

DOI: 10.11779/CJGE2020S2026

# 隔水层对深埋隧洞衬砌外水压力的影响研究

谢小帅<sup>1,2</sup>, 谢兴华<sup>\*2</sup>, 王小东<sup>2</sup>, 卢斌<sup>2</sup>, 王猛<sup>1</sup>, 陈华松<sup>3</sup>

(1. 四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

**摘要:** 目前计算外水压力的理论公式大多针对均质围岩, 当地层中存在强隔水层时, 计算结果较实际压力偏大较多, 导致出现衬砌结构厚度大、工程超预算等问题。为使衬砌结构设计参数选取更为经济合理, 结合滇中引水工程大理 II 段深埋长引水隧洞, 采用数值模拟的方法, 选取衬砌外表面 3 个特征点, 通过对上覆岩层中隔水层的位置高度、厚度以及围岩的相对渗透性开展敏感性分析, 对衬砌外水压力变化规律进行了研究。结果表明: 衬砌外水压力随着隔水层位置高度的增加而减小, 但是变化不显著; 隔水层厚度是影响衬砌外水压力的关键因素, 衬砌外水压力随着隔水层厚度的增加而显著减小; 衬砌外水压力随着围岩与隔水层渗透系数比值的增大而减小, 衬砌外水压力对相对渗透性非常敏感, 当相对渗透性增大到 200 以上时, 隔水层承担了绝大部分水头压力, 衬砌外水压力降低到一定程度并逐渐稳定下来。研究结果可为地层中含有隔水层的深埋长隧洞的衬砌设计提供借鉴和参考。

**关键词:** 深埋隧洞; 强隔水层; 外水压力; 衬砌设计

中图分类号: TV672

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0146-05

**作者简介:** 谢小帅(1995—), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事水工结构方面的研究工作。E-mail: 190865545@qq.com。

## Influences of aquiclude on external water pressures on linings of deep-buried tunnels

XIE Xiao-shuai<sup>1,2</sup>, XIE Xing-hua<sup>2</sup>, WANG Xiao-dong<sup>2</sup>, LU Bin<sup>2</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, CHEN Hua-song<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 3. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China)

**Abstract:** At present, the theoretical formulas for calculating the external water pressures are mostly for homogeneous surrounding rocks. When there is a strong aquiclude in stratum, the calculated results are larger than the actual pressures, which will lead to the problems of large thickness of lining structures and overestimation of project budget. In order to make the design of lining structures and selection of parameters more reasonable and economical, combined with the deep-buried long diversion tunnel of Dali Section II of Middle Yunnan Water Diversion Project, by using the numerical simulation method and selecting three characteristic points on the outer surface of the linings, the sensitivity analysis of the position height and thickness of the aquiclude in overlying strata and the relative permeability of surrounding rocks are performed, and the variation laws of the external water pressures on linings are investigated. The results show that the external water pressures on the linings decrease with the increase of the height of the aquiclude, but the change is not significant. The thickness of the aquiclude is the key factor affecting the external water pressures on the linings, and the external water pressures on the linings decrease significantly with the increase of the thickness of the aquiclude. The external water pressures on the linings increase with the ratio of the surrounding rocks to the permeability coefficient of the aquiclude. When the relative permeability increases to a certain value, the aquiclude bears most of the head pressures, and the external water pressures on the linings decrease to a certain extent and gradually stabilize. The research results may provide reference for lining design of deep-buried long tunnels with aquicludes in strata.

**Key words:** deep-buried tunnel; strong aquiclude; external water pressure; lining design

## 0 引言

深埋长引水隧洞衬砌外水压力是衬砌设计必须考

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401804)

收稿日期: 2020-09-01

虑的重要荷载,是设计与施工关注的重点,尤其是在复杂地下水环境下,确定衬砌外水压力的大小是保证工程施工与运营安全的前提<sup>[1-2]</sup>。然而,隧洞衬砌外水压力目前并没有统一的计算方法,参照水工隧洞设计规范可以通过静水压力与折减系数相乘的办法确定隧洞衬砌外水压力<sup>[3-4]</sup>,但是该方法折减系数取值区间大准确性有待提高,宋岳等<sup>[5]</sup>在此基础上提出了外水压力折减系数的修正方法,将其考虑为包括水头损失、水压作用面积以及排水设施影响的综合指标;通过理论公式计算衬砌外水压力也是一种常用的方法,但是计算外水压力的理论公式多针对均质围岩,计算结果与实际值偏差较大<sup>[6-7]</sup>。针对隧洞衬砌外水压力的确定方法,国内外众多学者进行了一系列研究。刘立鹏等<sup>[8]</sup>推导了复合衬砌结构外水压力折减系数理论公式,揭示了注浆圈、二次衬砌渗透系数及厚度等参数的变化对衬砌外水压力折减系数的影响规律。彭亚敏等<sup>[9]</sup>结合实际工程,基于三维有限元模型,研究了固结灌浆、排水孔等不同方案下的隧洞围岩浸润面变化和衬砌所受渗透压分布规律。傅睿智等<sup>[10]</sup>采用自行设计的可拆卸式复合衬砌渗流试验装置,开展了不同地下水头环境下的复合衬砌堵水与排水系统对衬砌外水压力的影响规律研究。Ponlawich Arjnoi 等<sup>[11]</sup>应用数值仿真模拟技术,研究了多种防排水方式下衬砌结构外侧水压力与衬砌结构内力响应的关系,发现隧道采用全排水不封堵的防排水型式可大幅度降低衬砌结构的内力响应。

上述研究采用了不同方法对衬砌外水压力进行计算研究,并得出了不同防排水方案下的外水压力变化规律,但是真实准确的衬砌外水压力值不仅与注浆圈,衬砌、排水措施等参数有关,还与地层中是否含有强隔水层密切相关,隔水层与临近地层渗透性相差较大,可以阻隔大量地下水,衬砌只需承担较小的外水压力。在实际工程中,由于隧洞埋深大、地层结构复杂,往往会存在隔水层,因此研究隔水层对衬砌外水压力的影响规律,对保证工程的安全性和提高其经济性具有重要意义。

## 1 工程概况

滇中引水工程总干渠全长 661.07 km,全线划分为大理 I 段、大理 II 段、楚雄段、昆明段、玉溪段及红河段。其中,大理 II 段海东、狮子山、磨盘山 3 条隧洞穿越多个岩溶水系统,最大埋深达 740 m,根据类似工程经验,暂定外水压力大于 1 MPa 为高外水压力,经初步分析预测,大理 II 段可能产生高外水压力洞段长共计 2.868 km 左右,约占本段隧洞总长的

3.15%,外水压一般为 1.0~1.48 MPa,但是在磨盘山局部地段岩层岩体透水性弱,存在较高水头(1.2 MPa)的承压水,这样的岩层可称之为隔水层,隔水层将承担大部分的外水压力,该洞段衬砌只需要承担很小的外水压力,此时再以高外水压力来设计衬砌参数并不经济合理。因此,本文将以大理 II 段深埋高水头含隔水层洞段为例,开展隔水层对隧洞渗流场及衬砌外水压力的影响研究。

## 2 计算模型及参数

本次计算以大理 II 段磨盘山隧洞某典型断面为例,围岩主要为凝灰岩及石英砂岩微新岩体,以较软岩为主,断面埋深为 270 m,地下水位距洞室顶板高程 200 m。断面形式为马蹄形,过水断面宽高均为 8.96 m,衬砌厚度为 0.5 m,排水孔左右间隔 22.5° 设置 5 个,排水孔孔径为 0.1 m,注浆圈厚度为 5 m,具体参数见图 1。

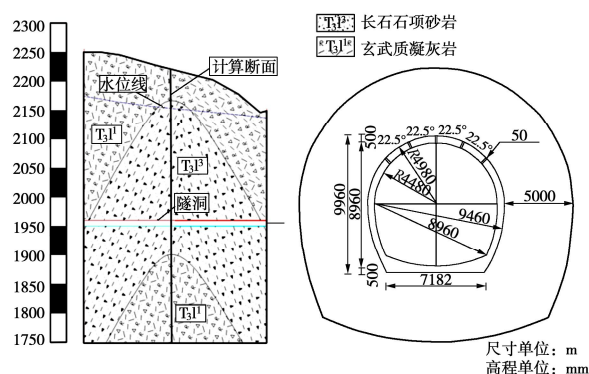


图 1 隧洞纵剖面及断面尺寸图

Fig. 1 Longitudinal profile and cross-section dimensions of tunnel

在该计算剖面下,岩体弱透水为主夹中等透水,局部存在较高水头(1.2 MPa)的承压水,为了简化计算,将模型网格及材料划分如图 2 所示。

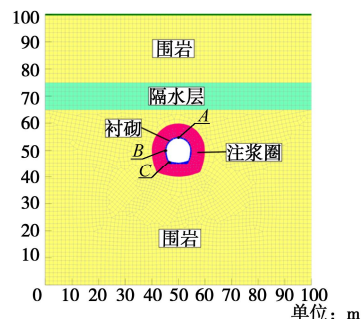


图 2 模型网格及材料划分图

Fig. 2 Model grid and material partition

本次计算采用 Geo Studio 中的 seep 模块进行稳定渗流分析,模型计算范围取为 100 m×100 m,洞室中心位于模型中心。模型左右两侧和底部均为不透水边界,衬砌内表面以及排水孔外表面边界条件压力水头

设置为 0 m, 模型上部边界的压力水头设置为 155 m。选取拱顶附近点 *A*, 侧墙点 *B* 以及左拱脚点 *C* 作为分析特征点 (具体分布见图 2), 数值计算的模型材料设计参数: 围岩渗透= $3.32 \times 10^{-5}$  cm/s, 注浆圈厚度=5 m, 注浆圈渗透系数= $5 \times 10^{-6}$  cm/s, 衬砌厚度=0.5 m, 衬砌渗透系数= $1 \times 10^{-6}$  cm/s, 隔水层渗透系数= $1 \times 10^{-6}$  cm/s, 隔水层厚度=10 m。

### 3 隔水层参数对衬砌外水压力的影响

#### 3.1 研究背景

对于不均匀岩层隧洞垂直渗透的渗透系数取值问题, 可采用围岩平均渗透系数  $k_y$  的概念来进行等效<sup>[12]</sup>,

$$k_y = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \dots + \frac{H_n}{k_n}} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{H_i}{k_i} \right)}, \quad (1)$$

式中,  $k_y$  为平均渗透系数,  $H$  为隧洞上覆岩层的厚度,  $H_i$  为不同岩层的厚度,  $k_i$  为不同岩层的渗透系数。

将设计参数代入式 (1) 进行计算, 可得  $k_y = 1.21 \times 10^{-5}$  cm/s, 将采用平均渗透系数与将隔水层和围岩分别计算设置为两种工况, 提取两种工况下 3 个特征点的外水压力值, 绘制成曲线如图 3 所示。

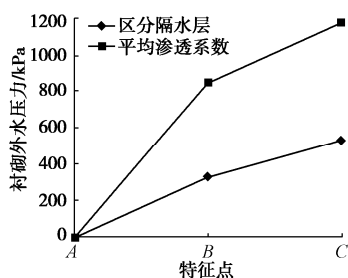


图 3 不同工况下各特征点外水压力比较图

Fig. 3 Comparison of external water pressures at different characteristic points under different working conditions

由图 3 可知, 两种工况下, 衬砌顶拱特征点 *A* 的外水压力都为 0 kPa, 这是因为顶拱的特征点位于排水孔边缘, 在排水孔的卸压范围内; 随着特征点远离排水孔, 在平均渗透系数计算的工况下, 边墙特征点 *B* 的外水压力为 853 kPa, 左拱脚特征点 *C* 的外水压力值为 1184 kPa; 而在区分隔水层的工况下, 特征点 *B* 的外水压力为 330 kPa, 特征点 *C* 的外水压力为 530 kPa, 相较于前种工况, 外水压力分别减小了 61.3%, 55.2%。由此可以发现, 如果在工程设计中, 不强调隔水层的作用, 而把隔水层与围岩取平均渗透系数, 按照平均渗透系数计算所得的外水压力值设计衬砌, 无疑会增加衬砌的厚度, 指示设计方案过于保守, 工程费用增加。因此, 研究隔水层的影响规律对确定深埋隧洞的衬砌外水压力进而合理设计衬砌意义重大。

#### 3.2 隔水层位置高度

围岩的渗透系数为  $3.32 \times 10^{-5}$  cm/s, 注浆圈的渗透系数为  $5 \times 10^{-6}$  cm/s, 衬砌的渗透系数为  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, 隔水层的渗透系数为  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, 厚度为 10 m, 研究不同隔水层位置高度对衬砌外水压力的影响规律。

由图 4 可知, 顶拱 *A* 的衬砌外水压力不随隔水层高度的变化而变化始终为 0 kPa, 这是由于受到排水孔排水卸压的影响, 距离排水孔较近的部位几乎不承受外水压力; 随着隔水层位置高度的增加, 侧边墙 *B* 和左拱脚 *C* 的外水压力变化趋势近乎一致, 只是略微降低, 侧边墙 *B* 的衬砌外水压力随着隔水层高度的增加相较于隔水层高度为 10 m 时分别减小 2.1%, 3%, 3.2%, 3.3%, 减幅甚小; 可以发现隔水层位置高度对外水压力的影响效果并不明显。

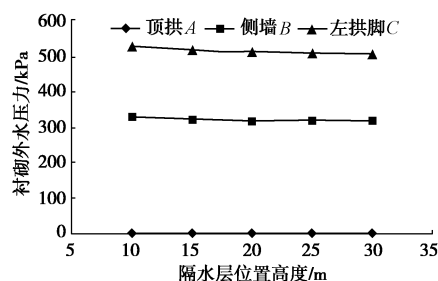


图 4 衬砌外水压力与隔水层位置高度关系

Fig. 4 Relationship between external water pressure of linings and position height of aquiclude

不同隔水层位置高度下的隧洞水头等值线分布见图 5, 从图中可以看到不同隔水层高度下的水头场分布规律基本一致, 即在隔水层的上边界压力水头为 140 m, 到了隔水层的下边界压力水头减小为 40 m, 说明大部分的地下水压力水头都被隔水层阻隔了, 并且不论隔水层的位置如何, 其阻隔地下水压力的能力是一样的。但是在隔水层下方与隧洞上方则形成了一个 40 m 压力水头的区域, 这个区域的面积与隔水层的高度密切相关, 高度越高, 面积越大。

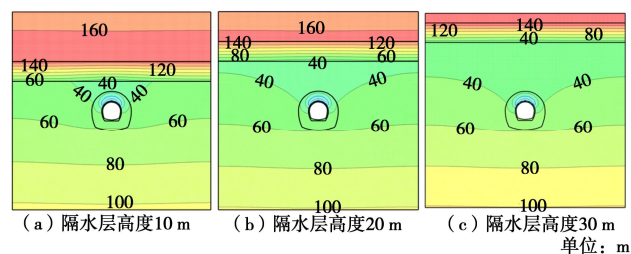


图 5 不同隔水层位置高度隧洞水头等值线

Fig. 5 Contours of water head of tunnels with different position heights of aquiclude

#### 3.3 隔水层厚度

保持围岩、注浆圈、衬砌的参数不变, 隔水层的渗透系数为  $1 \times 10^{-6}$  cm/s, 距离衬砌拱顶的高度为 10



m, 研究不同隔水层厚度对衬砌外水压力的影响规律。

由图 6 可知, 顶拱 *A* 的衬砌外水压力不随隔水层厚度的变化而变化, 始终为 0 kPa, 这再一次印证排水孔的作用, 即排水孔能排出周边大量地下水以减小衬砌承受的外水压力; 随着隔水层厚度的增加, 特征点 *B*, *C* 的衬砌外水压力显著降低, 当隔水层厚度为 25 m 时, 侧边墙 *B* 点的外水压力已减小至 0 kPa, 也就是说当隔水层厚度大于 25 m 以后, 侧边墙以上部位的外水压力均被隔水层阻隔; 左拱脚 *C* 点的衬砌外水压力则随隔水层高度的提高相较于隔水层厚度为 10 m 时分别减小 38.5%, 62.4%, 81.3%, 94.4%。这说明隔水层厚度是影响衬砌外水压力的重要因素, 在实际工程中若遇到厚隔水层时一定要着重考虑, 因为厚隔水层的存在承担了绝大部分的压力水头, 而作用在隧洞衬砌上的外水压力必然随之降低。

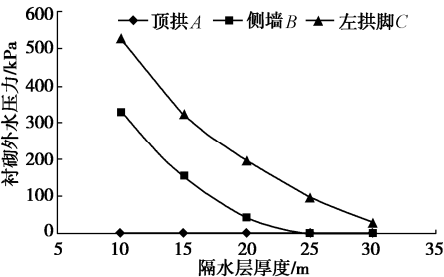


图 6 衬砌外水压力与隔水层厚度关系

Fig. 6 Relationship between external water pressure of linings and thickness of aquiclude

不同隔水层厚度下的隧洞水头等值线分布见图 7, 从图中可以看到在不同隔水层厚度条件下, 上覆岩层内水头场分布大不相同, 当隔水层厚度为 10 m 时, 隔水层上边界压力水头为 140 m, 隔水层下边界压力水头为 40 m, 这说明隔水层阻挡大部分地下水的下渗, 同时隔水层下方与隧洞上方形成了一个 40 m 压力水头的区域; 随着隔水层厚度的增加, 隔水层底部压力水头减小为 0 m, 0 m 压力水头等值线包裹的区域也逐渐增大, 隔水层下方的水头等值线数值明显降低。

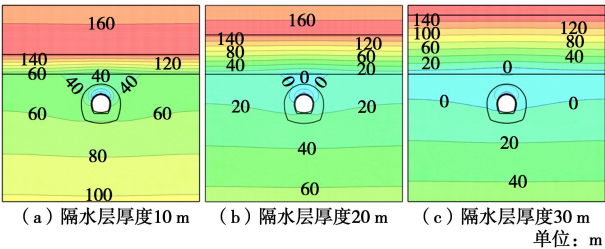


图 7 不同隔水层厚度隧洞水头等值线

Fig. 7 Contours of water head of tunnels with different thicknesses of aquiclude

3.4 隔水层和围岩的相对渗透性

通常把围岩与隔水层渗透系数的比值  $n_g$  称为其

之间的相对渗透性。保持注浆圈、衬砌的渗透性参数不变, 围岩的渗透系数为  $1 \times 10^{-4}$  cm/s, 隔水层的厚度为 10 m, 距离衬砌顶拱的高度为 20 m, 研究不同相对渗透性对衬砌外水压力的影响规律。

由图 8 可知, 顶拱 *A* 的衬砌外水压力不随相对渗透性变化而变化始终为 0 kPa, 具体原因此处不再赘述。随着相对渗透性的增加, *B*, *C* 两点的外水压力显著降低, 侧边墙 *B* 点、左拱脚 *C* 点衬砌外水压力随着相对渗透性增大到 200 相较于相对渗透性为 10 时分别减小了 97.1%, 89.5%。可以发现衬砌外水压力对相对渗透性非常敏感, 当相对渗透性增大到 200 时, 隔水层承担了绝大部分地下水压力。

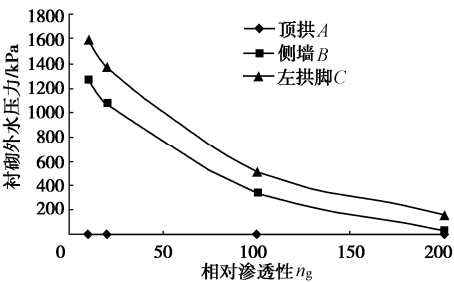


图 8 衬砌外水压力与相对渗透性关系

Fig. 8 Relationship between external water pressure of lining and relative permeability

不同相对渗透性下的隧洞水头等值线分布见图 9, 从图中可以看到在不同相对渗透性下, 隔水层上方的水头场分布大致相同, 但是隔水层下方的水头场则发生了较大的差异, 当  $n_g$  为 10, 20, 100, 200 时, 隔水层分别阻隔了 20, 40, 120, 160 m 的压力水头, 同时当  $n_g$  为 200 时, 在隔水层下部与衬砌排水孔上部形成了一块由压力水头等值线为 0 m 包裹的区域, 其它 3 种工况则没有出现这种现象, 这说明相对渗透性

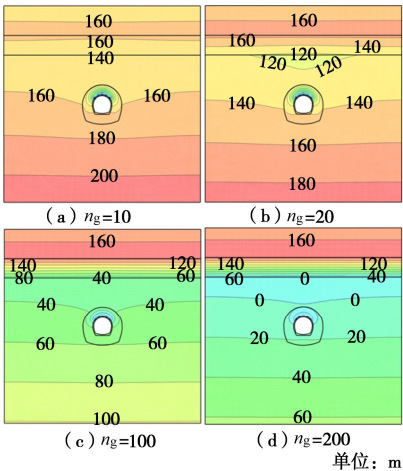


图 9 不同相对渗透性隧洞水头等值线

Fig. 9 Contours of water head of tunnels with different relative permeabilities

越大,隔水层承担的压力水头更多,衬砌所承担的外水压力更小。

## 4 结 论

(1)若地层中存在强隔水层,将隔水层与围岩的渗透系数在垂直渗透方向取平均渗透系数进行计算,所得的衬砌外水压力值较实际值偏大。

(2)衬砌外水压力随着隔水层厚度的增加而减小,且效果显著,隔水层厚度是影响衬砌外水压力的关键因素,当隔水层的厚度足够大时,能够完全阻隔地下水压力传递,衬砌将不再承担外水压力。

(3)衬砌外水压力随着围岩与隔水层渗透系数的相对渗透性的增大而减小,当相对渗透性增大到200以上时,隔水层承担了绝大部分水头压力,衬砌外水压力降低到一定程度并逐渐稳定下来。

(4)衬砌外水压力随着隔水层位置高度的增加而减小,但是效果并不显著。

## 参考文献:

- [1] 叶甜. 岩溶区深埋隧道衬砌外水压力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (YE Tian. Study on External Water Pressure of Deep-Buried Tunnel Lining in Karst Areas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [2] 高新强. 高水压山岭隧道衬砌水压力分布规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005. (GAO Xin-qiang. Research on the Distribution Law of Water Pressure in Lining of High Water Pressure Mountain Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [3] 庄宁, 阚二林, 邓明镜. 隧道衬砌外水压力确定的渗流场—应力场耦合模型研究[J]. 中南公路工程, 2007, 32(1): 55 - 59. (ZHUANG Ning, KAN Er-lin, DENG Ming-jing. Analysis of coupled seepage and stress fields model in determining tunnels external water pressure[J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32(1): 55 - 59. (in Chinese))
- [4] 周亚峰, 苏凯, 伍鹤皋. 水工隧洞钢筋混凝土衬砌外水压力取值方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 198 - 203. (ZHON Ya-feng, SU Kai, WU He-gao. Study on the value of external water pressure of reinforced concrete lining in hydraulic tunnel[J]. Chinese Geotechnical Mechanics, 2014, 35(S2): 198 - 203. (in Chinese))
- [5] 宋岳, 贾国臣, 滕杰. 隧洞外水压力折减系数工程地质研究[J]. 水利水电工程设计, 2007(3): 38 - 40, 55. (SONG Yue, JIA Guo-chen, TENG Jie. The engineering geological research for the reduction factor of tunnel external water pressure[J]. Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering, 2007(3): 38 - 40, 55. (in Chinese))
- [6] 郑波, 王建宇, 吴剑. 基于等效渗透系数计算衬砌水压力方法研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(6): 43 - 46, 57. (ZHENG Bo, WANG Jian-yu, WU Jian. Study of the calculation of external water pressure on tunnel lining based on the equivalent permeability coefficient of the composite lining[J]. Modern Tunneling Technology, 2011, 48(6): 43 - 46, 57. (in Chinese))
- [7] 冯晓成. 高外水深埋隧洞渗控措施分析及衬砌长期稳定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2016. (FENG Xiao-cheng. Analysis of Seepage Control Measures and Long-Term Stability of Tunnel Lining Under High External Water Depth[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese))
- [8] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 水岩分算隧道衬砌外水压力折减系数取值方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 495 - 500. (LIU Li-peng, WANG Xiao-gang, JIA Zhi-xin, et al. Method of calculating water pressure reduction coefficient of tunnel lining with water and rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 495 - 500. (in Chinese))
- [9] 彭亚敏, 沈振中, 甘磊. 深埋水工隧洞衬砌渗透压力控制措施研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(1): 89 - 94. (PENG Ya-min, SHEN Zhen-zhong, GAN Lei. Seepage pressure control measures for lining of deep buried hydraulic tunnels[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(1): 89 - 94. (in Chinese))
- [10] 傅睿智, 郭凯, 黄鹤程, 等. 复合衬砌外水压力模型试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 192 - 197. (FU Rui-zhi, GUO Kai, HUANG He-cheng, et al. Model test study for external water pressure on composite lining[J]. Yangtze River, 2019, 50(6): 192 - 197. (in Chinese))
- [11] ARJNOI P, JEONG J H, KIM C Y, et al. Effect of drainage conditions on porewater pressure distributions and lining stresses in drained tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 376 - 389.
- [12] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)