

注浆加固对近水库隧道裂隙密集带区地下水渗流场的影响性分析

高长军

(深圳南山区交通运输局, 广东 深圳 518000)

摘要: 利用 Visual-modflow 三维可视化渗流软件建模分析了邻近水库裂隙密集带地层, 隧道开挖至注浆前后全过程地下水渗流场分布规律。结合隧址区水库、裂隙密集带等水力联系的影响, 研究了隧道施工未扰动下渗流场演变过程。结果表明, 毛洞开挖后裂隙水垂直补给隧道, 影响范围很大, 水库方向的反向补给或贯通排泄并不明显; 隧道初期支护有利于保持地下水渗流场稳定, 由于密集裂隙带的存在, 横断面渗流变化与毛洞状态初期较为接近; 随着注浆加固止水效果的提升, 地下水向隧道内汇集的趋势减弱且范围减小, 当围岩渗透系数折减到 90% 时, 与初始渗流场较为接近, 表明良好的防水体系对维持地下水渗流场稳定发挥了较好的作用; 密集裂隙带的存在仅对局部渗流场有影响, 对隧道和水库之间的水力联系并无显著影响。

关键词: 隧道; 地下水; 渗流; 裂隙密集带

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)10-0203-05

0 引言

隧道工程的病害统计研究表明, 渗漏水成为伴随隧道施工期到运营期的难题^[1-3]。其造成的恶劣影响可以分为: (1)降低隧道结构安全, 如水压较大引起衬砌变形, 注浆圈渗水导致锚杆腐蚀, 并侵蚀隧道内附属设施; (2)生态资源的流失, 如生态遭到破坏, 地表凹陷, 地下水资源被损害; (3)影响洞内行车安全, 如衬砌渗水到路面进而积水使行车容易打滑侧翻。因此, 弄清地下水渗流场的分布尤为重要。

地下水渗流是在岩体中进行的, 岩体中的渗水一般通过裂隙进行渗透。对于结构面而言, 岩石的渗透性能很低, 大多数情况下可以忽略不计。而对于特殊地质条件(断层、裂隙密集带等), 则极易成为地下水向隧道渗透的潜在通道, 可能导致开挖至断层时发生较集中涌水等, 必须采用相应的止、排水措施。

国内外学者^[4]对隧道地下水渗流场的分布开展了一定的研究, 注浆—开挖—支护等每一个施工步骤都会引起隧道周围渗流场分布的改变。杜朝伟等^[5]以复变函数理论导出了包括衬砌结构、注浆圈和围岩在内组成的地下水渗流场公式, 并对以堵为主的衬砌水压力值给出了建议。任文峰等^[6]根据保角变换法, 推导出隧道开挖后稳定渗

流场分布公式。王秀英等^[7]对高水位隧道衬砌外水压力进行了探讨, 并提出了注浆圈厚度的取值方法。卓越等^[8]利用数值模拟计算和现场实验的手段, 研究了埋深、围岩渗透系数等对渗流场的扰动, 并对特殊地段提出了注浆措施。蔡臣等^[9]利用 Visual-modflow 三维可视化软件对隧道渗流场分布进行了探讨, 构建了地层局部区域渗流场模型。Lee^[10]对地下水渗透公式和地下水渗流对开挖面渗透力进行了数值计算。Robert^[11]利用有限单元法对地下水渗流场进行了数值模拟, 并通过试验验证了适用性。通过以上综述可知, 虽然国内外学者对隧道地下水渗流场分布已有一定研究, 但鲜有涉及存在裂隙密集带等特殊地质段的渗流场。本文以深圳市东部过境高速公路连接线工程为依托, 利用 Visual-modflow 三维可视化渗流软件对莲塘山 B XK2+850 裂隙密集带附近隧道注浆前后渗流场分布演变过程进行数值模拟分析。其结论对类似工程分析特殊地质段地下水渗流场的分布具有一定的指导意义。

1 工程水文地质概述

1.1 工程概况

如图 1 所示的深圳市东部过境高速公路工程位于深圳市内, 高速公路隧道段大致为水平的东西走向。距离深圳水库大坝下方 200~300 m 的位置下穿深圳东湖公园, 隧道顶在深圳水库水位以下, 埋深较浅。隧道线路长 8.6 km, 沿线穿越多处

收稿日期: 2020-05-09

作者简介: 高长军(1965—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事交通基础设施(道路、桥梁与隧道工程)建设管理工作。

重要建筑物、断层和裂隙带。隧道水库下游段的水文地质复杂多变^[12],隧道开挖极易导致地下水流失造成孔隙水压力减小,可能造成地表下沉,甚至塌陷。因此研究此区域的裂隙密集带隧道注浆地下水渗流场演变过程具有重要意义。

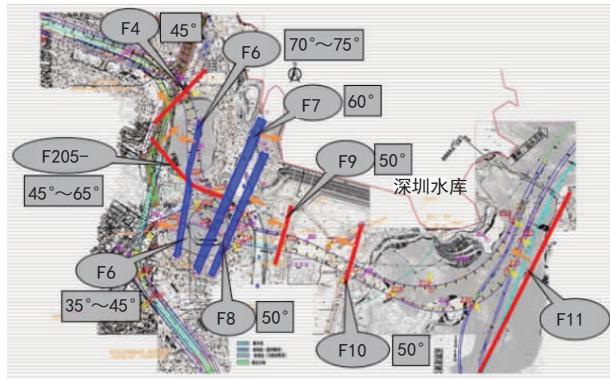


图1 工程概况

本次特殊地质段地下水渗流模型选取含有裂隙密集带的莲塘山 BXK2+850 里程段区域(见图2)。该区域最大开挖断面宽度在 35 m 以上,埋深较深,地下水位较高,离深圳水库直线距离最近,隧道开挖易形成新的贯通泄水通道。依据探孔相关现场资料发现:在莲塘山里程的 BXK2+850 m 附近基岩裂隙较为发育,岩体风化和破碎程度较高,局部存在石英富集现象,有较为显著的水蚀特征,探孔岩芯的表面存在大量水蚀导致的溶隙、溶孔,表明该工程区域的地下水处于频繁转移活动状态。

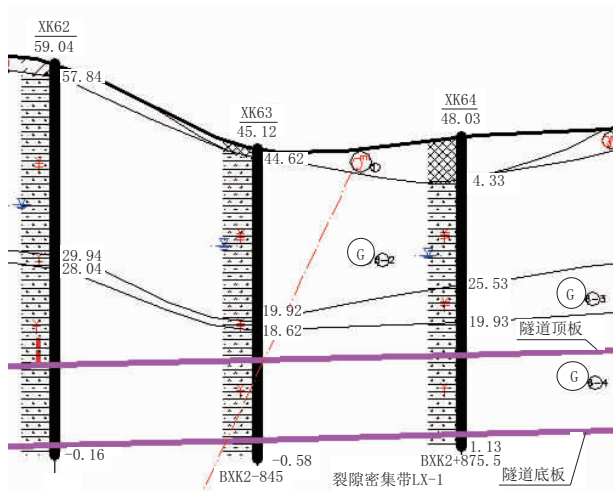


图2 莲塘山 BXK2+850 里程段区域地质图

1.2 现场抽水试验

在莲塘山密集裂隙带附近布设一组抽水试验,采用一个抽水主孔、多个观测孔的试验方法,使用油浸式不锈钢深井潜水泵对隧道顶板~底板部位的中风化~微风化基岩进行抽水,抽水量采用三角堰和水流计进行测量。抽水主孔(ZCK2)与观

测孔(ZCK2-1~ZCK2-4)距离为 6 m,观测孔连线两两垂直。结果如图3所示(图中 Q 代表涌水量, q 代表单位涌水量, S 代表水位降深)。钻孔 ZCK2 及 ZCK2-1~ZCK2-4 处地段未见断裂构造带,但基岩微裂隙发育,多成闭合~微张状,裂隙钙质填充,具有较好的地下水渗流通道。试验测试出该区域渗透性大,加之地处莲塘山分水岭北西侧地势低洼处,距离水库最近,抽水试验结果认为整体上有利于地下水以密集裂隙带为通道进行补给。

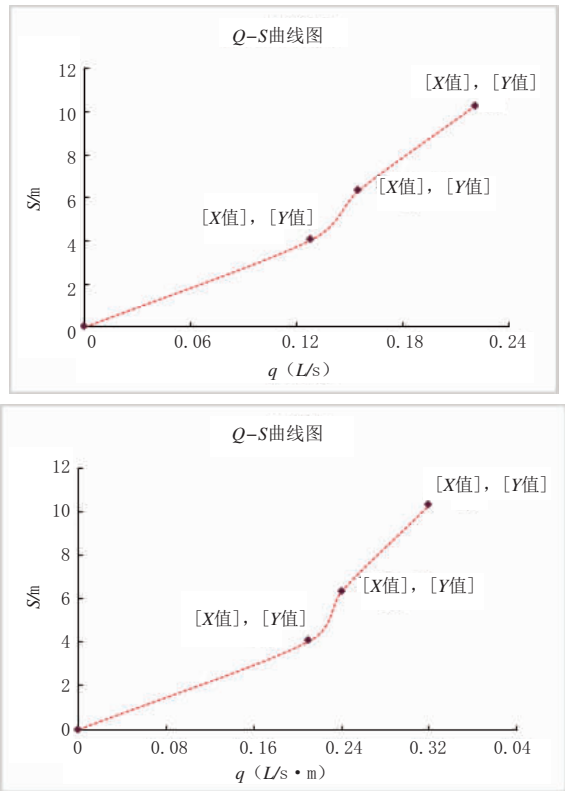


图3 莲塘山抽水试验成果图

1.3 裂隙带岩体构造

对位于莲塘山 BXK2+850 主线隧道附近的 Z20 钻孔进行物探超声波测井研究,Z20 孔取 3 组较完整、新鲜的岩芯进行岩石纵波速度测试,得到变质砂岩 $V_{pm}=4\ 300\text{ m/s}$ 。Z20 钻孔对应隧道穿越位置为孔深 52~68 m 段,岩体完整性系数为 0.38~0.87,则可计算出平均完整性系数 0.55,预测该段存在相对较破碎岩体,整体裂隙较发育,局部较完整。利用钻孔的孔内摄像技术,解译其裂隙发育情况,得出隧道主线在莲塘山里程 BXK2+850 段附近分布发育了 5 组主要裂隙面,产状分别为 $24\angle 39, 171\angle 53, 213\angle 52, 262\angle 59, 337\angle 48$ 。依据该里程段隧道走向和裂隙节理面产状信息,使用赤平投影原理绘制出线路与主要裂隙面的相对关系如图4所示。地震 CT 测试解译的莲塘山段基

岩裂隙密集带见图5。莲塘山段地震CT剖面解译出由多个小规模次级裂隙密集带组成的裂隙密集带LX-1, 推测次级裂隙密集带垂直厚度约4~10 m, 水平宽度1~4 m。其影响范围约67 m。该裂隙带贯通性较好, 并向北西延伸至水库下方。

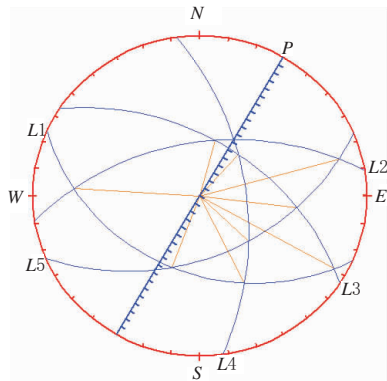


图4 隧道与主结构面及主要裂隙面的相对关系图

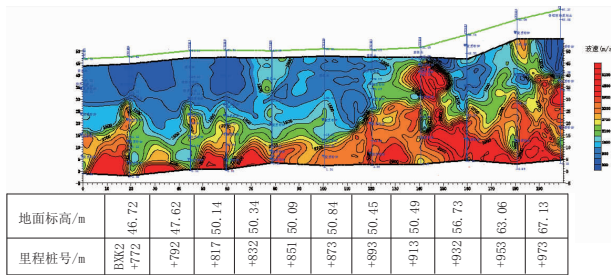


图5 地震CT测试解译莲塘山段基岩裂隙密集带

2 数值计算

2.1 数值模型的建立

利用 Visual-modflow 三维可视化软件计算的主要过程包括模型参数的输入, 包含有地表重要点处高程、含水层标高、渗透系数、初始地下水位等。接着划分合适的单元数量, 并定义水均衡区, 给予不同区段边界条件, 如降水补给和蒸发量等。然后录入地表分布的江、河、湖等水力参数。最后对整个模型输入水头初始值。

位于北向水量充足的河谷, 设为定水位补给边界, 其余边界为透水边界, 谷对岭地区的泄洪渠和水库下游地区为河流边界, 隧道为排水管边界。模型分布为 X 方向(东西向): 0~2 700 m, Y 方向(南北向): -450~1 450 m, Z 方向(竖直向): -50~200 m, 总面积为 5.13 km², 单元数达 432 000 个。基于勘察所给实际地形等高线输入各控制点高程值, 利用距离平方反比法进行差值生成模型地表(见图6), 依据测量的地下水位高程线性回归分析, 得出整个模型的初始水位分布。计算对比施工前后地下水渗流演变时, 模型注浆圈范围为 4.5 m, 同时掌子处采用全断面帷幕注浆, 长度 6 m。

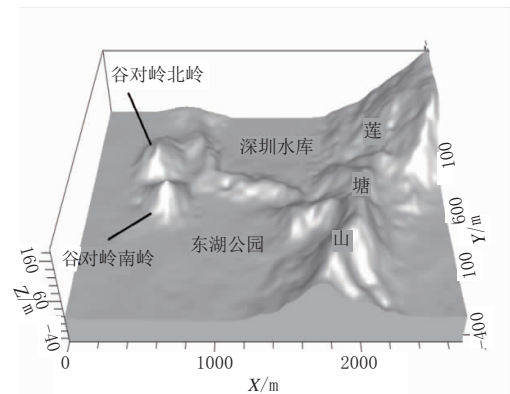


图6 模型三维示意图

2.2 计算参数

为保证模型计算结果既达到准确性要求, 又方便模型的建立及结果收敛, 特对模型岩性参数进行一定的简化合并。表1列出了计算模型中岩体和隧道结构的渗透系数、给水度、孔隙率等参数。当使用该软件仿真大型复杂地质环境时, 一般通过变更水力参数实现。王博等^[13]研究了有限元计算断层中水力参数, 本次模型中不同含水地层的水力参数值见表2。

表1 岩体和隧道结构计算参数

围岩 - 支护结构	$K_x / (m \cdot d^{-1})$	$K_y / (m \cdot d^{-1})$	$K_z / (m \cdot d^{-1})$	有效孔隙率 / %	给水度 / %
初衬	8.64E-03	8.64E-03	8.64E-03	—	—
加固圈	0.02	0.02	0.02	2	1.5
断层带	0.01	0.01	0.01	10	6.8
密集裂隙带	1.0	1.0	0.5	30	15
人工填土	0.2	0.2	0.1	3	2.4
强风化变质砂岩	0.5	0.5	0.25	15	11
中风化变质砂岩	0.5	0.5	0.3	12	9
微风化变质砂岩	0.15	0.15	0.075	10	7
强风化碎裂岩化混合花岗岩	0.5	0.5	0.25	5	3.3
微风化碎裂岩化混合花岗岩	0.2	0.2	0.1	3	2.1
强风化花岗岩片麻岩	0.4	0.4	0.2	4	3
微风化花岗岩片麻岩	0.08	0.08	0.04	2	1.5

2.3 计算工况

为研究裂隙密集带地层隧道围岩注浆前后渗流场分布演变规律, 以对比分析毛洞开挖未施支护到支护再到围岩注浆全过程, 包含附近裂隙密集带在内的地层渗流场演变情况, 具体的工况见表3。

表2 含水层计算参数

地层	渗透系数 $/(m \cdot d^{-1})$	贮水系数 $/m^{-1}$	有效孔隙率 $/\%$	给水度 $/\%$
密集裂隙带	1	1E-05	30	15
断层带	0.01	1E-05	10	6.8
潜水层	0.08~0.5	1E-05	10	10
隔水层	1E-06	1E-05	8	1
承压层	0.3	1E-05	10	15

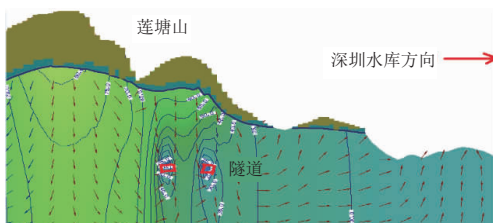
表3 计算工况

工况	隧道状态
工况一	毛洞开挖未支护
工况二	施作初支
工况三	初支 + 注浆(围岩渗透系数折减 50%)
工况四	初支 + 注浆(围岩渗透系数折减 90%)

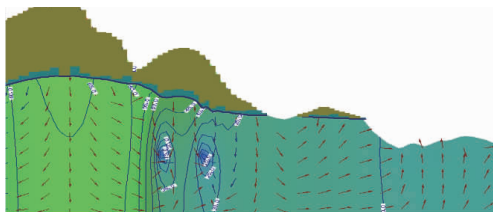
3 计算结果

3.1 毛洞状态

计算首先模拟隧道主线(北线、南线)和匝道(北线匝道、南线匝道)均开挖完成,未设置任何支护措施,也不设置注浆加固层,对洞室处于毛洞状态下的横断面渗流场进行分析。如图7所示,莲塘山隧道段埋深较深,随着隧道开挖,基岩裂隙水垂直补给隧道且影响范围极大。虽然存在密集裂隙带且围岩渗透系数较大,加之隧道及围岩均未采取任何防水措施,但开挖后未出现明显来自水库方向的反向补给或贯通排泄。考虑到此处水库距隧道最近(约250m),建议采取注浆封堵等措施。从地下水位的变化可以看出,该区域水头较高,隧道结构上方的地下水位变化不大。其原因是莲塘山体内部基岩裂隙水和降水补给。



(a)毛洞状态渗流横断面图(30 d)

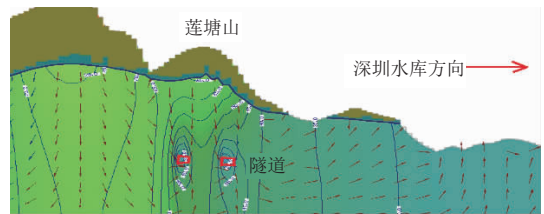


(b)毛洞状态渗流横断面图(180 d)

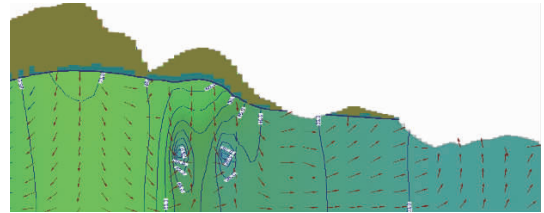
图7 毛洞状态横断面渗流变化图

3.2 施作初支

为与毛洞状态下的渗流特征进行对比,模拟隧道主线(北线、南线)和匝道(北线匝道、南线匝道)均开挖完成且已施作初衬状态,对其横断面渗流场进行分析。如图8所示,隧道开挖完成并在施作初衬状态下,由于密集裂隙带的影响,横断面渗流变化与毛洞状态初期较为接近,仅因为施作了初衬,使隧道开挖的影响范围减小。这说明初衬对保持地下水流动场稳定起到一定作用。地下水位最大降幅约为10m。



(a)施作初支状态渗流横断面图(30 d)



(b)施作初支状态渗流横断面图(180 d)

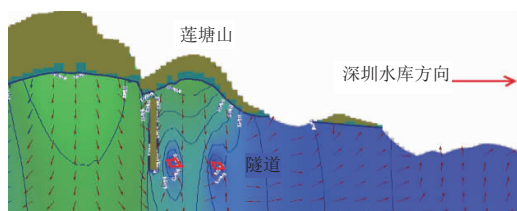
图8 施作初支状态横断面渗流变化图

3.3 初支 + 注浆(围岩渗透系数折减 50%)

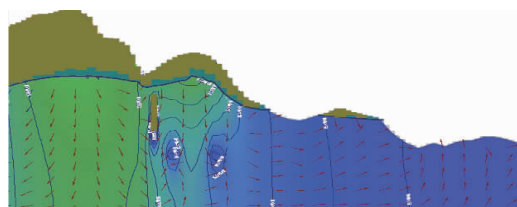
在该工况下,数值计算隧道的南北主线和匝道,模拟在隧道开挖后,对隧道施作初期支护并对围岩进行注浆加固后的渗流场变化规律。其中,对围岩进行注浆加固是通过对相应区域围岩的渗透系数进行折减。这里折减50%,数值计算的结果如图9所示。图9表明在施作初期支护、进行注浆加固后,地下水向隧道的渗透聚集趋势变弱,且隧道轴线上方围岩中的地下水向隧道的渗透范围也有一定程度的减小,即施作一定的隧道防水体系(初期支护 + 注浆加固圈)对稳定地下水具有明显的防水效果。

3.4 初支 + 注浆(围岩渗透系数折减 90%)

在该工况下,数值计算隧道的南北主线和匝道,模拟在隧道开挖后,对隧道施作初期支护并对围岩进行注浆加固后的渗流场变化规律。其中,对围岩进行注浆加固是通过对相应区域围岩的渗透系数进行折减。这里折减90%,数值计算的结果如图10所示。图10表明横断面与初始渗流场相比较为接近,隧道开挖的影响进一步减小,密集裂隙带的存在仅影响局部渗流场,对隧道和水库之间的水力联系并未见显著影响。考虑到此处渗透系

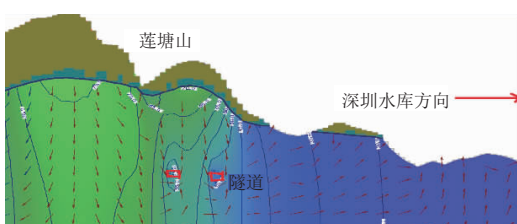


(a) 渗透系数折减 50% 渗流横断面图 (30 d)

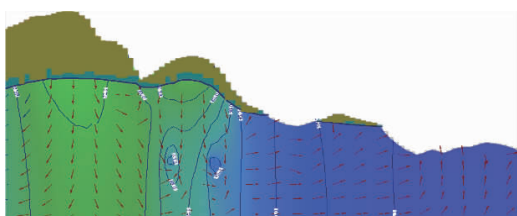


(b) 渗透系数折减 50% 渗流横断面图 (180 d)

图9 围岩渗透系数折减 50% 横断面渗流变化图



(a) 渗透系数折减 90% 渗流横断面图 (30 d)



(b) 渗透系数折减 90% 渗流横断面图 (180 d)

图10 围岩渗透系数折减 90% 横断面渗流变化图

数较大且距离水库最近,可考虑地表注浆等方式进一步封堵。

综上所述,密集裂隙带通过的莲塘山 BXK2+850 区域,由于地下水位较高且围岩渗透系数较大,隧道开挖后由基岩裂隙水垂直向隧道补给,密集裂隙带对局部渗流场有一定影响,但未见有明显从水库方向向隧道的补给和排泄,随着注浆加固措施的完善,可有效保证渗流场的稳定,同时减小外部水力联系。从地下水位的变化可以看出,随着隧道支护和注浆加固措施的施作,地下水位下降幅度明显减小。

4 结论

(1) 毛洞开挖,基岩裂隙水垂直补给隧道,影

响范围很大,开挖后未出现明显来自水库方向的反向补给或贯通排泄。

(2) 隧道施设初支后,由于密集裂隙带的存在,横断面渗流变化与毛洞状态初期较为接近,隧道开挖的影响范围减小,说明初衬对保持地下水流场稳定起到一定作用。

(3) 施设初衬和注浆圈(围岩渗透系数减小 50%)后,地下水朝着隧道内涌入的趋势减弱,隧道上方山体的地下水向隧道内汇集的范围也减弱,说明良好的止水措施对维持地下水渗流场稳定发挥了较好的作用。

(4) 施设初衬和注浆圈(原围岩渗透系数折减 90%)后,与初始渗流场相比较为接近,开挖影响进一步减小,密集裂隙带的存在仅对局部渗流场有影响,对隧道和水库之间的水力联系未有显著影响。

参考文献:

- [1] 蒋忠信. 隧道工程与水环境的相互作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 121-127.
- [2] 丁浩, 蒋树屏, 李勇. 控制排放的隧道防排水技术研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1398-1403.
- [3] 陈林杰, 蒋树屏. 限量排放下富水隧道衬砌外水压力计算探讨[J]. 公路交通技术, 2006(2): 88-90.
- [4] Perazzelli P, Leone T, Anagnostou, G. Tunnel face stability under seepage flow conditions [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014(43): 459-469.
- [5] 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(S2): 3567-3573.
- [6] 任文峰. 高压隧道应力场—位移场—渗流场耦合理论及注浆防水研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [7] 王秀英, 王梦恕, 张弥. 计算隧道排水量及衬砌外水压力的一种简化方法[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(1): 8-10.
- [8] 卓越, 王梦恕, 周东勇. 连拱隧道施工对地下水渗流场的影响研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 104-110.
- [9] 蔡臣, 黄涛, 贺玉龙. 广深港客运专线下穿珠江狮子洋隧道渗流场数值研究[J]. 铁道建筑, 2013(6): 68-70.
- [10] LEE IN-MO. Effect of tunnel advance rate on seepage forces acting on the underwater tunnel face [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(3): 273-291.
- [11] Chapuis R P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2012, 71(3): 401-434.
- [12] 李铮. 矿山法城市隧道渗流场演变及防排水问题研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [13] 王博, 刘耀炜, 孙小龙, 等. 断层对地下水渗流场特征影响的数值模拟[J]. 地震, 2008, 28(3): 115-124.