力使管片环缝间隙压缩至最小, 密封垫在管片沟槽内得到充分挤压, 将防水效果提升至最佳。而纵缝在施工过程中为了方便管片拼装, 在拼装前人为增大连接块管片纵向断面间距, 使连接块拼装完成后纵向密封垫无法得到充分挤压, 单靠管片自重下沉形成的分力和环向连接螺栓紧固力压紧密封垫实

现防水。为证明上述推断，统计分析论证 121 号—760 号环管片渗漏情况、纵缝大小和隧道埋深 3 方面数据。

根据统计测量拼装后 121 号—760 号环管片连接块纵缝大小与成型隧道连接块渗漏数据对比，得出连接块渗漏与纵缝大小关系，见表 2。

表 2 渗漏点与连接块纵缝大小关系统计表

| 渗漏情况 | 迎水面纵缝 2~4 mm | 迎水面纵缝 4~6 mm | 迎水面纵缝 6~8 mm | 迎水面纵缝 8~10 mm |
|---------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 总数/环 | 63 | 291 | 228 | 58 |
| 漏水环数/环 | 2 | 5 | 24 | 46 |
| 不漏水环数/环 | 61 | 286 | 204 | 12 |

从表 2 中可以看出：连接块纵缝越大，出现渗漏的情况越多；连接块纵缝越小，不渗漏的情况越多。

考虑 121 号—760 号管片埋深逐渐加深，纵缝防水所承受的水压逐渐变大，水压对渗漏的影响逐渐增大，为提高数据分析的准确性，在同一埋深范围内分别随机抽取 50 个不渗漏管片 and 对应埋深范围内的渗漏管片作为样本，统计各样本的纵缝大小，见表 3。

从表 3 可以看出，隧道埋深范围不变，地下

表 3 渗漏情况下隧道埋深与纵缝大小关系统计表

| 样本数量/个 | 样本特征 | | 密封圈压缩过大 | 密封圈正常压缩 | | | 密封圈压缩不足 |
|--------|------|-----------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | 是否渗漏 | 隧道埋深/m | 纵缝 2~4 mm 环数(占比) | 纵缝 4~6 mm 环数(占比) | 纵缝 6~8 mm 环数(占比) | 纵缝 8~10 mm 环数(占比) | 纵缝 8~10 mm 环数(占比) |
| 10 | 是 | 20.2~26.3 | 0 环(0%) | 0 环(0%) | 2 环(20%) | 8 环(80%) | |
| 50 | 否 | | 4 环(8%) | 21 环(42%) | 17 环(34%) | 8 环(16%) | |
| 51 | 是 | 26.3~32.7 | 0 环(0%) | 5 环(10%) | 15 环(29%) | 31 环(61%) | |
| 50 | 否 | | 9 环(18%) | 27 环(54%) | 12 环(24%) | 2 环(4%) | |
| 28 | 是 | 29.1~32.7 | 1 环(12%) | 5 环(18%) | 9 环(32%) | 13 环(46%) | |
| 50 | 否 | | 13 环(26%) | 31 环(62%) | 6 环(16%) | 0 环(0%) | |

水压一定，纵缝越大，渗漏点占比越大；密封圈正常压缩，纵缝大小范围一致，隧道埋深越大，地下水压越大，渗漏点占比越大。

管片在不同埋深下，不渗漏的管片数量与 4 种纵缝大小范围成正态分布，如图 2 所示，管片在正常拼装时，纵缝宽度在一般控制在 4~8 mm。

抗 6.25 MPa 的水压。

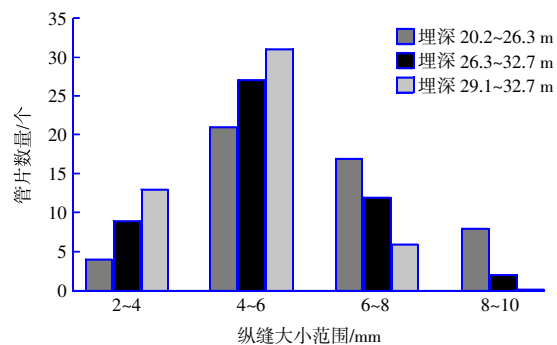


图 2 未渗漏管片数量与纵缝大小柱状图

由三元乙丙橡胶圈耐水压力试验曲线(图 3)可知，在无错位量条件下，随着张开量的减小，对应的密封垫的耐水压力明显提高^[1]。图 4 为三元乙丙橡胶圈性能指标图，可以看出密封垫缩量位移为 6 mm 时，对应纵向接缝宽度为 4 mm，可抵

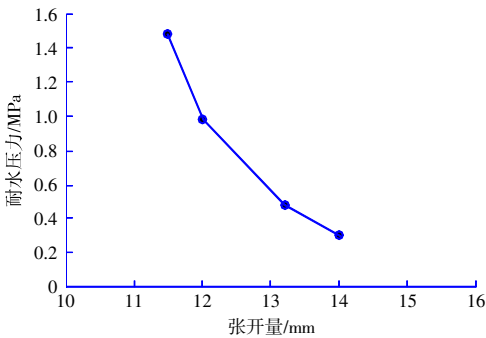


图 3 无错位量下的耐水压力试验曲线图

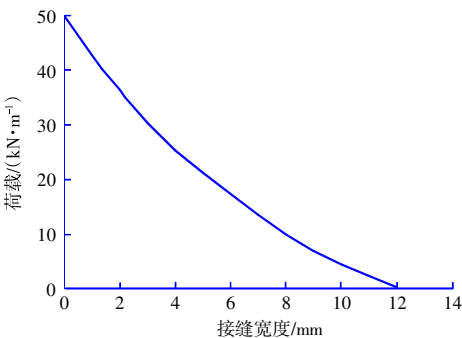


图 4 三元乙丙密封圈性能指标图

区间隧道最大埋深为 32.73 m, 隧道拱顶最大水压为 0.33 MPa, 为保证接缝防水效果, 施工时控制纵向接缝宽度最大为 8 mm 时, 可承受 1.25 MPa 水压, 满足连接块纵缝防水效果要求。

综上所述, 在正常拼装情况下, 连接块纵缝大小影响止水密封圈压缩程度, 当纵缝越小时, 密封圈压缩变形越大, 其止水性能越好。因此, 连接块纵向接缝宽度大小是决定防水效果的关键因素。

3.3 管片壁后同步注浆不饱满

在盾构掘进过程中, 管片外环与底层之间产生的空隙会造成地面沉降等。为降低影响, 采用不影响盾构掘进的同步注浆工艺, 即随着盾构向前推进, 盾构间隙同时形成, 通过同步注浆系统, 按规定的注浆压力和注浆量从盾尾注浆孔注入具有适当早期强度和最终强度的浆液材料填充盾尾间隙, 及时支护管片周围土体, 有效防止土体变形坍塌, 控制地表沉降, 除此之外还具有维持管片位置, 传递载荷和提高隧道防水性能的作用^[2]。盾构盾尾同步注浆示意图如图 5 所示。

同步注浆浆液可形成隧道的第 1 层防水层, 增加隧道的防水能力^[3]。当防水密封垫因损坏或管片错台而失效时, 浆液在一定程度上可减少地下

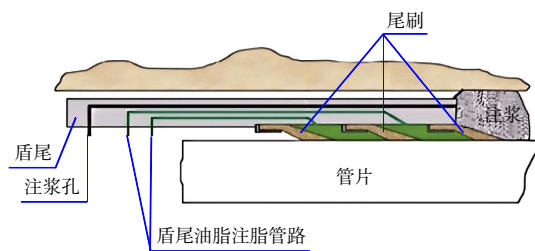


图 5 盾构盾尾同步注浆示意图

水的渗漏^[4]。

同步注浆因其隐蔽性和缺乏相应的控制标准, 故存在检验难和控制困难问题, 浆液存在流失现象。当注浆压力过大时, 浆液会沿着盾壳流入土仓; 当浆液配比不当或围岩存在承压水时, 浆液容易离析或被地下水稀释^[4], 导致注浆不饱满, 尤其在下坡连续掘进时, 浆液在重力作用下堆积在盾尾, 导致管片上方出现空腔形成水囊。

为研究管片壁后注浆饱满程度对管片渗漏的影响, 现场在 266 号—600 号管片连接块环范围内取连接块渗漏的 51 环并随机抽取无渗漏环管片作为调查样本, 通过凿开拱顶 120°范围的注浆孔, 利用钢钎触探检查壁后注浆饱满程度, 统计对比壁后注浆饱满度与渗漏关系, 得到管片壁后注浆饱满情况与连接块渗漏情况统计表, 见表 4。

表 4 管片壁后注浆饱满情况与连接块渗漏情况统计表

| 样本范围 | 样本数量/环 | 是否渗漏 | 地质条件 | 隧道埋深/m | 壁后注浆饱满环数/环 | 壁后注浆饱满环数占比/% | 壁后注浆不饱满环数/环 | 壁后注浆不饱满环数占比/% |
|-------------|--------|------|-------------|-----------|------------|--------------|-------------|---------------|
| 266 号—600 号 | 51 | 是 | <8-3>、<9-1> | 26.3~32.7 | 16 | 31 | 35 | 69 |
| | 51 | 否 | | | 44 | 86 | 7 | 14 |

从表 4 可以看出, 266 号—600 号中存在连接块渗漏的 51 环管片中, 有 35 环存在壁后注浆不饱满情况, 占比 69%。随机抽取 51 环无渗漏管片仅有 7 环存在不饱满情况, 占比 14%。由此可以得出管片壁后注浆是否饱满是导致连接块渗漏的关键因素。

在施工过程中, 根据现场管理人员和管片渗漏情况统计台账反映, 管片脱出盾尾后出现渗漏的部位在对应环或相邻环采取了二次注浆后, 管片渗漏会自动消失或减轻。由此可以判断, 当同步注浆不饱满时, 通过二次注浆可以减轻或控制管片渗漏情。

4 连接块渗漏水治理

针对文章中分析的影响连接块渗漏的主要原因,

制定了以下措施, 通过实践验证, 对控制连接块渗漏水问题有较好效果。

4.1 接缝密封圈止水条错位治理措施

防止密封圈在拼装时出现挤压错位, 可控制连接块拼装时 2 个临接块大小口间距, 并在连接块纵向密封圈涂抹润滑脂, 降低密封圈间的摩擦力, 减小拼装时挤出几率, 提高防水效果。

4.2 连接块纵向接缝宽度控制措施

根据上述连接块纵缝大小对渗漏影响关系分析以及密封圈压缩程度对防水性能的影响, 控制纵缝宽度在 4~8 mm 范围, 可有效提高连接块防水效果。通过实践验证, 连接块拼装时, 拼装间隙内弧面大口弦长控制在 $(1\,140 \pm 5)$ mm, 小口弦长控制在 (680 ± 5) mm 时, 最终纵缝宽度可以控

制在4~8 mm。

4.3 壁后注浆饱满度控制措施

在施工期间,采用二次注浆对同步壁后注浆损失进行补充,在此基础上可以增加对渗漏管片壁后饱满度检查,对不饱满的管片二衬注浆,优先选用单液浆,注浆孔封堵时采用双液浆。

当隧道贯通后,可以排查隧道整体渗漏情况,采取系统注浆,填充壁后空洞。同时可采用超声波雷达扫描技术对管片壁后进行空洞扫描,根据扫描结果二次补充注浆,最后进行管片渗漏处理。

4.4 施工过程监管

为确保连接块渗漏水措施落实到位,首先对各环节关键岗位人员进行详细交底,明确措施具体要求和操作方法。其次通过要求关键工序拍照片上传工作群的方式强化监督。由班组长或跟机技术员测量连接块拼装大、小口弦长,同时检查拼装完成后止水条是否存在挤出现象,并进行灵活处理。

4.5 盾尾油脂定向补充措施

在掘进过程中,可以根据连接块拼装位置,适当增大对应位置的盾构油脂注入量,使盾构油脂能够充分填入连接块外弧面的纵缝,起到一定止水效果。

5 结语

依托广州地铁十二号线某盾构区间工程,实践跟踪隧道连接块渗漏水问题,在隧道位于中风化和微风化地质,裂隙发育,地下水含量丰富,

且具有承压水的客观条件下,对管片连接块渗漏水情况、纵缝间隙大小和同步注浆效果进行统计,采用数据统计对比分析方法,得出了连接块渗漏水问题主要原因。根据成因制定了针对性措施,通过现场实践落实治理措施,使得连接块渗漏水问题得到有效控制。相关措施在其他区间应用也起到了显著效果,降低了因渗漏水造成的二次注浆及堵漏成本,对质量控制及成本管理具有重要意义。

然而,本研究仍存在一些不足之处,需要在后续工作中进一步改进和完善。如样本的局限性,本研究主要基于广州地铁十二号线某区间的760环管片数据进行分析,样本量相对有限。未来可扩大研究范围,涵盖更多不同地质条件和施工环境的隧道工程,以验证措施的普适性和可靠性。虽然本研究提出了优化密封圈安装工艺、控制接缝宽度和改进同步注浆技术等措施,但在具体实施细节上仍有进一步优化的空间。例如,可探索更先进的密封圈材料和安装技术,或引进智能化注浆控制系统以提高注浆饱满度的精准度。

参考文献:

- [1] 董林伟,江玉生,杨志勇,等.隧道管片接缝密封垫防水机理及试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(3):469-474.
- [2] 有智慧,李雪,霍鹏,等.城市轨道交通盾构同步注浆国内外现状及发展[J].都市轨道交通,2020,33(4):72-83.
- [3] 王冠琼,刘干斌,邓岳保.盾构壁后注浆对地表沉降影响模拟研究[J].宁波大学学报(理工版),2014,27(3):97-102.
- [4] 竺维彬,鞠世健,王晖,等.复合地层中的盾构施工技术(新版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.