

第三系富水弱胶结地层多技术措施协同治理研究

杨佑权

中铁隧道局集团有限公司, 广东 佛山 528200

[摘要]为解决临沧至清水河高速公路王家寨隧道第三系强富水粉细砂半成岩地层突涌灾害防治及施工难题,对隧道突涌灾害特征及作用机制进行分析。依托王家寨隧道开展工程试验,对比先前施工采用的地表深井降水及超前加固措施,施工团队提出超高压泥水平衡顶管超前引排水施工工法、水泥基动水抗分散新型灌浆材料(CIS)和自制T型锁扣密布中管棚超前管幕施工工法相结合的施工体系。现场实践表明:自2023年实施该技术以来,月均进尺由11.3m提升至20.8m,突涌量大于500m³的突涌灾害发生率降低70%,累计突涌量由92693.39m³(2022—2023年)降至26538.39m³(2024年),验证了施工体系的有效性,为富水弱胶结地层隧道安全施工提供了系统性解决方案。

[关键词]隧道;顶管;CIS;突泥涌水;强富水半成岩

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16644

中图分类号: U455

文献标识码: A

Research on Collaborative Treatment of Multiple Technical Measures for Weakly Cemented Strata with Rich Water in the Tertiary System

YANG Youquan

China Railway Tunnel Group Construction Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528200, China

Abstract: In order to solve the prevention and construction difficulties of the third series strong water rich fine sand semi diagenetic strata surge disaster in Wangjiazhai Tunnel of Lincang Qingshuihe Expressway, the characteristics and mechanisms of tunnel surge disasters are analyzed. Based on the Wangjiazhai Tunnel, engineering tests were conducted to compare the surface deep well dewatering and advanced reinforcement measures used in previous construction. The construction team proposed a construction system that combines the ultra-high pressure mud water balance top pipe advanced drainage construction method, cement-based dynamic water anti dispersion new grouting material (CIS), and self-made T-shaped locking dense central pipe shed advanced pipe curtain construction method. On site practice has shown that since the implementation of this technology in 2023, the monthly average footage has increased from 11.3m to 20.8m, and the incidence of sudden surge disasters with a surge volume greater than 500 m³ has decreased by 70%. The cumulative surge volume has decreased from 92693.39 m³(2022-2023) to 26538.39 m³(2024), verifying the effectiveness of the construction system and providing a systematic solution for safe construction of tunnels in water rich and weakly cemented strata.

Keywords: tunnel; top pipe; CIS; sudden mud and water influx; strong rich water semi diagenesis

引言

王家寨隧道临翔端施工段穿越区域主要发育全风化花岗岩与第三系半成砂岩地层。其中第三系半成砂岩地层具有典型弱胶结特征,其胶接差、孔隙率高、结构敏感性强^[1-6],在施工扰动作用下易发生颗粒骨架解构现象。更值得关注的是,该地层呈现出显著的水理特性劣化趋势,其含水率普遍超过塑限,且水稳系数较低,在渗流-应力耦合作用下易产生崩解液化和颗粒迁移效应,易诱发隧道突涌及管涌等灾害。

针对常规弱胶结地层先行治理措施主要为深井降水和复合超前注浆加固技术。但地下开挖的降水及加固措施已有较多成果,但是不同的地质条件下所产生的实际效果存在一定差异。隧道在穿越半成砂岩段的施工过程中,面临强富水、弱胶结的地层,尽管采用深井降水及复合注浆加固体系,仍存在加固效果离散性大、局部注浆体异常失

效等问题,其机理亟待揭示。第三系半成岩的低渗透性与动水环境下的结构失稳特性,导致浆液在非均质富水砂层中的扩散路径难以预测;同时受区域水压梯度与围岩力学参数空间变异影响,现有技术难以满足安全开挖需求。

针对以上问题,本文依托王家寨隧道,通过对第三系富水半成砂岩地层的灾害成因分析,提出了适用于该类型地层的新型施工工艺及加固材料,总结出了以超高压泥水平衡顶管超前引排水施工工法为主导的降水措施,结合水泥基动水抗分散新型灌浆材料和T型锁扣密布中管棚超前管幕施工工法实现掌子面稳定开挖,以相辅相成的开挖体系为同类型复杂地层开挖提供参考。

1 工程概况

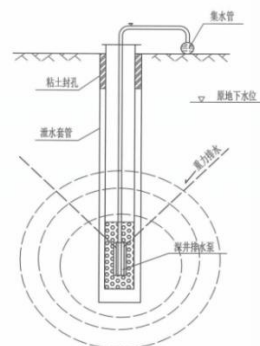
临沧至清水河高速公路,是“长江经济带”与“一带一路”通道连接线,是云南五大出境通道之一,经临沧孟定清水河口口岸出境,是中国进入印度洋最近的陆上通道,也是云

王家寨隧道穿越富水第三系半成岩地层,该地层具有显著的非均质性与弱胶结特性,其工程地质特征表现为渗透系数空间异质性显著、自稳能力低下及遇水软化效应突出。施工过程中,围岩受地下水渗流与开挖卸荷的耦合作用,易诱发渗透失稳,导致突涌灾害频发。传统支护体系因未能有效抑制塑性变形与动水侵蚀耦合效应,严重制约施工安全与进度控制。

2023 年隧道施工推进至埋深 180m 的强富水地质单元,开挖难度显著提升,月进尺逐步降低,沙粒更细、围岩整体富水,导致突泥涌水等灾害不断。2022 年至 2024 年期间,大小突泥涌水事故累计突涌量达 92693.39m^3 ,累计耽误工期约 566 天,对施工进度及人员安全造成了重大影响。

前期隧道开挖采用降水与超前加固相辅佐的方式进行开展,遵循“降水疏排,注浆固基,严防涌突,隧稳行安”的指导思想,坚持降水加固两手抓的作业方式,对王家寨隧道开挖进行了大量的实验。

以“先探水、后成井”的方式,采用“左幅深井截降水为主,右幅深井降水为辅”的布井整体原则,对王家寨隧道临翔端第三系半成岩段强富水区布设深井,尝试解决地层强富水问题,如图3。地表深井降水井直径为300mm,按照纵向10~20m/井的间距布设,埋管位置通常处于10至15m的沉砂深度。采用跟管钻工艺的打井方式进入至富水区后,地下水流由梅花状布置于管壁上的渗水缝渗入,并由排水泵引出。该工法有效解决了高水压下地层开挖影响,最为典型的是于ZK22+426左侧井处将静水位由120m降低至约20m,有效降低了水头,促使当月进尺达45.2m。然而在2023年隧道施工至强富水区时,受限於该地层上覆黏土岩-弱胶结砂岩复合结构的高渗透特性,原有工法的降水效能显著降低,无法满足施工要求。钻孔信息表明:黏土岩层厚58~95m(单轴抗压强度1.43~1.71MPa),弱胶结砂岩层厚90~130m(单轴抗压强度3.04~4.41MPa),其中砂岩体积占比达50.6%~53.8%,形成砂岩主导型复合围岩体系。同时,该区段地下水流速较2022年施工段有明显提升,自稳时间窗口缩短。地表深井降水法在面对更为严苛的地层环境下,对地层稳定性的控制效果减弱,隧道频发涌水事故,地层破坏明显,存在大量“重塑土”地质情况。2023年10月23日左幅于ZK23+055处发生大规模突泥涌水,涌突量约40000m³,造成较大规模的影响,大量突涌体涌出,形成突涌体堆积现状,未贯通段地质条件极其复杂且施工风险极高。12月8日左幅ZK22+853再次发生大规模突泥涌水,涌突量约7000m³,耽误施工进度多天。上述情况表明地表深井降水难以从根本上解决该劣质地层条件下易溃砂、涌水的问题,富水弱胶结砂岩地层的含水率无法稳定且快速地降至施工要求。



此外,现场采用“超前周边注浆+管棚+密排小导管”相结合的措施,对掌子面进行综合加固。但是根据现场注浆作业反应,传统水泥-水玻璃双液注浆技术在复杂地层加固工程中存在显著的技术局限性。其固化时间调控机制缺乏动态适应性,难以根据地层渗透性与水力条件实现初凝及终凝时间的精准匹配,导致长距离泵送工况下浆液易发生提前胶凝失效,且扩散轨迹呈现不可控特征。该技术在高动水压力及强流速环境中的抗冲刷性能显著降低,致

使富水高渗透区域的堵水效率急剧衰减。此外,固化体早期力学强度不足,易受地下水溶蚀作用引发结构崩解,而后期强度增长亦难以满足碎裂岩体长期抗渗与稳定性需求。

3 灾害治理体系关键内容

王家寨隧道自施工以来逐步进入强富水半成岩地层,该地层胶结程度低、水稳性差,地下水系庞大且联通复杂,掌子面开挖对围岩产生的扰动极易导致溃砂、流土和管涌等的情况,因层间渗透性差异显著导致传统降水和加固工法难以有效止水,亟需开发适应复杂地层的新工艺体系。现场遵循“降水先行,注浆固基,严防涌突,隧稳人安”的处置原则,采用以水泥基动水抗分散新型灌浆材料注浆加固、超高压泥水平衡顶管超前引排水和 T 型锁扣密布中管棚超前管幕为主导的预防性施工措施,着力先行改善地层富水问题,保障掌子面围岩性态稳定及后续开挖的高效安全。

3.1 水泥基动水抗分散新型灌浆材料

加固掌子面所采用的传统水泥-水玻璃双浆液凝结时间调控不足、动水环境适应性弱,在高水压、强动水的条件下易受地下水系的冲刷,导致加固体系强度较差,掌子面易形成突涌薄弱区。

水泥基动水抗分散新型灌浆材料的应用是针对加固问题做出的解决方式。浆液通过已有的岩溶涌水封堵材料-水泥基砂土灌浆材料基础上,基于高分子树胶特有的动水抗分散性、络合剂与氯离子的键合固溶为设计理念,对原有砂土灌浆材料进行优化,最终形成了初终凝时间可调、抗离子侵蚀性、抗动水分散、黏度可控的水泥基动水抗分散新型灌浆材料。使用注浆时结合三阶段注浆工艺体系,实现弱胶结砂岩地层注浆加固的可控性与高效性。三阶段注浆工艺即“预渗透-主劈裂-稳压渗透”,预渗透阶段的初始注浆压力为设定值 30%~50%,控制浆液渗透半径在 0.8~1.2m 范围,形成初级防渗屏障;主劈裂阶段将注浆压力分级调至设计 80%~120%,利用水泥基动水抗分散新型灌浆材料的触变特性实现可控劈裂扩散;稳压渗透阶段则持终压 10~15min,确保劈裂通道内浆液充分渗透充填。

针对掌子面超前周边注浆需求,新型灌浆材料通过初终凝时间可调特性,能够灵活匹配不同注浆阶段的要求,当钻孔揭露较大含水构造且地下水流速大、压力高时,新型灌浆材料可发挥极大优势,可对复杂裂隙、岩溶管道、富水砂层、富水粉细砂层等含水构造进行快速有效封堵。该材料将超前周边注浆的“堵水-固岩-控变形”效能提升至新层级,尤其为第三系半成岩、高压富水砂层等复杂地质的隧道施工提供了可靠的超前支护保障。

3.2 超高压泥水平衡顶管超前引排水施工工法

针对地表深井降水易受上覆黏土岩-弱胶结砂岩地层结构影响,导致超前排水作业成效相对较差的情况,提出了超高压泥水平衡顶管超前引排水施工工法。通过顶管技术超前形成导洞,可精准探明深埋富水隧道前方地质构造(如裂隙发育、含水层分布),并利用径向泄水管系统进行

主动排水。此举有效疏干围岩孔隙水及裂隙水,显著降低地层水位与含水率,从根本上改善掌子面作业环境,减少开挖时的突涌水风险。顶管导洞的超前引排不仅降低地下水压力,还通过渐进式排水减小地层应力集中释放风险。在弱胶结砂岩地层中,含水率降低可使围岩内摩擦角有效提升,显著增强自稳能力,保障掌子面注浆及后续开挖的安全稳定性。

王家寨隧道顶管区段长度为 249m,埋深约 188~302m。始发端位置设 I28 型钢框架混凝土反力墙,在原掌子面处设钢筋混凝土封堵墙为始发端;中间为顶管作业区。顶管所处地段存在强富水,粉细砂段和花岗岩段交替出现,故采用 YD1800 泥水平衡岩石顶管机,封堵墙上在顶进前于钢圈上安装橡胶板与折页翻板(图 4)。

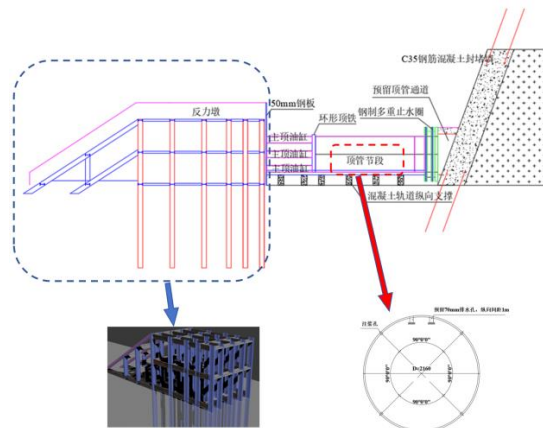


图 4 超高压泥水平衡顶管超前引排水施工工法示意图

顶管机依靠电机驱动刀盘切削土体,泥浆循环系统携带渣土排出机外;遇岩石时,刀盘滚刀挤压破碎岩石,碎块进入二次破碎仓经剪切后由泥浆排出,主顶油缸提供推力推动顶管机及后方管节逐段顶进并焊接成整体。针对强富水、粉细砂地层顶进阻力大的问题,设置 3 套中继间(每套含 16 支 50t 油缸,单套推力 800t,间距 70m),通过分段接力顶进分散主顶油缸负荷,使单段顶力处于允许范围内。同时触变泥浆通过管壁注浆孔注入管周空隙,形成环抱管道的泥浆套以大幅降低土体摩擦阻力,保障顶进效率。

顶管完成后,采用垂直钻机进行垂直降排水施工。从顶管内部垂直向上打设长 12~14m $\phi 60$ mm 泄水管(考虑拱部注浆加固圈 6~8m,排水管顶到拱顶初支以外 8~10m 排水),纵向 2m/孔布置。并在管内进行降水引排至管底,从管内顺坡流向出口,排出洞外,进而有效的改善顶管段围岩性质,以最快的速度降低掌子面附近水压和水力梯度,杜绝隧道上方的软塑层和水囊对隧道掘进的危害。

3.3 自制 T 型锁扣密布中管棚超前管幕施工工法

针对王家寨隧道地层富水量大,易发生溃砂、突涌的问题,创新性的采用自制 T 型锁扣密布中管棚超前管幕施工工法,这是用于地下工程施工时超前支护的一种独特、安全、可靠的手段。管幕法是利用较大直径的钢管在地层中以一定形状排布并预先相互锁合,形成钢管帷幕,然后

在此钢管帷幕的保护下进行安全掘进。管幕法以首发定位钢管铺设为基础,多根钢管逐根平行顶进并依靠特制锁扣连续锁合,并列密排在隧道周围形成稳定的支护结构,管幕结构纵向成梁、横向成拱,为开挖作业提供了可靠保护。

管幕法采用 $\Phi 89$ 热轧无缝钢管,纵向坡度与隧道一致,上台阶拱部环形布设,环向中心管距 11cm,单环共 176 根(含 142 根锁扣管和 32 根密排管棚),锁扣管采用 $50\times 50\text{mm}$ T 型钢双面焊接,钢管滑道开口宽度 1cm、长度 8m, T 型钢与滑道对称焊接长度 6.5m。用万向钻机钻 $\Phi 110$ 孔定位首发管,通过原初支钢架基准点下设导向拱架,由中间向两侧逐根顶进,并在管内锁扣间注入水泥-水玻璃双液浆,最终形成环形锁扣管幕结构(图 5)。此外,对于地质情况复杂,断面较大,易发生冒顶、塌方,地面沉降要求高,以及浅埋暗挖的隧道工程,锁扣式管幕法是优先选择的超前支护方案,可在锁扣管幕法基础上辅以注浆,形成密封的止水管幕。

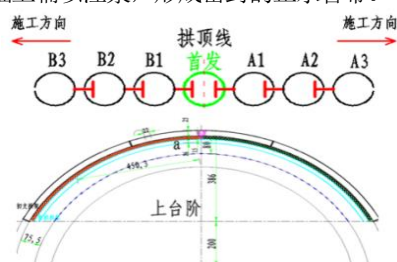


图 5 管幕横断面示意图

自制 T 型锁扣密布中管棚超前管幕施工工法的成功实施,进一步完善了隧道位于强富水粉细砂层地质情况下开挖的施工技术手段,提高了隧道开挖的施工效率,将隧道开挖循环速度提升至每循环 7 天(其中锁扣管幕 5 天/循环,开挖 2 天/循环)。

4 灾害治理体系的主要成效

针对弱胶结砂岩地层隧道施工中的围岩稳定控制难题,王家寨隧道工程创新性采用超高压泥水平衡顶管超前引排水施工工法,集合水泥基动水抗分散新型灌浆材料(CIS)与自制 T 型锁扣密布中管棚超前管幕,该技术体系通过多物理场协同调控机制,实现了围岩-地下水-支护体系的动态平衡优化。

超高压泥水平衡顶管超前引排水施工工法的核心在于构建多级次排水网络系统,成功将掌子面前方 50m 影响区内的孔隙水压力从初始 2MPa 降至 0.3MPa,降幅达 85%。这种精准的排水降压作用有效抑制了高压渗透水对围岩结构的潜蚀破坏,同时通过流体-固体耦合作用调控了地应力场分布特征。同时最大主应力集中系数由 3.2 降低至 1.8,促使应力重分布过程呈现渐进式调整特征,避免了传统工法中常见的应力突释风险。特别是在弱胶结砂岩地层中,含水率从饱和状态降至 35% 以下后,围岩单轴抗压强度和黏聚力提高,显著增强了岩体自承载能力。截止 2023 年 12 月底,左幅剩余段落长度约 200m,由于进、出口掌子面均发生大规模突泥涌水地质灾害,未贯通段拱部以上地层被严重破坏,

地层中存在庞大的隐伏性空腔和松散淤泥质流沙群,分布较广、潜伏范围较大,常规施工措施很难保证现场施工安全,故决定采用超高压泥水平衡顶管超前引排水技术。

工程实践表明,该技术体系的综合应用产生了显著的工程效益。突泥涌水灾害发生频率同比下降 70%。注浆量减少 18.4%,其中掌子面补注浆量及突泥涌水注浆用量降低 41.0%。施工效率提升尤为显著,月均进尺从 11.3m 提升至 20.8m,增幅达 84.6%。经测算,技术优化带来的直接经济效益达 150 万元,主要体现在注浆量费用降低和工期压缩两个方面。机理分析表明,排水体系与注浆加固的时空协同效应形成了“动态排水-强度恢复-主动支护”的链式反应机制。顶管降水技术不仅降低了地下水对注浆体的稀释作用,同时为水泥基砂土材料的水化反应创造了有利条件。新型材料辅以管幕施工法,有效封堵了排水后的残余渗流通道,形成完整的堵水帷幕,稳定了掌子面。

5 结论

针对王家寨隧道第三系强富水粉细砂半成岩地层突涌灾害特征及致灾机制的系统研究,结合工程实践与技术创新,提出以下结论与建议:

王家寨隧道工程通过集成泥水平衡顶管排水、CIS 新型注浆材料与锁扣管幕技术,构建了“排水-堵水-支护”三位一体防控体系。该案例表明,单一技术难以应对复杂地质条件,需通过多技术协同实现“1+1>2”效应。顶管排水系统降低孔隙水压力,为后续注浆和支护创造稳定环境;CIS 材料凭借抗动水冲刷性能和可调凝结时间,在高流速裂隙中形成致密堵水帷幕,实现了多方面协调以辅助施工高效、安全地进行。

【参考文献】

- [1]柳柳,李园,施红艺.花岗岩残积土微观结构及含水率对抗剪强度影响研究[J].铁道勘察,2025,11(4):1-11.
- [2]邢昊.王家寨隧道第三系半成岩泥岩富水软弱围岩大变形机理及控制措施[D].四川:西南交通大学,2023.
- [3]许劲松,李国锋,王秋懿,等.王家寨隧道第三系强富水粉细砂半成岩段突涌灾害防治施工关键技术[J].隧道建设(中英文),2023,43(1):514-521.
- [4]李雪松.不同加固方式下的隧道开挖稳定性影响研究[J].西部交通科技,2024(6):169-172.
- [5]杨建周.穿越松散堆积体围岩加固与隧道施工技术[J].铁道科学与工程学报,2019,16(5):1266-1273.
- [6]瞿山,唐吉祥,丁文其,等.王家寨第三系富水半成岩隧道施工措施与开挖变形特征分析[J].现代隧道技术,2024,61(1):1047-1057.
- [7]陈奕安,赵光明,许文松,等.渗流-应力耦合下砂岩广义应力松弛特性与流变破坏机制研究[J].岩石力学与工程学报,2025,11(4):1-14.

作者简介:杨佑权(1982.12—),男,毕业院校:湖南科技大学,土木工程,中铁隧道局集团建设有限公司,公司副总经理,高级工程师。