

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.09

富水隧道幕墙堵水技术研究

吴祖松¹, 侯秋萍¹, 马君伟², 刘琦¹, 肖 锦¹, 李 松¹

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2. 深圳市工勘岩土集团有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要: 富水隧道的涌水问题是目前隧道施工中要解决的首要问题, 尤其是涌水量特别大、水流速度大的隧道。目前针对该问题多采用注浆加固圈的方法, 以排为主, 后注浆加固。这种方法对于涌水量不大、渗透率低的围岩可行, 而对于水压大、地下水丰富的隧道, 其效果差、成本高。针对该问题, 文章提出一种幕墙堵水技术。首先分析渗透力与浆液的黏滞系数之间的关系, 通过计算得出多孔介质中注浆浆液在渗透力作用下的地下水临界流速, 确定幕墙距离隧道的最佳间距为 2 m, 并提出了 24 种不同尺寸的注浆方案。采用数值模拟方法, 分别计算了 24 种注浆方案的堵水或限排效果。最后在所建的 24 个模型中得出注浆深度为 30.6 m, 注浆长度为 20 m 的方案为最佳堵水方案, 并应用到工程中。结果显示该方案堵水效果明显, 洞内积水降低 80%, 能保证隧道下一步施工。研究表明: 通过临界流速分析方法能够经济、快速地确定堵水或限排方案, 满足现场施工及注浆堵水限排的要求, 研究成果可为类似工程设计提供理论依据。

关键词: 渗流; 渗透力; 浆液黏度; 渗流速度; 帷幕注浆; 富水隧道

中图分类号: P641.7; U452.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0065-07

Research on water blocking technology of curtain walls in water-rich tunnels

WU Zusong¹, HOU Qiuping¹, MA Junwei², LIU Qi¹, XIAO Di¹, LI Song¹

(1. Civil Engineering College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Shenzhen Geokey Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518026, China)

Abstract: The problem of water inrush in water-rich tunnels has become the primary problem to be solved in tunnel construction, especially in tunnels with particularly large water inflow and high water flow velocity. At present, most of the existing researches focus on the grouting reinforcement circle, which is mainly based on drainage and post-grouting. This method is feasible for surrounding rock with small water inflow and low permeability, but where it is high in water pressure and rich in groundwater, tunnels have poor performance and high cost. In view of this problem, this paper proposes a technical solution for curtain wall water blocking. Firstly, the relationship between the penetrating force and the viscosity coefficient of the slurry is analyzed. The critical flow velocity of the groundwater under the penetrating force of the grouting slurry in the porous medium is calculated, and the optimal spacing of the curtain wall from the tunnel is determined to be 2 m. Twenty-four different sizes of grouting solutions are proposed. Secondly, numerical simulation method is used to calculate the water blocking or limiting effect of the twenty-four grouting schemes. Finally, in the twenty-four models built, the scheme with a grouting depth of 30.6 m and a grouting length of 20 m is the best water shutoff scheme and is applied to the project. In the engineering application, the water in the cave is reduced by 80%, and the water blocking effect of the scheme is obvious, which can ensure the next construction of the tunnel. The research results show that the critical flow rate analysis method can economically and quickly determine the water blocking or limited discharge scheme to meet the requirements of in situ construction and grouting and water blocking. The research results can provide theoretical basis for similar engineering design.

收稿日期: 2018-11-28; 修订日期: 2019-01-25

基金项目: 重庆市科委基础研究与前沿探索(cstc2016jcyjA0190); 社会事业与民生保障科技创新专项(重点研发项目)(cstc2017shms-zdyf0412); 国家自然科学基金(51808083)

第一作者: 吴祖松(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事隧道工程、地下工程等领域的教学与科研工作。E-mail: 51315640@qq.com

Keywords: seepage water; penetration; slurry viscosity; seepage velocity; curtain grouting; water-rich tunnel

近年来,隧道工程在交通基础设施建设中占比迅速增加,其受水害影响的形式也呈多样化,并因地下水的影响导致施工难度加大。由于勘测结果的不确定性,隧道的水害问题无法在设计阶段从根本上解决,从而严重影响隧道施工安全。因此,解决隧道水害问题特别是在富水地区,是保证隧道施工安全性、控制建设成本的关键。

目前,处理隧道渗流涌水问题的原则为“以排为主”,即将地下水排出隧道外,再进行围岩注浆,形成注浆加固圈。如 LIU J 等^[1]提出了渗流-侵蚀突水耦合模型,研究帷幕注浆厚度与渗透腐蚀的关系;邓仁清^[2]证明在涌水量大、涌水压力高的地层中,用预应力锚索加固可以明显提高全环帷幕注浆堵水效果;张成平等^[3]分析了不同注浆机理对于不同围岩产生的效果。也有学者利用渗透系数对渗流特性^[4]和非均质地层的渗流量^[5]进行了研究。

虽然围岩注浆加固堵水具有适用范围广且施工简便等优点,但在涌水量大、水压力高的地层中直接注浆堵水的效果并不理想,甚至失败;分段注浆以减小地下水渗透力等注浆堵水方式则应运而生。刘强等^[6]通过模型试验研究了隧道周围水压分布规律和不同注浆圈参数下的渗流场分布;杜朝伟等^[7]用解析方法计算出初期支护和二次衬砌背后水头的计算公式,表明注浆圈和初期支护施工效果对衬砌后水压力和渗流量的影响很大;李鹏飞等^[8]提出了针对复合衬砌结构的海底隧道渗水量及水压力计算模型,并通过数值模拟验证了其合理性;丁小平等^[9]验证了使用轴对称解计算设置防水板和排水系统的复合式衬砌的隧道涌水量。

以上研究成果均以注浆加固圈为研究对象,对不同工况下堵水措施的研究则显不足。以排为主,后注浆加固,对于涌水量不大、渗透率低的围岩可行,而对于水压力大、地下水丰富的隧道,其效果差、成本高。本文依托海南海口市南渡江引水工程中部输水隧道,提出堵排结合的处治方案,并通过数值计算和理论分析,验证了堵排结合方案以及幕墙堵水技术的合理性,为富水隧道施工提供理论依据。

1 工程概况

海口市南渡江引水工程中部输水隧道项目属海口市中西部城市供水线路,建设地点在海南省海口市美万村北侧,县道 X144 东侧至东城水库东侧约 200 m 位

置。工程施工场地为原始林地或经济作物区,工程周边城市主干道、市政道路较多且施工区域周边散布居民较多。该项目施工总平面图如图 1 所示。



图 1 施工总平面图

Fig. 1 Construction master plan

输水隧道的地面高程为 57.90 ~ 85.40 m,隧道埋深 24 ~ 50 m,隧道全长 13.22 km。地形较为平坦,为玄武岩风化台地地貌单元。属性最差段为全风化玄武岩(β^1),属 V 类围岩,洞室围岩的整体稳定性差,全风化岩体渗透系数为 $9.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,属中等透水性。

南渡江流域径流枯水期为每年 12 月—翌年 5 月。枯水期多年平均流量为 $47.2 \text{ m}^3/\text{s}$;2 月最枯,最枯时期多年平均流量为 $27.8 \text{ m}^3/\text{s}$;丰水期多年平均流量为 $81.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。该流域暴雨具有季节长、雨量多、强度大、频次高、时空分布不均匀等特点,常发生在 4—11 月,个别年份曾在 3 月或 12 月发生暴雨,较集中的发生时间为 5—10 月;一次降雨过程历时 3 d 左右,最长可达 13 d。全市多年平均降水量为 1 818.7 mm。隧道上部岩石渗透系数高,导致水流量很大(图 2),水位距洞顶 2 m,洞顶水系发达。

2 帷幕注浆临界距离

由于开挖等原因,隧道开挖面周围的压力得到释放,若不及时支护,隧道内的水很难自行稳定。而在地下水丰富的地区,开挖后岩石中的孔隙水涌入隧道内且流量大,若在此时支护,则浆液在初凝前就会被水流冲散稀释,被带回隧道。因此,考虑在隧道外一定距离处注浆,形成一堵水墙,使得在墙后一定范围内的水流量大大减少,从而保证隧道的下一步施工。

水在岩石裂缝中,因为水头差和重力等原因会产



图2 洞内积水及涌水情况

Fig. 2 Water and water in the cave

生流动,岩石的边缘并不是光滑平整的,水流流过这些粗糙面时,水和岩石之间有一定的黏附力,在渗流通道很小时该力作用明显且渗流速度一般很小。而当渗流水过多、岩石之间空隙很大、水流通道很宽的时候,则可以不考虑水流和岩石接触的黏附力的影响,渗流速度将会随着水头差增大而增大,最终导致注浆失败。因此需要找到水流速度不至于把浆液冲散稀释的流速,在此处或是上游某处注浆,将大部分的水流引到隧道开挖影响范围外,从而保证隧道正常注浆和进行。

水在岩石中的流动受各种因素影响,想以目前掌握的知识直接用解析求解其在岩石中某一点的速度很困难。因此,为了求得此近似速度,将计算做简化:用水的渗流力大小与液体浆液的剪切强度作比较,当它们的值相等时,根据式(1)求出水头梯度,进而求出注浆点与隧道间的水平距离,再在数值模型中观察其速度大小。但由于浆液在初凝前是液体,剪切强度不能与凝固后的固体相比,因此用浆液的黏度代替剪切强度。

2.1 渗透力

渗透力是指土中的渗透水流在水头差作用下,作用于单位体积土体内土粒上的拖曳力。

由于开挖等原因,隧道周边围岩初始状态受到破坏,其本来的渗流参数被改变^[10]。现进行以下假设:(1)加固区为圆环形,其拱顶与实际加固边界相切;(2)将加固区边界和隧道边界投影为平面上的同心圆;(3)地表总水头的值,地表以上为正,地表以下为负。得到渗透力的计算公式:

$$f = i_p n \gamma_w \quad (1)$$

式中: f ——渗透力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

n ——土孔隙率;

γ_w ——流体单位重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

i_p ——径向水力梯度。

2.2 黏度

黏度是物质的一种物理化学性质,定义为一对平行板,面积为 A ,相距 dr ,板间充以某液体;今对上板施加一推力 F ,使其产生一速度变化度所需的力。水泥-水玻璃浆液的黏度为 $15 \sim 140 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,胶凝时间为十几秒至几十分。

根据黏度的单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,黏度与时间成正比关系。即黏度随着时间的增长而增加,可以将 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 理解为在第一秒的时候该物体的黏度为 1 Pa 。现为了求得水的渗透力与浆液的动力黏度之间的极限平衡点,避免水的渗透力将浆液冲散并流回隧道。取水泥-水玻璃浆液在第一秒时的极限值为 $15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,此结果偏安全,定义为在第一秒时要冲散该浆液的作用力为 15 Pa ,即 15 N/m^2 ,该作用力用 μ 表示。

2.3 确定临界距离

由量纲得知,渗流力 f 是体积力(N/m^3),作用力 μ 是面力(N/m^2),要将两力作为等式,需将作用力除以它的横截面积。即:

$$f = \frac{\mu}{A} \quad (2)$$

按照注浆孔的面积算,直径取 10 cm ,得出冲散浆液的作用力 f :

$$f = \frac{\mu}{A} = \frac{15}{\pi \cdot (5 \times 10^{-2})^2} = 1909.859 (\text{N/m}^3) \quad (3)$$

令渗流水的作用力等于 f ,则在该作用力下从隧道打进岩体的浆液将会被渗流水冲回隧道。将 f 代入式(1),孔隙率取 17% ^[11],水的单位重度为 $1 \times 10^4 \text{ N/m}^3$,可求出水力梯度:

$$i_p = \frac{f}{n \gamma_w} = \frac{1909.86}{0.17 \times 1 \times 10^4} = 1.123 \quad (4)$$

根据水力梯度的公式:

$$i_p = \frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

地下水面距隧道顶的距离 Δh 为 2.2 m ,将式(4)代入式(5)可求出水力梯度的水平距离 L 为:

$$L = \frac{\Delta h}{i_p} = \frac{2.2}{1.123} = 1.96 (\text{m}) \quad (6)$$

故在距离隧道左侧水平距离为 1.96 m 处注浆时,浆液刚好不被水流的作用力冲散。此距离是将浆液的黏度、胶凝时间都取为极限值时求得的距离,偏于安全。若大于等于此距离,则浆液不会被渗流水冲散并达到注浆效果;反之,则较危险。

3 数值模型

本文利用 Midas-GTS 建立数值模型,其尺寸与原

工程尺寸大小相同,重点反映在该实际工程条件下,采取先堵水方案时,隧道周边的水流速度及涌水量的变化情况。堵水方案为在地面注浆,距离隧道正上方一定距离,从上往下形成一道堵水墙,堵水墙的间距以及长度根据模型计算结果比较,求出最佳堵水方案,为工程提供参考和指导。

3.1 建立模型

渗透力的大小取决于渗流速度大小。由上一节计算得出,在距离隧道左侧水平距离为 1.96 m 处浆液不会被渗流水冲散,为计算方便,该距离取 2 m。先建立一个与隧道实际相符的模型,通过模型计算涌水量结果,查询数值计算结果得出在距离隧道 2 m 处的水流速度,再对隧道进行堵水,观察堵水后隧道周围的水流速度大小,若小于等于原模型间隔 2 m 处的水流速度,则该堵水方案可行。

模型尺寸见图 3。在图 3 中,矩形顶面为地面,模型宽 44 m、高 64 m,隧道长度取 15 m,岩土长度取 30 m。共划分单元格 19 191,节点 26 276 个。地下水位线在距地面线下方 22 m 的位置,隧道在距地面线下方 24 m 的位置。数值模型中隧道尺寸与实际尺寸相同,见图 4。

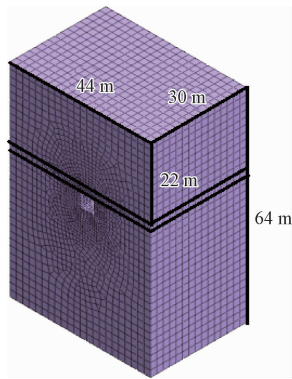


图 3 隧道原模型

Fig. 3 Tunnel original model

根据现场排水情况,隧道早期每日抽水量为 $200 \text{ m}^3/\text{d}$;枯水期每日抽水量为 $1\,200 \text{ m}^3/\text{d}$;富水期每日抽水量为 $1\,400 \sim 1\,500 \text{ m}^3/\text{d}$ 。富水期隧道内水深超 2 m。

3.2 计算参数

隧道的围岩属 V 类围岩,洞室围岩的整体稳定性差,全风化岩体渗透系数为 $9.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,属中等透水性。隧道在开挖后,水流将浆液一并带流回隧道时还未做二次衬砌,因此,在计算中,不考虑二次衬砌的阻水作用,此时考虑初衬的阻水效果,渗透系数取

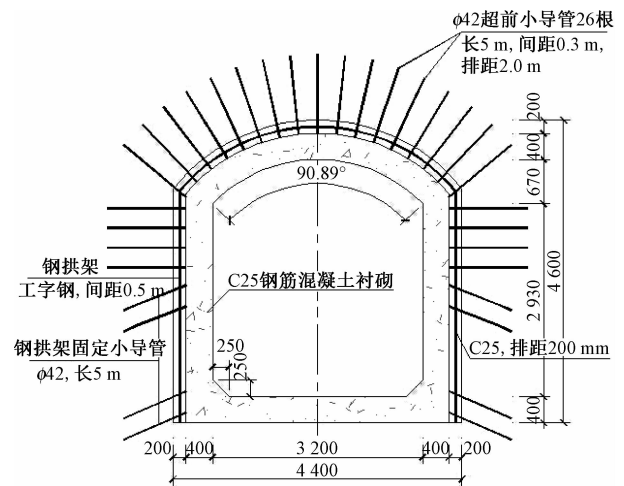


图 4 隧道截面详图(单位:mm)

Fig. 4 Detail tunnel section (mm)

0.9 mm/s。围岩参数和注浆参数见表 1 和表 2。

表 1 围岩参数

Table 1 Parameters of the surrounding rock

围岩参数	弹性模量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	泊松比	饱和容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦角/ $^{\circ}$
取值	5.0×10^5	19.5	190	0.35	21	26

表 2 浆液参数

Table 2 Slurry parameter

浆液参数	水:灰	弹性模量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥:水玻璃	泊松比	饱和容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
取值	0.5:1	2.8×10^7	20	1:0.1	0.2	21

在数值模型中,经过涌水量验算,查得隧道内一平方米范围内的涌水量为 $1.29 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$,根据图 4 尺寸换算成隧道顶面、侧面以及掌子面的渗流量为 $1\,454.28 \text{ m}^3/\text{d}$ 。因此,建立的模型涌水量计算符合隧道富水期的实际情况,若在该条件下能够使隧道正常注浆,则其他条件下隧道均能够正常施工。

3.3 方案比较

根据第 2 节解析解求出的距离 2 m,由图 5 可知,在模型中距离隧道 2 m 处的渗流速度为 $4.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。

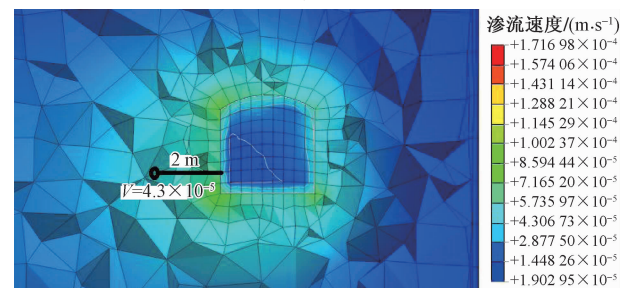


图 5 涌水孔截面

Fig. 5 Gushing hole section

为了研究注浆后渗流速度的影响,本次在模型计算中只考虑渗流场问题,根据第 2 节得出的结论,在距离隧道 2 m 处建立模型。在有堵水方案的模型中分别验证其隧道周围的渗流速度,当隧道周围的渗流速度小于等于 $4.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时,此方案可取。

注浆浆液扩散半径为 $2 \sim 4 \text{ m}$ ^[12],注浆孔半径为 0.5 m,此处建模考虑实际能堵水的范围,注浆扩散边缘堵水效果并不明显,故注浆堵水墙厚取 4 m,注浆幕墙边缘距离隧道左侧为 2 m,注浆幕墙中心距离隧道 4 m(表 3)。

表 3 距离隧道 2 m 处的注浆方案

Table 3 Grouting scheme at 2 m from the tunnel

方案	一	二	三	四	五	六	七	八
注浆深度/m	24.6	26.6	28.6	30.6	24.6	26.6	28.6	30.6
注浆长度/m	15	15	15	15	20	20	20	20

由表 3 建立出来的 8 个模型中,渗流速度选取点根据隧道截面详图(图 4)中的注浆点的位置选取速度最大点得出,结果如表 4 所示。只有方案八在隧道表面注浆处的渗流速度最小,故方案八为该 8 个方案中的最佳方案。几何模型如图 6 所示。

表 4 距离隧道 2 m 处注浆后各方案结果

Table 4 Results of each program after grouting at 2 m from the tunnel

方案	一	二	三	四	五	六	七	八
渗流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.0×10^{-4}	9.1×10^{-5}	1.2×10^{-4}	7.5×10^{-5}	6.4×10^{-5}	6.1×10^{-5}	5.5×10^{-5}	4.4×10^{-5}

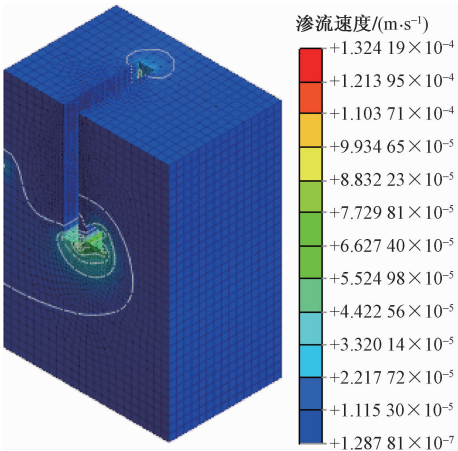


图 6 方案八几何模型

Fig. 6 Geometric model of scheme 8

由于隧道开挖支护是连续工程,因此只考虑隧道开挖掌子面后方 1 m 范围内的水流速度。由图 8 可知,注浆点 1 和注浆点 2 相比,位于隧道更下方的注浆点 1 渗流速度更大,只需满足在注浆点 1 处的渗流速度即可。由图 6 的图例可以在图 7 中得出注浆点 1 处的渗流速度为 $4.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,约等于 $4.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。

为了找出更优方案,再建立几个模型与方案八作比较。因此,在距离隧道 4 m 处另建立 8 个方案(表 5)。

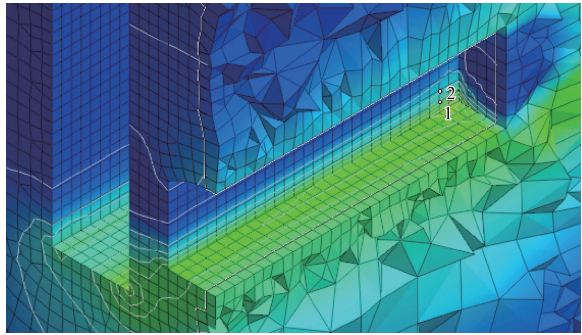


图 7 方案八隧道轴向剖面图(图例同图 6)

Fig. 7 Detail axial profile of the tunnel of scheme 8 (with the same legends as Fig. 6)

表 5 距离隧道 4 m 处的注浆方案

Table 5 Grouting scheme at 4 m from the tunnel

方案	九	十	十一	十二	十三	十四	十五	十六
注浆深度/m	24.6	26.6	28.6	30.6	24.6	26.6	28.6	30.6
注浆长度/m	15	15	15	15	20	20	20	20

由表 5 建立出来的 8 个模型得到结果如表 6 所示。可知,方案十六为最佳方案。方案十六几何尺寸见图 8,剖面图见图 9。图 9 中可以看出,注浆点 1 处渗流速度最为 $4.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,约等于 $4.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。

表 6 距离隧道 4 m 处注浆后各方案结果

Table 6 Results of each program after grouting at 4 m from the tunnel

方案	九	十	十一	十二	十三	十四	十五	十六
渗流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.0×10^{-4}	6.5×10^{-5}	8.9×10^{-5}	9.1×10^{-5}	7.5×10^{-5}	6.6×10^{-5}	5.7×10^{-5}	4.5×10^{-5}

再在距离隧道 6 m 处建立 8 个方案(表 7)。由表 7 建立出来的 8 个模型得到结果如表 8 所示。可知,方案二十四为最佳方案。但该方案中隧道内渗流速度

最大处速度为 $5.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,远大于 $4.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,故该 8 个方案均不可取。

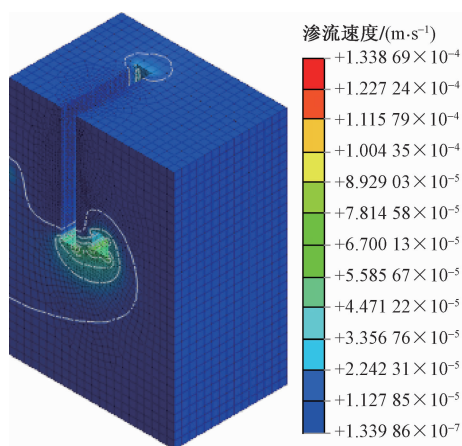


图8 方案十六几何模型

Fig. 8 Geometric model of scheme 16

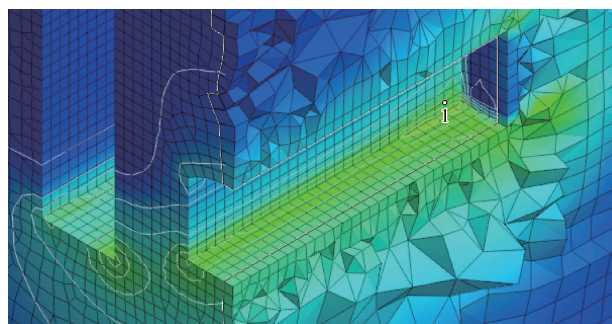


图9 方案十六隧道轴向剖面图(图例同图8)

Fig. 9 Detail axial profile of the tunnel of scheme

16 (with the same legends as Fig. 8)

表8 距离隧道6 m处注浆后各方案结果

Table 8 Results of each program after grouting at 6 m from the tunnel

方案	十七	十八	十九	二十	二十一	二十二	二十三	二十四
渗流速度/(m·s ⁻¹)	1.1×10^{-4}	9.9×10^{-5}	8.5×10^{-5}	8.6×10^{-5}	6.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}	5.9×10^{-5}	5.5×10^{-5}



图10 现场注浆及注浆后的隧道效果

Fig. 10 Tunnel rendering after in situ grouting and grouting

可以看出隧道内的水已经被注浆幕墙堵住,能够进行隧道两侧的回填灌浆和隧道的下一步施工。经过

表7 距离隧道6 m处的注浆方案

Table 7 Grouting scheme at 6 m from the tunnel

方案	十七	十八	十九	二十	二十一	二十二	二十三	二十四
注浆深度/m	24.6	26.6	28.6	30.6	24.6	26.6	28.6	30.6
注浆长度/m	15	15	15	15	20	20	20	20

由以上实验可知,距离隧道水平距离越近,注浆效果越明显;而在注浆距离不变时,注浆效果随注浆范围增大而增大。

3.4 选取最佳方案

根据现场实际情况,在所列十六个模型中符合渗水要求的模型只有方案八和方案十六。几何方面,若采取同一种注浆浆液,两种方案尺寸一样,且距离远近对于注浆的经济性无影响;注浆效果方面,方案八中得出的速度更接近于临界速度 4.4×10^{-3} m/s,而方案十六的渗流速度较之更大。因此,对于注浆来说,方案八更偏于安全。当注浆水平距离保持不变时,经济允许的情况下,注浆范围越大越安全,本文考虑经济性要求,选择方案八作为对本工程类似的地下水丰富、流速较大的隧道工程推荐方案。

用于回填灌浆的水泥标号为425#,用于固结灌浆的水泥标号为425#,固结灌浆采用纯水泥浆;拌浆水的温度不高于40℃。根据数值模拟选出的最佳方案注浆,注浆堵水后,每日排水量平均200 m³/d,积水最深处为25 cm,能够满足隧道内正常施工和运行,该方案可行。现场注浆及注浆效果见图10所示。

工程实施效果判定,该方案可行,能为相似涌水隧道提供参考和帮助。

4 结论及建议

(1)通过理论计算,得出渗流水速度与注浆浆液速度相等的位置在距离隧道2 m处。在此处或在浆液速度大于渗流速度的地方注浆堵住渗流水,可以保证隧道施工下一步的进行。

(2)建立了24个数值模型对隧道内的渗流水进行模拟分析,得出在距离隧道水平距离为6 m,注浆深度为24.6 m,注浆长度为20 m时,堵水效果最佳。

(3)海南因其独特的自然条件、地理位置,存在大量的地下水。在本文提出的堵水方案中,注浆效果随注浆范围的增大而增大,但考虑经济性,注浆范围不能

无限增大,需要进行计算模拟选出最佳注浆范围。

(4)现场施工效果证明数值模拟最佳方案可行,有效地堵住了地下水的渗流,保证隧道施工的连续进行,并可为类似工程设计提供参考和依据。

(5)渗流水的冲蚀对岩石和注浆材料的影响都很大,为了提高注浆质量和效率,必须对注浆材料的初凝时间进行控制,继续研究和选择快速凝固的注浆材料是需要下一步研究和解决的问题。

参考文献:

- [1] LIU J, CHEN W, YUAN J, *et al.* Groundwater control and curtain grouting for tunnel construction in completely weathered granite [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(2): 515 – 531.
- [2] 邓仁清. 高压富水隧道注浆堵水施工技术及应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(2): 263 – 266. [DENG R Q. Construction technology and application of grouting and water blocking in high pressure water-rich tunnel [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(2): 263 – 266. (in Chinese)]
- [3] 张成平, 张顶立, 叶英, 等. 高压富水岩溶隧道注浆机理及作用效果分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(5): 996 – 1002. [ZHANG C P, ZHANG D L, YE Y, *et al.* Grouting mechanism and effect analysis of high pressure water-rich karst tunnel [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(5): 996 – 1002. (in Chinese)]
- [4] 戴传山, 祁芸芝, 雷海燕, 等. 悬浮微小颗粒对多孔介质渗流特性影响的实验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 1 – 6. [DAI C S, QI Y Z, LEI H Y, *et al.* Experimental study on the effect of suspended microparticles on the seepage characteristics of porous media [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 1 – 6. (in Chinese)]
- [5] 陈社明, 刘宏伟, 卢文喜, 等. 悬挂式防渗墙作用下非均质地层的渗流量研究——以松花江干流群力堤为例[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 14 – 19. [CHEN S M, LIU H W, LU W X, *et al.* Study on seepage flow of heterogeneous stratum under the action of suspended cut-off wall——Taking the Songhua River main stream group as an example [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 14 – 19. (in Chinese)]
- [6] 刘强, 谭忠盛, 王秀英. 水下隧道渗流场分布规律的模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(增刊1): 388 – 392. [LIU Q, TAN Z S, WANG X Y, *et al.* Model test study on distribution law of seepage field in underwater tunnel [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(Sup1): 388 – 392. (in Chinese)]
- [7] 杜朝伟, 王梦恕, 谭忠盛. 水下隧道渗流场解析解及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增刊2): 3567 – 3573. [DU C W, WANG M S, TAN Z S. Analytical solution of seepage field in underwater tunnel and its application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Sup2): 3567 – 3573. (in Chinese)]
- [8] 李鹏飞, 张顶立, 赵勇, 等. 海底隧道复合衬砌水压力分布规律及合理注浆加固圈参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(2): 280 – 288. [LI P F, ZHANG D L, ZHAO Y, *et al.* Study on distribution law of water pressure of composite lining of subsea tunnel and parameters of reasonable grouting reinforcement ring [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(2): 280 – 288. (in Chinese)]
- [9] 丁小平, 刘昭, 史宝童, 等. 复合衬砌量化修正渗透系数隧道涌水量的计算方法[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(4): 461 – 466. [DING X P, LIU Z, SHI B T, *et al.* Calculation method for quantitative correction of water inflow in tunnels with composite lining [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2015, 36(4): 461 – 466. (in Chinese)]
- [10] 吴祖松, 梁波, 王元清, 等. 水下圆形隧道注浆加固区渗流特征理论研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊2): 89 – 94. [WU Z S, LIANG B, WANG Y Q, *et al.* Theoretical study on seepage characteristics in grouting reinforcement zone underwater circular tunnel [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2015, 36(Sup2): 89 – 94. (in Chinese)]
- [11] 朱学愚, 钱孝星. 地下水水文学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005. [ZHU X Y, QIAN X X. *Groundwater Hydrology* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005. (in Chinese)]
- [12] 许广坡. 岩溶注浆扩散半径物理模型试验及数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. [XU G P. Physical model test and numerical simulation of karst grouting diffusion radius [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)]

编辑: 汪美华