

强岩溶地区盾构隧道注浆处理方案设计

代永文¹, 李建强¹, 林恩¹, 梁杰^{*1}, 惠晓彤^{2,3}

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213;

2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;

3. 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 岩溶地质对地铁隧道施工存在不利影响, 会带来安全隐患并增加施工难度。基于南京至句容城际轨道工程勘测资料对区间内溶洞进行分类, 总结类似强岩溶地层处理经验后提出相应处理原则, 采用三维有限元模拟确定岩溶处理范围, 并提出相应岩溶处理措施: 采用袖阀管注浆对隧道外轮廓起3 m内溶洞进行处理; 其孔位布设遵循探至溶洞边界的原则, 周边孔选取水泥-水玻璃双浆液, 中央孔选取纯水泥浆; 将注浆压力与注浆量作为终注指标并采用钻孔取心法对注浆效果进行检验使其满足强度、密实度与渗透性要求。现场钻孔取心发现, 处理后的心样完整连续, 水泥-土混合物密实, 验证了本方案的可行性。

关键词: 强岩溶地区; 盾构隧道; 岩溶处理; 数值模拟; 注浆加固

中图分类号: U455 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)06-0118-08

Grouting design for shield tunnels in strong karst areas

DAI Yongwen¹, LI Jianqiang¹, LIN En¹, LIANG Jie^{*1}, HUI Xiaotong^{2,3}

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University,

Shanghai 201804, China;

3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

Abstract: Karst geology has negative impact on subway tunnel construction, and may bring potential safety hazards and increase construction difficulty. Based on the exploration data of the Nanjing to Jurong intercity rail project, the karst caves in the interval are classified, the karst treatment experience of similar strong karst formations are summarized, and the relevant treatment principles are proposed. The three-dimensional finite element simulation is used to determine the karst treatment range with the corresponding treatment measures proposed. Sleeve valve tube grouting was used to treat caves within 3m of the outer contour of the tunnel with the deployment of the grout holes reaching the cave boundary as the criteria. The dual-fluid slurry of cement-water glass was injected from the peripheral holes, while plain cement slurry was injected from the central holes use. The grouting pressure and the grouting amount were taken as the final injection index, and grouting effect was checked by using the drilling core method to meet the requirements on strength, compactness and permeability. The core samples were found to be complete and continuous after treatment, and the cement-soil mixture was dense, which verified the feasibility of the grouting design.

Key words: strong karst area; shield tunnel; karst treatment; numerical simulation; grouting reinforcement

收稿日期: 2020-04-08; 修回日期: 2021-04-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.06.019

作者简介: 代永文, 男, 汉族, 1975年生, 高级工程师, 土木工程专业, 主要从事地铁隧道施工方面的工作, 四川省成都市天府新区兴隆湖畔路南段356号。

通信作者: 梁杰, 男, 汉族, 1990年生, 工程师, 主要从事地铁隧道施工方面的工作, 四川省成都市金牛区洞子口天悦城4栋1301, 710219883@qq.com。

引用格式: 代永文, 李建强, 林恩, 等. 强岩溶地区盾构隧道注浆处理方案设计[J]. 钻探工程, 2021, 48(6): 118-125.

DAI Yongwen, LI Jianqiang, LIN En, et al. Grouting design for shield tunnels in strong karst areas[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6): 118-125.

0 引言

岩溶地貌在我国分布广泛,随着岩溶地区地铁工程的修建,岩溶的存在增加了地铁隧道施工的难度,影响隧道的结构稳定,容易诱发岩溶塌落进而导致地面沉降。为减少岩溶对隧道施工的不利影响,常见的岩溶预处理措施有注浆充填加固^[1]、注浆帷幕^[2]、开挖回填^[3]和结构跨越等,注浆充填因操作简便、适用性强且作用效果显著而在实际施工过程中被广泛运用。

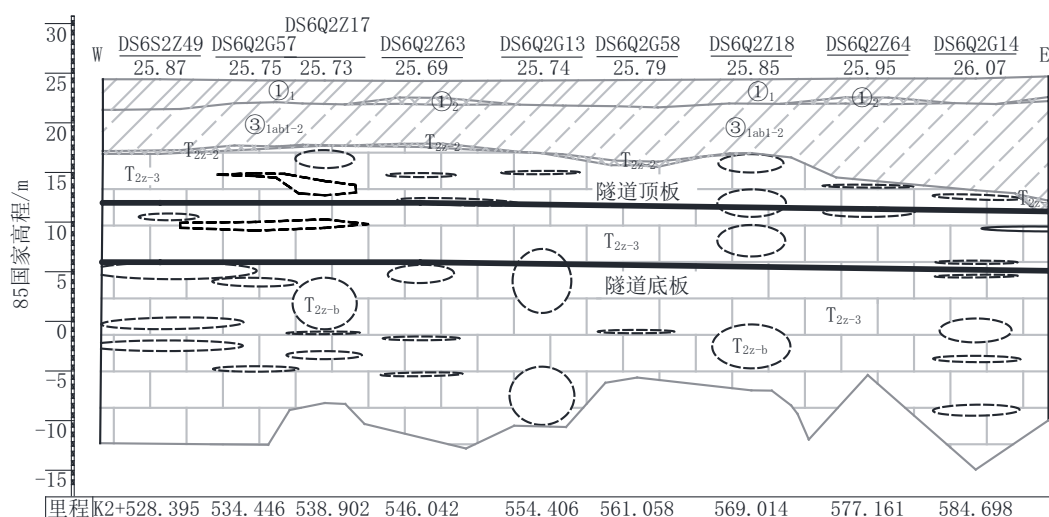
现阶段针对岩溶注浆填充技术研究,国内外工程技术人员和学者已取得了一定的成果。杨育僧等^[4]以广州地铁五号线工程为基础,根据溶洞的空间分布、大小、填充情况为分类依据,给出相应的溶洞处理措施。李慎奎等^[5]根据武汉地区岩溶发育特征将岩溶划分为高风险区、中风险区和低风险区,并给出相应的处理方式。黄焰等^[6]根据水文地质信息分析了广州地铁二号线竖井工程的涌水问题,对岩溶的处理采用注浆填充和旋喷桩加固形成止水帷幕。黄建明^[7]建议溶洞处理应综合考虑其位置、跨度、覆土高度、松弛高度、围岩性质等因素,根据溶洞充填情况给出不同处理措施。傅中文等^[8]认为隧道岩溶处理中可根据空穴大小、围岩稳定与否、水量大小和充填状况等对岩溶分类,对隧道中不同类型的岩溶采取多种方法进行综合治理。

综上,现有实际工程多依据过往工程经验,缺乏

理论依据,虽然考虑到岩溶地质的地域特性,处理水平仍是参差不齐。本文依托于南京至句容城际轨道交通工程岩溶集中段,将工程中已勘明溶洞根据分布范围、大小及填充情况等方面进行分类,参考国内同类地质工程施工经验,结合数值模拟,确定岩溶处理范围,并提出满足地铁隧道结构承载力和稳定性要求的岩溶充填注浆处理措施。

1 工程概况

南京至句容城际轨道交通工程DS6-TA01标段,区间地层从上到下分布为:杂填土、粉质粘土、中风化泥质灰岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩。麒麟镇站—白水桥东区间长725.721 m,隧道埋深范围为12.9~23.44 m。根据勘察资料及设计图纸,区间左、右线隧道穿越地层多为中风化泥质灰岩。其中里程K2+527~K3+000范围内为岩溶发育区段,区段内钻孔岩溶遇洞率为93.1%,岩溶线溶率为16.6%,根据《建筑地基基础设计规范》^[9]判定岩溶发育程度等级为强发育。岩溶洞隙主要沿岩层层面和节理面发育,数量较多,多呈串珠状。体积<50 m³的溶洞比例占已勘明溶洞数量的76%,溶洞平均充填率达75%,充填物主要为粘土、粉质粘土,局部夹泥质灰岩碎块,碎块粒径2~8 cm。单个溶洞主要分布在隧道的上部,占已勘明溶洞的51%,其地质剖面如图1所示,图中虚线为已勘明溶洞。



①₁—杂填土;①₂—素填土;③_{1ab1-2}—粘土、粉质粘土;T_{2x-2}—强风化泥质灰岩;T_{2x-3}—中风化泥质灰岩;T_{2x-b}—粘土、粉质粘土(溶洞填充物)

图1 代表性地质剖面

Fig.1 Representative geological section

根据勘察揭示的地层结构和地下水的赋存条件,拟建场地地下水类型有孔隙潜水、基岩裂隙水和岩溶溶隙水。各地下水间水力联系不密切。但岩溶含水层在一定的动水压力作用下土层中的细粒土可能被带走从而产生流土和管涌现象;盾构穿越该层时,可能导致盾构掘进面失稳。因此,需对已勘明溶洞进行注浆加固处理,防止盾构施工时盾构机栽头、掌子面突水及坍塌等情况的发生,保障盾构隧道安全施工。

2 岩溶注浆加固设计原则

2.1 岩溶发育情况分析

根据溶洞高度(3 m)将已勘明溶洞分为大型溶洞、小型溶洞^[10]。如图2所示:其中小型溶洞有151个,占已勘明溶洞的85%。

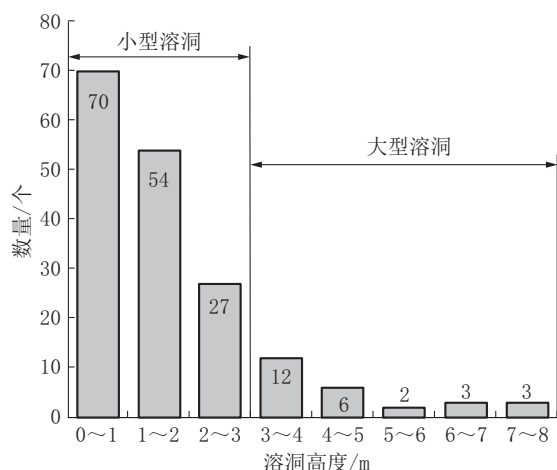


图2 溶洞尺寸统计

Fig.2 Statistics of cave sizes

将充填率 $>70\%$ 的溶洞归为全填充溶洞,充填率在 $30\%\sim 70\%$ 间的溶洞为半填充溶洞,充填率 $<30\%$ 的溶洞为无填充溶洞。如图3所示:全填充溶洞占已勘明溶洞的68%,且前文中小于3 m的151个溶洞中有104个为全填充溶洞,占69%,即已勘明溶洞以全填充小型溶洞为主,结合地勘资料及上述统计结果,可得其代表性溶洞尺寸为 $3\text{ m}\times 3\text{ m}\times 6\text{ m}$,充填率为75%。

2.2 溶洞处理范围

决定溶洞处理范围的关键在于隧道开挖与溶洞之间临界岩层厚度的研究,当围岩应力达到或超过强度临界值时会形成连续贯通的塑性区,产生剪切

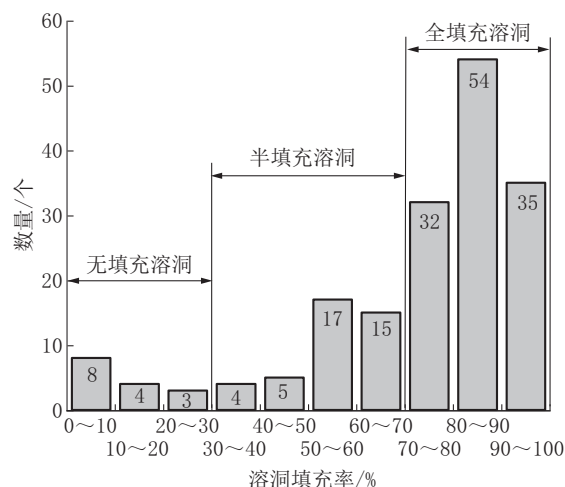


图3 溶洞填充率统计

Fig.3 Statistics of karst cave filling rates

破坏,引起较大位移,从而导致失稳^[11]。本文通过折减溶洞与隧道间距,分析围岩塑性区变化以得到本工程的岩溶处理范围。

结合工程情况建立三维有限元数值模型,如图4、图5所示。模型尺寸为 $X\times Y\times Z=40\text{ m}\times 42\text{ m}\times 50\text{ m}$,地层由上至下依次设置为杂填土(3.4 m)、粉质粘土(7.6 m)和中风化泥质灰岩(39 m),且均采用Mohr-Coulomb理想弹塑性模型,地层及隧道结构物理力学参数如表1所示。其中,盾构隧道埋深为21.9 m,内径为5.5 m,衬砌厚度为0.35 m,注浆层厚度为0.105 m,开挖面直径为6.41 m,盾构机主机长度8.4 m,为模拟其自重对盾构掘进的影响,采用相同的盾壳质量替代盾构机主体质量,模型中岩土体、衬砌、等代层及盾壳均采用C3D8R单元类

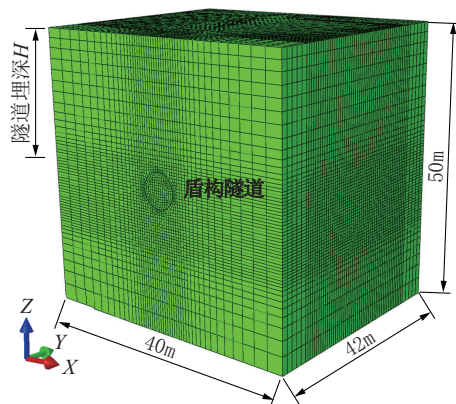


图4 三维盾构隧道开挖模型尺寸示意

Fig.4 Dimensional diagram of the three-dimensional shield tunneling model

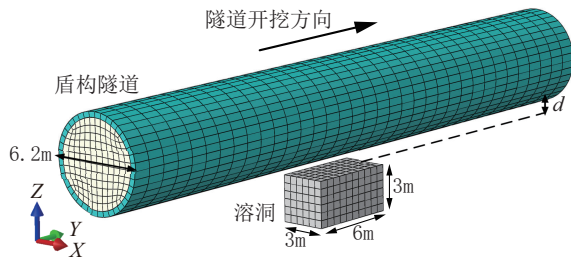


图 5 底部溶洞与隧道空间示意

Fig.5 Spatial schematics of the karst cave and the tunnel

型。由前文可得,本工程中已勘明溶洞的平均充填率为 75%,模型中采用“空场力学模型”简化溶洞并对填充物密度及弹性模量折减 25% 的方式模拟充填率影响。

采用等效塑性应变(PEEQ)描述塑性区的产生及发展,如图 6 所示,图中灰色区域表明土体已产生塑性变形,并将围岩塑性区的发展范围定义为 S 。以隧道底部溶洞为例,当溶洞与隧道距离 $d=2.5$ m

表 1 各土层及结构物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers and structures

土层及结构	容重 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹模 E / MPa	泊松比 μ	粘聚力 c /kPa	内摩擦 角 φ /($^{\circ}$)
杂填土	19.0	14.9	0.31	17.7	10.5
粉质粘土	20.0	27.3	0.31	45.6	15.0
中风化泥质灰岩	23.0	1000	0.35	100	27
溶洞填充物	12.8	12.4	0.35	27.9	7.6
衬砌	25.0	30000	0.3		
注浆层	21.0	1.5	0.2		
盾壳	180.0	210000	0.2		

时,隧道周边围岩塑性区与溶洞贯通(图 6b),影响盾构隧道的施工安全;当距离 $d=3$ m 时,溶洞的存在虽会影响相邻围岩塑性区,但无法贯通(图 6c),可以认为是安全状态。故溶洞处理范围为 3 m。

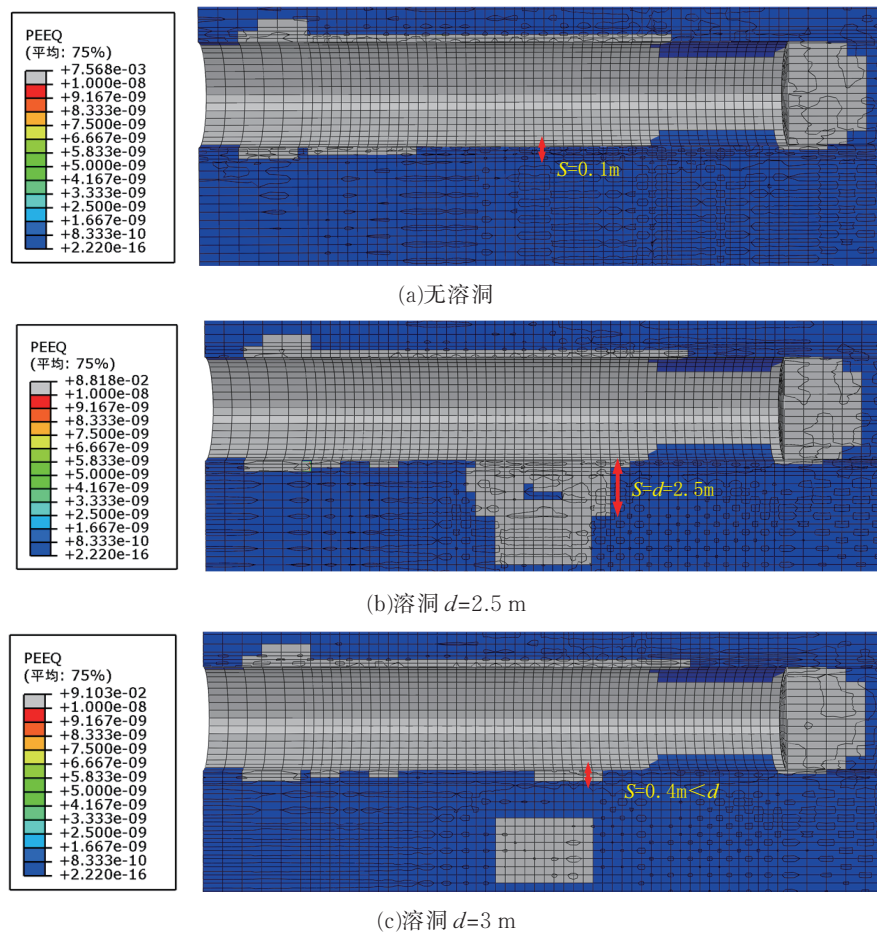


图 6 溶洞与隧道间距离对围岩塑性区的影响

Fig.6 Effect of the distance between the karst cave and the tunnel on the plastic area of surrounding rocks.

结合数值模拟结果及岩体特性、溶洞填充情况,本工程溶洞处理范围为从结构轮廓外放3 m,统计结果如图7所示。

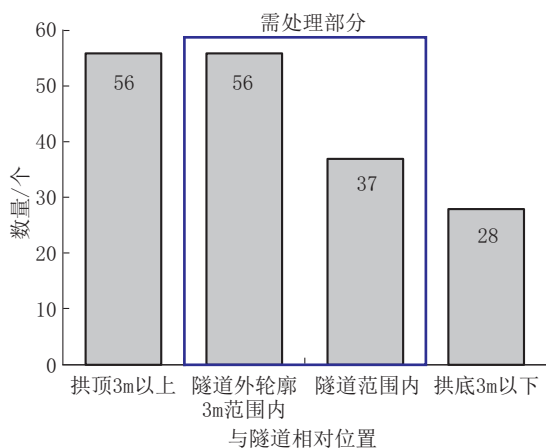


图7 需处理溶洞与隧道相对位置统计

Fig.7 Statistics of the relative positions of caves and tunnels to be treated

2.3 溶洞处理措施

结合上述研究及相似工程案例,根据溶洞充填率及高度对处理范围内溶洞采取不同的措施。

(1)半填充、未填充溶洞:针对溶洞高度 <3 m的无填充或半填充型溶洞,可直接采用注浆处理。对于高度 >3 m的溶洞,应先去除溶洞内的软弱充填物质,在原钻孔附近补钻投砂孔,利用高压投砂把空洞部分填实,然后再进行注浆加固处理。

(2)全填充溶洞:全填充溶洞的处理应根据填充物的具体情况确定,本工程填充物主要为软塑—可塑状粘土、粉质粘土,可直接采用水泥浆液注浆充填。

3 溶洞充填注浆加固

3.1 注浆钻孔布设

岩溶注浆处理前,需先进行溶洞平面范围的试探测:以勘测点DS6Q2Z63为例(图8),探测孔位间距以2.0 m控制,钻孔深度以横断面上需处理的溶洞底部高程为准;沿隧道轴线方向以溶洞基准点为中心前后范围内补充钻孔(孔位间距按照3.0 m控制),以基本找到溶洞边界为止。

根据溶洞处理范围,注浆孔主要分布在左右隧道中心线上以及大型溶洞分布区域。钻孔平面布置由前期勘测钻孔向外扩散,按照间距2 m布置钻孔,

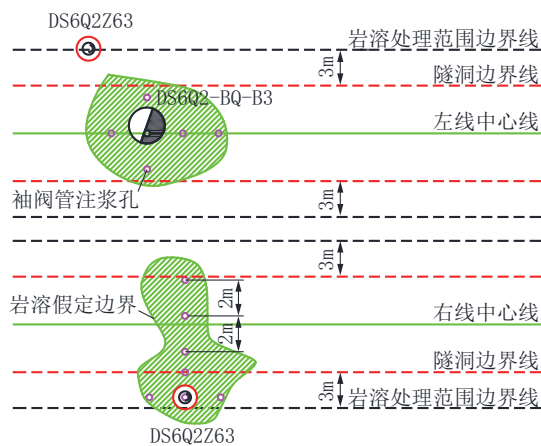


图8 溶洞处理注浆平面布置

Fig.8 Plan layout for karst cave grouting treatment

注浆管应进入溶洞底部以下不小于0.5 m。小溶洞一般钻2~3个孔,大溶洞根据现场情况采用四边形布置钻孔,孔位间距1 m。

3.2 注浆施工要点

施工顺序按照先试探测处理边界—注浆填充(高度 >3 m的无填充或半填充型溶洞先进行填砂加固处理)—注浆效果检测。

注浆填充采用 $\varnothing 50\sim 60$ mm的PVC袖阀管进行压力注浆,注浆压力从低到高,采取间歇、反复注浆,且间歇式注浆每次注浆间隔6~10 h。

为保证注浆效果,注浆施工时应先进行周边孔注浆,将处理范围内溶洞与外部溶洞隔开,再处理中间区域溶洞,以控制注浆量,防止浆液流失,注浆孔剖面布置见图9。周边孔注浆,以相对小压力、多次数、较大量控制,注浆压力保持在0.6~1.0 MPa,注浆3~5次;中间孔注浆压力保持在0.8~1.0 MPa,注浆3次。最大注浆压力不得超过1.5 MPa,终压控制在1.0 MPa以下。

为防止窜浆、跑浆,中间区域溶洞补充孔应跳跃施工。全孔段注浆完成后,间歇一段时间再进行第二次注浆,间歇时间控制在5~30 min。

3.3 注浆材料及注浆方式

常用注浆材料主要分为水泥类注浆材料和化学类注浆材料。水泥类注浆材料来源广泛易获取、污染小、强度高、价格低,但不适用于复杂岩溶处理,在富水岩溶地区注浆时浆液易被稀释、耗浆量大导致成本增加,填充效果不好^[12]。

水泥浆防渗性能好但凝结时间长,可添加速凝

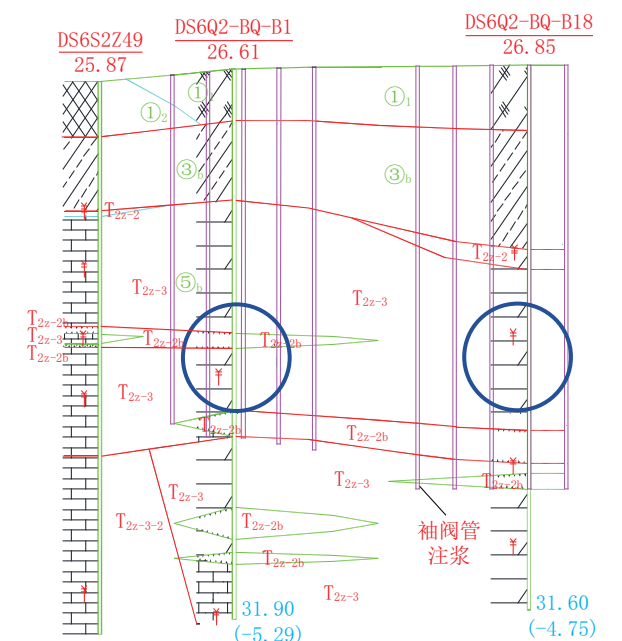


图 9 溶洞处理注浆纵剖面布置

Fig.9 Layout of the grouting longitudinal section for karst cave treatment

剂如水玻璃来调节水泥浆液的性能。水泥-水玻璃浆液可以通过配比控制凝结时间,但双浆液混合不均匀会降低强度和防渗性能,同时提高了注浆难度,容易造成堵管憋泵现象。根据不同配比水泥与水玻璃凝胶时间的试验结果可知:水玻璃浓度在 30~50 Be 区间内,凝胶时间随浓度增长而增长;水玻璃模数较大时,凝结时间短,结石强度高。水玻璃与水泥的体积比在 0.8:1~1:1 范围内,水玻璃掺量较少,凝结时间较短^[13]。

针对国内现有溶洞充填注浆工程案例进行分析,结合工程地质情况、溶洞分布情况对其采用的注浆方式、注浆材料和配比进行总结,以期为本工程提供相关参考。查阅类似工程案例^[14-18],总结各类岩溶注浆方案如表 2 所示。为此,本工程中溶洞采用袖阀管进行注浆填充。

表 2 类似工程各类岩溶注浆方案				
Table 2 Karst grouting plans for similar projects				
工程项目	地层特性	溶洞类型	注浆材料	注浆方式
武汉地区桩基施工	二叠系灰岩	串珠型	纯水泥浆	袖阀管注浆
长沙地铁 1 号线		埋藏型	纯水泥浆	袖阀管注浆
长沙地铁 5 号线	中风化钙质砾岩		水泥-水玻璃双浆液	袖阀管注浆
广州地铁两线区间交汇	炭质灰岩沉积地层	埋藏型	周边孔:纯水泥浆+水玻璃;中央孔:纯水泥浆	袖阀管注浆
广州地铁 8 号线	微风化岩层		周边孔:纯水泥浆+水玻璃;中央孔:纯水泥浆	袖阀管注浆
广州地铁 3 号线北延段	汇演沉积地层	串珠型	周边孔:纯水泥浆+水玻璃;中央孔:纯水泥浆	袖阀管注浆

(1) 周边孔:采用水泥-水玻璃双液浆,水泥浆水灰比 0.8~1,水泥浆和水玻璃(体积比)比例 1:0.6~1:0.8,水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,水玻璃模数 $m=2.3\sim3.4$, $Be=30\sim40$,具体配合比应根据现场试验确定。

(2) 中间孔:水泥浆液采用 42.5 级普通硅酸盐水泥配制,水灰比 0.8~1,具体应根据现场试验确定。

3.4 终止注浆指标

综合考虑注浆压力与注浆量等因素,本工程采用的注浆结束条件为:

(1) 当注浆压力 ≥ 0.8 MPa,吸浆量 < 2.5 L/min,稳定时间 5~20 min。表明该处溶洞已灌注饱

满,可换孔注浆。实际施工过程中注浆终止压力应根据地下水位及压力作出调整。

(2) 发现被加固地基有上抬的趋势时,立即停止注浆。

(3) 发现串浆或浆液流失严重时,立即停止注浆,10~15 min 后可再次对该孔灌浆,若串浆现象仍然存在,表明该处溶洞已灌注饱满,可换孔灌浆。

(4) 特殊情况当注浆压力不大基底出现异常上鼓时,应终止注浆,可利用附近注浆孔补充注浆。

3.5 注浆效果检查

对注浆效果进行合理评价是保证安全施工,确保注浆质量的关键。本工程采用检查孔法,即在处理后的溶洞注浆固结体内钻孔取心,以检查其充填

情况及胶结状况,再对取心孔进行抽水试验,以检查处理后溶洞的渗透性。

(1)采用钻芯法检测,随机在各勘测孔1.5 m范围内布置检测点,检查溶洞充填物胶结情况或裂隙充填情况、钻孔泥浆是否漏失。

(2)检测要求:①无充填半充填溶洞,抽芯检测率应达到90%以上;②全充填溶洞充填物强度标贯击数 ≤ 10 击;③检测钻孔泥浆是否漏失。

(3)对加固区取心土体进行强度及渗透性检测,要求加固土体28 d无侧向抗压强度 ≤ 1 MPa,加固体渗透系数 $\geq 1 \times 10^{-4}$ cm/s。

(4)对溶洞注浆效果进行检验,主要是检查填充率及密实程度,采用二次压浆的方法检查填充率并采用标贯法测定密实程度,标贯值达到坚硬状土为优,硬塑状土为合格。

(5)应确保加固体的完整连续、均匀、密实性。

4 工程处理效果

采用上述处理方案进行本区间的溶洞注浆加固工作,总用时79 d,保证了后续盾构推进不受溶洞处理工期的影响。施工过程中共使用水泥量1372 t,平均单孔水泥注浆量为 4.8 m^3 ,符合施工预期及理论设计值。注浆施工结束后,按相关规范要求自检并提请第三方检测单位进行综合质量检测与验证分析评价,结果显示:现场钻孔心样完整连续,水泥-土混合物密实,如图10所示,进一步验证了本方案的可行性。



图10 现场钻孔心样验证

Fig.10 Site verification by drilling core samples

5 结论

本文对南京至句容城际轨道交通工程中的岩溶处理问题进行研究,其主要研究结论如下:

(1)对溶洞采取袖阀管注浆的处理方式,大型无填充、半填充溶洞先填砂加固再注浆处理,小型无填充、半填充溶洞与全填充溶洞均采用直接注浆加固的方式。

(2)溶洞的处理范围为隧道外轮廓起延伸3 m。注浆孔按间距2 m布置,小型溶洞钻2~3个孔,大型溶洞采用四边形布置钻孔,孔位间距1 m。

(3)袖阀管注浆材料周边孔选取水泥-水玻璃双浆液,中央孔选取纯水泥浆。注浆施工时先进行周边孔注浆,再对中央孔注浆,中间孔注浆采用跳跃施工。

(4)注浆压力 ≥ 0.8 MPa,吸浆量 ≤ 2.5 L/min,稳定时间5~20 min可终止注浆。采用钻孔取心法对溶洞注浆效果进行检验,加固土体应满足强度、密实度与渗透性的要求。

参考文献(References):

- [1] 李治国. 隧道岩溶处理技术[J]. 铁道工程学报, 2002, 19(4): 61-67.
LI Zhiguo. Technology of treatment for karst encountered in tunnel construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002, 19(4): 61-67.
- [2] 刘瑞琪. 城市岩溶区地铁隧道的溶洞超前探测及处治技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2012, 25(2): 42-46.
LIU Ruiqi. Construction treatment technology for city metro in karst area[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2012, 25(2): 42-46.
- [3] 龙艳魁. 长沙地铁1号线工程岩溶洞穴稳定性及其病害处理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
LONG Yankui. The study of stability and processing technology of karst caves in Changsha Metro Line 1[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [4] 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): 58-62.
YANG Yuseng, WU Hao, XU Jianfei, et al. Construction of shield tunnel in karst strata[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 24(7): 58-62.
- [5] 李慎奎, 陶岚. 武汉地区岩溶发育特征及地铁工程中岩溶处理[J]. 隧道建设, 2015, 35(5): 449-454.
LI Shenkui, TAO Lan. Features of karst development in Wuhan area and treatment of karsts encountered in construction of Wuhan Metro[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(5): 449-454.
- [6] 黄焰, 伍永胜. 岩溶地区城市地下浅埋隧道工程技术研究[J].

- 土木工程学报, 2005, 38(8): 111-117.
- HUANG Yan, WU Yongsheng. Engineering techniques for construction of shallow underground tunnels in urban karst regions [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(8): 111-117.
- [7] 黄建明. 广佛线地铁隧道土洞和溶洞的探测与处理[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(6): 132-135.
- HUANG Jianming. Exploration and treatment method of the soil cave and limestone cave in metro tunnel of Guang-Fo Line [J]. West-China Exploration Engineering, 2007, 19(6): 132-135.
- [8] 傅中文, 舒磊, 谢卫民. 复杂地质条件下隧道施工中典型岩溶处理措施[J]. 山西建筑, 2009(7): 305-309.
- FU Zhongwen, SHU Lei, XIE Weimin. On the exploration of typical karst treatment measure in tunnel construction under complex geological condition [J]. Shanxi Architecture, 2009(7): 305-309.
- [9] GB 50007-2011, 建筑地基基础设计规范[S].
- GB 50007-2011, Code for design of building foundation[S].
- [10] 李广涛. 广州地铁三号线北延段岩溶处理设计[J]. 隧道建设, 2009, 29(1): 61-64.
- LI Guangtao. Design of karst treatment case study on north extension section of No.3 Line of Guangzhou Metro [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(1): 61-64.
- [11] 谢琪, 段智博, 马少坤, 等. 岩溶区盾构隧道开挖的稳定性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S1): 156-160.
- XIE Qi, DUAN Zhibo, MA Shaokun, et al. Stability analysis of shield tunnel excavation in karst [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(S1): 156-160.
- [12] 雷金山. 广州地铁隐伏型岩溶地基稳定性分析及充填处理技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- LEI Jinshan. Foundation stability and filling technology research on hidden karst in Guangzhou Metro [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [13] 刘玉祥, 柳慧鹏. 水泥-水玻璃双液注浆中的最优参数选择[J]. 矿冶, 2005, 14(4): 1-3.
- LIU Yuxiang, LIU Huipeng. Optimal parameters selection of cement-water glass two-shot grouting [J]. Mining & Metallurgy, 2005, 14(4): 1-3.
- [14] 朱考飞, 张可能, 毛亚军, 等. 浅埋盾构隧道水下岩溶处治与施工控制技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10): 16-20.
- ZHU Kaofei, ZHANG Keneng, MAO Yajun, et al. Underwater karst treatment and construction control technology for shallow shield tunnel [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10): 16-20.
- [15] 万维燕. 岩溶区地铁基坑涌水治理技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(12): 17-19, 42.
- WAN Weiyan. Research on the water gushing treatment technology of subway foundation pit in karst area [J]. Railway Construction Technology, 2017(12): 17-19, 42.
- [16] 滕扬. 袖阀管注浆在广州地铁岩溶处理中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2008(13): 234, 239.
- TENG Yang. Application of sleeve valve tube grouting in karst treatment of Guangzhou Metro [J]. China High Technology Enterprises, 2008(13): 234, 239.
- [17] 曲强. 溶土洞对地铁施工、运营的影响及治理措施[J]. 铁道标准设计, 2009(10): 68-71.
- QU Qiang. Influence of karst cave on construction and operation of metro as well as realignment measures [J]. Railway Standard Design, 2009(10): 68-71.
- [18] 范峥, 钟久安, 何非凡, 等. 高聚物复合堵水浆材在岩溶地区深孔帷幕灌浆中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(1): 86-90.
- FAN Zheng, ZHONG Ju'an, HE Feifan, et al. Application of high polymer composite water blocking slurry in deep hole curtain grouting in the karst area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1): 86-90.

(编辑 周红军)