

文章编号: 1674—8247(2022)03—0045—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.03.009

城际铁路矿山法隧道防排水体系探讨

陈国栋

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 城际铁路矿山法隧道一方面具有铁路山岭隧道大埋深、高水压的特点;一方面又具有城市轨道交通隧道全地下敷设,无地下水自然排泄条件的特点。如何制定合理的运营期防排水原则,成为城际铁路矿山法隧道建设中的重大课题。文章通过工程调研、理论分析及数值计算,对城际铁路矿山法隧道在高水压环境下的受力特征进行了分析,提出高水压环境下“排水泄压”的基本思路,进而提出了针对城际铁路矿山法隧道高水压段“限量排放”的治水理念。并结合某在建城际铁路矿山法隧道工程,从衬砌结构承受的合理水压限值、抗水压结构设计参数以及“限量排放”的合理地下水排放标准等方面对“限量排放”理念进行了具体工程应用。

关键词: 城际铁路; 矿山法隧道; 限量排放; 限压排放; 高水压; 结构设计

中图分类号:U453.6 文献标志码:A

Discussion on Water Handling System for Mined Tunnels of Intercity Railway

CHEN Guodong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: On the one hand, the intercity railway mined tunnel has the characteristics of large buried depth and high water pressure of railway mountain tunnel; on the other hand, it has the characteristics of full underground laying of urban rail transit tunnel without natural groundwater discharge conditions. How to formulate reasonable water handling principles during the operation period has become a major issue in the construction of intercity railway mined tunnels. Through engineering investigation, theoretical analysis, and numerical calculation, this paper analyzes the mechanical characteristics of the mined tunnels of intercity railways in a high water pressure environment, puts forward the basic idea of "drainage and pressure relief" under a high water pressure environment, and then puts forward the water control concept of "limited discharge" for high water pressure section of mined tunnels of intercity railways. In combination with a mined tunnel works of an intercity railway under construction, the concept of "limited discharge" is applied in the works from the aspects of reasonable water pressure limit, design parameters of anti-water pressure structure, and reasonable groundwater discharge standard of "limited discharge" of lining structure.

Key words: intercity railway; mined tunnel; limited discharge; limited pressure discharge; high water pressure; structural design

收稿日期:2022-03-03

作者简介:陈国栋(1973-),男,高级工程师。

引文格式:陈国栋. 城际铁路矿山法隧道防排水体系探讨[J]. 高速铁路技术,2022,13(3):45-51.

CHEN Guodong. Discussion on Water Handling System for Mined Tunnels of Intercity Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3): 45-51.

城际铁路是以实现相邻城市的快速连接为目的的区域铁路,其建设环境同传统的中国铁路干线及城市轨道交通均有较大差异。一方面,由于其主要位于大型城市周边,为统筹城市发展、节约土地资源及减少对周边环境的影响,大量采用全地下形式敷设,区间采用全隧道,车站采用地下车站,导致其无法形成地下水自然排泄通道,若采用传统铁路隧道目前遵循的“以排为主”的理念^[1],势必导致运营期抽排水成本巨大,同时也对地下水资源及生态环境造成严重影响;另一方面,穿越城市周边的城际铁路隧道埋深及地下水水位均显著高于位于城区的城市轨道交通隧道,因而城市轨道交通隧道采取的“以防为主”^[2]的隧道防排水理念不能完全适用于城际铁路隧道。因此,如何在“以排为主”和“以防为主”之间寻求平衡,实现隧道工程结构安全、经济合理,成为了城际铁路建设中亟待解决的问题。

1 “全封防水”型衬砌结构合理性分析

本文以承受水压荷载能力最好的“全封防水”型衬砌即圆形衬砌为例,借助有限元计算软件 ANSYS,对内径为 8.0 m 的深埋岩质隧道在不同水压条件下的衬砌结构内力进行计算并进行相应的结构检算,以此分析合理的衬砌结构设计参数。除水压外,考虑的荷载还包括结构自重及围岩压力,计算模型如图 1 所示。

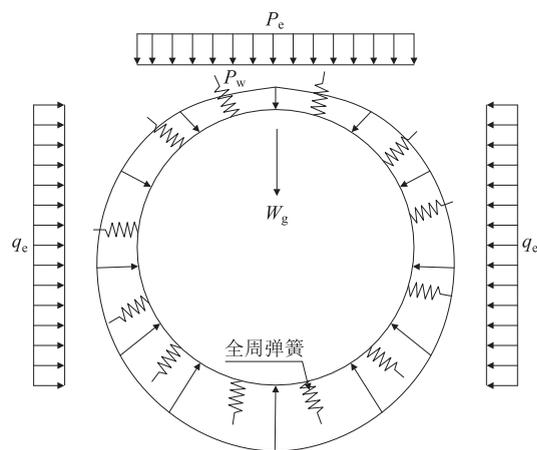


图1 深埋岩质隧道荷载-结构模型图

围岩等级按Ⅲ级考虑,相应的物理力学参数取值如表 1 所示。

表1 围岩物理力学参数表

围岩级别	容重 (kN/m ³)	弹性抗力系 (MPa/m)	内摩擦角 (°)	侧压力系数
Ⅲ级	24	700	65	0.15

参考 TB 10003 - 2016《铁路隧道设计规范》,深埋岩质隧道垂直及水平匀布地层压力可按式(1)和式(2)确定。

$$P_e = \gamma h_a \quad (1)$$

$$q_e = \lambda P_e \quad (2)$$

$$h_a = 0.45 \times 2^{s-1} \times \omega \quad (3)$$

式中: P_e ——围岩垂直匀布压力;

q_e ——围岩水平匀布压力;

γ ——围岩重度;

h_a ——计算围岩高度;

s ——围岩级别;

ω ——宽度影响系数, $\omega = 1 + i(B - 5)$;

B ——隧道开挖宽度;

i —— B 每增减 1 m 时的围岩压力增减率, $B < 5$ m 时, $i = 0.2$, $B > 5$ m 时,可取 $i = 0.1$;

λ ——侧压力系数。

外水压力采用径向加载,拱顶处水压按式(4)计算。

$$P_w = \gamma_w h_w \quad (4)$$

式中: γ_w ——水重度;

h_w ——地下水位高度。

根据上述模型,结合破损阶段法对 40 cm 厚、HRB400 钢筋($\phi 20 @ 250$)的 C35 钢筋混凝土圆形衬砌进行检算,并将不同拱顶水压下的结构安全系数绘制成曲线如图 2 所示。

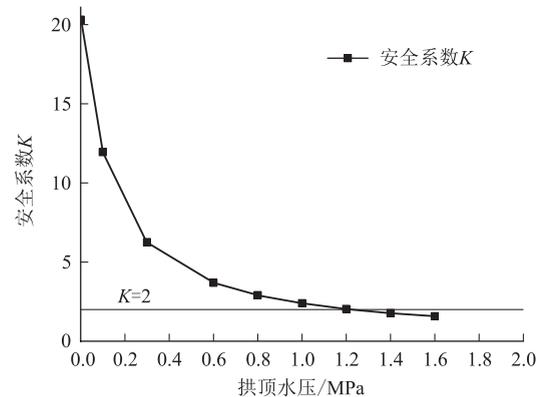


图2 40 cm厚圆形衬砌安全系数与拱顶水压关系图

从图 2 可以看出,对于Ⅲ级围岩下的圆形衬砌,由于围岩压力较小,水压实际为不利荷载,衬砌安全系数随水压增大而降低,当拱顶水压达到 1.4 MPa 以上时,安全系数 K 小于 2,不满足规范要求。

进一步通过有限元计算分析,得到无水压与 1.4 MPa 拱顶水压下 40 cm 圆形衬砌的结构内力云图,

如图3所示。从图3可以看出,与无水压工况相比,1.4 MPa拱顶水压下,衬砌弯矩分布形式发生改变,两侧负弯矩范围增大,最大弯矩从拱顶的正弯矩36 089 N·m变为拱肩处的负弯矩-99 833.9 N·m,数值上增大176.6%;拱部轴力明显增大,最大轴力从-565 022 N变为 -6.42×10^6 N,增大1 036.2%。可见,在高水压下,圆形衬砌轴力极大,使得其截面呈现小偏心受压特征,经检算,安全系数不满足GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》^[3]要求。

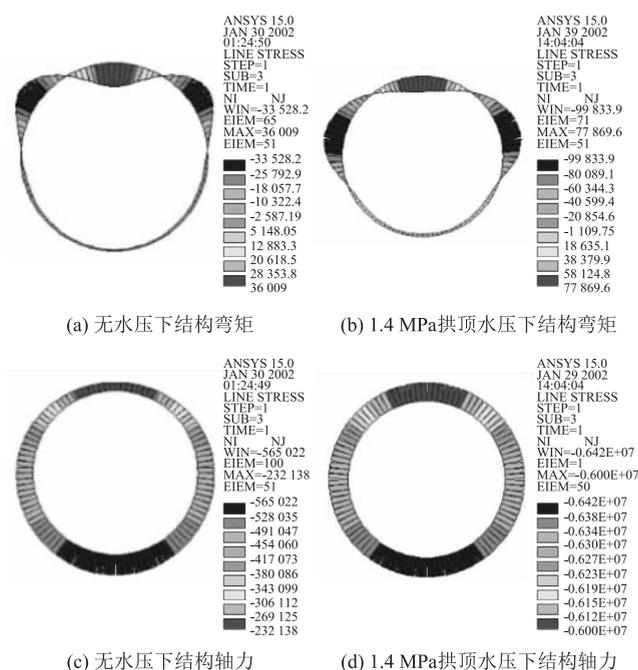


图3 无水压与1.4 MPa拱顶水压下40 cm圆形衬砌结构内力云图

根据TB 10003-2016《铁路隧道设计规范》,衬砌小偏心受压的截面强度为:

$$KNe \leq 0.5R_a b h_0^2 + R_g A'_g (h_0 - a') \quad (5)$$

式中: K ——安全系数,不应小于2;

N ——轴力;

e ——钢筋的重心至轴向力作用点的距离;

R_a ——混凝土抗压极限强度;

b ——矩形截面宽度,取为1 m;

h_0 ——截面有效高度;

R_g ——钢筋的抗压计算强度;

A'_g ——受压区钢筋的截面面积;

a' ——受压区钢筋重心分别至截面最近边缘的距离。

由式(5)可知,在同一内力条件下,为提高安全系数,可采取提高衬砌厚度、提高混凝土强度等级、增加

主筋面积或提高钢筋等级等措施实现。结合现有矿山法施工工艺分析,混凝土强度及钢筋强度等级可增加的空间有限,对提高结构安全系数的贡献不大;而增加主筋面积需通过加密配筋来实现,在主筋间距小于200 mm的情况下对混凝土浇筑和振捣质量影响较大,因此,该方式对提高结构安全系数的贡献仍然不大,且缺乏经济性和合理性的考虑。因此,对于高水压下的矿山法隧道,若要通过优化结构设计参数以提高抗水压能力,增大衬砌厚度是最为可行的方案。

为进一步分析衬砌厚度对衬砌承受高水压荷载的贡献,针对不同衬砌厚度、不同水压条件下的矿山法隧道圆形衬砌进行结构检算,其结果如图4、图5所示。

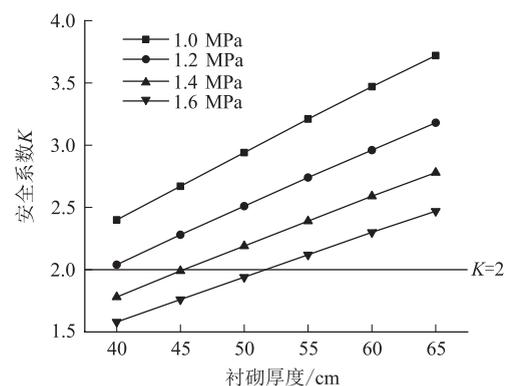


图4 不同衬砌厚度下结构安全系数图

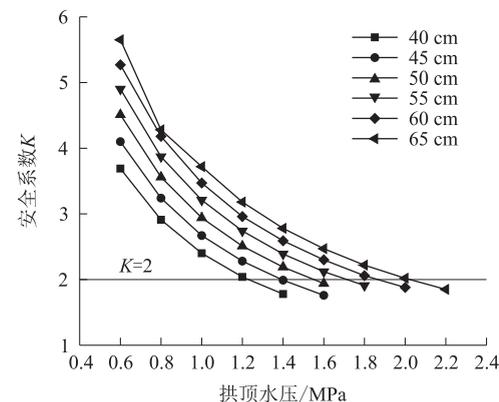


图5 不同拱顶水压下结构安全系数图

从图4、图5可以看出,在高水压条件下,衬砌结构安全系数随衬砌厚度增加而增加,加大衬砌厚度可显著提升结构抗水压能力。但即使不考虑经济性、施工便利性等因素,将衬砌厚度增大到65 cm,也仅能抵抗2 MPa左右的水压;而城际铁路隧道的最大埋深普遍超过200 m,理论水压在2 MPa以上。可见,通过对“全封防水”型衬砌结构设计参数的优化加强,无法彻底解决衬砌抵抗高水压荷载的问题。

2 “限量排放”与“限压排放”理念的适用性分析

既然只通过优化加强衬砌结构设计参数来解决衬砌抵抗高水压的方案既不经济也无法达到预期效果,“排水泄压”则成为了必然选择,如前所述,对于城际铁路隧道,从环保、经济以及运营安全等方面考虑,均不适宜采用地下水“全排”的方案,而应该采取“限排”方案。针对隧道“限排”方案,工程设计人员往往对“限量排放”和“限压排放”两种防排水模式存在较大争议。

所谓“限压排放”,即在隧道衬砌特殊部位安设限压阀,限压阀与衬砌背后地下水连通,如图6所示,并对“限压阀”设置一定的压力限值,当限压阀处的水压达到限值后,阀门将自动开启引排衬砌背后地下水,当限压阀处水压力降低后,阀门又可自动关闭,以此保证衬砌背后水压力始终低于结构所能承受的最大水压力。

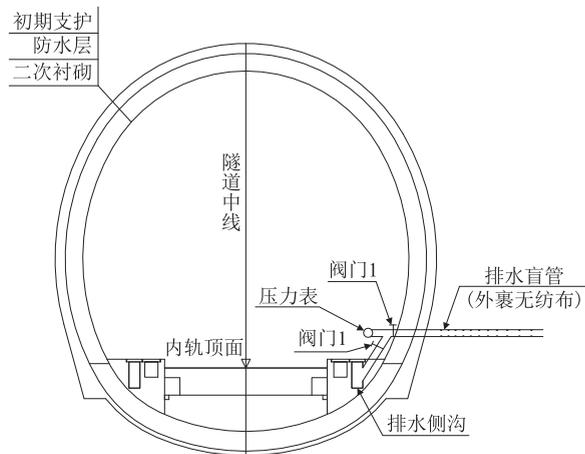


图6 “限压排放”衬砌示意图

陶伟明^[4]通过对隧道地下水渗流场的解析得到了多种介质地下水渗流模型,如图7所示,并推导出地下水流量公式:

$$Q = \frac{2\pi(H_4 - H_1)}{\frac{\ln r_2 - \ln r_1}{K_1} + \frac{\ln r_3 - \ln r_2}{K_2} + \frac{\ln r_4 - \ln r_3}{K_3}} \quad (6)$$

各种介质范围的水力势分别为:

$$H_{1r} = \frac{(\ln r - \ln r_1)}{K_1} \times \frac{Q}{2\pi} + H_1 \quad (r_2 \leq r \leq r_1) \quad (7)$$

$$H_{2r} = \left(\frac{\ln r - \ln r_2}{K_2} + \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{K_1} \right) \times \frac{Q}{2\pi} + H_1 \quad (r_3 \leq r \leq r_2) \quad (8)$$

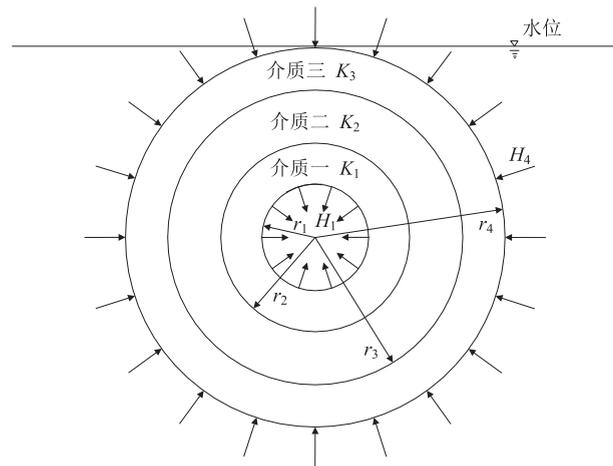


图7 多种介质地下水渗流模型图^[4]

$$H_{3r} = \frac{(\ln r - \ln r_4)}{K_3} \times \frac{Q}{2\pi} + H_4 \quad (r_4 \leq r \leq r_3) \quad (9)$$

式中: Q ——地下水流量;

r_1, r_2, r_3 ——分别为介质一、二、三的内缘半径;

r_4 ——介质三的外缘半径;

K_1, K_2, K_3 ——分别为介质一、二、三的渗透系数;

H_1 ——介质一内缘水力势;

H_4 ——介质三外缘水力势;

H_{1r}, H_{2r}, H_{3r} ——分别为介质一、二、三区域内的水力势。

介质一、二、三可分别视为隧道衬砌、周边加固圈及原状围岩,根据式(6)~式(9)可知,当限压阀关闭时,衬砌为完全不排水状态,等效于 $K_1 \rightarrow 0$,此时,始终有衬砌结构自然排水量 $Q_1 = 0, H_2 = H_4$,即衬砌背后水压最终将等于全水压,限压阀最终都将处于开启状态;而当限压阀开启后,衬砌为完全排水状态,等效于 $K_1 \rightarrow \infty$,此时,因未对衬砌周边围岩进行堵水加固,有 $K_2 = K_3$,则衬砌结构排水量 Q_1 等于洞室自然排水量 Q_0 。因此,采用此种排水方案理论上无法达到“限排”的目的。

目前,“限压排放”大多应用在城市地铁的高水压隧道中,实践结果表明,采用“限压排放”方案的隧道难以到达理想的“限排”效果,甚至会引发一些病害,其原因除限压阀损坏、排水盲管堵塞以外,最主要的还是由于围岩并非完全各向同性体,节理裂隙的不均匀性导致衬砌背后不同部位的水压力并非均匀分布。限压阀位置的衬砌外缘水压力尚未达到压力设定限值时,往往会因其他部位衬砌背后水压力超限导致地下水从衬砌结构薄弱部位或接缝位置发生渗漏。

与“限压排放”相对应的,“限量排放”方案的思路是对隧道固定长度的排水量设定一个限值,根据开挖后监测的围岩出水量情况,对不满足该排水量限值的段落进行洞内周边径向注浆,以封堵集中出水点及部分围岩节理裂隙,达到降低围岩透水性、减小围岩出水量的目的,直至洞周围岩出水量满足“限量排放”要求为止。在此基础上,隧道采用排水型衬砌,对限值以下的围岩出水进行引排,消除衬砌背后水压力。

由式(6)~式(9)可知,由于隧道采用全排型衬砌,等效于 $K_1 \rightarrow \infty$,当对周边围岩进行注浆后,可在一定程度上降低其透水性,即 $K_2 < K_3$,则 $0 < Q_1 < Q_0$, $H_2 = 0$ 。即在该模式下,衬砌结构排水量小于洞室自然出水量,排水量大小取决于对周边围岩的堵水效果,且衬砌背后理论水压力始终为0。因此,“限量排放”排水模式能同时达到限定排水量和降低衬砌外缘水压力的目的。

“限量排放”的防排水理念在我国铁路隧道中已有较多实践案例,取得了较理想的效果,其中以渝怀铁路歌乐山隧道和圆梁山隧道^[5]为典型代表。现行《铁路隧道设计规范》已将“以堵为主、限量排放”作为隧道在中、高水压环境下推荐的防排水设计原则^[6]。目前在建的大瑞铁路、成兰铁路等工程中,在穿越水环境敏感区域时,大量采用了这一防排水方案。

综上所述,“限量排放”方案从理论和实践经验上均较“限压排放”方案更为可靠。

3 “限量排放”治水方案的工程实践

本文以某在建城际铁路隧道为依托工程,该隧道长6 605 m,采用全地下敷设,两端连接地下车站,线路纵坡采用“N”字型坡,区间无地下水自排条件,于线路最低点位置设置水泵房,采用机械抽排地下水,小里程出站端1 645 m采用盾构法施工,其余4 960 m全部采用矿山法施工,如图8所示。隧道洞身依次穿越灰岩、砂岩、灰岩、角砾岩及花岗岩,矿山法段落大部分位于微风化花岗岩内。隧道埋深为12~259 m,其中盾构段最小埋深12 m,最大埋深55 m,盾构段地下水位埋深为0.5~15 m,盾构段采用不排水的管片衬砌;矿山法段最小埋深18 m,最大埋深达259 m,地下水位埋深为1.5~40 m,矿山法段落大部分位于深埋越岭段,深埋越岭段地下水位埋深均大于10 m。矿山法段落预测正常涌水量约23 233 m³/d,最大涌水量约162 636 m³/d,若采用地下水全排方案,则运营期地下水抽排及设备检修维护成本巨大,若采用地下水全封防水方案,大埋深越岭段衬砌结构无法承受超高的水压荷载。因此,设计单位对该段矿山法隧道采用了“限量排放”与“全封防水”相结合的地下水处治方案。

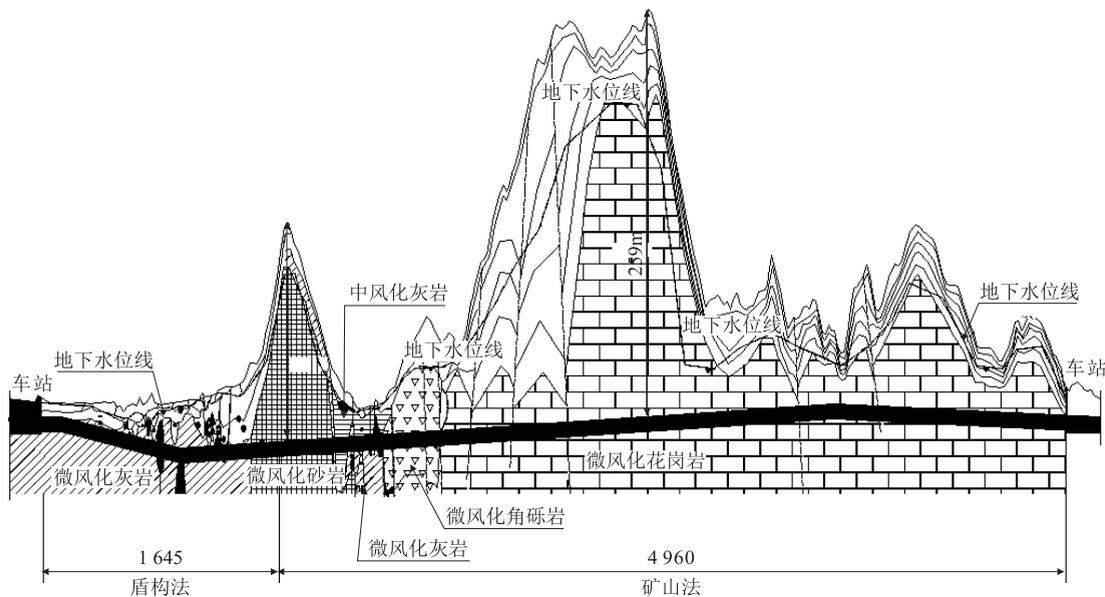


图8 隧道纵断面示意图(m)

3.1 “限量排放”与“全封防水”水压分界值的确定

为尽量减少运营期排水对地表水环境的影响及降低运营期排水的费用,隧道应尽量多采用“全封防水”型衬砌,减少排水段落。因此,在保证结构安全和防水

性能可靠的前提下,“限量排放”与“全封防水”的水压分界值应尽可能取大值。

矿山法隧道衬砌结构本身的抗水压能力取决于其断面形状、结构厚度和配筋,通过理论计算和实践经验

证明,对于单线隧道,衬砌厚度为40~50 cm时,通过调整结构配筋,基本可适应0.5 MPa的外水压力,若对断面进行适当优化,其承受外水压力的能力将进一步提高,且对工程造价影响较小^[7]。对近年来采用“全封防水”型衬砌的矿山法隧道进行调研,具体情况如表2所示。

表2 采用“全封防水”型衬砌的矿山法隧道表

隧道名称	所属工程	拱顶最大水压/MPa	状态
浏阳河铁路隧道	武广客运专线	0.5	已运营
金沙洲铁路隧道	武广客运专线	0.27	已运营
浏阳河城市道路隧道	长沙湘江大道	0.31	已运营
苔井山铁路隧道	温福铁路	0.18	已运营
友谊铁路隧道	中老铁路	1.0	已运营
张家界西隧道	张家界轨道交通工程	0.13	已建成未运营
大宝山铁路隧道	渝昆高速铁路	0.5	在建

目前,“全封防水”型衬砌在隧道净水头不超过50 m的工程中已经得到广泛应用并取得了较好的效果,大量的工程实践也证明在水头超过60 m的情况下若不采取其他辅助措施,复合式衬砌结构本身将难以达到全封防水的目的。因此,目前业内比较认可的“全封防水”型衬砌的合理最大水头高度为50~60 m^[8]。而德国相关规定则将60 m作为防水型复合式衬砌适用的最大水头高度。

综上所述,考虑到现有材料性能和施工工艺水平,并参考既有工程经验,此工程采用的“限量排放”与“全封防水”型衬砌的水压分界值确定为60 m,即水头高度大于60 m地段采用“限量排放”型衬砌;水头高度小于60 m的地段采用“全封防水”型衬砌。

3.2 “全封防水”型衬砌结构设计

根据“全封防水”型衬砌所承受的最大水头高度,对衬砌结构进行设计,结构计算模型参考第1节,考虑的荷载包括围岩压力、结构自重、衬砌外缘水压力。综合考虑经济性及力学性能,经计算确定的衬砌横断面如图9所示。

经计算分析可知,在考虑深埋高水压荷载的情况下,各级围岩下对结构设计参数起控制作用的荷载均为水压荷载,因此,浅埋工况不作为设计的控制工况,而依托工程深埋越岭段稳定地下水位埋深均大于10 m,为尽量减少运营期排水的环境影响及工程造价,取埋深70 m作为“全封防水”型衬砌的最大适用埋深,其抗水压能力按0.6 MPa设计。经计算,各级围岩段隧道衬砌设计参数如表3所示。

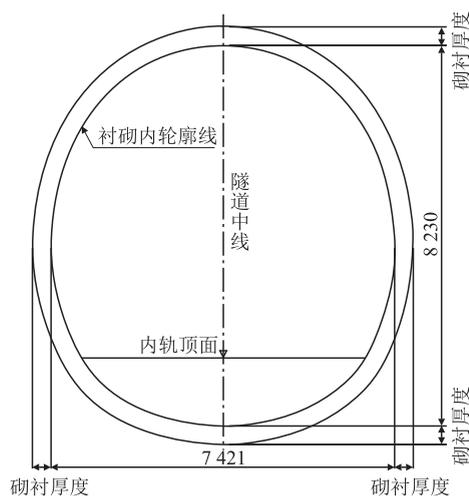


图9 “全封防水”型衬砌横断面图(mm)

表3 “全封防水”型衬砌结构设计参数表

围岩级别	衬砌厚度/cm	环向主筋
III	40	C20@250
IV	45	C22@250
V	50	C25@250

3.3 “限量排放”标准的确定

国内外典型“限量排放”型隧道的地下水排放标准统计结果如表4所示,从既有工程案例及其实施效果来看,地下水限量排放标准在 $0.05 \sim 5 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{m})$ 之间均有应用案例。因此,在不小于 $0.05 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{m})$ 的前提下,不同排放标准从现有施工工艺和技术上均可行。为确定合理的地下水排放量,应针对工程本身和周边环境要求的不同进行综合考虑。

表4 国内外典型“限量排放”型隧道地下水排放标准表^[9]

工程名称	地下水限量排放标准/ $(\text{m}^3 / (\text{d} \cdot \text{m}))$	限排原因	状态
大奥斯陆区铁路隧道	0.05~0.23	保证生活用水、防止建筑变形	已运营
挪威 Oslofjord 跨海通道	0.288	环保、保护地下水资源	已运营
日本青函海底隧道	0.81	减少运营期抽排	已运营
胶州湾海底隧道	0.51	减少运营期抽排	已运营
大瑞铁路保山隧道	1.0~5.0	环保	在建
成兰铁路跃龙门隧道	1.5	环保	在建
成兰铁路平安隧道	1.5	环保	在建
渝怀铁路歌乐山隧道	1.0	富水岩溶区维持地表水系	已运营
渝怀铁路圆梁山隧道	5.0	富水岩溶区维持地表水系	已运营

根据既有工程实施经验,铁路山岭隧道大多具备地下水自然排泄的条件,采用“限量排放”的原因多为

环保要求或在富水地段为降低对地表水系影响及施工涌水风险,其地下水允许排放量相对较大,一般按 $1 \sim 5 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 控制;而对于一些跨江越海或城区采用全地下敷设的隧道,因地下水不具备自然排泄条件,为减小运营期抽排水成本,同时考虑到平衡建设期注浆堵水成本,其地下水允许排放量相对较小,一般控制在 $0.5 \sim 1 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$;对于穿越人员及建构筑物较为密集的城市建成区的隧道,为避免施工及运营期地下水排放对周边生产生活用水产生影响及造成地层变形进而危及建(构)筑物,其地下水允许排放量则更为严苛,通常低于 $0.5 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。

依托工程具备典型的城际铁路与市域(郊)铁路的特点,其功能定位为连接中心城市与周边区域,所处位置为城区边缘的越岭地段,采用全地下敷设的形式,隧道不具备地下水自然排泄条件。同时,工程周边环境以林地和自然保护区为主,基本无建(构)筑物或居民,对地表水及地下水水位变化的敏感程度一般。因此,依托工程地下水排放标准的确定主要考虑因素为减小施工期间注浆堵水及运营期抽排水综合成本。综合以上因素及既有工程的实施经验,最终确定该工程地下水“限量排放”标准为 $1 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 。

4 结论

本文通过对城际铁路隧道运营期防排水特点的分析,运用工程调研、理论分析和计算模拟的手段,得出以下主要结论:

(1) 城际铁路矿山法隧道在高水压环境下通过加大衬砌厚度、增加配筋等结构加强手段以提高其抵抗高水压的能力的作用有限且不经济。

(2) 大埋深、高水压环境下对衬砌背后地下水适当引排以减小衬砌背后水压荷载的手段是有效且十分必要的。

(3) 高水压环境下隧道采用地下水“限压排放”模式最终难以达到限排效果,而“限量排放”是高水压环境下隧道地下水限排模式的合理选择。

(4) 在现有材料性能和施工工艺水平下,考虑经济合理性,依托工程矿山法隧道“全封防水”型衬砌承受的极限水压不宜超过 0.6 MPa 。

(5) 结合某在建城际铁路矿山法隧道工程特点,

通过工程调研、数值计算等方法,确定了“限量排放”与“全封防水”的合理水压分界值及“限量排放”的排水量标准,对不同工况下的“全封防水”型衬砌进行了结构设计。

参考文献:

- [1] TB 10003 - 2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003 - 2016 Code for Design of Railway Tunnel[S].
- [2] GB 50157 - 2013 地铁设计规范[S].
GB 50157 - 2013 Code for Design of Metro[S].
- [3] GB 50010 - 2010 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010 - 2010 Code for Design of Concrete Structures[S].
- [4] 陶伟明. “以堵为主, 限量排放”隧道防排水原则的理论基础及其工程实践[J]. 铁道标准设计, 2006, 50(9): 78 - 82.
TAO Weiming. The Theoretical Basis and Engineering Practice of the Waterproof and Drainage Principle of “Mainly Blocking and Limited Discharge” for Tunnel [J]. Railway Standard Design, 2006, 50(9): 78 - 82.
- [5] 陶伟明. 高水位山岭隧道防排水原则的理论基础及其工程实践[C]//自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(2), 2009:558 - 568.
Tao Weiming. Theoretical Basis of the Waterproof and Drainage Principle Applied to Mountain Tunnel with High Groundwater Level and Its Engineering Application [C]// Papers of the 11th Annual Conference of China Association for Science and Technology on Independent Innovation and Sustainable Growth (2), 2009: 558 - 568.
- [6] 胡炜, 谭信荣, 李奎, 等. 高压富水地区岩溶隧道防排水设计方案优化研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(5): 97 - 101.
HU Wei, TAN Xinrong, LI Kui, et al. Research on Optimization of Design Schemes for Waterproofing and Drainage of Karst Tunnels in High-Pressure and Water-Rich Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(5): 97 - 101.
- [7] 高杨. 铁路隧道防排水设计指南[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2018.
GAO Yang. Guide for Waterproofing and Drainage Design of Railway Tunnels [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2018.
- [8] 肖明清. 防水型复合式衬砌隧道的设计要点[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(8): 54 - 57.
XIAO Mingqing. Key Design Points of Waterproof Compound Liner Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(8): 54 - 57.
- [9] 王建宇. 矿山法隧道工程修建理念的更新[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Wang Jianyu. Innovative Concepts in Conventional Tunneling [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.