

DOI: 10.11779/CJGE201803008

# 工程活动诱发的围岩结构变化对隧道突涌水的影响分析

黄震<sup>1, 2, 3</sup>, 朱术云<sup>4</sup>, 赵奎<sup>\*1</sup>, 李晓昭<sup>3</sup>, 吴锐<sup>1</sup>, 王迎超<sup>5</sup>, 王晓军<sup>1</sup>

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

3. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 4. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

5. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 随着深大交通、水利水电隧道(洞)的大量建设及地下矿产的不断延深开采, 隧道突水灾害问题愈加严重。工程活动作为诱发突水的必要条件, 其导致的围岩结构变化将对围岩力学、水力学性质及隧道附近渗流场产生重要影响。从工程扰动诱发的围岩损伤及其导致的渗透性演化入手, 利用理论解析法研究了隧道围岩结构变化对涌水量及水压力分布的影响。结果表明: 损伤区厚度对隧道涌水量和孔隙水压力分布具有较大影响, 损伤区范围越大, 发生突水的危险性越大; 损伤区渗透系数对隧道涌水量的影响阈值约为 2 个数量级, 之后其对涌水量的影响较弱; 注浆圈厚度越大、渗透系数越低, 隧道涌水量越小, 但并不是注浆圈厚度越大、渗透性越低, 涌水量的控制效果就越好, 而是存在一个最优效果的设计值。

**关键词:** 地下工程; 隧道突水; 开挖损伤; 岩体结构; 渗透系数; 涌水量

**中图分类号:** TU452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2018)03-0449-10

**作者简介:** 黄震(1989-), 男, 江西大余人, 博士, 讲师, 主要从事工程地质和岩土工程方面的教学与研究工作。

E-mail: huangzhen075@163.com。

## Influences of structural variation of host rock induced by engineering activities on water inrush of tunnels

HUANG Zhen<sup>1, 2, 3</sup>, ZHU Shu-yun<sup>4</sup>, ZHAO Kui<sup>1</sup>, LI Xiao-zhao<sup>3</sup>, WU Rui<sup>1</sup>, WANG Ying-chao<sup>5</sup>, WANG Xiao-jun<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 4. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Water inrush disasters have become a serious problem resulting from the current trend that numerous traffic roads and hydropower tunnels are constructed, and minerals are mined in deep underground. The variation of rock structures induced by engineering activities has great influences on the mechanical and hydraulic properties of the host rock, and the seepage fields around tunnels. The theoretical analysis method is employed to investigate the influences of the structure variation of rock on the groundwater inflow rate and pore water distribution based on the damage and permeability evolutions of host rock induced by engineering disturbance. The results show that the influences of the thickness of the damage zone on the pore water distribution and the groundwater inflow rate are significant. The risk of water inrush increases with the increase of the thickness of the damage zone. The influences of the hydraulic conductivity on the pore water distribution and the groundwater inflow rate are weak if more than two orders of magnitude increase in hydraulic conductivity of damaged zone. The inflow rate decreases with the increase of the thickness of grouting circle and the decrease of its hydraulic conductivity. However, there is a best design value for the thickness and permeability of the grouting circle, rather than the effect of greater thickness and lower permeability of the grouting circle.

**Key words:** underground engineering; water inrush of tunnel; excavation damage; rock structure; hydraulic conductivity; inflow rate

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2013CB036001); 国家自然科学基金项目(4170236, 41572263); 博士后创新人才支持计划(BX201700113); 中国博士后科学基金项目(2017M620205); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDEK1703); 江西理工大学博士启动基金项目(jxxjbs17005)  
**收稿日期:** 2016-12-01  
**\*通讯作者** (yglmf\_zk@163.com)

## 0 引言

交通、水利水电隧道(洞)开挖、地下矿产开采等

地下工程活动将造成围岩应力重新分布,诱发岩体的损伤破坏,形成开挖损伤区,致使岩体的渗透特征发生改变,进而导致围岩失稳、隧道突水等灾害事故的发生<sup>[1-2]</sup>。尤其随着中国工程建设重心向深部转移,在高应力、高水压等条件下,围岩的扰动损伤作用更加显著,突水事故发生的危险性也大大增加<sup>[3-4]</sup>。分析突水实例可知,工程扰动是诱发突水的必要条件<sup>[5]</sup>。工程扰动在突水机制中的本质作用是改变了围岩的结构状态,进而改变围岩的渗透性能。因此,开展工程扰动诱发的围岩损伤及其对隧道突涌水的影响研究具有重要的理论意义和工程应用价值。

国内外学者针对地下工程围岩损伤破坏及损伤区的渗透性演化规律开展了一系列的研究。Kelsall 等<sup>[6]</sup>研究了地下核废料处置库开挖诱发的围岩损伤破坏及其渗透性演化特征; Martino 等<sup>[7]</sup>针对加拿大 URL (Underground Research Laboratory) 地下实验室系统研究了隧道开挖引起的围岩损伤及造成的围岩渗透性变化; Baechler 等<sup>[8]</sup>采用多种测试手段研究了开挖损伤区的渗透特征; 姜振泉等<sup>[9]</sup>、孙强等<sup>[10]</sup>采用伺服渗透试验研究了岩石应力-应变过程中的渗透性演化特征,指出岩石受力损伤过程中渗透性存在一个突增点; 胡少华等<sup>[11]</sup>分析了高放废物深地质处置场址围岩损伤过程中的微裂纹萌生、扩展机制,并采用细观力学方法研究了岩体的渗透率演化机制; 贾善坡等<sup>[4]</sup>、韩国锋等<sup>[12]</sup>、王伟等<sup>[13]</sup>学者对岩石损伤破坏过程中的渗透特征进行了大量研究,获得了许多有益的结论,对地下工程中的水害防控起到了积极的指导作用。但是由于实际地下工程围岩损伤及渗流突水问题的复杂性,目前关于工程扰动造成的围岩损伤及其对隧道突水的控制机理仍存在很多问题有待深入研究。此外,隧道施工过程中经物探和钻探方法探明断层、溶洞、陷落柱等富水地段后,常采用注浆法对围岩进行加固,来预防岩体失稳及突水。事实上,注浆加固就是对围岩的结构进行人为改造,提高围岩的结构级别和阻渗能力,从而提高围岩的控渗防突能力。本文在前人研究的基础上对工程扰动诱发的围岩损伤及其对岩体渗透性的影响进行分析,并采用理论解析法研究围岩结构变化对隧道突涌水的影响,以期对隧道突水机理研究和突水防治提供一定的参考依据。

## 1 开挖损伤及其对围岩渗透性的影响

地下工程施工过程中,开挖扰动必然会造成围岩应力场发生变化,围岩力学和水力特性也将发生明显改变,其主要表现为岩体内部裂隙的扩展和贯通(即岩体结构的改变)、岩体渗流特性及声波波速

的改变等<sup>[2, 14]</sup>。性质发生改变的这部分区域一般称为开挖损伤区(excavation damaged zone, EDZ)或开挖扰动区(excavation disturbed zone, EDZ)。

### 1.1 围岩开挖损伤范围

开挖损伤区的出现不仅改变了围岩的力学性质和水理性质,降低了防突岩体的阻水性能,而且减小了围岩的有效隔水厚度,增加了突水的危险性。因此,合理预测和确定围岩损伤范围对于预防隧道突水、指导隧道开挖和支护设计具有重要的工程意义。

隧道开挖前后围岩的裂隙发育及分布调查是确定围岩开挖损伤范围的一种有效方法。图 1 为法国 Meuse/Haute-Marne 及比利时 HADES 地下实验室隧道开挖后断面附近围岩裂隙分布图<sup>[15-16]</sup>,实测结果表明裂隙分布具一定规律:其中 Meuse/Haute-Marne 实验室该隧道的裂隙面与水平面的夹角约为  $45^\circ$ ,掌子面前方裂隙范围接近 1 倍洞径(约为 4 m);实测 HADES 某隧道的裂隙面与水平面的夹角约为  $60^\circ$ ,掌子面前方裂隙范围约为 6~8 m,径向裂隙发育范围约为 1 m。

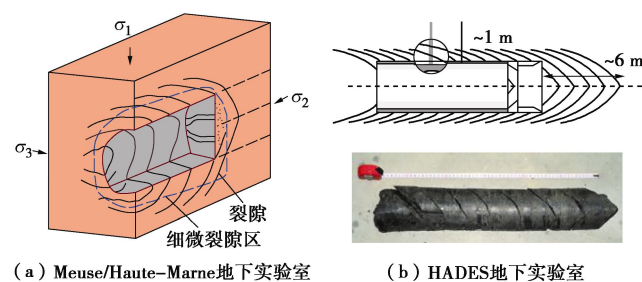


图 1 隧道开挖过程中的围岩裂隙分布<sup>[15-16]</sup>

Fig. 1 Observed fracture patterns of host rock during excavation of tunnels<sup>[15-16]</sup>

图 2 为瑞士 Mont Terri 地下岩石实验室某隧道裂隙调查结果<sup>[17]</sup>,由图可知,隧道开挖后,断面附近发育有互相连通的裂隙网络,其中隧道断面 0~30 cm 范围内每米发育有几十条裂隙,距离隧道壁越远,裂隙发育越少,裂隙发育区集中于隧道断面 0.9 m 范围内。

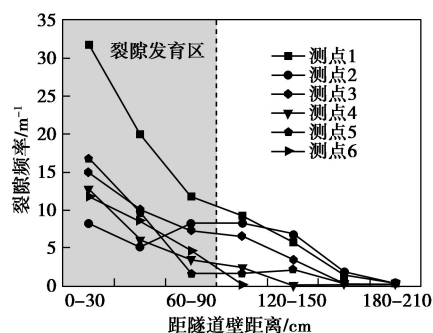


图 2 实测围岩裂隙频率与距隧道壁距离的关系<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Relationship between fracture frequency and distance from tunnel wall<sup>[17]</sup>

Kaiser 等<sup>[18]</sup>提出以最大切向应力  $\sigma_{\max}$  和岩石单轴抗压强度  $\sigma_c$  来预测现场围岩脆性破坏深度的经验公式

$$\frac{D_f}{a} = 1.34 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} - 0.57(\pm 0.05) \quad (1)$$

式中  $D_f$  为围岩开挖破坏深度;  $a$  为隧道半径; 最大切向应力  $\sigma_{\max}$  可根据下式计算

$$\sigma_{\max} = 3\sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

式中  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小主应力。

Martin 等<sup>[19]</sup>在隧道开挖破坏深度实测数据的基础上对式 (1) 进行了修正, 获得了如图 3 所示线性经验表达式

$$\frac{D_f}{a} = 1.25 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} - 0.49(\pm 0.1) \quad (3)$$

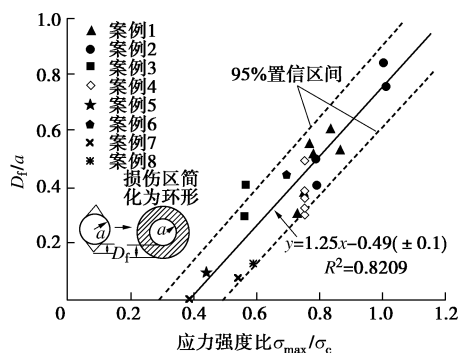


图3 隧道围岩破坏深度与应力的拟合关系<sup>[19]</sup>

Fig. 3 Fitting relationship between measured depth of failure and stress<sup>[19]</sup>

由图 3 可知, 当应力强度比  $\sigma_{\max}/\sigma_c \approx 0.4 \pm 0.1$  时, 隧道围岩将开始出现损伤破坏<sup>[20]</sup>, 应力强度比值越大, 围岩开挖损伤范围越大。

## 1.2 开挖损伤区的渗透特征

开挖损伤区 (EDZ) 的产生将造成围岩渗透性的显著提高。大量国内外隧道围岩渗透性的现场实测研究表明<sup>[1, 16, 21-25]</sup>, 隧道开挖后, 围岩渗透性将呈数量级增长。图 4 (a) 为瑞士 Mont Terri 隧道开挖后断面不同位置围岩的渗透率实测结果<sup>[17]</sup>, 由实测结果可知, 虽然不同部位围岩的渗透性演化特征不同, 但围岩渗透性出现明显变化的区域均集中于隧道断面 1 m 范围内, 其中围岩渗透性显著提高 ( $>1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ ) 的区域位于衬砌后 10~20 cm 范围内, 此范围内围岩的渗透率较原岩增加 2~4 个数量级。对比图 2 所示的裂隙调查结果可知, 裂隙频率与渗透性分布结果具有一致性。图 4 (b) 为加拿大 URL 实验隧道测得的围岩渗透率与距隧道壁距离的关系<sup>[22]</sup>, 可以看出, 距离隧道壁越近, 围岩渗透性增加幅度越大, 与原岩渗透性相比最高可增加约 5 个数量级, 围岩渗透性明显增加

区域也集中于隧道断面 1 m 范围内, 距离隧道壁越远, 围岩渗透性逐渐趋于原岩的渗透性。此外, 根据实测结果<sup>[1, 16, 23-35]</sup>, 比利时 Mol 地下实验室围岩损伤区渗透系数增加 1~4 个数量级, 法国 Bure 隧道增加 4~5 个数量级, 法国 Tournemire 隧道增加 5~6 个数量级。

前人的研究结果可为下文损伤范围及损伤区渗透系数的确定提供一定的参考依据。

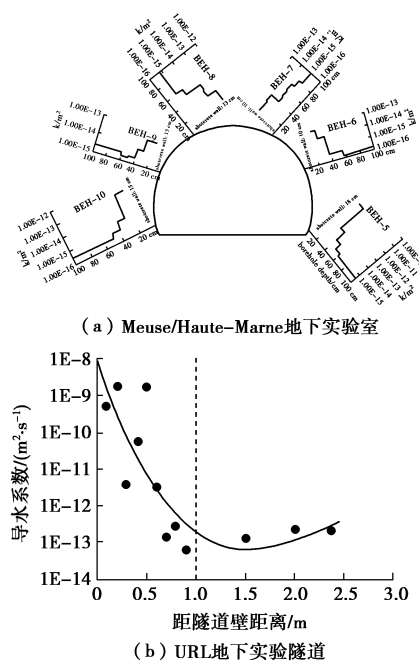


图4 实测渗透率与距隧道壁距离的关系<sup>[17, 22]</sup>

Fig. 4 Relationship between observed permeability and distance from tunnel wall<sup>[17, 22]</sup>

## 2 开挖损伤对隧道突涌水的影响

由以上分析可知, 隧道开挖后, 损伤区将引起围岩渗透特征的变化, 而渗透性的改变必将对隧道渗流场产生影响, 加之, 渗流场和应力场的耦合作用将对围岩和支护结构的受力状态产生复杂的影响<sup>[26]</sup>。在渗流场和应力场的相互作用下, 围岩阻水能力和稳定性降低, 支护结构承受的荷载增大, 严重时会造成隧道突水突泥等灾害事故的发生。因此, 确定开挖损伤区对隧道周围渗流场分布、渗流量大小, 及其对隧道涌水和周围水压力分布的影响具有重要的理论意义和工程应用价值。

涌水量的计算方法多种多样, 常用的主要有解析算法、工程类比法、数值计算及其它数学方法等<sup>[26-28]</sup>。由于隧道突水、涌水的发生机制十分复杂, 加之其影响因素多变, 由此可能造成上述几种方法的预测结果误差均较大。与工程类比法和数值计算法等其它方法相比, 解析算法具有概念清晰、计算简便等优点, 并且便于直接揭示开挖损伤区对隧道涌水及水压力影

响的一般规律。而水压力的计算方法主要包括解析计算法、折减系数法及数值计算法等等。其中折减系数法在水工隧道中运用较广,其考虑了围岩、衬砌的渗透性及隧道防排水体系等影响因素,但它作为一种经验或半经验的方法对于确定高水压隧道和 underwater 隧道的水压力还存在很大的不足<sup>[29]</sup>。因此,本文运用理论解析方法求解考虑开挖损伤区的隧道涌水量和水压力计算公式,并据此研究了开挖损伤对隧道突涌水的影响。

## 2.1 涌水量和水压力的解析解

在隧道涌水的理论解析计算中,一般将围岩假定为连续介质,并假定岩体的渗透性各向同性或各向异性。而在实际中,节理裂隙和断层等结构面的存在使天然岩体为不连续介质且其渗透性表现为各向异性,但一般而言,围岩中裂隙的间距远小于隧道的尺寸,因此有可能把裂隙的影响平均到围岩中去,把围岩视为连续多孔介质<sup>[26,30]</sup>。因此,尽管在计算中将围岩假定为各向同性的连续介质与实际情况不完全相符,但是由于连续多孔介质的渗流理论相对成熟<sup>[26]</sup>,一般在研究计算中常把岩体作为满足达西定律的连续介质进行分析<sup>[31]</sup>。

假定围岩为各向同性的连续多孔介质,岩体中的渗流符合达西定律,不考虑围岩中的应力场及应力-渗流耦合效应,假设隧道断面为圆形且开挖损伤区为环形,则隧道涌水量及水压力分布可根据 Harr<sup>[32]</sup>提出的隧道镜像法(见图5)求得。

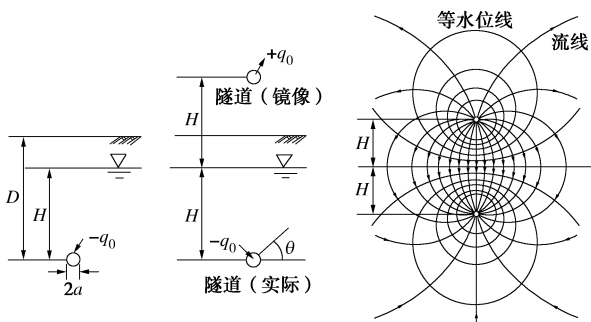


图5 隧道镜像法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mirror image tunnel method

围岩中任一点位置的测压管水头可由下式进行计算<sup>[32]</sup>

$$h = \frac{q_0}{2\pi k_m} \left[ \ln(\cos^2 \theta + (2H/r - \sin \theta)^2)^{0.5} \right] + H \quad (4)$$

式中  $h$  为位置水头;  $q_0$  为单位长度隧道的涌水量;  $k_m$  为围岩的渗透系数;  $r$  为测点位置距隧道断面中心的距离;  $\theta$  为隧道拱脚线与测点方向线的逆时针夹角;  $H$  为隧道之上的地下水水头高度,并且假设  $H$  在隧道开挖过程中保持稳定,如图5所示。

其中,沿着隧道拱脚线 ( $\theta=0^\circ$ ), 上式简化为

$$h_{sp} = \frac{q_0}{2\pi k_m} \left[ \ln(1 + (2H/r)^2)^{0.5} \right] + H \quad (5)$$

考虑到  $h_{sp}=0$ , 单位长度隧道涌水量  $q_0$  可根据式(5)计算

$$q_0 = -\frac{2\pi H k_m}{\ln[1 + (2H/a)^2]} \quad (6)$$

式中  $a$  为隧道半径。对于深埋隧道工程,考虑到  $[1 + (2H/a)^2]^{0.5} \approx 2H/a$ , 上式可变为

$$q_0 \approx -\frac{2\pi H k_m}{\ln(2H/a)} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)可得位置水头的计算公式

$$h = \left[ 1 - \frac{\ln(\cos^2 \theta + (2H/r - \sin \theta)^2)}{\ln[1 + (2H/a)^2]} \right] H \quad (8)$$

隧道围岩水压力分布公式可由上式求得

$$p = \left[ 1 - \frac{\ln(\cos^2 \theta + (2H/r - \sin \theta)^2)}{\ln[1 + (2H/a)^2]} - \frac{r \sin \theta}{H} \right] H \gamma_w \quad (9)$$

对于  $\theta=0^\circ$ , 上式简化为

$$p_{sp} = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + (2H/r)^2)}{\ln[1 + (2H/a)^2]} \right] H \gamma_w \quad (10)$$

式中  $p$  和  $p_{sp}$  为孔隙水压力;  $\gamma_w$  为水的重度。由式(10)可知,隧道周围的孔隙水压力梯度很大程度上受到隧道之上的地下水水头高度与隧道半径比值 ( $H/a$ ) 大小的影响。

## 2.2 考虑开挖损伤的涌水量和水压力解析解

Heuer<sup>[33]</sup>通过对比大量隧道涌水量实测值与式(7)的预测值,发现实测值与预测结果的误差普遍较大。分析其原因,除了理论解析法假定围岩为各向同性、将等效半径的圆形代替实际隧道断面形态及未考虑针对性的地质条件等原因之外,还有可能是由于涌水量的解析计算时将围岩的渗透系数假定为一个定值,而在实际当中开挖必将可能导致隧道附近岩体的渗透系数发生高达几个数量级的改变,因此通过式(7)计算得到的涌水量的预测值误差较大。为了提高涌水量预测的准确性,Heuer<sup>[33]</sup>将岩体的等效渗透系数与归一化的涌水量进行对应分区,然而这种方法为一种纯粹的统计经验方法。本文将开挖损伤区列入解析计算的考虑范围,并在此基础上对隧道涌水量和水压力的计算公式进行了必要的修正。

图6为损伤区及隧道围岩中的水头损失及孔隙水压力分布示意图<sup>[34]</sup>,假设开挖损伤区为以隧道断面中心点为对称中心的环形区域,则单位损伤区长度的涌水量可由下式进行计算<sup>[35]</sup>:

$$q_d = -\frac{2\pi k_d \Delta h_d}{\ln(b/a)} \quad (11)$$

式中  $q_d$  为单位长度损伤区的涌水量;  $k_d$  为损伤区范围岩体的渗透系数;  $\Delta h_d$  为损伤区范围内的水头损失;  $a$  为隧道半径;  $b$  为损伤区(环形)半径。

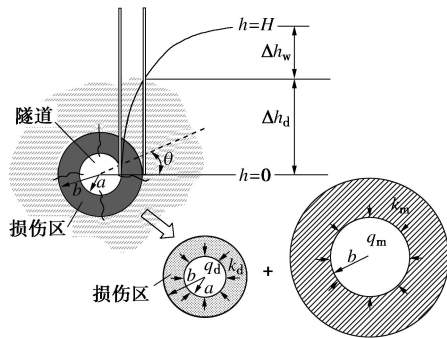


图6 损伤区及隧道围岩中的水头损失及孔隙水压力分布示意图  
(据 Fernandez 和 Moon<sup>[34]</sup>修改)

Fig. 6 Schematic diagram of head losses and distribution of pore water pressures of damage zone and host rock (modified from Fernandez and Moon<sup>[34]</sup>)

损伤区外围岩中单位长度的涌水量可由式(6)和式(7)变换得来

$$q_m = -\frac{2\pi k_m \Delta h_w}{\ln[1 + (2H/b)^2]^{0.5}} \approx -\frac{2\pi k_m \Delta h_w}{\ln(2H/b)} \quad (12)$$

式中  $q_m$  为损伤区外单位长度的涌水量;  $k_m$  为损伤区外围岩的渗透系数;  $\Delta h_w$  为损伤区外围岩中的水头损失;  $H$  为隧道之上的地下水水头高度, 有

$$H = \Delta h_w + \Delta h_d \quad (13)$$

考虑渗流的连续性, 在损伤区边缘有  $q_d = q_m$ , 联立式(11)、式(12)和式(13)则可获得损伤区内水头损失的计算公式

$$\Delta h_d = \frac{H}{1 + C(k_d/k_m)} \quad (14)$$

其中  $C$  为与  $H$ ,  $a$  和  $b$  有关的参数<sup>[35]</sup>

$$C = \frac{\ln(2H/b)}{\ln(b/a)} \quad (15)$$

将式(14)代入式(12)得

$$q_d = q_m = -\frac{2\pi k_m H}{\ln[1 + (2H/b)^2]^{0.5}} \left[ \frac{C(k_d/k_m)}{1 + C(k_d/k_m)} \right] \approx -\frac{2\pi k_m H}{\ln(2H/b)} \left[ \frac{C(k_d/k_m)}{1 + C(k_d/k_m)} \right] \quad (16)$$

将式(16)代入式(4)得

$$h = \left( 1 - \left[ \frac{\ln(\cos^2 \theta + (2H/r - \sin \theta)^2)}{\ln[1 + (2H/b)^2]} \right] \left[ \frac{C(k_d/k_m)}{1 + C(k_d/k_m)} \right] \right) H \quad (17)$$

对于  $\theta=0^\circ$ , 上式简化为

$$h_{sp} = \left( 1 - \left[ \frac{\ln(1 + (2H/r)^2)}{\ln[1 + (2H/b)^2]} \right] \left[ \frac{C(k_d/k_m)}{1 + C(k_d/k_m)} \right] \right) H \quad (18)$$

根据式(10)可得考虑开挖损伤区的孔隙水压力计算公式

$$p_{sp} = \left( 1 - \left[ \frac{\ln(1 + (2H/r)^2)}{\ln[1 + (2H/b)^2]} \right] \left[ \frac{C(k_d/k_m)}{1 + C(k_d/k_m)} \right] \right) H \gamma_w \quad (19)$$

开挖损伤区的出现必定会对隧道涌水量产生影响, 其可通过考虑损伤区的涌水量与未考虑损伤区涌水量的比值( $q_d/q_0$ )来反映, 根据式(7)和式(16)可得涌水量比为

$$\frac{q_d}{q_0} = \frac{\ln(1 + (2H/a)^2)}{\ln(1 + (2H/b)^2)} \frac{C(k_d/k_m)}{1 + C(k_d/k_m)} \quad (20)$$

## 2.3 结果分析

根据前文可知, 损伤范围与工程扰动程度及所处的应力环境有关, 且隧道开挖后, 损伤区的渗透性将呈数量级增长。为了便于分析, 下文理论计算中损伤区厚度( $b/a$ )及伤区渗透系数( $k_d/k_m$ )均取几个具有代表性的简化值。

### (1) 开挖损伤对孔隙水压力的影响

通过式(19)计算获得了归一化的孔隙水压力( $p_{sp}/Hr_w$ )随损伤区渗透系数增大比( $k_d/k_m$ )、损伤区厚度( $b/a$ )及隧道之上的地下水水头高度( $H/a$ )的变化规律(见图7), 图中红线为未考虑损伤区( $k_d/k_m=1$ )的孔隙水压力曲线。从图中可以看出, 随着损伤区渗透系数( $k_d/k_m$ )的增加, 隧道附近的孔隙水压力逐渐降低, 损伤区内的水力梯度也逐渐降低。以图7(b)为例, 在隧道外  $r/a=6$  位置处, 当损伤区渗透系数增大比  $k_d/k_m$  为 2, 5, 10,  $10^2$ ,  $10^3$  和  $10^4$  时, 归一化的孔隙水压力( $p_{sp}/Hr_w$ )分别降为不考虑损伤区的 82.2%, 79.9%, 69.9%, 68.1%, 66.7% 和 66.6%, 可知归一化的孔隙水压力随损伤区渗透系数增加逐渐降低。并且当损伤区渗透系数达到一定值后(约  $k_d/k_m=10^2$ )继续增加时(即损伤区渗透系数较原岩增长达 2 个数量级后), 孔隙水压力和损伤区内水力梯度降低的效果越来越不明显, 而基本慢慢稳定。此外, 对比图 7(a)和图 7(b)可知, 损伤区厚度(图中  $b/a$ )对孔隙水压力分布有较大的影响, 在同一位置, 孔隙水压力随损伤区厚度的增大而减小。在隧道外  $r/a=6$  位置, 以地下水水头高度  $H/a=5$  及损伤区渗透系数增大比  $k_d/k_m=10$  为例, 损伤区厚度  $b/a$  分别为 2 和 5 的归一化孔隙水压力( $p_{sp}/Hr_w$ )分别为 0.609 和 0.525, 后者较前者降低了 13.8%。而且, 对比图中曲线的变化规律可知, 损伤区厚度越大, 损伤区渗透系数的变化对孔隙水压力的影响更加明显。

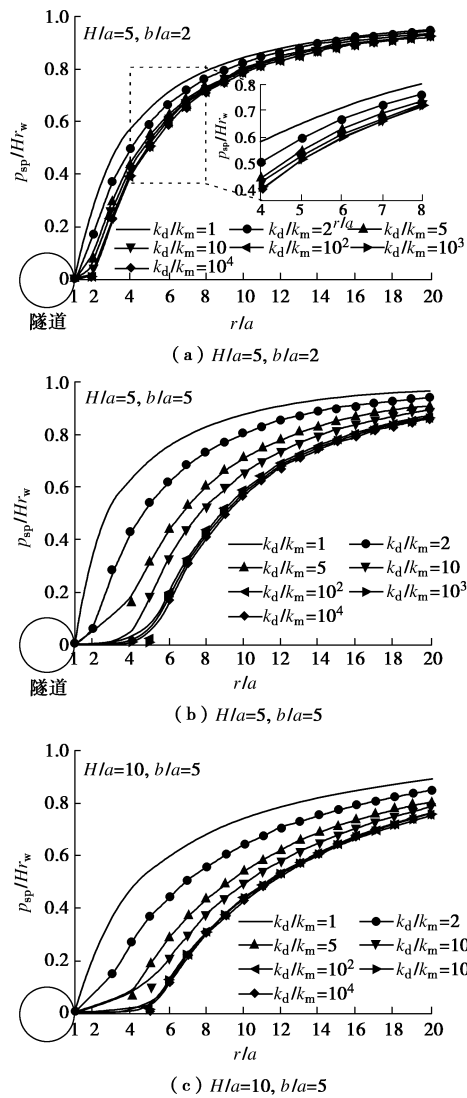


图7 孔隙水压力随损伤区渗透系数、厚度及地下水水头高度的变化规律

Fig. 7 Distribution of normalized pore water pressures for various ground water tables above tunnel, hydraulic conductivities and thicknesses of damage zone

(2) 开挖损伤对隧道涌水量的影响

图8为根据式(20)计算得到的隧道涌水量比( $q_d/q_0$ )随损伤区渗透系数( $k_d/k_m$ )、损伤区厚度( $b/a$ )及隧道之上的地下水水头高度( $H/a$ )的变化规律。由图可知,随着损伤区渗透系数( $k_d/k_m$ )的增加,隧道涌水量逐渐增大,这说明损伤区的出现对防止隧道突涌水是不利的,这与实际工程结果是一致的。进一步可以发现,当损伤区渗透系数达到一定值后(约 $k_d/k_m=10^2$ ),隧道涌水量随损伤区渗透系数的继续增加几乎没什么变化,如图中所示,在 $k_d/k_m>10^2$ 后, $q_d/q_0$ 曲线几乎保持水平。这种现象说明隧道涌水量并不会随着损伤区渗透性的增加而无限增大下去,损伤区渗透系数变化的影响阈值约为2个数量级( $k_d/k_m=10^2$ )。此外,对比图8中各图可知,隧道涌

水量随损伤区厚度的增大而增大,以地下水水头高度 $H/a=5$ 及损伤区渗透系数增大比 $k_d/k_m=10$ 为例,损伤区厚度 $b/a$ 分别为2和5的隧道涌水量比( $q_d/q_0$ )分别为1.358和2.327,后者涌水量较前者增大了71.4%。结果说明损伤区厚度对隧道突涌水的影响非常大,损伤区范围越大,越容易发生隧道突水事故。因此在实际的隧道开挖过程中,有必要查明开挖造成的损伤区的范围并制定合理的处理方案,如对损伤区进行注浆加固,以降低损伤区的渗透性,进而降低隧道突水的危险性。

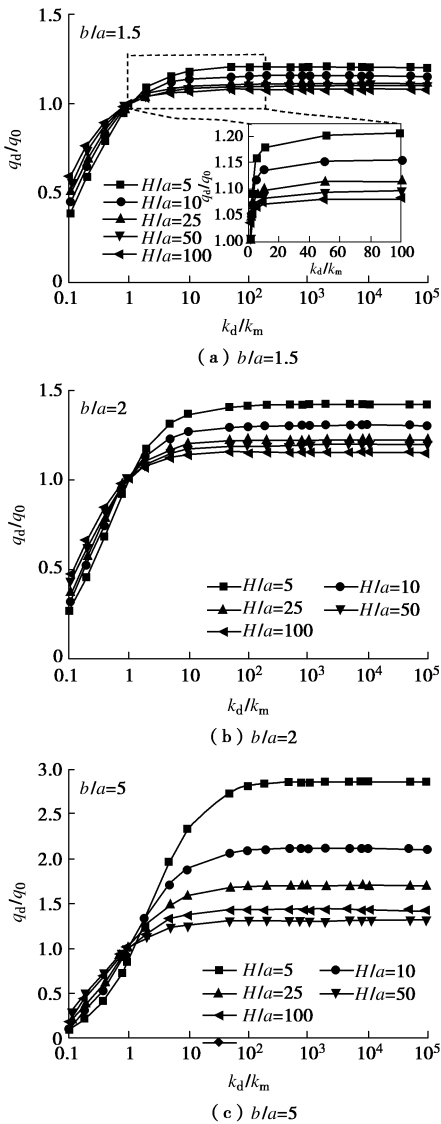


图8 涌水量比随损伤区渗透系数、厚度及地下水水头高度的变化规律

Fig. 8 Variation of ratio of inflow rates with various ground water tables above tunnel, hydraulic conductivities and thicknesses of damage zone

3 注浆加固的控渗效果分析

围岩开挖损伤区的出现增大了隧道突涌水的危险



性, 特别在高水压条件下尤为严重。虽然隧道开挖过程中会施工衬砌, 但地下水会对衬砌产生侵蚀破坏, 影响衬砌的耐久性, 此外, 在高水压下衬砌承受高水压, 有可能造成衬砌的渗透破坏。隧道施工过程中对围岩进行注浆加固, 可以有效地控制围岩的渗透系数, 从而达到降低隧道涌水量的效果, 加之, 注浆圈的存在消耗了大部分渗流能量, 这样衬砌直接承受的水压就会大大降低。

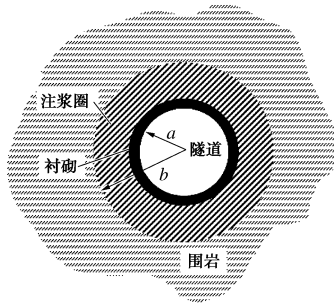


图9 注浆圈计算模型

Fig. 9 Computational model for grouting circle

考虑隧道衬砌和围岩注浆圈的简化计算模型如图9所示。由于衬砌的厚度相对于隧道直径、损伤区厚度和地下水水头较小, 为简化计算, 将衬砌和注浆圈归为一体并假设其半径为 $b$ 。对比考虑损伤区和注浆圈的隧道涌水量解析模型可以发现, 二者在解析计算模型具有相似性, 差别仅在于开挖损伤区造成围岩渗透性增大, 而注浆圈却导致围岩渗透性减小。因此, 上文得到的公式也可用于考虑围岩注浆圈的计算。

假设 $q_g$ 为单位长度注浆圈的涌水量,  $k_g$ 为注浆圈范围的渗透系数。则由式(19)和式(20)可计算得到考虑注浆圈的隧道孔隙水压力和涌水量的变化规律。

#### (1) 注浆圈对孔隙水压力的影响

图10为归一化的孔隙水压力( $p_{sp}/Hr_w$ )随注浆圈渗透系数( $k_g/k_m$ )、注浆圈厚度( $b/a$ )及隧道之上的地下水水头高度( $H/a$ )的变化规律。图中红线为未考虑注浆圈( $k_g/k_m=1$ )的孔隙水压力曲线。由图可知, 随着注浆圈渗透系数的减小, 孔隙水压力逐渐升高, 注浆圈内的水力梯度也逐渐升高。对比图10(b)和图10(c)可知, 随着注浆圈厚度的增加, 孔隙水压力和注浆圈内的水力梯度也逐渐升高。

#### (2) 注浆圈对隧道涌水量的影响

图11为隧道涌水量比( $q_g/q_0$ )随注浆圈渗透系数( $k_g/k_m$ )、注浆圈厚度( $b/a$ )及隧道之上的地下水水头高度( $H/a$ )的变化规律。从图中可以发现, 随着注浆圈渗透系数的减小, 隧道涌水量逐渐减小, 当注浆圈渗透系数不小于原岩渗透系数2个数量级( $k_g/k_m >$

0.01)时, 降低注浆圈渗透系数对减小隧道涌水量的效果明显, 而当 $k_g/k_m < 0.01$ 时, 注浆圈渗透系数的降低对隧道涌水量的减小效果不再显著, 解析结果与其他学者<sup>[36-37]</sup>的研究结果具有一致性。可见, 并不是使注浆圈的渗透系数越低就能达到越好的降水效果, 因此, 在进行隧道围岩注浆加固时需进行科学有效的分析设计, 以达到经济、合理的最优效果。

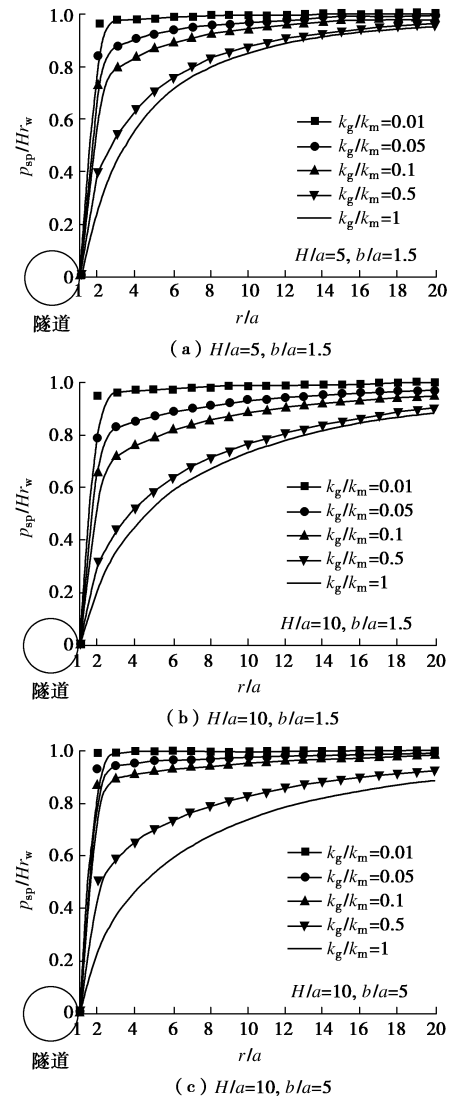


图10 孔隙水压力随注浆圈渗透系数、厚度及地下水水头高度的变化规律

Fig. 10 Distribution of normalized pore water pressures for various ground water tables above tunnel, hydraulic conductivities and thicknesses of grouting circle

另外, 对比图11中各图可知, 对于相同的注浆圈渗透系数曲线而言, 随着注浆圈厚度的增大, 隧道涌水量也逐渐减小。以 $k_g/k_m=0.1$ 和 $H/a=5$ 为例, 随着注浆圈厚度 $b/a$ 的增大(分别为1.5, 2, 3, 5, 6, 7), 隧道涌水量分布比( $q_g/q_0$ )分别为0.39, 0.27, 0.18, 0.12, 0.09和0.07, 虽然涌水量整体上随注浆圈厚度的

增大而持续减小,但注浆圈厚度  $b/a>5$  时,注浆圈的控水效果越来越不明显,隧道涌水量几乎不再减小(见图12)。所以,同样可以得出并不是注浆圈厚度越大对隧道涌水量的控制效果越好。分析结果与已有的理论研究结果和数值模拟结果<sup>[36-37]</sup>吻合。

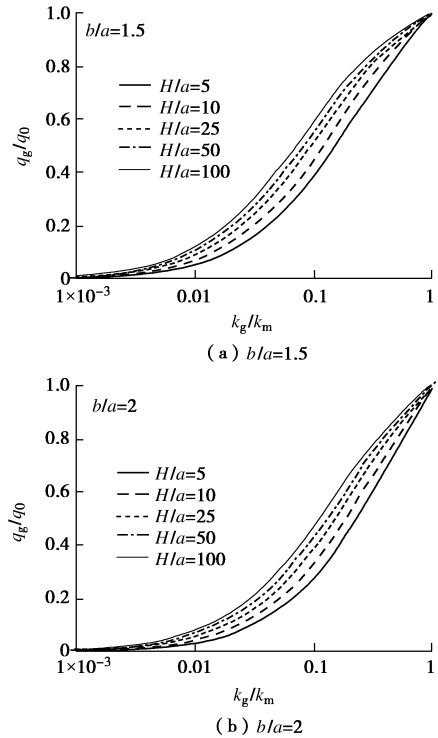


图 11 涌水量比随注浆圈渗透系数、厚度及地下水水头高度的变化规律

Fig. 11 Variation of ratio of inflow rates with various ground water tables above tunnel, hydraulic conductivities and thicknesses of grouting circle

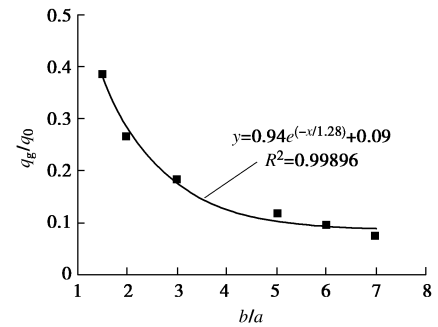


图 12 涌水量与注浆圈厚度关系

Fig. 12 Relationship between ratio of inflow rates and thickness of grouting circle

4 结 论

(1) 工程活动是引起围岩渗透性改变及造成岩体阻水能力变化的重要原因,隧道开挖诱发的围岩损伤及注浆加固本质上均为对围岩结构状态进行人为改造,前者造成结构破坏或弱化,后者增强围岩结构。

(2) 采用理论解析法获得了考虑开挖损伤区的隧道涌水量和孔隙水压力分布的计算公式,研究了围岩结构变化对隧道突涌水的影响,并分析了结构变化区渗透系数、厚度等因素对涌水量和水压力分布的影响规律。

(3) 损伤区厚度对隧道涌水量和孔隙水压力分布具有较大影响,厚度越大,发生突水的危险性越大,但涌水量并不会随着损伤区渗透性的增加而无限增大下去,损伤区渗透系数变化的影响阈值约为 2 个数量级。

(4) 涌水量随着注浆加固圈厚度的增加和渗透性的降低而减小,但并不是注浆圈厚度越大、渗透性越低,隧道涌水量的控制效果就越好,二者均存在一个最优效果的设计值。

参考文献:

[1] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1251 - 1275.

[2] 吉小明. 隧道开挖的围岩损伤扰动带分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1697 - 1702. (JI Xiao-ming. Study on mechanical and hydraulic behavior of tunnel surrounding rock masses in excavation-disturbed zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1697 - 1702. (in Chinese))

[3] 黄震, 姜振泉, 孙强, 等. 深部巷道底板岩体渗透性高压压水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1535 - 1543. (HUANG Zhen, JIANG Zhen-quan, SUN Qiang, et al. High-pressure water injection tests on permeability of deep rock mass under tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1535 - 1543. (in Chinese))

[4] 贾善坡, 高敏, 龚俊, 等. 渗流-应力耦合作用下高孔低渗泥岩渗透特性演化模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1221 - 1235. (JIA Shan-po, GAO Min, GONG Jun, et al. Permeability evolution model for clay stone with high porosity and low permeability in coupled hydro-mechanical condition[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(6): 1221 - 1235. (in Chinese))

[5] 李利平, 路为, 李术才, 等. 地下工程突水机理及其研究最新进展[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(3): 104 - 112. (LI Li-ping, LU Wei, LI Shu-cai, et al. Research status and developing trend analysis of the water inrush mechanism for underground engineering construction[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(3):



- 104 - 112. (in Chinese))
- [6] KELSALL P C, CASE J B, CHABANNES C R. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1984, **21**(3): 123 - 135.
- [7] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(8): 1413 - 1426.
- [8] BAECHLER S, LAVANCHY J M, ARMAND G, et al. Characterisation of the hydraulic properties within the EDZ around drifts at level -490m of the Meuse/Haute-Marne URL: a methodology for consistent interpretation of hydraulic tests[J]. Physics and Chemistry of the Earth Parts, 2011, **36**: 1922 - 1931.
- [9] 姜振泉, 季梁军, 左如松, 等. 岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(10): 1442 - 1446. (JIANG Zhen-quan, JI Liang-jun, ZUO Ru-song, et al. Correlativity among rock permeability and strain, stress under servo-control condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(10): 1442 - 1446. (in Chinese))
- [10] 孙强, 姜振泉, 朱术云. 北皂海域煤矿顶板软岩试样渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 540 - 545. (SUN Qiang, JIANG Zhen-quan, ZHU Shu-yun. Experimental study on permeability of soft rock of Beizao Coal Mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 540 - 545. (in Chinese))
- [11] 胡少华, 陈益峰, 周创兵. 北山花岗岩渗透特性试验研究与细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(11): 2200 - 2209. (HU Shao-hua, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. Laboratory test and mesomechanical analysis of permeability variation of Beishan Granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(11): 2200 - 2209. (in Chinese))
- [12] 韩国锋, 王恩志, 刘晓丽. 岩石损伤过程中的渗流特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, **33**(5): 41 - 50. (HAN Guo-feng, WANG En-zhi, LIU Xiao-li. Seepage characteristics of rock during damage process[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2011, **33**(5): 41 - 50. (in Chinese))
- [13] 王伟, 郑志, 王如宾, 等. 不同应力路径下花岗片麻岩渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(2): 260 - 267. (WANG Wei, ZHENG Zhi, WANG Ru-bin, et al. Experimental study of permeability properties of granitic gneiss under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(2): 260 - 267. (in Chinese))
- [14] 朱泽奇, 盛谦, 张勇慧, 等. 大岗山水电站地下厂房洞室群围岩开挖损伤区研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(4): 734 - 739. (ZHU Ze-qi, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Research on excavation damage zone of underground powerhouse of Dagangshan Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(4): 734 - 739. (in Chinese))
- [15] WILEVEAU Y, BERNIER F. Similarities in the hydromechanical response of Callovo-Oxfordian clay and Boom clay during gallery excavation[J]. Physics and Chemistry of the Earth Parts, 2008, **33**: S343 - S349.
- [16] LI X. TIMODAZ: A successful international cooperation project to investigate the thermal impact on the EDZ around a radioactive waste disposal in clay host rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, **5**: 231 - 242.
- [17] BOSSART P, MAYOR J C, MEIER P M, et al. Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus clay of the Mont Terri Rock Laboratory[J]. Engineering Geology, 2002, **66**: 19 - 38.
- [18] KAISER P K, MCCREATH D R, TANNANT D D. Canadian rockburst support handbook[M]. Sudbury: CAMIRO, 1996.
- [19] MARTIN C D, KAISER P K, MCCREATH D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(1): 136 - 151.
- [20] 蔡明, 赵星光, KAISER P K. 论完整岩体的现场强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 1 - 13. (CAI Ming, ZHAO Xing-guang, KAISER P K. On field strength of massive rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 1 - 13. (in Chinese))
- [21] PUSCH R. Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1989, **26**(1): 79 - 83.
- [22] SOULEY M, HOMAND F, PEPA S, et al. Damage-induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**: 297 - 310.
- [23] TSANG C F, BERNIER F, DAVIES C. Geohydromechanical

- processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays in the context of radioactive waste disposal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, **42**(1): 109 – 125.
- [24] SHAO H, SCHUSTER K, SONNKE J, et al. EDZ development in indurated clay formations: in situ borehole measurements and coupled HM modelling[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, **33**(S1): S388 – S395.
- [25] LEVASSEUR S, CHARLIER R, FRIEG B, et al. Hydro-mechanical modelling of the excavation damaged zone around an underground excavation at Mont Terri Rock Laboratory[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, **47**(3): 414 – 425.
- [26] 房倩, 张顶立, 黄明琦. 基于连续介质模型的海底隧道渗流问题分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(增刊 2): 3776 – 3784. (FANG Qian, ZHANG Ding-li, HUANG Ming-qi. Analysis of seepage problem induced by subsea tunnel excavation based on continuum medium model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(S2): 3776 – 3784. (in Chinese))
- [27] 王建秀, 朱合华, 叶为民. 隧道涌水量的预测及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(7): 1150 – 1153. (WANG Jian-xiu, ZHU He-hua, YE Wei-min. Forward and inverse analyses of water flow into tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(7): 1150 – 1153. (in Chinese))
- [28] 李术才, 赵岩, 徐帮树, 等. 海底隧道涌水量计算的渗透系数确定方法[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(5): 1497 – 1505. (LI Shu-cai, ZHAO Yan, XU Bang-shu, et al. Study of determining permeability coefficient in water inrush numerical calculation of subsea tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(5): 1497 – 1505. (in Chinese))
- [29] 杜朝伟. 海底隧道衬砌水压力及结构受力特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011. (DU Chao-wei. Research on water pressure on lining and the stress characteristics of lining structure of subsea tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [30] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (ZHANG You-tian. *Rock hydraulics and engineering*[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2005. (in Chinese))
- [31] KOLYMBAS D, WAGNER P. Groundwater ingress to tunnels: the exact analytical solution[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, **22**(1): 23 – 27.
- [32] HARR M E. *Groundwater and seepage*[M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [33] HEUER R. Estimating rock tunnel water inflow-II[C]// *Proceeding of Rapid Excavation and Tunnelling Conference*. Seattle, 2005.
- [34] FERNANDEZ G, MOON J. Excavation-induced hydraulic conductivity reduction around a tunnel: part 1 Guideline for estimate of ground water inflow rate[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, **25**: 560 – 566.
- [35] FERNANDEZ G, ALVAREZ T A. Seepage-induced effective stresses and water pressures around pressure tunnels[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **120**(1): 108 – 128.
- [36] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 高压富水区隧道限排衬砌注浆圈合理参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(11): 2270 – 2276. (ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, et al. Study on appropriate parameters of grouting circle for tunnels with limiting discharge lining in high water pressure and water-enriched region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(11): 2270 – 2276. (in Chinese))
- [37] 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 Peng-fei, ZHANG Ding-li, ZHAO Yong, et al. Study on distribution law of water pressure acting on composite lining and reasonable parameters of grouting circle for subsea tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(2): 280 – 288. (in Chinese))