

张彦龙,田卿燕,张建同. 广东地区某公路岩溶隧道水害分析及其数值模拟研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 307-313.
DOI:10. 11932/karst20180219

广东地区某公路岩溶隧道水害分析及其数值模拟研究

张彦龙¹, 田卿燕¹, 张建同^{2,3}

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广州 510420; 2. 深圳市市政工程总公司, 广东 深圳 518033; 3. 武汉大学, 武汉 430072)

摘 要:结合岩溶区公路隧道的实际情况,研究隧道涌水量计算的关键因素,并通过降水量、降水强度和入渗强度定量分析隧道涌水量。文章根据大宝山的实际情况,采用降水入渗法和地下径流模数法计算隧道两侧洞口段雨季涌水量,针对强降雨过程,分析隧道可能出现的最大涌水量。研究表明:隧道排水能力理论上可满足降雨的排水要求,但实际排水能力受工程施工材料、工程的不均匀性以及长期的淤堵等因素影响。文章明确了广东地区公路岩溶隧道水害影响因素,考虑临界状态和破坏状态的水压力建立岩溶隧道涌水模拟模型,水压力临界值随隧道衬砌结构厚度的增加逐渐增大。

关键词:岩溶;公路隧道;涌水量;水害;隧道涌水模拟;水压力

中图分类号:P642.25

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)02-0307-07

0 引 言

根据 2014 年广东省高速公路隧道定期检查资料,目前营运的高速公路隧道总体技术状况较好,评价为 A 类隧道为 0 个, B 类隧道的总数为 37 个。其中因水害问题而评价为 B 类的隧道有 20 个,占 54%,水害已成为隧道最主要的病害。

岩溶隧道渗漏问题早已引起国内外学者的关注。Asakura^[1]认为隧道建设使地应力破坏引发压力不平衡,引起地面沉降,进而导致隧道渗漏水。Day^[2]分析了岩石崩塌、地面沉降和地下水入侵导致深埋隧道施工更加困难,指出应重视岩溶水文地质问题。一些学者通过水岩相互作用分析隧道渗漏水问题^[3-7]庄旭峰^[8]等以磨雄隧道和银山隧道为例,阐述了岩溶地下水系统与隧道建设的不和谐关系。许和平^[9]针对岩溶区的南昆线渗漏水原因进行了分析,并提出相应的整治措施。魏兴萍等^[10]采用地下水动力学法、古德曼经验公式,经验解析法公式计算涌水量,并比较中梁山铁路隧道修建对漏水的影响。庾乐等^[11]为了查明岩溶地下水径流途径、径流特征,在不同的注

浆圈和初衬渗透系数下,不考虑隧道开挖的扰动影响,进行了地下水连通试验。李铮等^[12]采取 Visual-modflow 软件进行涌水量预测。学者们也提出了岩溶隧道水害具体的治理措施,如赵旭东^[13]提出了注浆、凿槽埋管引排、凿槽堵漏和放水砂浆抹面等具体整治措施;陈荣国^[14]对南昆线部分隧道渗漏水提出了整治措施和工艺;祝和权等^[15]指出隧道渗漏水综合治理的主要原则及设计要求;江亦元和王星华^[16]通过昆仑山隧道渗漏水现场试验指出隧道渗漏水的主要因素,并提出了治理措施。

纵观国内外研究现状,在隧道工程水灾害研究领域还存在诸多挑战。本文结合广东岩溶地区运营公路隧道水害问题,以 G4 京港澳大宝山隧道为案例,开展岩溶隧道涌水量分析与数值模拟并对其水害进行评价。

1 工程案例概况

大宝山隧道位于广东省曲江县与翁源县的分界

基金项目:中国博士后科学基金(2016M590717);广东省交通运输厅科技计划项目(2013-02-035)

第一作者简介:张彦龙(1983-),男,高级工程师,硕士,主要从事公路隧道工程检测、设计、咨询和科研工作。E-mail:36067844@qq.com。

收稿日期:2017-03-04

岭——猫耳岭凹,隧道结构采用分离式单向行车三车道,衬砌结构均按照新奥法原理,采用复合式衬砌,以锚杆、喷射混凝土或钢筋网喷射混凝土,格栅钢筋拱架和轻型工字钢钢架作为初期支护,模筑混凝土或钢筋混凝土作为二次支护,同时在初支和二衬之间设PVC复合式防水层。大宝山为低山陡峭山坡及冲沟地貌,岩性为中—厚层状泥质灰岩,岩层单斜,倾角约为 $25^{\circ}\sim 52^{\circ}$,岩石成层性差,裂隙发育。地下水以裂隙水为主,局部有溶蚀现象,该区域降雨丰富,大部分由地表直接排泄于沟谷。隧道周边山体无常年性水体存在,大气降水是山体地表洪流和隧道山体各类地下水的主要来源,多年平均降雨量为1640mm,每年4—10月份为雨季,降雨量占全年降雨量的75%,6月份和8月份是该地降水量最高峰月份。大气降水是隧道涌水水源且在雨季可导致隧道突水。大宝山隧道汇水区域如图1所示:

当暴雨集中时,由于历时短,降雨量大,隧道内排水系统不畅,中心排水沟和边沟排水能力不足,使隧

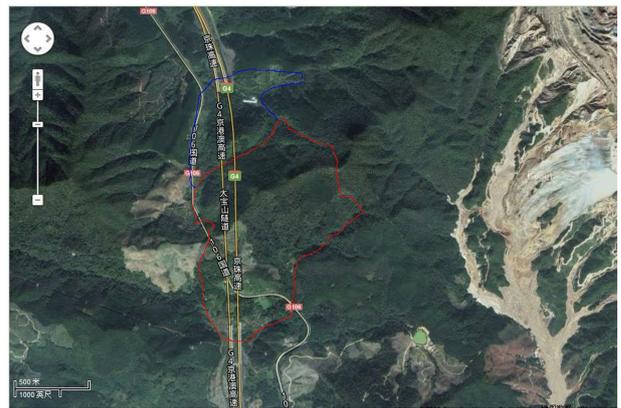


图1 大宝山隧道集水区域图

Fig.1 Tunnel recharge area map
图中红色和蓝色线框区域为两个汇水区域

道外山体水压升高,在高水压作用下隧道边沟底板遭破坏,岩溶水涌入隧道造成涌水涌泥等严重渗漏水事件(图2)。



图2 隧道现场排水系统典型病害照片

Fig.2 Typical water disaster photo of tunnel drainage system

2 隧道涌水量及水害分析

在岩溶区修建隧道,首要问题是涌水量的预测。由于岩溶区水文地质条件较复杂,难以掌握其非均质、管道流等特性,导致难以准确获取渗透系数、渗入系数、集水面积等参数,因此难以按隧道所处岩溶水动力剖面分带特征选择计算方法,这些是导致预测的隧道涌水量与实际情况有差异的主要原因。

公路隧道涌水量预测的常用方法有水文地质比拟法、解析法和均衡法。其中,水文地质比拟法常用于隧道建设期涌水量的预测;解析法要求的均质、层流、各向同性等条件与岩溶区公路隧道实际水文地质条件是不相符的;岩溶区大部分隧道涌水水源主要为大气降水,因此均衡法在计算运营期公路隧道涌水量是最为适用的。

隧道洞口段埋藏较浅,入渗水通过孔隙、裂隙等

与地表汇水区域相通而直接排泄;隧道中部入渗水通过围岩裂隙和岩溶管道为主要排水通道;因此,计算隧道涌水量的关键因素是降水量、降水强度和入渗强度。针对大宝山的实际情况,本文采用均衡法中的降水入渗法和地下水径流模数法计算大宝山隧道两侧洞口段雨季涌水量,采用强降水过程分析隧道可能出现的最大涌水量。

2.1 隧道雨季涌水量计算

2.1.1 降水入渗法

按一定时期内降水入渗补给地下水的水量来计算隧道的涌水量,降水入渗法计算公式如下:

$$Q_1 = 2.74\omega\alpha A_1 / 365 \quad (1)$$

式中: Q_1 为隧道的正常涌水量($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); ω 为年降水量(mm); α 为降水入渗系数,一般取 $0.10 \sim 0.59$; A_1 为汇水面积(m^2)。

根据大宝山隧道所在区域及降水情况,大宝山隧道涌水量预测的重点应放在 4—10 月的雨季。故公式(1)修改为:

$$Q_1 = 2.74 \times 0.75 \times 1.64 \times \alpha A_1 / 210 \quad (2)$$

式中降水入渗系数 α 取 0.2。依据隧道汇水区域图,得出隧道所在山体汇水面积为 $A_1 = 820 \times 515 = 904\,800(\text{m}^2)$ 。则由公式(2)可得隧道的正常涌水量 Q_1 :

$$\begin{aligned} Q_1 &= 2.74 \times 0.75 \times 1.640 \times \alpha A / 150 \\ &= 2.74 \times 0.75 \times 1.640 \times 0.2 \times 904\,800 / 210 \\ &= 4\,214.919(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}) \\ &= 145.208(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}) \end{aligned}$$

2.1.2 地下水径流模数法

地下水径流模数法是依据大气降水补给的泉流量或由地下水补给的河流流量,计算出隧道通过地段的地表径流模数,并将之视为隧道流域的地下水径流模数,然后确定隧道的汇水面积,宏观地预测隧道的涌水量。地下水径流模数法计算公式如下:

$$Q_2 = M \times A_2 \quad (3)$$

式中: Q_2 为涌水量($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); A_2 为汇水面积(km^2); M 为径流模数($\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$);根据区域水文地质资料,该处地下水径流模数 M 取 $4.78 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 。因此由公式(3)可得涌水量 Q_2 :

$$\begin{aligned} Q_2 &= M \times A_2 = 4.78 \times 0.904\,8 \\ &= 4.324\,944(\text{L} \cdot \text{s}^{-1}) = 3\,736.75(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}) \\ &= 155.698(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}) \end{aligned}$$

对比上述两种方法的计算结果,分析认为两种方法入渗系数和径流模数为经验取值,是造成计算结果偏差的原因。为评价隧道涌水量对隧道安全的影响,

按照最不利原则,取其中较大值,即雨季隧道正常涌水量取 $155.698 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,单条隧道的正常涌水量为 $77.849 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。通过实际监测,雨季期间大宝山隧道单条隧道中心排水沟日均排水量约为 $1\,800 \text{ m}^3$ (涌水量为 $75 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$),与实际计算结果相近,验证了均衡法中的降水入渗法对岩溶区公路隧道涌水量的预测是较为准确可靠的。

2.2 极端天气下最大涌水量

在极端天气下隧道内最大涌水量与降水强度和降水时间关系十分密切,可根据日最大降水量和降水时间对隧道内最大涌水量进行计算。

$$Q_3 = 2.74\alpha A_3 XT \quad (4)$$

式中: Q_3 为隧道最大涌水量($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); α 为降水入渗系数,取值 0.2; X 为雨强($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); A_3 为隧道集水面积(m^2); T 为降水时间(h)。

据统计,该地区 20 年一遇的最大日降水量是 188.2 mm ,30 年一遇的最大日降水量是 202.5 mm ,50 年一遇的最大日降水量是 220.5 mm ,100 年一遇的则是 244.1 mm ,详细结果见表 1。

表 1 不同降水强度、不同降水时程下隧道涌水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) 计算表

Table 1 Calculation table of water inflow ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) under different precipitation intensity and different precipitation time course (h)

降水强度/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	降水时程/h				
	1	6	12	16	24
20 年一遇	38.9	41.8	45.6	50.4	52.7
30 年一遇	233.3	251.0	273.3	302.6	316.1
50 年一遇	466.6	502.0	546.7	605.2	632.2
100 年一遇	699.9	753.0	820.0	907.7	948.3
本次最大量*	933.2	1\,004.1	1\,093.3	1\,210.3	1\,264.4

注: * 本次最大(降水强度)取铁龙林场站雨量观测值 255 mm 。

根据设计要求与施工资料,大宝山隧道中部有直径为 0.5 m 的中心排水沟,排水量为:

$$Q_4 = A_4 \times V \quad (5)$$

式中: A_4 为排水沟断面面积; V 为水流速,其计算公式为 $V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$; R 为水力半径; I 为水力坡度(取 0.0015); n 为粗糙系数(可取 0.015)。根据公式(4)可计算得中心排水沟最大排水能力为 $645.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,隧道排水沟总排水能力为 $1\,291 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,对比表 1,当降水强度为百年一遇降雨量时,在隧道排水系统完好的状况下,基本达到隧道最大排水能力。从计算结果看,隧道排水能力理论上可满足本次降雨状

况下的排水要求,但实际工程中由于材料的影响、工程的不均匀性以及长期的淤堵,排水系统实际排水能力达不到理论排水能力。

2.3 隧道水害分析

为查清隧道水害的原因,本项目采用了多种试验和评估方法,评估内容和结果如表2所示。隧道水害原因:(1)衬砌 LK1983+978 处,由于初期支护没有将围岩面喷平,围岩存在尖角和突出,容易引起应力集中。浇筑二衬混凝土时,防水板处于绷紧状态或背后有水,导致浇筑二次衬砌时厚度严重不足,并且二衬背后出现空洞。该处二衬在雨季水压力较大,旱季水压力很小,这样反复交替,结构形成了疲劳损伤,在本次特大暴雨时水压力剧增,直接造成了二衬混凝土脱落。(2)LK1984+823 处围岩是岩溶区,水系发达,在暴雨期间,地下水通过岩溶通道,将泥土带入隧

道内,造成中心水沟排水不畅,边沟排水能力不足,加之在此段无仰拱,推测边沟下部存在岩溶,在高水压力下造成边沟底板破损,岩溶水涌入隧道造成涌水涌泥。(3)整座隧道存在多处渗漏水现象,特别二衬施工缝交界处和防水板焊接施工质量较差的部位,强降雨后更是直接成流线状滴漏。同时,隧道围岩含水丰富、防排水系统失效、隧道二次衬砌开裂、振捣不密实等也是造成隧道渗漏水的原因。(4)降雨对隧道围岩的地下水补给迅速,隧道岩壁的水压力大于 0.32 MPa。(5)理论上,设计的隧道排水系统可以满足排水要求,但实际工程中,由于材料的影响、工程的不均匀性、排水设施老化或部分失去功能,以及淤堵等原因,排水系统的实际排水能力达不到理想状态,不能满足特大降雨的瞬时排水需求,引起水位上升,隧道围岩水压力增大,围岩水通过衬砌的薄弱部位渗出。

表2 大宝山隧道水害检测项目一览表

Table 2 List of water disaster detection items in Dabaoshan tunnel

试验和评估项目	检测位置和检测内容	检测数量	检测结果
外观检测	LK1983+533~LK1985+118	共 1 585 m	LK1983+978 处,衬砌破坏、掉块;小溶洞发育
洞顶调查	山体附近水文地质和洞口山体稳定性	大宝山隧道洞口洞顶	地表存在滞水,存在岩溶塌陷
二衬厚度检测	LK1983+900~LK1984+050 纵向测 150 m,测线 3 条	450 延米测线	掉块区域周边厚度满足设计要求
隧道内裂缝监测	纵向裂缝	3 条	基本无变化
二衬应力监测	衬砌掉块处附近	2 个	排水后,应力较原来减小
水压和涌水量评估	分析大宝山隧道涌水量和水压力		最大涌水量为 124.5 m ³ ,随降雨量的减少而变小;水压为 0.39~0.65 MPa
二衬混凝土强度检测	大宝山掉块混凝土	3 个	均值为 28.2 MPa,大于设计强度值 25 MPa,满足设计要求
围岩溶洞探测	LK1983+900~LK1984+050 衬砌掉块和渗漏水严重区段和 LK1984+770~LK1984+900 水沟管涌严重区段	共 280 m 长度, 2 248 个测点	共发现 12 个岩溶发育处
结构安全性评估	二衬掉块、开裂、渗水严重区段	8 种工况	详细结果如表 4 所示

3 隧道灾变数值模拟及衬砌破坏水压分析

根据前述检查结果,结合工程地质情况,对该隧道受灾前后进行了数值计算分析。

3.1 围岩参数的选取

数值模拟计算范围以隧道轴线为中心线,作如下假定:(1)水柱高度取隧道限界 3~5 倍影响范围内最大水柱高度(最不利边界),将水柱高度依次按等差数列(等差值为 1.0 m)递减进行现场模拟计算;(2)隧

道拱腰、拱顶以及边墙的溶腔简化成左右边界形状相同的模型,以便于计算。

大宝山隧道最大洞跨为 15.6 m,X 面边界距隧洞为 3 倍洞跨,Y 面边界距隧洞为 3 倍洞跨。根据圣维南原理,设模型的大小为 46.8 m×46.8 m×30.6 m。围岩(级别为 II 级)与衬砌的本构关系采用 Drucker-Prager 模型,隧道拱圈混凝土视为线弹性材料。力学参数如表 3 所示。

表 3 力学参数

Table 3 Mechanical parameters

名称	E/MPa	μ	C/KPa	$\varphi/^\circ$	$\gamma/\text{KN}\cdot\text{m}^{-3}$	$K_s/\text{KN}\cdot\text{m}^{-3}$	$K_n/\text{KN}\cdot\text{m}^{-3}$
灰岩	6.5×10^3	0.26	600	42	19		
初衬	3.1×10^4	0.20	600	40	28		
灰岩与隧道拱顶之间						30	45
灰岩与隧道拱腰之间						22	39
灰岩与隧道侧边墙之间						5	5

3.2 有限元网格

对表 4 中的隧道水压工况 1~工况 8 进行网格划分,运用平面应变理论,隧道衬砌结构单元采用三角形单元(Triangle 6 node 2),围岩选择 Drucker-Prager 弹性分析的 SOLID 单元(即三角形六节点单元)。整个单元剖分图和衬砌结构网格如图 3 所示。

表 4 计算工况情况

Table 4 Calculation of working condition

工况 序次	衬砌厚度/ cm	等差值/ cm	备注
工况 1	16		a 隧道断面 b 破坏状态水压力
工况 2	20	5	临界状态水压力
工况 3	25	5	临界状态水压力
工况 4	45	5	临界状态水压力
工况 5	45	5	16 cm 厚度衬砌时破坏状态水压力值
工况 6	50		临界状态水压力
工况 7	50		16 cm 厚度衬砌时破坏状态水压力值
工况 8	50		破坏状态水压力值

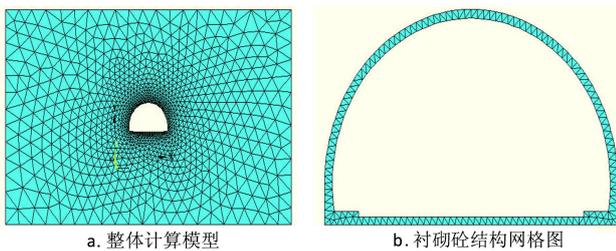


图 3 隧道涌水计算模拟模型

Fig. 3 Simulation model of tunnel water inflow

3.3 接触单元

模型中的接触单元采用面-面接触中的刚-柔接触模型进行分析。先判断潜在的接触面,再指定接触区域大小,将刚性面定义为目标面,柔性面定义为接触面。对于接触面单元,刚性目标面(如隧道衬砌结构)采用 Target2 单元来模拟;柔性体的接触面(如围

岩)采用 Conta2 单元来模拟。模型考虑了围岩与隧道衬砌结构之间、灰岩与隧道拱顶之间、灰岩与隧道拱腰之间、灰岩与隧道侧边墙之间接触面等多重介质。

3.4 边界处理

边界条件分为荷载和位移。如图 4(a)所示,计算模型的左右边界约束水平方向的位移;上部边界为自由界面;下部边界约束垂直方向的位移。荷载分为:(1)上部边界施加原岩自重应力(按最大高度 100 m 计算,即 2.10 MPa);(2)周围灰岩对计算区域施加应力,应力为岩体的自重引起的侧压力,呈三角形分布,面荷载最大值为 0.70 MPa;(3)由于京珠南高速公路大型货运车较多,大型货运车通行时对隧道结构产生较强烈的振动荷载,振动荷载分布范围为 1.75×3.5 m,可简化为均布面荷载,如图 4b 所示。

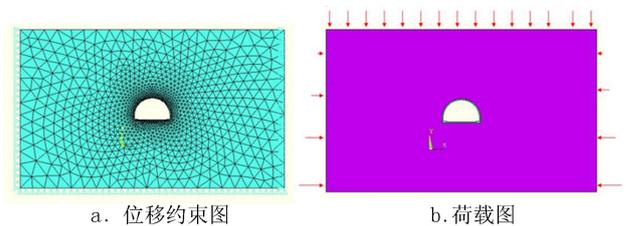


图 4 计算模型前视图的边界条件

Fig. 4 Boundary conditions of the simulation model-front view

3.5 结果与讨论

3.5.1 临界水压力值

首先对二衬掉落区段内(LK1983+977-LK1983+978)的 8 个工况进行数值模拟计算,得到隧道衬砌结构出现塑性变形时所对应的临界水压力值,进而对该区段在其他不同二衬厚度所对应的临界水压力作用下结构的稳定性进行数值模拟分析。图 5 为二衬掉落区段内(LK1983+977-LK1983+978)在临界水压力作用条件下衬砌结构的应力和应变云图。计算得知(表 5),LK1983+977-LK1983+978 区段的衬砌厚度为 16 cm 时,破坏水压力大于 0.32 Mpa。衬砌外水压对隧道衬砌结构具有一定的影响。在一定埋深条件下,不同的隧道衬砌

结构厚度,受衬砌外水压力影响的临界值(隧道结构开始出现塑性变形时所对应的溶腔内的水压力)是不同的,水压力临界值随衬砌结构厚度的增加逐渐增加。

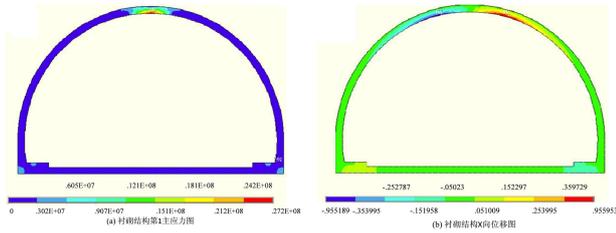


图 5 临界水压力作用下隧道衬砌结构应力应变云图

Fig. 5 Stress and strain cloud map of tunnel lining structure

3.5.2 应力和应变分析

通过计算,各工况的最大位移、最大主应力和最小主应力结果如表 6 所示。

表 6 各工况下大宝山隧道结构最大位移、最大主应力及最小主应力计算结果
Table 6 Calculation results of maximum displacement, maximum principal stress and minimum principal stress of Dabaoshan tunnel

工况 序次	计算项目 衬砌厚度/cm	拱顶最大竖 向位移/mm	拱脚最大水平 位移/mm	最大主应力拉应力 压应力/Mpa	最小主应力拉应 力压应力/Mpa	备注
工况 1	16	-4.85	-3.659	2.73 23.45	1.454 17.59	a 隧道断面 b 破坏状态水压力
工况 2	20	-0.371	-0.853	0.201 2.10	0.095 1.22	临界状态水压力
工况 3	25	-0.211	-0.654	0.184 1.99	0.073 1.02	临界状态水压力
工况 4	45	-1.042	-0.982	2.44 14.5	1.051 9.9	临界状态水压力
工况 5	45	-1.323	-1.052	1.77 13.45	1.33 10.05	16 cm 厚衬砌时破坏 状态水压力值
工况 6	50	-0.61	-0.07	1.62 11.55	1.03 8.52	临界状态水压力
工况 7	50	-0.082	-0.063	1.69 11.12	0.99 8.88	16 cm 厚衬砌时破坏 状态水压力值
工况 8	50	-3.252	-1.995	2.58 21.22	1.052 15.52	破坏状态水压力

注:①压应力为负,拉应力为正;②位移方向水平向左为正,向右为负,竖直方向向上为正,向下为负;③侧向压力为三角形分布,顶部压力为均布分布;④工况荷载组合形式为衬砌自重+顶部山岩压力+侧向山岩压力。

对应于工况 1,在二衬掉落区段内(LK1983+977-LK1983+978)破坏水压荷载为 0.320 MPa,该区域数值模拟计算得出的最大压应力与最大拉应力均超过允许拉应力与压应力值,增量分别为 23.4%与 36.5%(根据《混凝土结构设计规范》GB50010-2010,C25 混凝土容许压应力为 19.0 Mpa,容许拉应力为 2.0 Mpa),此时拱顶和侧壁最大收敛位移均大于 3.6 mm,说明 LK1983+977-LK1983+978 二衬掉落区的应力超过其容许应力,因此衬砌结构出现了失稳破坏。

其他工况在 LK1983+977-LK1983+978 区段内的破坏水压荷载作用下(围岩压力、结构力与车辆

表 5 衬砌厚度与水压关系
Table 5 Relationship between lining thickness and water pressure

衬砌厚度 /cm	隧道衬砌结构出现塑 性变形临界水压/MPa	隧道衬砌结构出现 破坏水压/MPa	备注
16	0.201	0.320	隧道断面
20	0.211	—	隧道断面
25	0.238	—	隧道断面
30	0.264	—	隧道断面
35	0.296	—	隧道断面
40	0.312	—	隧道断面
45	0.367	0.602	隧道断面
50	0.395	0.633	隧道断面

荷载不变,不考虑动水压力及渗流作用),计算的二衬(二衬厚度分别为 40 cm、45 cm 与 50 cm 时,施加的水压荷载值为该区段内的破坏水压荷载 0.320 MPa)的应力均未超过容许应力,增加幅度不大,说明其它断面区域的二衬结构安全。

4 结论

本文针对广东地区岩溶发育规律,以 G4 京港澳大宝山隧道为例,研究了公路岩溶隧道涌水量及水害,主要结论如下:

(1)排水系统不畅和周围地质环境是引起溶洞顶

板发生涌水的重要原因。

(2)针对岩溶区营运公路隧道,采用均衡法计算隧道的涌水量和评价隧道的营运安全性是可靠的、可行的。

(3)公路岩溶隧道突水原因是长期暴雨天气,降雨量大,地表水入渗后通过岩溶通道、围岩裂隙、挤压断层破碎带等渗流向隧道,在衬砌背后形成较大地下水压力,地下水通过隧道防水设施的缺陷或结构薄弱部位涌入隧道,并夹带大量的溶腔物。

(4)通过对大宝山隧道工程的涌水数值计算,可知衬砌外水压对隧道衬砌结构具有一定的影响。在一定埋深条件下,不同的隧道衬砌结构厚度,受衬砌外水压力影响的临界值(隧道结构出现塑性变形时对应的溶腔内的水压力)是不同的,水压力临界值随衬砌结构厚度的增加逐渐增加。

参考文献

- [1] Asakura T, Kojima Y. Tunnel maintenance in Japan[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(2): 161-169.
- [2] Day M J. Karstic problems in the construction of Milwaukee's Deep Tunnels[J]. Environmental Geology, 2004, 45(6): 859-863.
- [3] WANG Y, CHEN Q, WEI Y, et al. Water/Rock Interaction Mechanism in Deep-buried Tunnels in Karst Area [J]. China Railway Science, 2004, 4: 10.
- [4] Liansheng T, Pengcheng Z, Sijing W. Testing study on macroscopic mechanics effect of chemical action of water on rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 526-531.
- [5] Kim Y I, Amadei B, Pan E. Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(7): 949-970.
- [6] 李术才,赵岩,徐帮树,等.海底隧道涌水量数值计算的渗透系数确定方法[J].岩土力学, 2012, 33(5): 1497-1504.
- [7] 吴明亮,漆继红,许模,等.川东南隔挡式构造区隧道空间展布影响下岩溶涌突水特征简析[J].中国岩溶, 2016, 35(2): 190-196.
- [8] 庄旭峰,孙东.实例分析隧道建设对岩溶水的影响[J].中国岩溶, 2016, 35(6): 681-687.
- [9] 许和平.对南昆线(西段)隧道衬砌漏水整治的思考[J].铁道工程学报, 1999, 16(2): 63-68.
- [10] 魏兴萍,张虹,苏程恒.重庆南山隧道工程涌水隐患研究[J].中国岩溶, 2016, 35(1): 74-80.
- [11] 庚乐,王礼恒,王举平.广西平南某矿区岩溶地下水连通试验研究[J].中国岩溶, 2014, 33(1): 31-36.
- [12] 李铮,何川,杨赛舟,等.不考虑开挖扰动影响的隧道涌水量预测模型试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2499-2506.
- [13] 赵旭东.隧道渗漏水的病害整治[J].西部探矿工程, 2001, 13(2): 72-73.
- [14] 陈荣国.富水地区隧道渗漏水整治措施[J].现代隧道技术, 2002, 39(3): 65-68.
- [15] 祝和权,李海燕,杜存山.隧道渗漏水综合治理技术的研究[J].中国铁路, 2004(5): 42-45.
- [16] 江亦元,王星华.昆仑山隧道渗漏水原因探讨及治理[J].中国铁道科学, 2005, 26(4): 52-56.

Water disaster analysis and numerical simulation of a karst tunnel in a highway of Guangdong Province

ZHANG Yanlong¹, TIAN Qingyan¹, ZHANG Jiantong^{2,3}

(1. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510420, China;

2. Shenzhen Municipal Engineering CORP., Shenzhen, Guangdong 518033, China;

3. Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract The key factors to calculate the tunnel water inflow are studied based on the actual situation of a highway tunnel in the karst area. The tunnel water inflow rate is quantitatively analyzed with precipitation, rainfall intensity and infiltration intensity. According to the actual situation of Dabaoshan engineering site, precipitation infiltration method and underground runoff modulus method are applied to calculate the tunnel water inflow at the entrance on both sides in the wet season, and the maximum possible water inflow volume is analyzed under the heavy rainfall condition. The results show that the drainage capacity of the tunnel theoretically meets the requirement of drainage in the wet season, but will be affected by the heterogeneity of the material and the engineering, and the long-term effect of clogging.

The impact factors of karst tunnel water in highway are identified in Guangdong area. Karst tunnel simulation models are established for both critical state and failure state of the water pressure. The results show that the critical value of water pressure increases with the thickness of the lining structure.

Key words karst, highway tunnel, water inflow, water disaster, tunnel inflow simulation, water pressure

(编辑 张玲)