

李泮展,岳健,安永林,等.河底浅埋小净距隧道施工期渗流性状分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(4):47-54. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.007

LI F Z, YUE J, AN Y L, et al. Analysis of Seepage Characteristics During Construction of Shallow Buried Tunnels with Small Clear Spacing at the Bottom of River [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36 (4): 47-54. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.007

河底浅埋小净距隧道施工期渗流性状分析

李泮展,岳健*,安永林,孙超杰,谭仁华

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为了弄清河底浅埋小净距隧道矿山法施工段的渗流性状,以长沙市浏阳河隧道为工程背景,考虑工作面时空变化对洞内渗流边界的影响,建立三维数值模型,将施工期的河水位变化情况用8折线函数近似表示并嵌入到模型中进行计算,将计算结果与现场实测结果进行对比,验证了计算模型的可参考性.通过该模型分析施工期的水压力、渗水量、渗流速度、水力梯度的变化性状,并提出相关的工程建议.结果表明:施工期间双洞初衬背后的水压力都小于40 kPa,初衬背后水压力、注浆加固圈外的围岩水力梯度最大值与河水位均呈正相关关系.所得结论对于类似工程具有参考价值.

关键词:河底浅埋隧道;小净距;渗流性状;河水位变化;矿山法

中图分类号:U459.5 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)04-0047-08

Analysis of Seepage Characteristics During Construction of Shallow Buried Tunnels with Small Clear Spacing at the Bottom of River

LI Fengzhan, YUE Jian, AN Yonglin, SUN Chaojie, TAN Renhua

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to find out the seepage characteristics of the shallow-buried tunnel with small clear distance under the river, with the Liuyang River Tunnel in Changsha as the engineering background, a three-dimensional model was established, which considered the influence of the space-time change of working faces on the seepage boundaries inside the tunnels. The river water level change during the construction period was approximated by the 8-fold line function and embedded in the model. Compared with field test results, reference performances of the calculation model were verified. Based on the model, the variation characteristics of water pressure, seepage flow rate, seepage velocity and hydraulic gradient during construction period were analyzed, and the relevant engineering suggestions were put forward. The results show that the water pressure behind the initial lining is less than 40 kPa during construction; the water pressure behind the initial lining and the maximum rock hydraulic gradient outside the grouting reinforced region's relationship with the river water level is positively correlated. The conclusions have reference value for the similar projects.

Keywords: shallow buried tunnels at the bottom of river; small clear spacing; seepage characteristics; river water level change; mining method

收稿日期:2019-04-11 修改日期:2021-11-25

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30248)

*通信作者, E-mail: changshalaosan@163.com

近年来,我国水下隧道发展迅速,但由于水下隧道的工程地质与水文地质条件大多比较复杂,导致目前水下隧道施工依然存在较大的风险,因此,研究水下隧道的渗流性状对于确保施工安全具有重要的工程意义.众多学者针对不同工程条件下的富水隧道渗流问题开展研究^[1-5],安永林等^[6]认为水下并行隧道后行洞的施工会改变先行洞一侧的渗流场分布;叶治等^[7]研究揭示了渗流侵蚀对结构变形与地表沉降的影响规律;万友生^[8]通过岩石弹塑性损伤-渗流耦合模型,分析了不同降雨强度下隧道洞口结构的安全性状;李晓军等^[9]构建了复合式衬砌隧道的渗流模型,研究得出了相应的渗透系数求解方法;郭玉峰等^[10]融合 Schwartz 迭代法与保角变换法,研究得出了水下浅埋平行双洞的渗流场解析方法;刘坤等^[11]通过对隧道排水系统的非对称堵塞进行分析,指出排水系统非对称堵塞会导致衬砌外的水压力上升;Sweetenham 等^[12]应用高分辨的综合水文模型详细研究了隧道渗流过程.目前,在水下隧道渗流性状的数值模拟研究方面,多数研究假定地表水的水位恒定不变或仅仅对比某几个特定水位,很少把地表水水位随时间的实时变化曲线嵌入到模型中进行计算分析.鉴于此,针对矿山法河底浅埋小净距隧道的施工特点,以长沙市浏阳河公路隧道为工程背景,考虑双洞工作面时空变化对洞内渗流边界的影响,采用迈达斯软件建立三维数值模型,将施工期的河水位变化情况用 8 折线函数近似表示并嵌入到模型中进行计算,将计算结果与现场实测结果进行对比,验证计算模型的可参考性.通过该模型分析施工期的水压力、渗水量、渗流速度、水力梯度的变化性状,并提出相关的工程建议.

1 工程概况与计算模型的建立

长沙市浏阳河公路隧道矿山法段下穿浏阳河,采用双洞平行的方式从 V 级强风化砾岩中穿过.选取河底 12 m 长的一段隧道作为研究对象,该区段隧道单洞开挖宽 11.9 m、高 10.4 m,两洞净距为 $1.9B_1$ (B_1 为单洞开挖宽度),水下岩土覆盖层厚度仅为 14 m.研究区段隧道复合式衬砌断面如图 1 所示.初衬为 25 cm 厚的 C25 喷射混凝土,二次衬砌为 50 cm 厚的 C35 防水钢筋混凝土.复合式衬砌外为 5.5 m 厚的超前注浆加固圈.限于篇幅,具体工程情况详见文献[13].建立的计算模型宽 300 m,高 150 m,纵向长 12 m,模型整体及细部网格划分如图 2 所示.计算模型共计约 37.9 万个计算单元,约 35.8 万个计算节点.根据地质勘察报告与相关规范,选定本构模型与计算参数如表 1 所示.

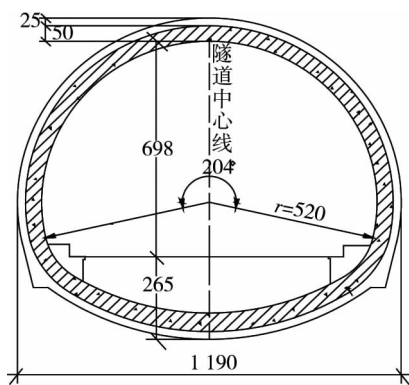


图 1 隧道复合式衬砌断面(单位:cm)

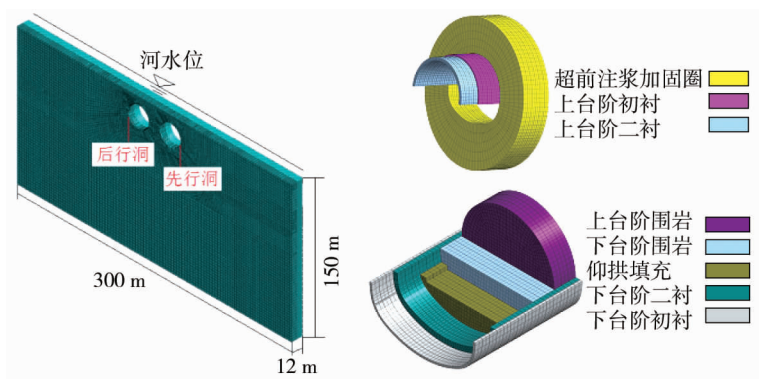


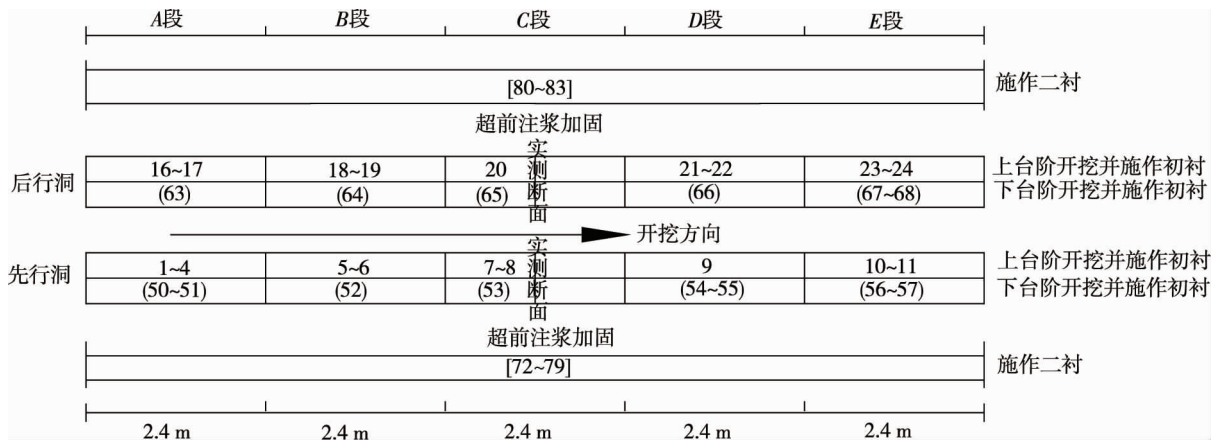
图 2 模型整体及细部网格划分

表 1 材料的本构模型与计算参数

名称	本构模型	泊松比	重度/(kN/m ³)	弹性模量/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m/d)
强风化砾岩	摩尔-库伦	0.38	20.0	500 000	250	24	0.250
超前注浆加固圈	摩尔-库伦	0.36	23.6	700 000	450	25	0.125
初衬	弹性	0.20	25.0	24 000 000			0.100
二衬	弹性	0.20	25.0	31 500 000			

双洞均采用上下台阶法进行开挖,因此有 4 个开挖面.工作面随时间空间的变化情况如图 3 所示,总耗时 83 d,单洞的上下台阶均分为 5 个阶段开挖(A 段~E 段),每个阶段开挖进尺约为 2.4 m,图 3 中隧道

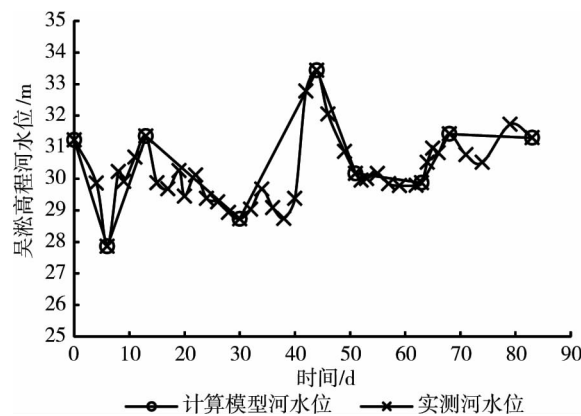
区段的中间断面为现场实测断面.在施工期间,如果研究区段的二衬尚未施作,水可以渗透过围岩或初衬流入洞内;如果研究区段的二衬已经施作,全环封闭的二衬(外裹全环封闭的防水板)在施工期间的防水性能良好,假设二衬本身不透水,但由于整座隧道的二衬还不会沿纵向封闭,水依然可以沿初衬与二衬防水板之间的空隙进行纵向流动.因此,随着隧道工作面的纵向推进,将围岩与初衬的临空面压力水头均设为 0,将二衬的内表面设为不透水边界,可见工作面的时空变化会改变洞内的渗流边界.



图中数字表示施工某一阶段的实际起止时间(d),数据来源于现场每一天对于里程的观测;超前预注浆在该区段隧道开挖之前已经完成,这里未计入超前预注浆的时间;第 12~15,25~49,58~62,69~71 d,研究区段未施工,因此未在图中示出,但这些时间段内模型顶面的河水位仍处于变化状态

图 3 工作面的时空变化

模型顶面为河水与岩土交界面.模型顶面的位移自由并设为透水界面,其余界面均约束法向位移并设为不透水界面.模型与河水位标高均采用吴淞高程表示,模型顶面高程为 22 m,河水位高程的实际变化曲线通过现场实测与参考邻近水位站的资料获得^[14].施工期间河水位变化曲线如图 4 所示.



第 0 d 为 2009 年 5 月 23 日;第 83 d 为 2009 年 8 月 14 日

图 4 施工期间河水位变化曲线

将施工期间河水位随时间的实际变化曲线用 8 折线函数 $f(t)$ 近似表示:

$$f(t) = \begin{cases} 31.230 - 0.562t, & 0 < t \leq 6; \\ 24.866 + 0.499t, & 6 < t \leq 13; \\ 33.352 - 0.154t, & 13 < t \leq 30; \\ 18.650 + 0.336t, & 30 < t \leq 44; \\ 53.988 - 0.467t, & 44 < t \leq 51; \\ 31.455 - 0.025t, & 51 < t \leq 63; \\ 10.340 + 0.310t, & 63 < t \leq 68; \\ 31.964 - 0.008t, & 68 < t \leq 83. \end{cases} \quad (1)$$

$$h_w = f(t) - h_d + h_c \tag{2}$$

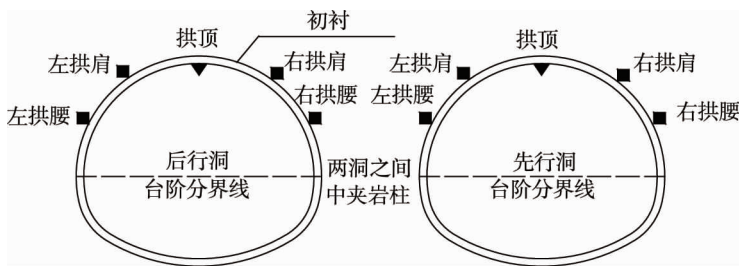
式中: $f(t)$ 为随时间变化的河水位高程,m; t 为时间变量,d; h_w 为模型顶面的总水头,m; h_d 为模型顶面高程, h_d 为22 m; h_c 为模型高度, h_c 为150 m.

通过式(2)求出模型顶面的总水头边界函数,最后将总水头边界函数输入到软件专用的渗流边界设置窗口中,由此把河水位变化曲线嵌入到模型中进行计算.

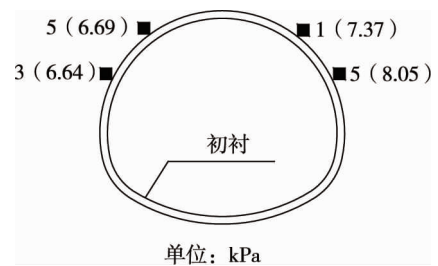
因为隧道工作面沿纵向推进会改变洞内的渗流边界,而且模型顶面的总水头边界也会随时间而改变,因此,模型计算的是非稳态渗流.根据达西定律与有效应力原理,按照文献[15-16]所述方法进行应力-非稳态渗流耦合,最终建成考虑应力-非稳态渗流耦合的三维数值模型,该模型能分析应力、位移、渗流等指标,文章重点分析渗流指标.

2 计算模型现场验证

隧道现场实测断面的测点布置如图5所示.现场实测时,在初衬拱顶粘贴反射膜片作为测点并利用全站仪测量初衬拱顶沉降,喷射初衬混凝土前,在初衬左右两侧拱肩与拱腰背后的围岩中埋设水压计用于记录施工时期的初衬背后水压力.图6是第63 d先行洞实测断面初衬背后水压力的数值模拟结果与现场实测结果对比.双洞实测断面初衬拱顶沉降的数值模拟结果与现场实测结果如图7所示.由图7可以看出:数值模拟结果与现场实测结果相差不大,表明建立的数值模型具有参考价值.



▼为初衬拱顶沉降测点;■为初衬背后水压力测点
图5 现场实测断面测点布置



“()”外为现场实测结果;“()”内为数值模拟结果
图6 先行洞实测断面数值模拟与现场实测的初衬背后水压力对比

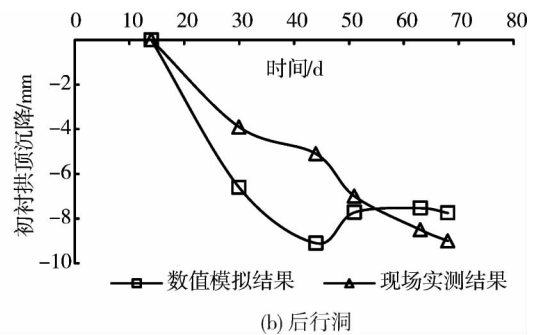
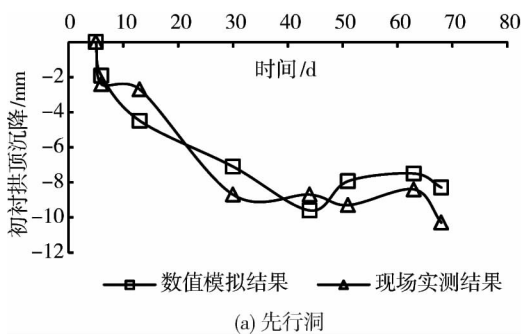


图7 初衬拱顶沉降随时间变化曲线

3 数值模拟结果分析

3.1 初衬背后的水压力

双洞现场实测断面4个计算节点的初衬背后水压力随时间变化的曲线如图8所示.由图8可知:在初衬透水的情况下,双洞4个计算节点初衬背后的水压力值介于6~11 kPa.将图8与图4进行对比发现:计算节点初衬背后的水压力的变化趋势均与对应时间段隧道上方河水位的变化趋势一致.由此可得,在隧道某一断面已经施作初衬的情况下,初衬背后的水压力与河水位呈正相关关系,即初衬背后的水压力随河水

位的升高而增大,随河水位的降低而减小。

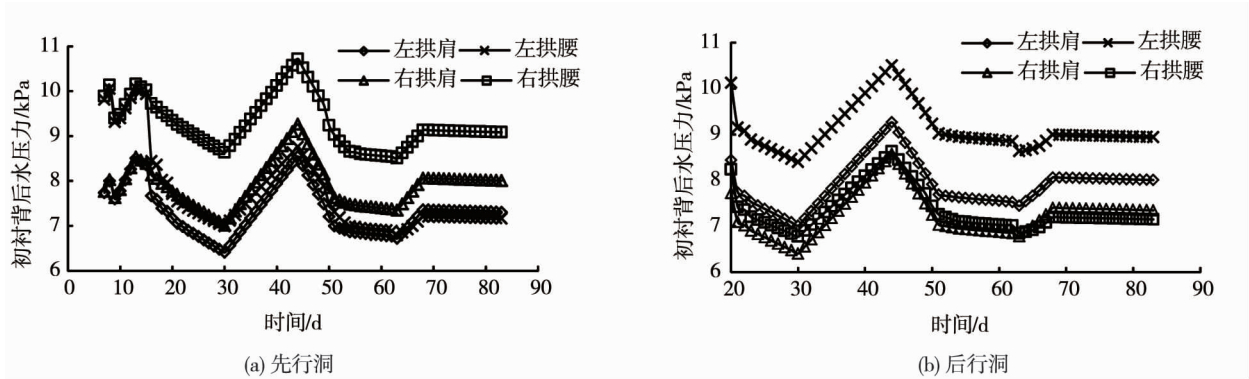


图8 双洞实测断面初衬背后水压力随时间变化曲线

第83 d 双洞初衬背后的水压力分布如图9所示。由图9可知:双洞初衬背后水压力呈现出由拱顶至拱底逐渐增大的趋势,初衬背后水压力的最大值均位于远离中夹岩柱一侧的仰拱角部,都约等于14 kPa。

进行水下隧道初衬设计时,初衬背后的水压力应该取多大值才能既经济又安全,这是一个难题,因为要考虑实际施工中渗入初衬背后的水量与初衬本身的透水性,因此,应结合实际施工情况进行动态设计。计算结果表明:对于浏阳河公路隧道,围岩为V级强风化砾岩,在隧道埋深为14 m,双洞净距为 $1.9B_1$ (B_1 为单洞开挖宽度)的情况下,初衬背后的水压力在整个施工期间都没有超过40 kPa,均比较小。这一点可为类似工程提供参考。

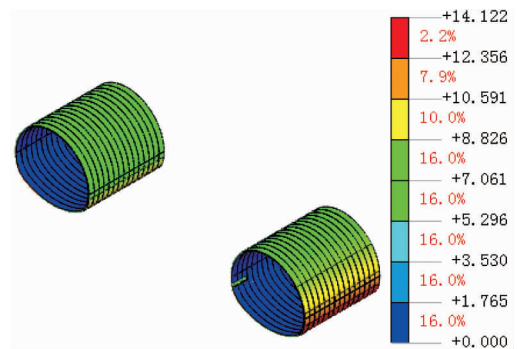


图9 第83 d 双洞初衬水压力分布(单位:kPa)

3.2 渗水量

图10是第18 d 双洞周围的渗水量分布,负数表示从模型中的渗出量,该时间段先行洞上台阶已经施工完毕,后行洞施工到上台阶B段。由图10可知:渗水量的最大值位于后行洞上台阶掌子面远离中夹岩柱一侧的拱脚附近,约为 $0.6 \text{ m}^3/\text{d}$,此时先行洞上台阶初衬拱脚位置的渗水量约为 $0.2 \text{ m}^3/\text{d}$ 。隧道施工上台阶的其他时间段,渗水量的最大值总是位于上台阶掌子面远离中夹岩柱一侧的拱脚附近,掌子面靠近中夹岩柱一侧的拱脚部位的渗水量也较大。对于上述现象,建议施工时应当注意上台阶掌子面两侧拱脚和上台阶初衬拱脚附近的渗水。

将隧道内临空面渗水量除以对应时间的隧道内临空面表面积,得到单位面积渗水量变化如图11所示。由图11可知:前7 d 的单位面积渗水量均大于 $600 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,第1 d 的单位面积渗水量最大,约为 $1200 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;第70 d 施作二衬之前,随着隧道施工的不断推进,单位面积渗水量逐渐趋于稳定,介于 $400 \sim 700 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。将图11与图4对比分析发现:前5 d 先行洞施工上台阶A段与B段时,单位面积渗水量较大,但随着时间的推移,单位面积渗水量呈降低趋势,该趋势与图4中前5 d 河水位的下降趋势吻合;第24~50 d,开挖临空面的面积不再变化,图4中河水位变化明显,该时间段的单位面积渗水量变化不明显,波动幅度为 $80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;第68 d 双洞的上下台阶均施工完毕,与施工上台阶时相比,单位面积渗水量约减少 $100 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。综上所述,隧道开挖临空面面积较小时,影响单位面积渗水量的主要因素是河水位的变化;开挖临空面面积增大到一定程度时,影响单位面积渗水量的主要因素是开挖临空面的面积变化。

计算发现,双洞任意一洞的上台阶或下台阶施工完成后,如果相邻洞没有进行施工,该洞的渗水量不会产生较大变化。在相邻洞施工时间段,双洞的渗水量变化曲线如图12所示。由图12可知:图12a中,后行洞施工上台阶会导致先行洞(上台阶施工完毕)的渗水量减小;图12b中,先行洞施工下台阶导致后行洞(上台阶施工完毕)的渗水量减小;图12c中,后行洞下台阶的施工会导致先行洞(上下台阶均施工完毕)

的渗水量增大.综上所述,当双洞任意一洞的上台阶施工完成后,相邻洞的施工会导致已完成施工洞的渗水量减小;当先行洞上下台阶均施工完成后,后行洞下台阶的施工会导致先行洞的渗水量增大.

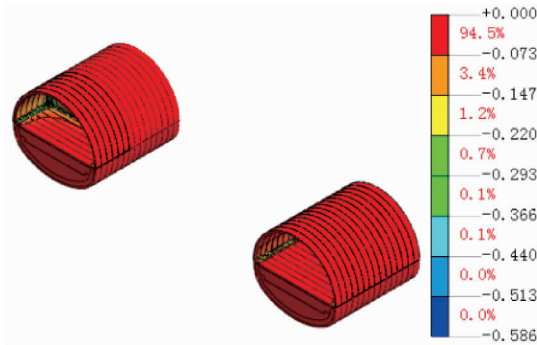


图 10 典型时间段渗水量分布(单位: m^3/d)

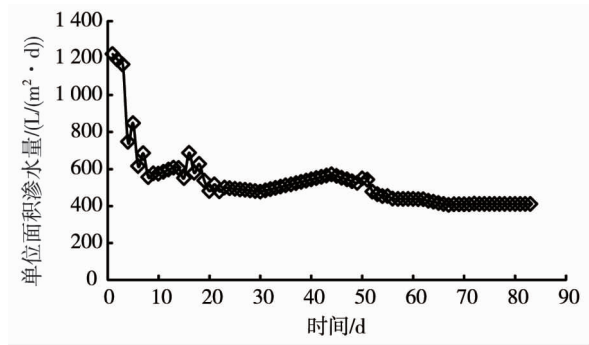
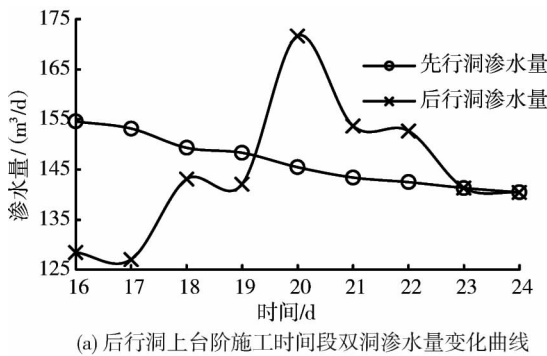
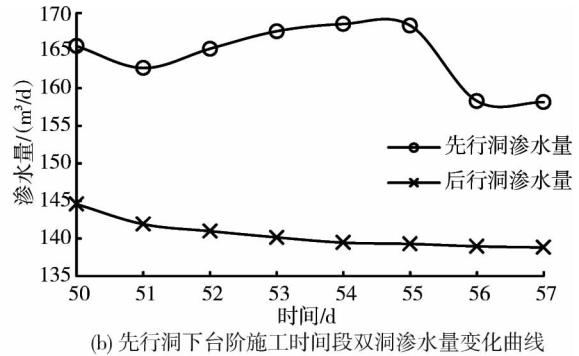


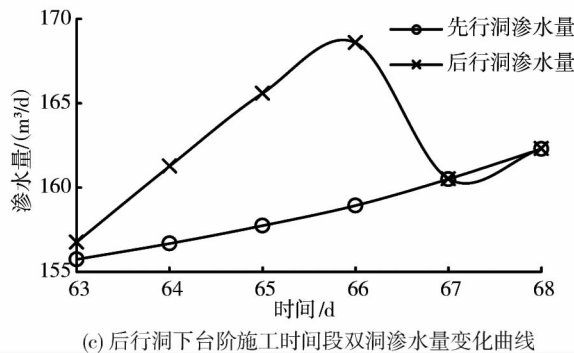
图 11 单位面积日均渗水量随时间变化曲线



(a) 后行洞上台阶施工时间段双洞渗水量变化曲线



(b) 先行洞下台阶施工时间段双洞渗水量变化曲线



(c) 后行洞下台阶施工时间段双洞渗水量变化曲线

图 12 双洞渗水量变化曲线

3.3 渗流速度

图 13 是第 18 d 双洞周围的渗流速度分布.由图 13 可知:先行洞渗流速度较大的位置位于上台阶初衬拱脚处,渗流速度介于 $0.7\sim 1.2\text{ m/d}$;后行洞渗流速度的最大值位于上台阶掌子面远离中夹岩柱一侧的拱脚附近,约为 1.86 m/d .隧道施工上台阶的其他时间段,渗流速度的最大值总是位于上台阶掌子面远离中夹岩柱一侧的拱脚附近.对于上述现象,建议施工时注意排出积水,防止渗流速度较大位置的渗水积聚,而且在开挖之后应及时支护,避免渗水带走土颗粒.

最大渗流速度随时间变化的曲线如图 14 所示.由图 14 可知:除第 1 d 外,最大渗流速度分别在第 16,50 及 63 d 呈现跳跃式增长.结合图 3 分析发现:最大渗流速度总是在开挖上下台阶 A 段围岩时呈现跳跃式增长,随着施工的持续推进,最大渗流速度逐渐下降.产生该现象的原因是在开挖上下台阶 A 段之前,上下台阶围岩均为饱和土体,新开挖面的产生使原本稳定的饱和土体产生新的透水边界,导致围岩中的水从新透水界面中渗出,引起最大渗流速度突变.对于该现象,建议在开挖隧道上下台阶初期,提前做好排水准备.

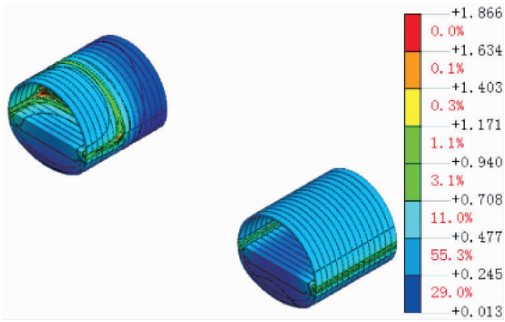


图 13 典型时间段渗流速度分布(单位:m/d)

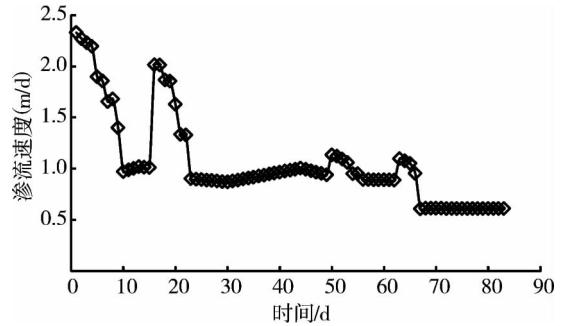


图 14 最大渗流速度随时间变化曲线

3.4 水力梯度

典型时间段注浆加固圈外的围岩水力梯度分布如图 15 所示.第 5 d 注浆加固圈外的围岩水力梯度分布如图 15a 所示,此时先行洞正在施工上台阶 B 段,注浆加固圈外的围岩水力梯度的最大值位于先行洞开挖界面上方,最大值约为 0.9.图 15b 是第 18 d 注浆加固圈外的围岩水力梯度分布,注浆加固圈外的围岩水力梯度的最大值位于先行洞开挖界面上方,约为 1.02,伴随着后行洞上台阶的开挖,后行洞开挖界面上方注浆加固圈外的围岩水力梯度值相较于第 5 d 时上升明显.根据地质勘察资料显示:距离施工现场不远处的长沙市水厂曾发生过管涌灾害;隧道周边强风化砾岩粒径的范围为 2~40 mm,遇水易崩解,产生更小粒径的土颗粒.文献[17]指出:当重力方向与渗流方向一致时,渗透力及重力对土体颗粒的作用方向一致,对土体颗粒的稳定最为不利.上台阶施工时间段,注浆加固圈外部的围岩水力梯度的最大值位于开挖界面上方,注浆加固圈顶部的渗流路径方向与重力作用方向一致.在所得水力梯度及渗流路径的条件下,开挖界面上方的注浆加固圈外部围岩容易发生管涌病害.对于该现象,施工超前注浆加固圈时,应确保超前注浆能有效地改善隧道周边围岩的质量,必要时应采取多种加固措施,确保隧道上方的围岩稳定.双洞上台阶施工完成后,中夹岩柱上方的水力梯度值逐渐升高,后续下台阶施工阶段水力梯度的分布不再随下台阶开挖而产生大幅度变化,最终如图 15c 所示,此时注浆加固圈外的围岩水力梯度的最大值位于隧道中夹岩柱正上方,约为 1.09.对于该现象,建议在施工双洞之间的横向通道时,应对横向通道上方围岩的防渗措施进行加强,避免发生管涌.

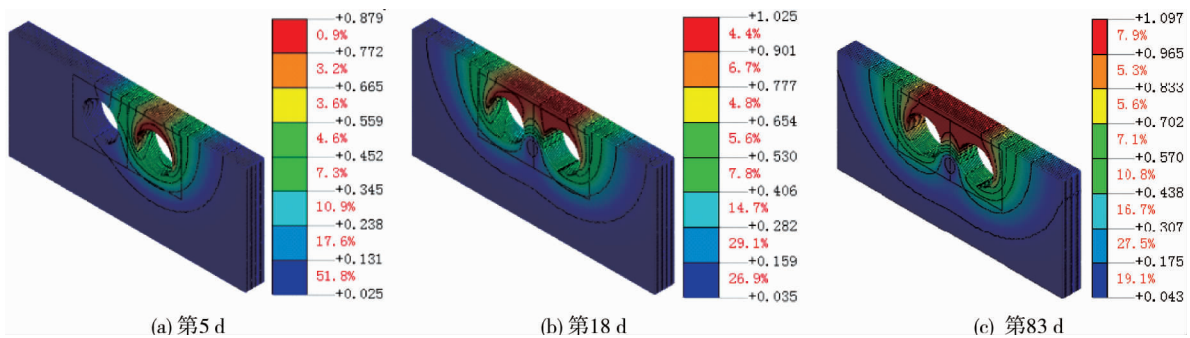


图 15 典型时间段注浆加固圈外的围岩水力梯度分布

注浆加固圈外的围岩水力梯度最大值随时间变化的曲线如图 16 所示.由图 16 可知:注浆加固圈外的围岩水力梯度最大值约为 0.83~1.18.与图 4 进行对比发现:注浆加固圈外的围岩水力梯度最大值与河水位呈正相关关系.对于该现象,建议今后修建此类隧道时,应实时分析发生渗流破坏的可能性.

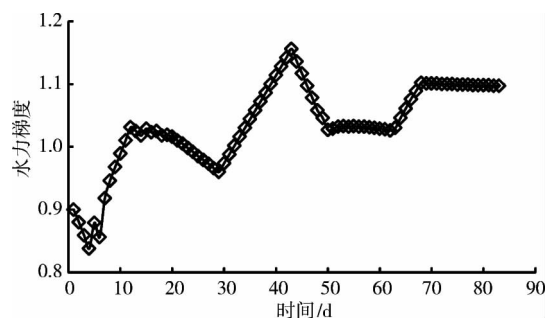


图 16 注浆加固圈外水力梯度最大值随时间变化曲线

4 结论

1) 在隧道上台阶施工期间,双洞渗水量与渗流速度的最大值均位于上台阶掌子面远离中夹岩柱一侧拱脚附近.

2) 当双洞任意一洞的上台阶施工完成后,相邻洞的施工会导致已完成施工洞的渗水量减小;当先行洞上下台阶均施工完成后,后行洞下台阶的施工会导致先行洞渗水量增大.

3) 在隧道上台阶施工期间,注浆加固圈外的围岩水力梯度最大值位于先行洞开挖面的上方;双洞施工完成后,注浆加固圈外的围岩水力梯度最大值转移到了中夹岩柱的正上方.

参考文献:

- [1] 李林毅,阳军生,高超,等.排水管堵塞引起的高铁隧道结构变形与渗流场特征模拟试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(4):715-724.
- [2] Hassani A N, Farhadian H, Katibeh H. A comparative study on evaluation of steady-state groundwater inflow into a circular shallow tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2018,73(3):15-25.
- [3] Pan Q, Dias D. Three dimensional face stability of a tunnel in weak rock masses subjected to seepage forces [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71(1):555-566.
- [4] Islam M S, Iskander M. Twin tunnelling induced ground settlements: A review [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110(3):1-27.
- [5] Sharma V, Fujisawa K, Murakami A. Space-time finite element method for transient and unconfined seepage flow analysis[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2021, 197(12):1-10.
- [6] 安永林,胡文轩,岳健.水下并行隧道施工后行洞对先行洞的影响分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(2):66-70.
- [7] 叶治,付岸然,刘华北.盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):279-287.
- [8] 万友生.基于弹塑性损伤-渗流耦合模型的隧道洞口段围岩稳定性研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(8):117-123.
- [9] 李晓军,刘荆辉.防排水系统对复合式衬砌渗透特性的影响及表征方法[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(7):995-1003.
- [10] 郭玉峰,王华宁,蒋明镜.水下浅埋双孔平行隧道渗流场的解析研究[J].岩土工程学报,2021,43(6):1088-1096.
- [11] 刘坤,刘新荣,钟祖良,等.隧道排水系统非对称堵塞对衬砌外水压力的影响[J].地下空间与工程学报,2018,14(2):369-378.
- [12] Sweetenham M G, Maxwell R M, Santi P M. Assessing the timing and magnitude of precipitation-induced seepage into tunnels bored through fractured rock[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2017,65(5):62-75.
- [13] 魏彦昭.城市河底浅埋隧道围岩与衬砌力学性状的分析与探索[D].湘潭:湖南科技大学,2017.
- [14] 杜鹃,徐伟,赵智国,等.湘江流域近30年径流量与水位的长期变化规律研究[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(3):369-378.
- [15] 靳晓光,李晓红,张燕琼.越江隧道施工过程的渗流-应力耦合分析[J].水文地质工程地质,2010,37(1):62-67.
- [16] 岳健,谭仁华,安永林,等.河水位变化影响下水下隧道的施工力学行为[J].铁道科学与工程学报,2016,13(11):2211-2219.
- [17] 吴梦喜,高桂云,杨家修,等.砂砾石土的管涌临界渗透坡降预测方法[J].岩土力学,2019,40(3):861-870.