

Grouting Technology of Water Stemming in Shield Zone of Jinan Metro Tunnel

Dewen Zhang^{1,2}, Wen Li^{1,2}, Lei Chen³, Bin Gong¹, Jiangbo Gai¹, Hui Chou¹, Liqing Liu¹, Chuazheng Geng¹, Xiaolei Qiao¹

¹China Railway 14th Bureau Group Co., LTD., Jinan Shandong

²China Railway 14th Bureau Group Tunnel Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong

³Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan Hubei
Email: 42760473@qq.com

Received: Apr. 15th, 2019; accepted: Apr. 30th, 2019; published: May 7th, 2019

Abstract

The limestone composite stratum in Jinan Metro Line R1 contains a large amount of karst fissure water, which causes a large amount of water intrusion in the shield tunneling and seriously affects the excavation efficiency and construction safety. The development of limestone burst bodies, caverns and fissures in the Jinan Metro Line R1 is collected from the engineering geology and hydrogeological exploration results. Therefore, groundwater storage conditions and flow channels are obtained to predict the hazard risk of gushing water. According to the distribution characteristics of karst fissure water on the R1 line of Jinan Metro, a series of safety control techniques are adopted for shield tunnels through cracked caverns, including technical measures such as waterproofing, drainage and water plugging. This article mainly discusses the grouting water plugging scheme, technology and effect test in the limestone rocks.

Keywords

Metro, Shield Tunnel, Karst, Fractures, Water Inflow, Water Stemming

济南地铁含岩溶裂隙水盾构区间注浆堵水控制技术

张德文^{1,2}, 李文^{1,2}, 陈磊³, 宫斌¹, 盖姜博¹, 仇晖¹, 刘丽晴¹, 耿传政¹, 乔晓磊¹

¹中铁十四局集团有限公司, 山东 济南

²中铁十四局集团隧道工程有限公司, 山东 济南

³中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉
Email: 42760473@qq.com

收稿日期：2019年4月15日；录用日期：2019年4月30日；发布日期：2019年5月7日

摘要

济南地铁R1号线穿越含灰岩复合地层中含有大量岩溶裂隙水，造成盾构掘进涌水量大，严重影响掘进效率和施工安全。对此，根据济南地铁隧道R1号线的工程地质和水文地质探测结果，获取R1号线中灰岩破裂体、溶洞、裂隙发育情况，从而分析了地下水储水条件及流动通道，预测突涌水灾害风险。针对济南地铁R1号线岩溶裂隙水分布特征，研究了一套盾构穿越溶洞裂隙水的安全控制技术，制定了防水、排水、堵水等技术措施。本文重点论述了在中风化石灰岩段注浆堵水方案、工艺及其效果检验。

关键词

地铁，盾构，岩溶，裂隙，涌水，注浆堵水

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

济南是著名的泉城，地下岩溶裂隙发育，溶洞众多，水源补给充足，裂隙的存在给地下水提供了储水条件及运输通道，并且灰岩裂隙岩溶水具承压性，盾构掘进过程中极易发生突涌水灾害。岩溶的存在可能会使盾构掘进过程中发生盾构机栽头、陷落[1]，隧道上方溶洞可能引发地表塌陷，运营期车辆振动引发地表坍塌或激发管片下方溶土洞的坍塌，导致列车运行存在风险并且岩溶水的存在引发溶洞继续发育，对地铁长期运营造成威胁。为确保施工及运营安全，必须对岩溶裂隙水、溶洞进行处理。

盾构施工过程中如采用直接降水方案，降水量巨大并且会威胁附近建筑物的运营安全[2]。为保证施工安全同时达到绿色施工的目标，按照“以堵为主，综合治理”的原则施工[3] [4] [5]，堵是从水源传播路径上阻断岩溶裂隙水向隧道渗透，尽量不影响地下水的原始结构，综合治理包括溶洞的注浆填充和结构的防水措施。

2. 工程概况及穿越灰岩复合地层岩溶裂隙水涌水情况

济南地铁 R1 号线王府庄站至大杨庄站区间线路主要穿越京沪高铁高架桥、京台高速公路桥、腊山河桥、陡沟桥，区间全长 3754 m，采用盾构法施工，区间在右 K30 + 411.950 (中心里程)处设一座中间风井，采用明挖法施工。王府庄站~风井区间盾构机均在此处拆机吊出，区间风井~大杨庄站区间左右线盾构机在此处分体始发。区间风井~大杨庄站段隧道长度约 2033 m，其中在 K30 + 460.3~K31 + 362.2 下穿灰岩段，该段区间需穿越两端基岩凸起段，左线隧道穿岩长度约 725 m，右线隧道穿岩长度约 798 m，该段线路图如图 1 所示。本文主要论述区间风井到大杨庄站中风化石灰岩段的岩溶裂隙水涌水情况及其安全控制技术。

中风化石灰岩地层单轴饱和抗压强度与土体强度相差悬殊，容易造成掘进机破岩困难、刀具严重偏磨、轴承受损等事故[6]。富水岩溶地区修建城市地下轨道交通工程有着极大的风险，盾构隧道的施工和运营过程中都有可能使溶洞顶板坍塌、溶洞的突泥、涌水等事故发生已成为当前最严重的地质灾害之一

[7], 给地铁隧道的施工和运营都带来了很大的安全隐患。目前, 区间风井~大杨庄站左线灰岩段已累计完成 426 m, 右线灰岩段累计完成 429 m, 盾构机在中风化石灰岩段掘进过程中, 地层岩溶裂隙水补给量大, 管片和掌子面涌水严重, 螺机喷涌严重(如图 2 所示), 额外消耗大量排水、清渣时间, 影响施工进度; 若盾尾清理不干净, 影响管片拼装质量可能影响施工安全。

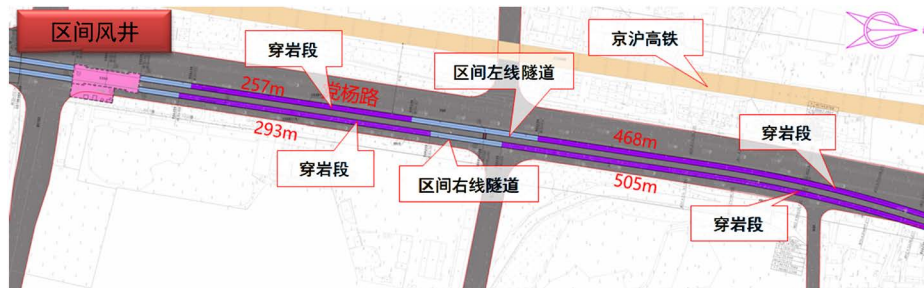


Figure 1. Route of line R1

图 1. 区间线路图



(a) 隧道渗水

(b) 掌子面涌水

(c) 螺旋机喷涌漏渣

Figure 2. Water flow in the tunnel

图 2. 隧道涌水图

3. 工程地质和水文地质条件

3.1. 工程地质

勘查资料显示, 灰岩段地层特点包括岩石强度高, 存在溶洞, 岩溶、裂隙水丰富。中风化石灰岩单轴饱和抗压强度位于 33.5 MPa~83.2 MPa 范围内, 标准值为 64 MPa, 在盾构机实际掘进过程中施工单位取岩芯送检发现岩石抗压强度普遍分布在 80 MPa 以上, 且最高达到 112 MPa, 现场钻孔岩芯完整性统计显示 ROQ 值在 5~50 之间, 普遍在 5~25 之间, 质量分级为极差。隧道沿线地质钻孔在中风化石灰岩段揭露有溶洞, 局部含有灰岩破碎体。王府庄站至大杨庄站区间线路溶洞数量较多, 厚度较大, 同时揭露有串珠状溶洞, 钻探揭露灰岩溶蚀现象较严重, 局部灰岩蜂窝状、针孔状溶孔溶隙发育, 在长期的地下水作用下, 溶洞规模可能进一步扩大, 岩溶稳定性较差。根据钻探成果, 钻孔揭露的溶洞总数为 129 个, 其中小于 1 m 的溶洞 79 个, 占溶洞总数的 61.2%; ≥ 1 m 的溶洞 50 个, 占溶洞总数的 38.8%; ≥ 2 m 的溶洞 29 个, 占溶洞总数的 22.5%; ≥ 3 m 的溶洞 23 个, 占溶洞总数的 17.8%。钻探揭露无充填型溶洞的钻孔 11 个, 揭露无充填型溶洞个数 12 个。其中 ZK39-2 号钻孔揭露 1.0 m 无充填型溶洞, 其余揭露无充填型溶洞均小于 1 m。充填物以黏性土及碎石为主, 碎石粒径及含量不均匀。

3.2. 水文地质

王大区区间灰岩段揭露地下水主要为灰岩裂隙岩溶水, 水位标高 27.06 m~32.05 m, 水位埋深 11.2 m~14.6 m。含水层主要为强风化灰岩层、中风化灰岩层及灰岩破碎体。主要接受大气降水入渗补给、河床渗漏集中补给及第四系松散岩类孔隙水渗透补给, 以人工开采排泄、补给第四系含水层为主。该层地下水主要赋存于灰岩岩溶裂隙中, 灰岩破碎裂隙及溶洞裂隙的存在给该层地下水提供了储水条件及运输通道。该层地下水局部受完整灰岩及上覆粉质黏土层隔挡, 具承压性。

中间风井原始位置做试桩施工时, 发现灰岩裂隙水量较大, 根据现场抽水试验分析, 补给水是溶岩裂隙水。抽水试验采用 100 m³/h 泵抽水时间 4 小时, 水位降低 0.4 m 后, 稳定水位不变, 地下水补给量大, 无法成桩, 中间风井的位置因此南移。

水文地质图中显示, 区间穿中风化石灰岩段, 为济南中西部片区水量最大的区域, 裂隙岩溶水单井出水量基本大于 10,000 m³/d, 说明该段为富水区, 水量补给较大, 且地下水具有承压性(见图 3)。

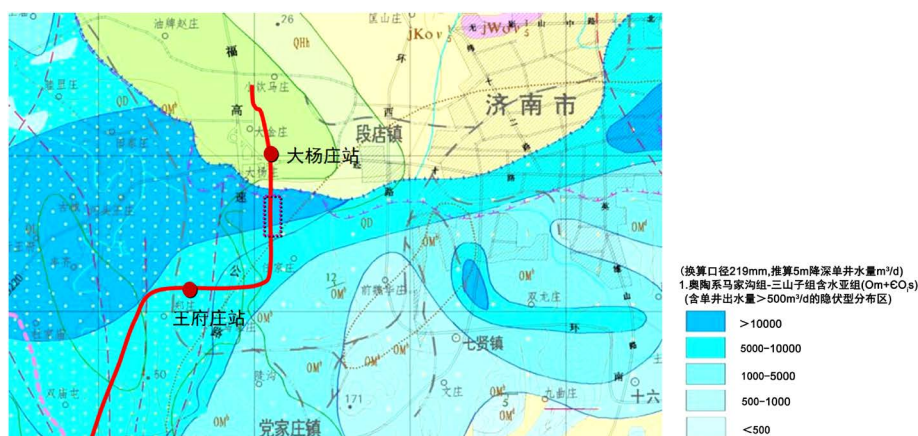


Figure 3. Hydrogeological of line R
图 3. 水文地质图

4. 穿越溶洞裂隙水的安全控制技术

在中风化灰岩段掘进过程中, 由于岩溶裂隙水补给量大, 造成螺机喷涌严重, 额外消耗大量排水、清渣时间; 盾尾漏水, 带走同步注浆浆液; 若盾尾清理不干净, 影响管片拼装质量; 严重影响围岩稳定性, 严重影响了施工阶段安全和质量, 施工进度也得不到保证。经过多方比较, 岩溶裂隙水安全控制技术确定为探测和处理相结合的方案。

探测的方法包括超前探测和地质钻探, 超前探测有地质雷达、激发极化、CT 扫描、电密度法等方法进行了地下水、溶洞、裂隙分布探测, 地质钻探是沿隧道中线每隔 5 米施打一个钻孔, 孔深约 23 米, 进行溶洞、裂隙水、完整性探测。这样得到的探测结果较为真实可信, 能为后面的处理方案提供很好的参考价值。

处理的技术有地表注浆, 井下施工时注浆, 盾尾二次环箍注浆。地表双液注浆预处理是通过地面钻探孔进行水泥水玻璃双液注浆; 井下注浆采用无害和初凝时间短的惰性浆液, 少量多次, 这样注浆的扩散范围小, 容易控制; 盾尾二次环箍灌浆尽可能靠近盾尾, 宜距盾尾后部 5 环左右, 阻隔盾尾后部来水, 将浆液凝结时间控制在 10 s 左右, 注浆压力应大于当前位置水压 2 bar~3 bar。掘进时可采用气压掘进模式, 即在开挖仓里注入膨润土等改良剂, 通过气压把膨润土压入周围的裂隙里, 起到封堵裂隙水的效果; 开仓换刀时, 采用平衡泥膜护壁带压开仓换刀。这一控制技术经过现场监测效果显著, 后面将做较为详细的介绍。

4.1. 岩溶水处理试验方案

由于掌子面涌水严重, 根据工程地质和水文地质条件, 虽然地下裂隙发育溶洞众多, 弄清地下水水源补给的来源, 从水源传播路径上截断, 因此需寻找水源补给方向, 水源方向探测通过以下方式进行:

- 1) 地质钻机钻孔, 钻孔位置如图 4 所示, 从地面打孔, 钻孔深度为掘进断面向下 5 米, 钻孔顺序为 5 → 3 → 7 → 1 → 9 → 2 → 4 → 6 → 8 → 0 → 10, 若过程中找到了水源补给方向, 2、4、6、8、0、10 可不再钻孔, 钻孔完成后, 注入清水, 若清水能够灌满、不向下渗入或者渗水速度慢, 则在此孔附近重新钻孔。
- 2) 注入水泥浆液, 观察掌子面是否有浆液流出, 若有水泥浆液流出, 则可以判定此孔方向为水源补给来源之一, 对此孔进行注浆或灌注砂浆处理;
- 3) 在已探测出的水源补给孔位两侧 1.5 米处钻孔, 进行注浆或灌注砂浆处理。

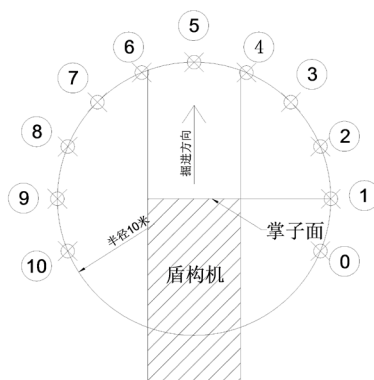


Figure 4. Detection drilling of water source
图 4. 水源探测钻孔示意图

4.2. 岩溶裂隙水处理

根据探测结果, 对水源补给孔及其两侧孔进行处理, 处理方式优先选用注双液浆, 当双液浆无法产生有效作用时, 采用灌注砂浆。

注双液浆法: 依次或同时对相应孔位进行袖阀管注浆, 当孔位具备注浆条件后, 先注入水泥浆液, 同时观察掌子面是否有浆液流出。确认有水泥浆液流出后, 调配双液浆凝固时间, 分别按照凝固时间 120 s、90 s、60 s、30 s、15 s 调整配比, 按照凝固时间由长到短依次进行注浆, 每种配比尝试注浆 1 h 左右(具体时间根据现场情况调整), 若持续流出则更换时间更短的配比, 直到掌子面不再流出浆液为止, 过程中做好施工记录, 特别是最终压力值, 作为后续施工的经验值。双液浆中水泥浆与水玻璃体积比 C:S = 1:(0.5~1), 水玻璃浓度为 35 波美度, 模数 $m = 2.4 \sim 2.8$ 。

灌注砂浆法: 当双液浆调整至最短凝固时间仍不能对涌水产生有效作用时, 尝试进行灌注砂浆[8]。

4.3. 溶洞处理

在可溶性岩层中, 构造裂隙发育, 地下水丰富, 由地下水的溶蚀和侵蚀, 形成的规模大小不一、形态各异、埋深不等的洞穴。容易造成盾构机卡机、刀盘突水, 隧道下方的溶洞塌陷引发地表塌陷等问题。

溶洞处理范围为隧道上部、隧道洞身范围、隧道底板下一倍洞径范围、隧道轮廓线外 5 m 范围内的溶洞都需要处理, 其中硬塑性黏土充填的溶洞可以不处理。

在探测有溶洞的地方加密钻孔, 钻孔间距 2.5×2.5 m, 进一步查清和了解溶洞的具体位置、大小、充填物性质及地下水情况, 加密钻孔可兼做注浆孔。对于全填充溶洞采用水泥浆进行填充加固; 对于岩

溶洞穴高度不大于 1 m 的无填充溶洞和半填充溶洞的直接采用 1:1 水泥浆液进行压力注浆；对于洞径小于 2 m 的无填充溶洞和半填充溶洞，可采用水泥砂浆填充；对洞径大于 2 m 的无填充溶洞和半填充溶洞，先采用吹砂处理，后采用注浆加固的方法；对于洞径大于 4 m 的特大型无填充溶洞，可考虑先投碎石，后采用注浆加固(如图 5)。并且在管片结构上预留岩溶处理专用孔，用于隧道掘进过程中新发现的溶洞，以及隧道后期发生沉降超限或异常的地段，沿线路纵向每 10 环管片进行洞内补充钻探，钻孔深度为隧道底部一倍洞径，根据钻探结果，对隧道底部进行注浆填充，保证运营安全。

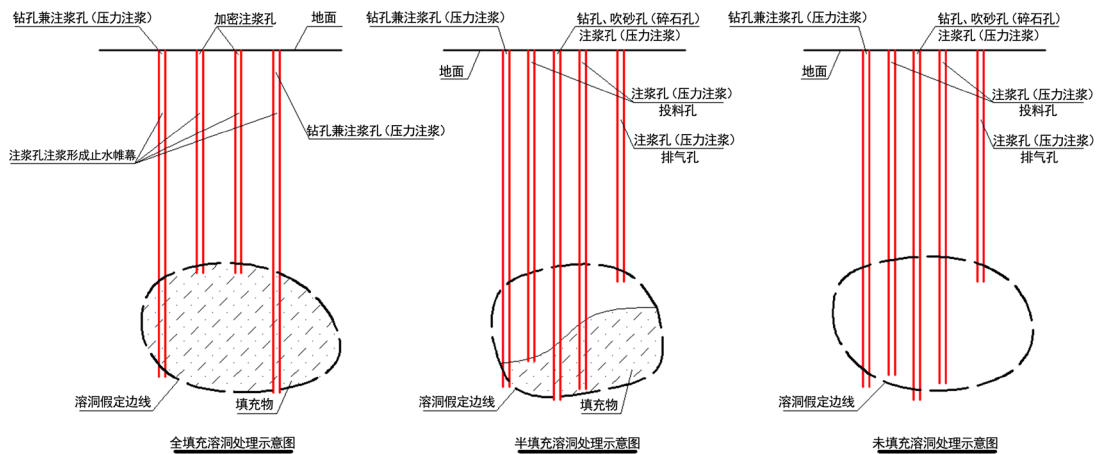


Figure 5. Cave treatment measures
图 5. 溶洞处理措施示意图

注浆用的水泥浆水灰比为 1:1.2，注浆压力控制在 0.4 MPa~0.8 MPa，袖阀管和注浆芯管下到洞底或洞底以下 0.2~0.3m，从洞底往上压注水泥浆或水泥砂浆当注浆压力达到 1.0 MPa，吸浆量 1 L/min~2 L/min 稳压 10 min 可终止注浆。

4.4. 径向注浆和管片防水加强处理

隧道内每环管片是由 6 只管片连接而成，管片宽 1.2 m，每环管片预留四个孔作为堵水注浆孔，浆液为水泥砂浆。隧道整个运营期内最大水头高度为 23.5 m。根据管片结构防水图中设计要求，管片接缝允许张开量为 6 mm 时，弹性密封垫仍可抵抗 0.8 MPa 的水压，因此，现设计方案满足隧道防水要求。但考虑到该段岩石强度较高，岩溶及破碎带发育，岩溶水水量丰富，盾构施工过程中掘进姿态难以控制，管片拼装质量难以达到理想状态，因此对穿岩段盾构管片满环柔性嵌缝，以提高管片的防水能力，嵌缝采用柔性聚氨酯密封胶(如图 6)。

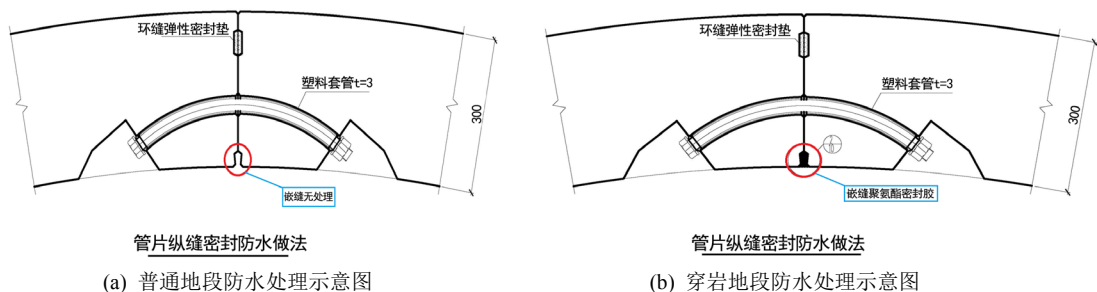


Figure 6. Segment waterproofing schematic
图 6. 管片防水处理示意图

5. 应用效果及结论

地面注浆加固,从水源传播处切断其传播,施工时采用分序孔的注浆方式,并宜采用间隔跳孔、逐步约束、先下后上的注浆施工方法,注浆过程中,随时关注泵压和流量变化,若吸浆量很大或压力突然下降,注浆压力长时间不上升,应查明原因,如工作面漏浆,可采取封堵措施;如跑浆可通过调换浆液、调整浆液配比,缩短浆液凝胶时间,进行大泵量、低压力注浆,必要时采用间歇注浆,及时调整注浆参数,以达到控域注浆的目的。

工程实践证明盾构机掘进到注浆区域后掌子面涌水情况得到明显改善。据统计处理前掌子面涌水量值大约为 $4 \text{ m}^3/\text{h}$,控制之后掌子面涌水量在 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下,管片上的涌水量几乎为零。从盾构机的掘进速度来看,前期由于涌水严重,盾构机时常需要排水而停机 2~3 天,掘进速度受到严重制约,不停机时掘进速度大约在 3 m/d ;控制之后平均掘进速度大约达到了 6 m/d 。由此可见溶洞的处理减少了盾构机卡机、栽头的灾害,确保了施工进度与施工安全,为之后地铁隧道的盾构施工提供了经济可靠的方法。

参考文献

- [1] 杨育僧,吴昊,许建飞,等.岩溶地层中的盾构隧道施工[J].铁道工程学报,2007,24(7):56-60.
- [2] 王国富,李罡,路林海,等.济南轨道交通 R1 线车站基坑降水回灌适宜性分析[J].施工技术,2016,45(1):67-72.
- [3] 李治国.隧道岩溶处理技术[J].铁道标准设计,2003,19(s1):36-40.
- [4] 刘招伟,张顶立,张民庆.圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区注浆施工技术[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1728-1734.
- [5] 张顶立,李治国,张民庆.圆梁山隧道高压富水区帷幕注浆及止浆技术[J].中国铁道科学,2004,25(3):27-31.
- [6] 竺维彬,王晖,鞠世健.复合地层中盾构滚刀磨损原因分析及对策[J].现代隧道技术,2006,43(4):72-76.
- [7] 黄润秋,王贤能,陈龙生.深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):573-576.
- [8] 汤德刚.灌浆技术在涌水溶洞处理中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(z2):3583-3586.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入,输入文章标题,即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org