

不同开挖方法下炭质板岩隧道围岩稳定性及结构可靠度分析*

晋婉晴, 陈洁金, 胡敏

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 根据云南海巴洛隧道的开挖方法及支护方式, 采用 MIDAS GTS/NX 建立三维数值模型, 模拟台阶法与三台阶预留核心土法的施工过程, 对比分析 2 种开挖方法下围岩位移、塑性区及隧道衬砌结构内力, 并采用 MATLAB 编写蒙特卡洛直接抽样法程序, 计算在抗压、受拉开裂条件下结构可靠度。结果表明, 围岩位移变化模拟结果与现场监控量测结果较吻合; 三台阶预留核心土法施工对围岩的扰动更小, 能更好地控制围岩位移, 更适合炭质板岩隧道施工, 该施工方法下隧道衬砌结构的可靠度指标大于目标可靠度指标, 可获得较稳定的隧道整体结构。

关键词: 隧道; 炭质板岩隧道; 三台阶预留核心土法; 台阶法; 围岩稳定性; 结构可靠度

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)04-0170-05

海巴洛隧道是云南省香格里拉至丽江高速公路的重点控制性工程, 所在地区地质构造复杂, 揭露围岩主要为强、全风化炭质板岩, 薄层状结构, 节理裂隙、地下水一般发育。围岩强度较低、水理性质较差, 遇水易软化、崩解, 自稳能力极差, 易受扰动。适用于炭质板岩隧道的施工方法有台阶法、三台阶预留核心土法、CD 法和中导洞法等, 这些方法各有优缺点。以该隧道的地质环境条件为主要依据, 同时考虑其断面尺寸、施工技术水平、造价及工期等, 进口段选取施工速度快、工序简单的台阶法施工, 若开挖段较软弱, 可预留核心土来保证开挖掌子面的稳定性。该文采用有限元软件建立三维模型, 分析左线进口段采用台阶法与三台阶预留核心土法施工的过程, 对比分析 2 种施工方法下围岩位移、塑性区及衬砌结构内力。

目前隧道衬砌结构可靠度计算方法有一次二阶矩法、随机有限元法、蒙特卡洛法、响应面法等。其中矩法的高度非线性的功能函数很难处理, 且精度不高, 有一定误差; 响应面法和随机有限元法需编制特定的程序, 比较复杂。而蒙特卡洛法不会受非正态分布随机变量及非线性功能函数的限制, 相对于其他方法, 只要模拟次数够多, 就是一种较精确的方法。而且 MATLAB 可实现蒙特卡洛直接抽样法编程, 不受复杂编程和算法的困扰。因此, 依据有限元模拟所得衬砌结构的轴力与弯矩, 采用 MATLAB

编写蒙特卡洛直接抽样法程序, 计算在抗压、受拉开裂条件下二次衬砌结构的可靠度。

1 基本原理及方法

1.1 隧道衬砌结构的极限方程

衬砌截面的破坏可作为建立隧道衬砌结构极限状态方程的依据, 但衬砌截面的破坏由衬砌强度决定, 可能出现压碎或拉裂 2 种不同的破坏形式。因此, 根据衬砌截面抗压和抗拉检算式分别建立衬砌截面抗压极限状态方程和抗拉极限状态方程。

当偏心矩 $e_0 \leq 0.2h$ 时, 将截面抗压强度条件视为承载能力极限, 功能函数为:

$$g_1(x) = N_{\text{极限}} - N = K_R \alpha b h R_a - N \quad (1)$$

式中: $N_{\text{极限}}$ 为衬砌砼能承受的极限轴力, 即结构抗力; N 为数值模拟求出的截面轴力, 即作用效应; K_R 为抗力项的计算模式不定性; α 为偏心影响系数; b 为截面纵向宽度, 取 1 m; h 为截面厚度; R_a 为砼抗压强度。

当偏心矩 $e_0 > 0.2h$ 时, 将截面受拉开裂条件视为承载能力极限, 功能函数为:

$$g_2(x) = N_{\text{极限}} - N = 1.75 R_l - K_s \left(\frac{6M}{bh^2} - \frac{N}{bh} \right) \quad (2)$$

式中: R_l 为砼抗拉极限强度; K_s 为荷载项的计算模式不定性; M 为数值模拟求出的截面弯矩。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51908065)

1.2 蒙特卡洛法基本原理与 MATLAB 实现

蒙特卡洛法又称随机抽样法,主要包括直接抽样法、重要抽样法等,较适用于计算隧道衬砌结构可靠度。MATLAB 是优秀的商业数学软件,可实现蒙特卡洛直接抽样法编程。该软件提供了多种分布类型的随机变量发生器,不必复杂地编程,就可生成实际工程所需分布类型的随机数,直接产生变量 x_i ,然后代入功能函数进行计算,极大提高了运算效率,也使蒙特卡洛法在工程中应用更广泛。基于蒙特卡洛法与 MATLAB 计算隧道衬砌结构可靠度的步骤与方法参考文献[8—10]。文中用到的随机变量生成随机数的指令为 $r = \text{normrnd}(Mu, Sigma, m, n)$,表示产生服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 分布的 m 行 n 列随机变量数组 r 。

基本思路:先把功能函数 $g(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 中的各随机变量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 进行大量随机抽样,然后用这些随机抽样值生成函数产生 $m \times n$ 组随机变量数组,将这些数组代入功能函数,统计其结果小于零的个数 K ,则失效概率 $P_f = K / (m \times n)$,可靠度指标 $\beta = -\phi^{-1}(P_f)$ 。

2 隧道现场监控量测

海巴洛隧道左幅进口段 ZK66+307 断面开挖宽度为 12.5 m,高度为 10.2 m,埋深为 195 m。采用复合式衬砌,初期支护采用厚度为 25 cm 的 C25 喷射砼、间距为 60 cm 的 $H200 \times 200$ 钢拱架,二次衬砌采用厚度为 50 cm 的 C30 模筑钢筋砼。采用台阶法开挖,下台阶开挖落后上台阶约 10 m,二次衬砌施作落后下台阶开挖 15 m,开挖进尺为 1.6 m/d。

选取 ZK66+307 断面对洞身水平收敛和拱顶沉降进行监测,监测结果图 1、图 2。结合现场施工分析,第 8 d 上台阶开挖完毕,此时拱顶沉降为 56 mm,水平收敛为 26 mm;之后下台阶开挖,从 13 d 起变形增加量逐渐减缓;到 21 d 时,拱顶沉降达到 84 mm,水平收敛为 44 mm,围岩变形趋于平稳。可见,台阶法施工的位移量在上台阶施工时变化速率最快,随着下台阶开挖完成,二次衬砌及时闭环,拱顶沉降及水平收敛得到抑制,位移增速逐渐减缓,变形趋于稳定。

3 隧道数值模拟及支护结构可靠度计算

3.1 建立隧道开挖支护模型

根据海巴洛隧道的开挖方法及支护方式,采用

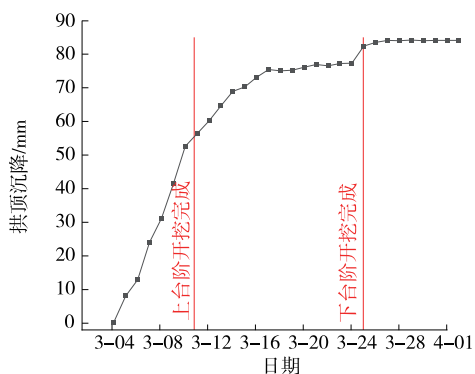


图 1 隧道断面拱顶沉降曲线

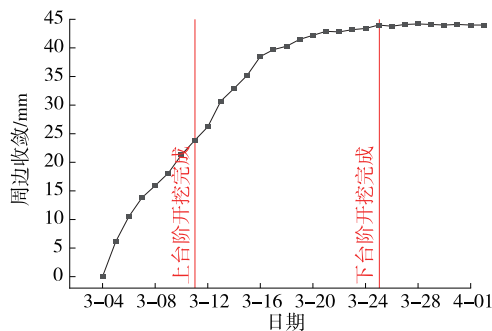


图 2 隧道断面洞身水平收敛曲线

MIDAS GTS/NX 进行三维数值分析。计算模型尺寸选取 3~5 倍洞径,隧道横向(x 方向)取 120 m,沿洞轴(y 方向)长度取 30 m,上下边界(z 方向)长度取 100 m,隧道埋深取 50 m,上覆剩余土体自重通过在上表面施加 2.9 MPa 竖向压力来模拟。模型底部固定约束,侧面法向约束,上表面设为自由边界,并施加等效荷载(见图 3)。

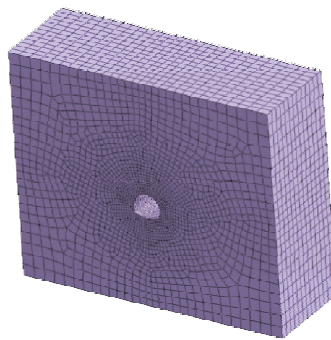


图 3 隧道三维数值模拟模型

围岩为薄层炭质板岩,比起摩尔—库伦准则,更适合采用广义 Hoek—Brown 强度准则。Hoek—Brown 强度准则确定了岩石发生屈服破坏时的应力关系式,可较好地反映岩体的非线性破坏特征,其应力关系式中的岩石参数可较好地反映由于层理

面、结构面的存在引起的围岩强度降低,较适用于节理裂隙发育岩体。该强度准则针对原有准则中的不足,在缺少现场试验数据的情况下,根据大量工程经验引入2个相关系数,可准确估计各类岩体的力学性质,更好地描述岩体软硬程度及完整性。根据既有地质强度指标表,结合隧道揭露围岩地质水文条件,确定地质强度指标 GSI 的取值为50、板岩岩石类型 m_i 的取值为9、扰动参数 D 的取值为0.5。输入参数可由有限元软件自动算出 m_b (岩石的材料常

数,反映岩石的坚硬程度)、 s (Hoek—Brown 经验参数,反映岩体的破碎程度)、 a (岩石的材料常数)。

围岩采用各向同性的广义 Hoek—Brown 本构模型,初期支护、锚杆和二次衬砌采用各向同性的弹性本构模型模拟。采用 Solid 单元模拟围岩作用;支护结构参数采用等效法予以考虑,将钢拱架的弹性模量折算至初期支护喷射砼;采用 Shell 单元模拟初期支护、二次衬砌的作用,并用弹性连接模拟其复合衬砌结构的作用。模拟计算参数见表1。

表1 数值模拟计算参数

材料及构件	弹性模量/GPa	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	m_b	s	a
炭质板岩	0.5	20.0	0.4	0.83	0.001 3	0.506
初期支护	30.2	25.0	0.2	—	—	—
锚杆	210.0	78.5	0.2	—	—	—
二次衬砌	31.0	25.0	0.2	—	—	—

3.2 隧道施工方法模拟

该隧道进口段围岩级别为Ⅳ级,受开挖施工方法影响较大。模拟台阶法和三台阶预留核心土法的施工过程,对2种工法下隧道围岩稳定性进行比较分析,模拟模型见图4、图5。

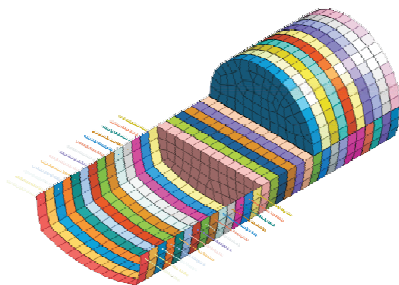


图4 台阶法数值模拟模型

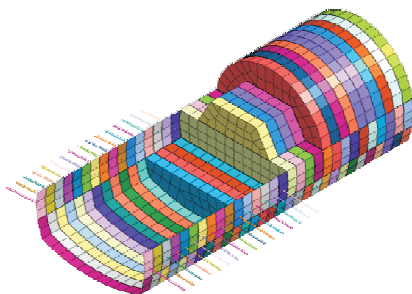


图5 三台阶预留核心土法数值模拟模型

台阶法的模拟施工步骤:1) 开挖上台阶并施作初期支护及锚杆,上台阶高6 m、长6 m;2) 开挖下台阶并施作初期支护及锚杆,下台阶高4 m,及时施作仰拱;3) 隧道开挖完成,进行仰拱回填,施作二次衬砌(落后下台阶15 m)。循环进尺为2 m,每步开

挖完成及时施作对应部位的初期支护及锚杆,应力一次释放,施工阶段以隧道部分全部开挖完成为止。

三台阶预留核心土法的模拟施工步骤:1) 上台阶开挖,预留核心土,及时施作初期支护及锚杆,上台阶高5 m、长4 m,核心土每2 m开挖一次;2) 错开开挖核心土及中台阶,并施作边墙初期支护及锚杆,中台阶高度2.5 m、长4 m;3) 开挖下台阶并施作初期支护及锚杆,下台阶高2.5 m;4) 隧道开挖完成,进行仰拱回填,施作二次衬砌(落后下台阶15 m)。循环进尺为2 m,每步开挖完成及时施作对应部位的初期支护及锚杆,应力一次释放,施工阶段以隧道部分全部开挖完成为止。

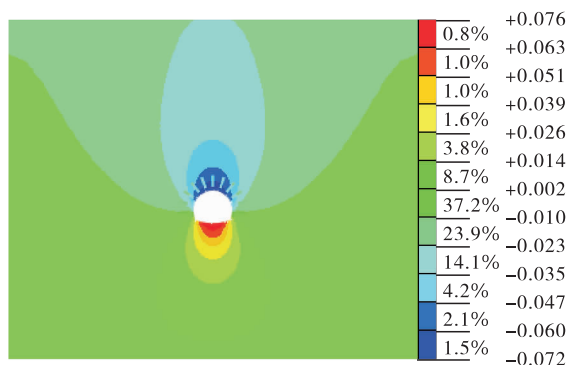
3.3 数值模拟结果分析

3.3.1 围岩位移分析

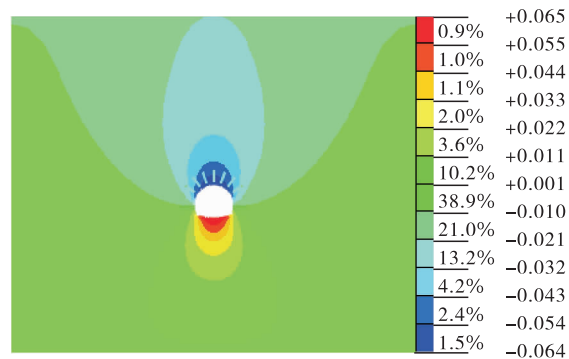
图6、图7分别为台阶法、三台阶预留核心土法施工时围岩总竖向位移和水平位移。由图6、图7可知:采用台阶法、三台阶预留核心土法施工时,施工完成后,拱部沉降较大,分别为0.076、0.065 m;仰拱的隆起值最大,分别为0.072、0.064 m;水平收敛最大值位于边墙中下处,分别为0.040、0.038 m。

取 $y=10$ m 处断面为监测断面,考虑2种施工方法下分部开挖的每阶段拱顶沉降,研究整个施工过程中拱顶下沉值。图8为该断面拱顶下沉曲线。由图8可知:仅上台阶开挖时,台阶法拱顶沉降为0.041 m,占开挖过程总沉降的59.3%;三台阶预留核心土法上台阶开挖时,拱顶沉降为0.033 m,占总沉降的53.2%;随着下台阶开挖完成,沉降增幅逐渐减小;之后二次衬砌开始施作,沉降几乎不再增长,

渐渐趋于稳定。拱顶沉降主要发生在上台阶开挖。

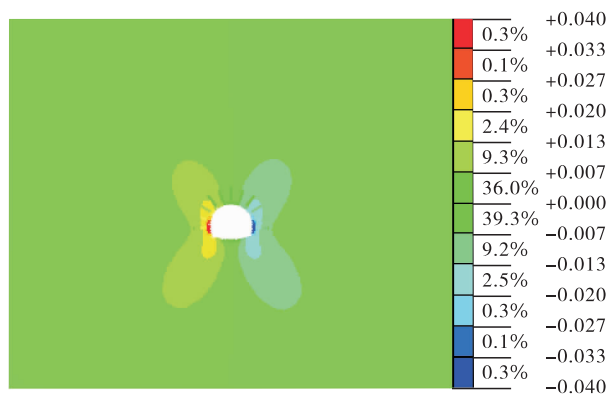


(a) 台阶法

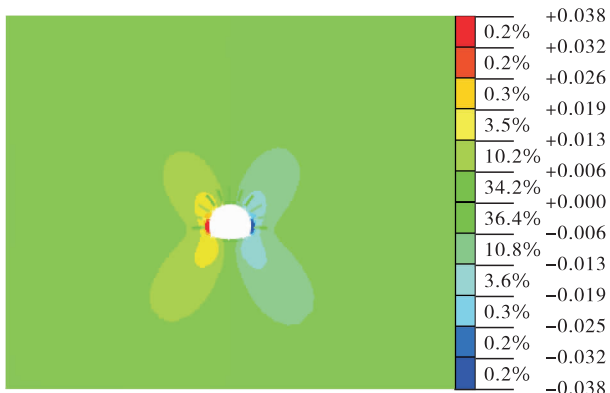


(b) 三台阶预留核心土法

图 6 不同开挖方法下围岩总竖向位移云图(单位:m)



(a) 台阶法



(b) 三台阶预留核心土法

图 7 不同开挖方法下总水平位移云图(单位:m)

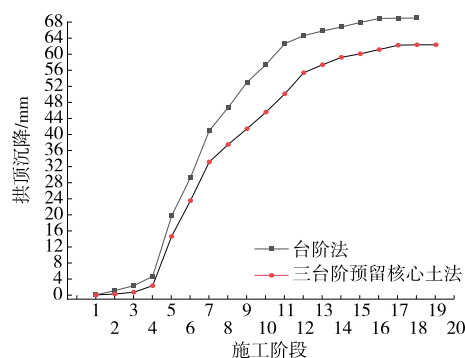


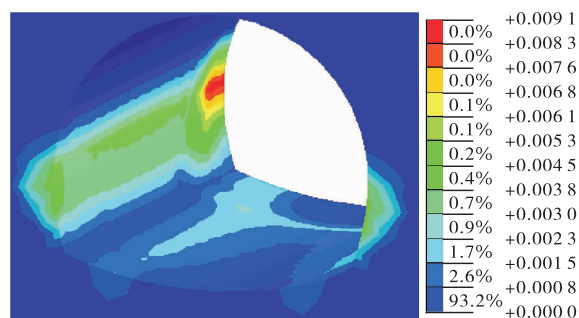
图 8 隧道断面拱顶沉降曲线

对比台阶法模拟的围岩位移变化结果与现场监控量测结果,其变化规律相同,最终位移值也较吻合;模拟沉降值和水平收敛值偏小,这是由于模拟过程中省略简化较多,如未考虑水的作用。但总体相差较小,证明了数值模拟的准确性。

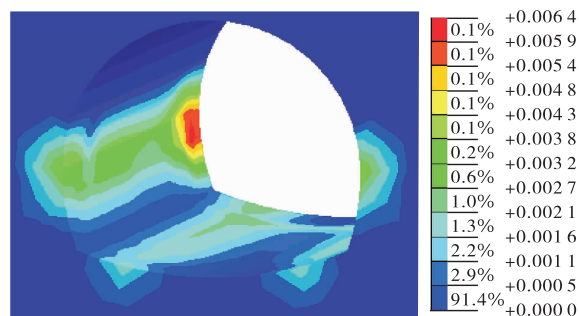
台阶法的总竖向位移及总水平收敛大于三台阶预留核心土法,这是由于隧道开挖段的围岩是薄层板岩,较软弱,采用预留核心土法相当于减小了每次隧道开挖掌子面的开挖面积,上台阶开挖时对围岩的扰动减小了很多,可增强掌子面的稳定性,并缩短台阶间的开挖步距,加上及时进行初期支护,更能有效控制围岩位移。

3.3.2 围岩塑性区分析

图 9 为台阶法、三台阶预留核心土法施工时围岩有效塑性应变。



(a) 台阶法



(b) 三台阶预留核心土法

图 9 不同开挖方法下围岩有效塑性应变云图

由图9可知:隧道施工完成后,2种方法施工时的塑性区均发生在拱脚附近及台阶开挖衔接处,且塑性应变最大值出现在台阶开挖衔接处,分别为0.009 1、0.006 4。说明这些部位属于薄弱部位,较易发生破坏,应重点关注,加强监测,及时支护,必要时采取加固措施。三台阶预留核心土法的有效塑性应变值比台阶法的小,主要是因为其台阶长度比台阶法短,可快速有效地施作初期支护,围岩直接暴露在外的时间短,更有利于围岩的稳定。

3.3.3 二次衬砌结构内力

取 $y=10\text{ m}$ 处断面作为监测断面,分别提取拱顶、拱脚、拱腰和拱底位置二次衬砌的轴力、弯矩,结果见表2。

表2 衬砌结构重点部位的内力值

部位	轴力/kN		弯矩/(kN·m)	
	三台阶法	三台阶预留核心土法	三台阶法	三台阶预留核心土法
拱顶	-1 815.02	-1 488.74	10.87	6.39
拱腰	-461.28	-300.47	-30.63	-21.99
拱脚	-1 436.87	-812.36	172.39	132.43
拱底	-162.24	-92.01	5.70	2.71

由表2可知:由于施工步骤不同,2种施工方法下结构内力最大值出现的部位存在差异,但台阶法结构内力值始终较大,相比三台阶预留核心土法,台阶法施工时二次衬砌结构更容易达到极限强度,也就更容易发生破坏。

综上,对比围岩位移、应力及二次衬砌结构内力,三台阶预留核心土法施工对海巴洛隧道进口段围岩的扰动更小,施工过程中围岩变形、二次衬砌结构内力较小,更适合该隧道。

3.4 隧道支护结构可靠度计算

针对隧道衬砌结构分别按抗压、抗裂条件要求建立功能函数[见式(1)、式(2)], K_R 、 K_s 、 R_a 、 R_l 、 h 根据文献[13]取值,其统计特征见表3。

表3 基本随机变量的统计特征值

随机变量	均值	变异系数	分布类型
R_a	25.98 MPa	0.14	正态
R_l	4.2 MPa	0.12	正态
K_s	1	0.20	正态
K_R	1	0.20	正态
h	0.5 m	0.15	正态

利用 MATLAB 编写蒙特卡洛直接抽样法程序,将表3中随机变量值代入功能函数,然后将有限

元模拟求得的二次衬砌结构轴力和弯矩输入 MATLAB 程序,采用蒙特卡洛法进行 100 万次直接抽样,求得支护结构可靠度(见表4)。

表4 不同开挖方法下衬砌结构可靠度计算结果

开挖方法	结构可靠度	
	抗压条件下	抗裂条件下
台阶法	4.365 0	3.965 4
三台阶预留核心土法	4.692 6	4.253 4

根据文献[14]提出的隧道衬砌承载能力极限状态目标可靠度指标,安全等级为二级时目标可靠度指标为 4.2,安全等级为一级或三级时目标可靠度指标相应提高或降低 0.5。与表3对比,三台阶预留核心土法施工的二次衬砌结构可靠度指标均满足要求。在相同支护参数条件下,三台阶预留核心土法由于每阶段的开挖面积较小,对围岩的扰动较小,增强了掌子面的稳定性,引起的围岩位移及应力较小,二次衬砌结构更稳定。

4 结论

采用 MIDAS GTS/NX 建立三维数值模型,模拟台阶法与三台阶预留核心土法的施工过程,分析 2 种施工方法下围岩位移和塑性区及二次衬砌结构内力,并利用 MATLAB 编写蒙特卡洛直接抽样法程序,计算 2 种施工方法下衬砌结构在抗压、抗裂条件下的可靠度。得出以下结论:

(1) 海巴洛隧道开挖施工过程模拟结果与现场实测数据相差不大,变化规律一致。其拱顶沉降主要发生在上台阶开挖阶段,减小上台阶开挖对隧道的扰动可有效减小围岩变形。

(2) 对于海巴洛炭质板岩隧道,采用三台阶预留核心土法施工时拱顶沉降和仰拱隆起值均小于台阶法开挖,预留核心土法更能有效控制围岩位移。

(3) 2 种施工方法下,隧道围岩塑性区均发生在台阶开挖衔接处及拱脚附近,说明这些部位较脆弱,施工时必须及时支护,实时监测,必要时采取加固措施。

(4) 在相同支护参数下,采用三台阶预留核心土法施工时二次衬砌结构的可靠度满足规范要求,衬砌结构不易破坏,可获得较稳定的隧道整体结构。

参考文献:

- [1] 汪冬兵,杨易莹.大断面黄土隧道台阶法施工数值模拟(下转第 179 页)

输时挂倒电线杆阻碍车辆通行,造成合计约5 h交通中断和周边部分村镇断电外,未发生过人员伤亡事故和其他严重交通拥堵事件,较圆满地完成了安全生产目标任务。

分析施工期间交通事故与交通拥堵形成原因,除驾驶员疲劳驾驶或操作不当等直接原因外,也与水稳层及路面下面层和中分带的非封闭占道施工期间对车速缺乏连续执法监管有关,导致部分车辆的实际行驶速度仍高达90~110 km/h,易引起车辆频繁穿插超越及相互干扰。在工程项目以后阶段的扩建施工中应重点加强对施工段交通管制期间的车速管控,采用区间限速并适当增加执法监测设备。

5 结论

(1) 成乐高速公路扩建工程试验段采用半幅封闭单向通行交通组织方案,将乐山往成都方向车流分流至周边路网,较好地解决了项目合同工期短和路网分流条件不平衡等难题,确保了区域高速交通在施工期间的正常运行。

(2) 在施工路段完善交通诱导信息、设置水马+新泽西护栏混合隔离、集中拆除原跨线天桥和沿线电力杆线等措施,有效隔离施工作业与车辆通行,最大限度降低了施工过程交通安全风险,维持了施工路段基本通行能力,提高了工程施工效率。

参考文献:

- [1] 王森.安新高速公路改扩建工程交通组织研究[J].公路,2006(10):135—137.
- [2] 汪超.佛开高速公路改扩建工程交通组织设计[J].公路,20126(2):27—32.
- [3] 贺海,袁继东,姚晓春.津滨高速公路改扩建工程施工期间交通组织研究[J].中外公路,2011,31(2):273—276.
- [4] 陈礼彪,邬晓光,苏兴矩,等.厦蓉高速公路改扩建工程交通组织方案研究[J].工程管理学报,2020,34(3):61—66.
- [5] 张明武.高速公路双喇叭互通式立交改扩建方案研究[J].交通科技,2012(5):106—108.
- [6] 马小虎.高速公路互通式立交改扩建交通组织研究[D].西安:长安大学,2019.
- [7] 邱礼球,何启龙,李艺林,等.高速改扩建交通组织评价指标构成研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,34(6):316—318.
- [8] 霍东芳,张生瑞,任杰.高速公路改扩建施工期交通组织方案评价指标体系研究[J].交通标准化,2010(增刊):101—104.
- [9] 叶云,黄磊.高速公路多肢交汇枢纽互通交通设施设置研究[J].公路与汽运,2020(2):50—51.

收稿日期:2021-01-12

(上接第174页)

- 研究[J].路基工程,2017,32(4):155—161.
- [2] 马云锋,唐前松,周勇,等.基于随机有限元理论的连拱隧道结构可靠性分析[J].矿冶工程,2012,32(6):5—8.
 - [3] 张道兵,杨小礼,朱川曲,等.基于最大熵原理与最优化方法的隧道衬砌结构可靠度分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(2):663—668.
 - [4] 张健,田平.隧道初期支护可靠度分析[J].黑龙江交通科技,2017(1):136—137.
 - [5] 赵旭峰,王春苗.应用有限元响应面法分析地下结构可靠度[J].地下空间与工程学报,2006,2(4):551—555.
 - [6] 杨悦,陈孝国,高霞,等.基于神经网络—蒙特卡洛法的隧道衬砌可靠度研究[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2017,33(1):61—65.
 - [7] 罗跃锋.大华山隧道围岩稳定性及结构可靠度研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.
 - [8] 朱川曲,张道兵,朱海燕.基于 Monte Carlo 模拟法的煤巷锚杆支护结构可靠性分析[J].中国安全科学学报,2008,18(4):146—150.
 - [9] 张道兵,杨小礼,朱川曲.基于可靠度理论与 Matlab 的隧道衬砌结构设计与分析[J].采矿与安全工程学报,2011,28(2):323—327.
 - [10] 张明,金峰.结构可靠度计算[M].北京:科学出版社,2015.
 - [11] 袁永才,王美霞,石少帅,等.基于 Hoek—Brown 准则的山岭隧道围岩力学参数估计[J].地下空间与工程学报,2017,13(1):22—28.
 - [12] 苏永华,封立志,李志勇,等. Hoek—Brown 准则中确定地质强度指标因素的量化[J].岩石力学与工程学报,2009,28(4):679—686.
 - [13] 陈志强.某公路隧道施工过程数值模拟及结构可靠度分析[D].长沙:中南大学,2010.
 - [14] 赵东平,喻渝,赵万强,等.铁路隧道衬砌目标可靠指标研究[J].铁道工程学报,2015,32(6):51—56.

收稿日期:2020-09-21