文章编号:1009-6582(2019)04-0062-07 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2019.04.010

桃园至巴中高速公路八庙隧道非常规岩爆段病害处治与设计反思

王登茂 滕振楠 田志宇 陈志学
(四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院,成都 610041)

摘 要 桃巴高速公路八庙隧道局部段落最大埋深312 m,围岩产状为近水平地层的砂泥岩互层,隧道施工过程中发生非常规岩爆现象,运营后发生非常规岩爆现象的段落出现了一系列病害。文章通过对现象与数据的分析,结合隧道专项检查结果归纳总结了病害原因;基于施工期间现场地应力测试结果,假定已经发生严重开裂的二次衬砌处于破坏临界状态,从而反推得出结构所承担的荷载。文章推导了混凝土结构增设套衬后的结构安全系数计算公式,得出隧道增设套衬后安全系数与套衬厚度的关系。

关键词 公路隧道 病害整治 非常规岩爆 套衬补强 安全系数
中图分类号:U457 **文献标识码:A**

1 引 言

随着我国经济的快速增长,对交通的需求越来越大,公路的修建速度也相应增快。为了缩短公路里程,改善路线线形和交通运输条件,保护环境,山岭地区新建公路隧道的数量和里程也逐步增大。

我国地域辽阔,各类自然条件差异很大,隧道所穿越山体的工程地质及水文地质条件复杂多变,同时既有隧道又受修建时期的设计与施工技术条件的限制,隧道病害随着既有线隧道使用时间的增加和混凝土使用时间的增长也在不断发展,因此研究隧道病害的预防整治具有很强的紧迫性和必要性[1]。

2 工程概况

桃巴高速公路八庙隧道设计为双向四车道,设计时速80 km/h[2]。隧道左线长4 089 m,右线长4 088 m,隧道于2010年11月动工,2014年1月通车。隧道按新奥法施工原理进行洞身结构设计,即由系统锚杆、喷混凝土、钢筋网、钢架组成的初期支护与二次模筑混凝土相结合的复合式衬砌型式[3]。

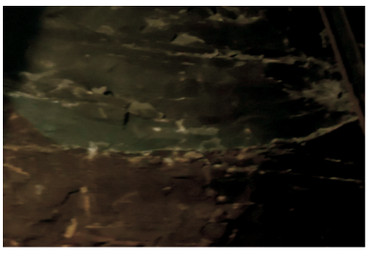
隧道右洞施工至K110+567附近时,揭露的围岩为砂泥岩互层,岩层产状接近水平,隧道埋深为312 m,围岩级别可达Ⅳ级,局部可达Ⅲ级。按原设计Ⅳ型衬砌结构施作的初期支护在刚施作后无明显变形,但经过一周或半个月后,可听到岩层产生“啪啪”的声响,初期支护突然开裂,格栅钢架扭曲变形,初期支护部分侵限(图1)。此种现象在八庙隧道Ⅳ级围岩段施工时经常发生,曾于2011年12月26日和2012年5月30日发生过比较严重的岩爆现象。

在砂泥岩互层等较软弱地层中发生岩爆地质现象是比较少见的。根据现场实际情况,结合监控量测和超前地质预报资料,经实验将八庙隧道K110+600~K110+900段由原设计Ⅳ型衬砌类型变更为Ⅳ^{加强变5}型衬砌施工,变更前后支护参数详见表1。

3 病害发展过程

3.1 病害的发现

修改稿返回日期:2018-09-03
基金项目:四川省交通科技项目“基于承载能力量化分析的公路隧道支护体系适应性研究”(2013C10-3);国家自然科学基金项目(51378434,51578456).
作者简介:王登茂(1965-),男,硕士研究生,高级工程师,主要从事公路规划勘察设计方面的工作,E-mail:377434767@qq.com.



（a）围岩开挖后情况

（b）初期支护施作半月后变形

图1　围岩状况及初期支护变形

Fig.1　State of surrounding rocks and deformation of primary support

2012年底，发现K110+600～K110+900段衬砌拱部出现多处蜘蛛网状交叉裂缝，肉眼观察缝宽在1 mm以内。据施工钻孔取芯柱状件，其缝深还未将二次衬砌裂通，有20 cm左右衬砌未形成裂缝（二次衬砌厚度40 cm）。施工单位在裂缝的两侧钻交叉口并采用钢针注环氧树脂浆充填封堵。整治完成后的情况见图2。

2014年11月，八庙隧道K110+600～K110+900段沥青路面出现两处开裂：（1）K110+682.4～K110+737.4段，行车道中线纵向裂缝，局部向右侧发展；（2）K110+752.4～K110+802.4段，行车道中线纵向裂缝，局部向右侧发展。裂缝长度为105 m，最大开裂缝宽1 cm。病害情况见图3。

3.2　病害发展过程

自2014年11月起，开始对K110+600～K110+900段隧道病害进行监测。

根据监测断面拱顶下沉及周边收敛监测数据来看，各监测断面二次衬砌变形值极小，均在规范允许范围之内，K110+600～K110+900段衬砌结构稳定。

现代隧道技术

表1　原设计及变更后支护参数

Table 1　Original and alternated support parameters

项目		衬砌类型	
		Ⅳ型	Ⅳ^{加强变5}型
超前支护	ϕ22药卷锚杆/cm	450@40	450@40
初期支护	C25喷混凝土/cm	18	24
	ϕ22药卷锚杆（纵×横）/cm	250（100×120）	300（80×100）
	钢筋网/cm	ϕ6.5@25	ϕ6.5@25（拱部90°范围内双层）
	钢架/cm	格栅10×15@100	I18@80
	预留变形量/cm	7	15
二次衬砌	拱墙/cm	40	40
	仰拱/cm	40	40

图2　2012年整治完成后的情况

Fig.2　Treatment completion in year 2012

监测的同时，也对该段隧道裂缝进行观察和记录，表象观测发现隧道衬砌裂缝发展明显，电缆槽沟壁破损数量逐渐增加，路面裂缝数量逐渐增加。隧道左洞出现裂缝的位置与右洞出现裂缝位置相对应。

现代隧道技术

3.3　病害检测结果

2016年6月，对八庙隧道右线K110+600～K110+900段及其对应的左线段进行了病害专项检测[4]。

3.3.1　外观检测

（a）路面开裂

（b）路面开裂细部

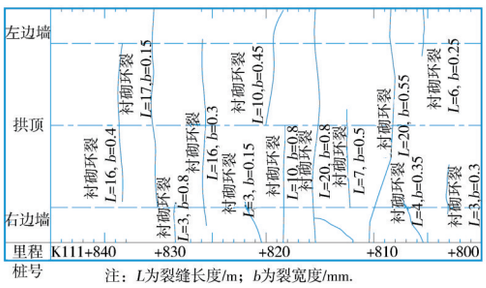
图3　2014年发生的路面开裂

Fig.3　Pavement cracking occurred in year 2014

（1）衬砌

检测区段内衬砌病害主要表现为开裂。共发现衬砌开裂194处，其中环裂146处，最长为全环开裂，最宽处达1.5 mm；纵裂25处，最长达10 m，最宽处达0.35 mm；斜裂缝21处，最长处达10 m，最宽处达1.1 mm；还有2处交叉裂缝，最宽达0.15 mm。所检纵向裂缝有两条（5 m）出现在拱腰位置，其余出现在边墙位置。

衬砌外观检测典型图详见图4。



注：*L*为裂缝长度/m；*b*为裂宽度/mm.

图4　衬砌外观检测结果典型图

Fig.4　Typical drawing of the inspection result of lining appearance

（2）路面检测

八庙隧道检测区段内路面病害主要表现为路面纵向开裂及隆起。共发现路面纵向开裂9处，最长达37 m，累计开裂长度达148 m。

（3）检修道检测

八庙隧道检测区段内检修道病害主要表现为检修道倾斜及破损。共发现6处病害，其中检修道倾斜达63 m，破损4处。检修道破损情况详见图5。

图5　检修道破损典型状况

Fig.5　Typical condition of damaged maintenance roadway

3.3.2　衬砌检查

（1）衬砌地质雷达检测

八庙隧道检测区段内二次衬砌发现脱空或空洞4处，共21 m；不密实19处，共109 m。

（2）衬砌强度检测

衬砌强度检测采用超声回弹综合法，检测结果显示八庙隧道左右线所测断面衬砌强度均满足设计强度要求。

（3）衬砌裂缝检测

在检测区段边墙衬砌裂缝处共选取7个部位进行边墙衬砌裂缝钻孔取样，其中5条裂缝宽度贯穿二次衬砌混凝土，2条裂缝未贯穿。

3.3.3　净空断面检测

隧道衬砌净空断面内，衬砌拱圈有1处断面右拱腰侵入内轮廓1.9 cm；检测断面均存在检修道变形，局部断面倾斜严重（内高外低）；检测断面路面均有不同程度的隆起，最大隆起量达26 cm。

4　隧道病害原因分析

通过搜集查阅八庙隧道设计文件及建设施工期间的相关资料，了解管养单位在隧道运营期间发现的病害情况，结合专项检查结果，分析产生病害的原因可能主要有以下几方面：

（1）高地应力作用

岩爆是深埋地下工程在施工过程中常见的动力破坏现象。当岩体中聚积的高弹性应变能大于岩石破坏所消耗的能量时，破坏了岩体结构的平衡，多余的能量导致岩石爆裂，使岩石碎片从岩体中剥离、崩出。常规岩爆一般发生在硬脆岩体高地应力地区，

现代隧道技术

具有埋深较大、岩体强度高的特点。

八庙隧道施工阶段，在穿越Ⅳ级围岩段时曾多次发生岩爆现象，结合隧道施工前后所表现的特点可以发现：八庙隧道岩爆现象为非常规岩爆，具有地应力较高、地应力释放速率不一致、变形较大等特点。

因该段地应力较高，地应力释放速率不一致，或因施工安全步距和施工工期要求，在应力未完全释放时就施作了二次衬砌；运营期间，围岩与隧道结构共同形成的承载环发挥的作用有限，应力作用在较软弱砂泥岩互层地层中的隧道结构上并持续释放，造成衬砌开裂、路面开裂、隆起等病害。

（2）地震作用

根据地震监测台网数据显示，自八庙隧道建成后，在隧址区200 km范围内先后发生了29次不同震级、不同震源深度的地震，对八庙隧道的结构产生了较大的影响。八庙隧道地应力较高，释放速率不一致，在地震作用力与较高地应力的耦合作用下导致八庙隧道结构应力重分布，产生衬砌及路面变形、开裂。

综上所述，八庙隧道右线K110+600～K110+900段及其对应的左线段发生病害的主要原因为，具有微层理的缓倾斜砂泥岩互层地层中长期缓慢释放的较高水平地应力以及与地震作用力的耦合作用。

5 隧道病害整治方案研究

结合八庙隧道工程地质条件、原设计方案、地应力检测情况、病害检测结果以及病害现状可知：八庙隧道右线K110+600～K110+900段及其对应的左线段发生病害的根本原因是结构受力不合理。故病害整治的首要任务是优化既有隧道衬砌结构。

5.1 既有隧道二次衬砌受力分析

（1）由施工期间隧道地应力测试成果[5]可知：

① 八庙隧道桩号K110+567处，岩体最大主应力为17.9 MPa，中间主应力为9.8 MPa，最小主应力为8.6 MPa。根据地应力的大小判断，八庙隧道区存在中等偏高的地应力。

② 八庙隧道K110+567处上覆岩体铅直向自重应力与实测垂直应力不一致，但相差不大，反映本区构造应力不强。K110+567处实测垂直应力与自重应力关系详见表2。

③ 最大主应力σ_1倾角为18.1°，方向为N79°W，隧道走向为正北向，最大主应力方向与隧道轴线呈大角度相交。

④ 将最大主应力分解，可以得出最大主应力在隧道平面内垂直于隧道轴线的分力为：σ_x=17.9 MPa×cos18.1°×sin79°=16.69 MPa。

表2 实测垂直应力与自重应力关系比较

Table 2 Comparison of measured vertical stress and dead weight stress

测点位置	埋深/m	上覆岩体重/MPa	实测σ_x/MPa	自重/实测百分比/(%)	说明
K110+567	312	6.708	10.56	63.52	岩体密度取2.15 g/cm^3

（2）既有隧道结构受力分析

取隧道断面进行二维结构分析[6,7]，结构荷载详见图6。

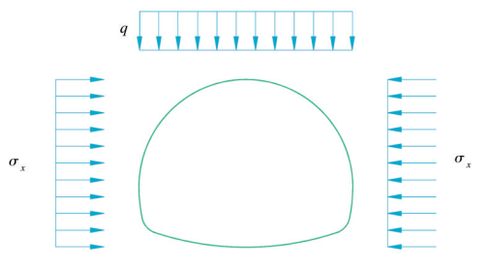


图6 隧道原二次衬砌结构受力图

Fig.6 Force borne by original secondary lining

根据《JTGD70-2004 公路隧道设计规范》[3]相关规定，侧压力系数：

$$\lambda=\sigma_x/q \tag{1}$$

式中：σ_x为侧向均布荷载；q为竖向均布荷载。假设结构所受荷载保持原始地应力比例，那么$\lambda=\sigma_x/q$=16.69÷10.56=1.58。

既有隧道二次衬砌结构为40 cm厚素混凝土，结构裂缝密集，因此可假设二次衬砌混凝土处于破坏临界状态，安全系数无限接近1。

根据规范[3]相关规定，当$e_0\leqslant 0.20h$时，系抗压强度控制承载能力：

$$K=\frac{\varphi\alpha R_a bh}{N} \tag{2}$$

式中：K为安全系数；h为截面高度；b为截面宽度；R_a为混凝土抗压极限强度，按照规范取值；φ为构件纵向弯曲系数，可取为1；α为轴向力的偏心影响系数。

当$e_0>0.20h$时，系抗拉强度控制承载能力：

$$K=\varphi\frac{1.75R_l bh}{\left(\frac{6e_0}{h}-1\right)N} \tag{3}$$

式中：R_l为混凝土抗拉极限强度。

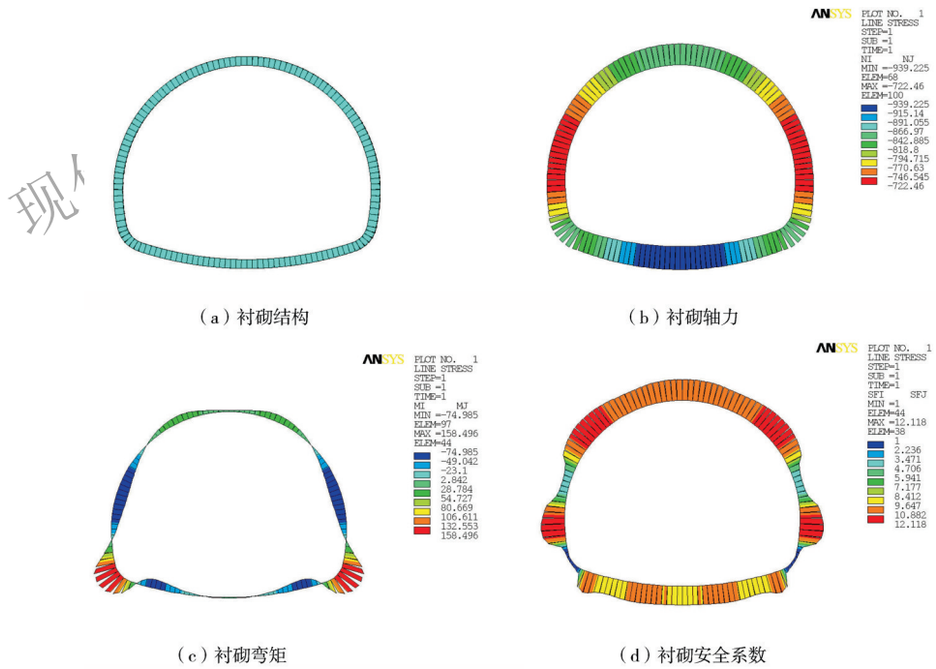
通过ANSYS有限元进行试算，当K=1时，侧向均布荷载σ_x=97.95 kN/m，竖向均布荷载q=154.76 kN/m。

衬砌结构及其受力图详见图7。

5.2 衬砌补强方案

八庙隧道病害段落局部衬砌病害较为严重。根据类似工程的经验分析，该段衬砌二次衬砌强度已不满足要求，需进行增设套衬处理。处理方式详见图8。

工程应用中，首先将既有混凝土表面进行凿毛，然后用模板台车浇筑混凝土。套衬拱脚位置设置ϕ25砂浆锚杆，锚杆与套衬钢筋焊接牢固。



（a）衬砌结构　（b）衬砌轴力

（c）衬砌弯矩　（d）衬砌安全系数

图7　隧道二次衬砌结构及受力图

Fig.7　Tunnel secondary lining structure and loading

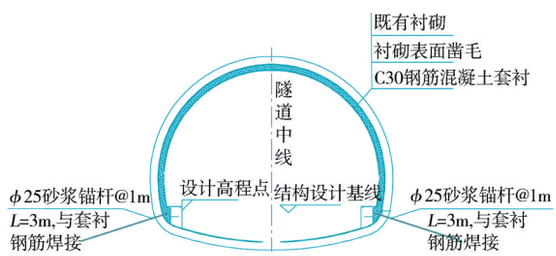


图8　隧道增设套衬补强方案

Fig.8　Tunnel reinforcement by additional lining

套衬现浇混凝土拟配置双层钢筋。根据钢筋保护层要求及隧道建筑限界要求，套衬厚度可在15～35 cm之间取值。为了使套衬结构在受力最优的条件下尽可能节约成本，需对增设套衬的结构进行受力计算。

由于补强钢筋混凝土套拱与原二次衬砌作为整体结构受力达到极限状态时，内层钢筋的力学状态难以评估，因此计算时仅将其作为安全储备，故素混凝土受压构件钢筋混凝土套拱（双层钢筋）补强结构可简化为素混凝土受压构件钢筋混凝土套拱（单层钢筋）补强结构[7]，简化模型详见图9。

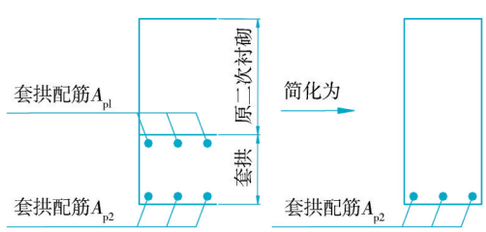


图9　套拱补强后计算模型简化示意

Fig.9　Simplified diagram of calculation model after reinforcement by additional arch

施作套拱后衬砌受力情况详见图10，由基本公式（4）可以推得结构安全系数K的计算公式（5）。

$$\left.\begin{aligned} KNe &= \alpha_r R_w bx\left(h_0 - \frac{x}{2}\right) \\ KN &= \alpha_r R_w bx - R_p A_p \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

$$K=\frac{\alpha_r R_w b(h_0-e)-R_p A_p+\sqrt{\left[\alpha_r R_w b(h_0-e)-R_p A_p\right]^2-R_p A_p(1-2h_0\alpha_r R_w b)}}{N} \tag{5}$$

式中：α_r为原结构承载力折算系数，结合现场隧道病害情况[4]，参照表3折减系数取值为0.7；R_p为新增钢筋的极限抗拉强度；A_p为新增钢筋的截面面积。

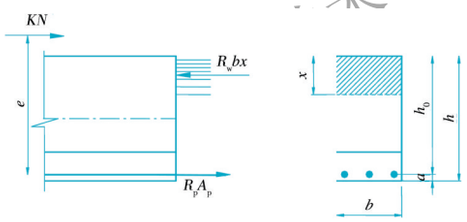


图10　套拱补强后结构受力示意

Fig.10　Force on structure after reinforcement by additional arch

表3　隧道原结构承载力折算系数α_r

Table 3　Conversion coefficients α_r of bearing capacity of tunnel original structure

病害评价等级	5类	4类	3类
素混凝土衬砌α_r	0.8	0.7	0.6

通过ANSYS有限元进行结构计算，荷载值取原结构安全系数为1时，求得的侧向均布荷载σ_x=97.95 kN/m,竖向均布荷载q=154.76 kN/m。

在上述荷载条件下，套衬厚度按取值15～35 cm依次进行计算，可得出安全系数随套衬厚度变化曲线，如图11所示。

由图11可知，在15～35 cm区间内，当套衬厚度取27 cm时，衬砌结构安全系数最优，为1.481。

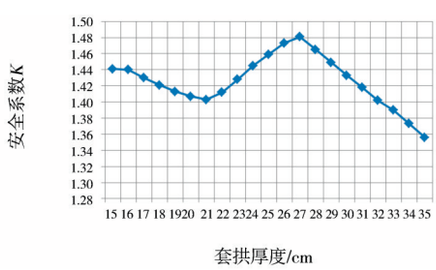
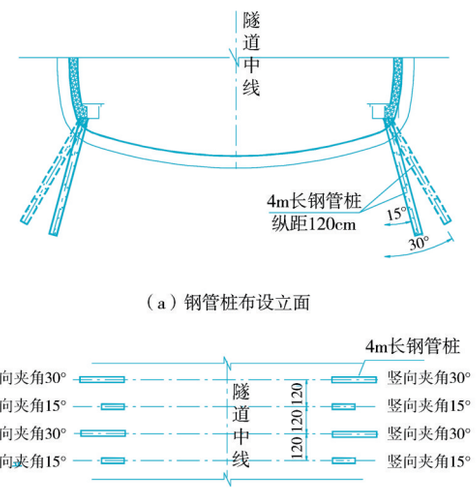


图11　安全系数随套衬厚度变化曲线

Fig.11　Curve of safety factor varying with thickness of additional lining

5.3　钢管桩补强方案

结合结构受力状态，从增加套衬后的安全系数变化图中可以看出，增设套衬后结构拱脚位置弯矩最大，为安全系数的薄弱点，故考虑在拱脚位置增设钢管桩。增设钢管桩设计方案详见图12。



（a）钢管桩布设立面

（b）钢管桩布设平面

图12　隧道增设钢管桩补强方案

Fig.12　Scheme of additional reinforcement by steel-pipe pile

6　结论

（1）八庙隧道右线K110+600～K110+900段及其对应的左线段发生病害的主要原因为：在具有微层理的缓倾斜砂泥岩互层地层中长期缓慢释放的较高水平地应力，以及与地震作用力的耦合作用。

（2）在今后类似八庙隧道砂泥岩互层的较软弱地层中发生非常规岩爆地段，应加强初期支护措施，采用钢筋混凝土二次衬砌。

（3）素混凝土受压构件钢筋混凝土套拱（双层钢筋）补强结构可简化为素混凝土受压构件钢筋混凝土套拱（单层钢筋）补强结构，内层钢筋作为安全储备。

（4）结构安全系数并非随套衬厚度增加而线性增大，设计中应通过计算进行比选。

参考文献

References

[1] 滕振楠. 隧道结构裂缝病害评价及治理方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
TENG Zhennan. Research on Evaluation and Treatment Methord of Tunnel Structural Cracks Disease[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[2] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. 四川省桃园(川陕界)至巴中高速公路八庙隧道两阶段施工图设计文件[R]. 成都:2010.
Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute. Two-stage Construction Drawings of the Bamiao Tunnel on Taoyuan-Bazhong Highway in Sichuan Province[R]. Chengdu: 2010.
[3] 中华人民共和国国家标准. 公路隧道设计规范:JTG D70-2004)[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
National Standard of the People's Republic of China. Code for Design of Road Tunnel: JTG D70-2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
[4] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. 巴陕高速八庙隧道病害区段专项检查报告[R]. 成都:2016.
Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute. Special Inspection Report on the Bamiao Tunnel Disease Section of Bazhong-Shanxi Highway[R]. Chengdu: 2016.
[5] 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室. 四川省桃园(川陕界)至巴中高速公路八庙隧道地应力测试报告[R]. 成都:2011.
State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection. Crustal Stress Test Report of Bamiao Tunnel on Taoyuan-Bazhong Highway in Sichuan Province[R]. Chengdu: 2011.
[6] 田志宇,林国进,张兆杰. 全自动隧道结构计算软件SDC在支护参数优化中的应用[C]// 2013年全国公路隧道学术交流会论文集. 重庆:重庆大学出版社, 2013.
TIAN Zhiyu, LIN Guojin, ZHANG Zhaojie. Application of Fully Automated Calculation Software SDC for Support Parameters Optimization of Tunnel Structure [C]// Proceedings of 2013 Symposium on National Highway Tunnel Academic Exchanges. Chongqing: Chongqing University Press, 2013.
[7] 田志宇,林国进,丁 尧,等. 隧道全自动结构计算软件SDC的研发与应用[J]. 现代隧道技术, 2014 (2): 30-34.
TIAN Zhiyu, LIN Guojin, DING Yao, et al. Development and Application of Fully Automated Calculation Software SDC for Tunnel Structures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014 (2): 30-34.
[8] 田志宇,林国进,杨 枫,等. 隧道不同支护体系的支护效果模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2018 (2): 134-139.
TIAN Zhiyu, LIN Guojin, YANG Feng, et al. Experimental Test of Support Effect of Different Tunnel Support Systems[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018 (2): 134-139.
[9] 田志宇,林国进,吴庆发,等. 对《JTG D70-2004 公路隧道设计规范》结构计算部分条文的修改意见[J]. 现代隧道技术, 2017 (5): 13-17.
TIAN Zhiyu, LIN Guojin, WU Qingfa, et al. Suggestions for Revision of Some Clauses of Structure Calculations in the "JTG D70-2004 Code for Design of Road Tunnels"[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017 (5): 13-17.
[10] 田志宇,杨 枫,张兆杰,等. 对《JTG D70-2010 公路隧道设计细则》结构计算部分条文的修改意见[J]. 现代隧道技术, 2017 (6): 1-7.
TIAN Zhiyu, YANG Feng, ZHANG Zhaojie, et al. Opinions on Amendments to Partial Provisions for Tunnel Structure Calculation in "JTG D70-2010 Guidelines for Design of Road Tunnel" [J]. Modern Tunnelling Technology. 2017 (6): 1-7.

Reflection on Disease Treatment and Design Issues of Unconventional Rockburst of Bamiao Tunnel on Taoyuan-Bazhong Highway

WANG Dengmao TENG Zhennan TIAN Zhiyu CHEN Zhixue
(Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey Design and Research Institute, Chengdu 610041)

Abstract The maximum buried-depth of Bamiao tunnel on Taoyuan-Bazhong highway is 312 m, the rock stratum is nearly of horizontal form and it presents as interbed of sand and mudstone. Unconventional rockburst events occurred during the tunnel construction, and a series of diseases were found at these sections after operation. The causes of the diseases were summarized by analyzing the phenomena and data as well as the results of special tunnel inspection. Based on the on-site geostress test results during construction, it was assumed that the seriously cracked secondary lining was in the critical state of failure, thus the load borne by the structure was deduced. The formula for calculating safety coefficient of concrete structure with additional lining was deduced, and the relationship between the safety coefficient of tunnel with additional lining and the thickness of additional lining was obtained.

Keywords Highway tunnel; Disease treatment; Unconventional rockburst; Reinforcement by additional lining; Safety Coefficient