

文章编号:1005-0523(2014)03-0023-06

浅埋软弱隧道下穿重载道路变形规律与控制研究

吴东鹏¹, 杨新安¹, 吴冲²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 神华包神铁路集团公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:以巴准铁路敖包沟隧道为依托, 基于FLAC^{3D}软件, 采用摩尔-库伦弹塑性模型, 对浅埋隧道下穿重载道路分步开挖及道路重载对开挖过程中变形的影响进行数值模拟; 并将计算得到的浅埋隧道下穿重载道路的变形规律与实际监测结果进行对比分析。研究验证了计算模型和计算参数的合理性, 表明重载运煤车辆对地表沉降和拱顶沉降影响量近三分之一, 而对拱底变形影响很小; 表明隧道施工期间应停止运煤通道运营, 并给出4方面的施工控制措施。研究结果保障了敖包沟隧道下穿段的施工安全, 对同类施工有一定借鉴作用。

关键词:浅埋隧道; 下穿重载道路; 数值模拟; 实测; 变形规律

中图分类号: U25

文献标志码: A

随着铁路建设的不断发展, 很多铁路隧道施工面临下穿既有重载道路的问题^[1]。隧道下穿工程是一类复杂的工程, 特别是在黄土地区, 在隧道下穿重载道路施工过程中, 道路重载会对围岩拱效应的形成在空间和时间上产生影响; 同时, 支护结构与土相互作用, 不断调整自身受力与变形^[2]; 在开挖过程中, 会对上部的道路结构产生一定程度的影响, 影响既有道路的使用安全, 阻碍在建工程的正常进行^[3]。因此, 对浅埋隧道施工进行相关的数值模拟和分析, 预判隧道建设与既有重载道路的相互影响, 从而做好相应的防护措施是非常必要的。随着计算机技术的发展, 有限元法被引入支护计算中^[4-5]。在目前的研究中, 对于重载道路对下穿其的浅埋隧道施工影响的研究比较少, 本文采用FLAC^{3D}对巴准铁路敖包沟隧道下穿重载运煤道路施工的隧道开挖与支护进行模拟, 将模型计算结果与现场实测进行比较, 并分析隧道开挖对重载运煤通道的影响。通过数值分析提出处治措施, 保证隧道施工的正常进行。

1 工程概况

巴准铁路敖包沟隧道全长3 180 m, 为双线铁路隧道, 地处内蒙高原低中山区, 地形起伏较大, 沟梁相间。隧道为IV、V级围岩, 隧道水平开挖跨度12.26 m, 高度10.55 m; 水平最大净空10.76 m, 拱高9.80 m。敖包沟隧道在D1K34+492~D1K34+505里程段下穿西凉煤矿的主运煤道路, 相交角度约50.5°, 隧道与运煤道路之间的平面位置关系如图1所示。下穿区域洞顶距运煤道路路面约8 m厚, 中间覆土为人工填土。运煤道路为双向行车道, 宽10.30 m, 路表为水泥路面, 东南侧为宽约13.70 m的泥结石道路, 东北侧为高约8 m的黄土边坡, 西南侧为深约5 m的冲涮沟谷。高峰期时运煤道路上车辆以大型重载运煤车辆为主, 行车密集, 运煤车辆饱和载重维持在30多吨左右。

隧址区地层软弱, 大范围分布砂质黄土、泥岩、砾岩、砂岩夹泥岩, 隧道洞身穿越地层为砂岩夹泥岩, 地

收稿日期: 2014-04-16

作者简介: 吴东鹏(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为隧道工程与岩石工程;

导师简介: 杨新安(1964—), 男, 教授, 博导, 研究方向为隧道工程与岩石工程。

质条件差。下穿运煤通道区段隧道洞身穿越土丘,近沟谷,岩层层理走平缓,地质构造简单,地基土具有以下特点。下穿道路段隧道上覆三层岩层,依次为 Q^m_4 , J_1 的 $\textcircled{4}_{21}$, J_1 的 $\textcircled{4}_{22}$;其中 Q^m_4 以砂质黄土为主,呈褐黄色,稍湿,稍密; J_1 的 $\textcircled{4}_{21}$ 层为砂岩夹泥岩,呈黄绿色,全风化,原岩结构已破坏,岩芯呈土状; J_1 的 $\textcircled{4}_{22}$ 层为砂岩夹泥岩:黄绿色,强风化,原岩结构已破坏,岩芯呈土状,一般节长5~15 cm。隧道位于 J_1 的 $\textcircled{4}_{23}$ 层,为砂夹泥岩,呈灰绿色,强风化,泥砂质结构,层状构造,岩芯呈小块状。

根据土工试验和勘察设计资料, Q^m_4 , $\textcircled{4}_{21}$, $\textcircled{4}_{22}$, $\textcircled{4}_{23}$ 土层的物理参数如表1所示。

表1 土层物理力学参数

Tab.1 Physico-mechanical parameters of soil horizon

层号	土层名称	厚度/m	重度/($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
Q^m_4	砂质黄土	0.9	22.1	15	19.3	14	0.35
$\textcircled{4}_{21}$	全风化砂岩夹泥岩	7.1	24.2	90	24	19.3	0.27
$\textcircled{4}_{22}$	全风化砂岩夹泥岩	17	25.2	135	28.5	26	0.24
$\textcircled{4}_{23}$	强风化砂岩夹泥岩	46	25.8	180	32	28.5	0.22

2 本构模型建立与隧道开挖模拟

2.1 本构模型的选择

土体是一种很复杂的复合体,在外力的作用下,土体不仅产生弹性变形,而且还会产生不可恢复的塑性变形^[6]。土的弹塑性本构模型能较好地反映土体应力路径、土的硬化和软化特性。本文在采用FLAC^{3D}模拟计算中,土体采用摩尔-库伦模型,该模型是最通用的岩土本构模型,适用于那些在剪应力下屈服,但剪应力只取决于最大、最小主应力,而第二主应力对屈服不产生影响松散而胶结的粒状的材料,如:土体,岩石,混凝土等^[7]。其屈服准则为^[8]

$$\xi = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} = 0 \quad (1)$$

式中: $N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$; c 为凝聚力; φ 为摩擦角。

2.2 计算模型与计算参数

该隧道模型断面完全采用原隧道断面,对设计图利用Midas-gts划分网格后导入FLAC^{3D}拉伸形成三维模型。模型地层尺寸定为100 m×71 m×30 m(垂直于隧道方向水平×竖向×平行于隧道方向)。

隧道浅埋下穿运煤通道,简化为二者平面垂直交叉。由于在运煤通道西南侧为深约6 m的冲刷沟谷,坡度较陡,故模型垂直于隧道方向靠近冲刷沟谷面从地面起6 m设为自由边界,该面6 m以下全约束;上边界为自由边界,底部全约束,其余侧边约束了水平位移。

由于隧道断面较大,且为浅埋下穿重载道路,但限于施工承包单位施工技术水平有限,故采用上下两台分布开挖法,并采用超前大管棚加固。计算过程中,超前大管棚、初衬、二衬均采用实体单元进行模

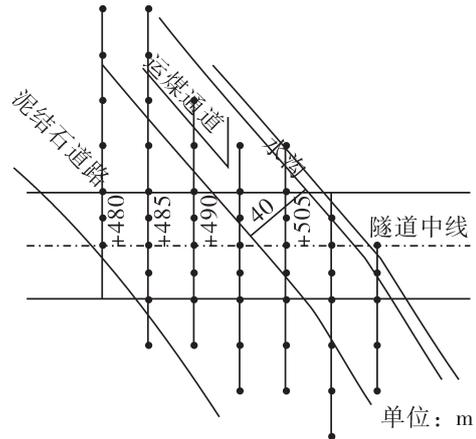


图1 重载道路与隧道相交平面位置关系

Fig.1 Plane relation of heavy-load road and tunnel

拟。在模型网格划分中,为了提高计算精度,对隧道周围垂直于隧道掘进工作面方向长50 m、高30 m(距地表1 m)范围内做加密处理;模型共划分为166 377个单元,模型图和网格划分情况如图2所示。

根据设计资料,模型实体主要单元计算参数见表2。

2.3 计算工况模拟

根据施工工序,计算模型的开挖、支护模拟共分成13部,如表3所示。在模拟计算中,首先考虑土体自重应力下初始应力平衡,然后分布进行开挖和支护,开挖采用NULL命令进行。

由于隧道下穿重载道路,本文对比模拟在有重载和无重载两种情况下隧道和道路的变形情况。

工况一:在开挖和支护时考虑地表运煤通道重载车辆荷载的影响时,车型按黄河JN360标准在超载200%情况下轴重为 $2 \times 232.22 \text{ kN}^{[9]}$,以隧道于运煤道路水平投影面为活载作用区域,将其简化为均布荷载464.44 kPa。

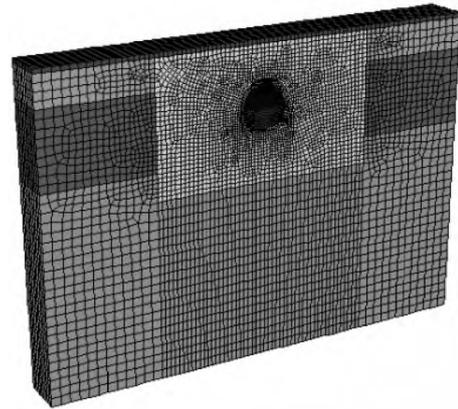


图2 三维有限元模型网络划分

Fig.2 Mesh of three-dimensional finite element model

表2 支护参数

Tab.2 Parameters of support

项目	厚度/m	体积模量 E/MPa	切变模量 E/MPa	泊松比 μ
超前大管棚	0.5	500	300	0.19
初衬	0.25	300	200	0.23
二衬	0.45	330	210	0.21

工况二:不考虑重载车辆荷载。

两种情况开挖支护均为以下计算步骤。

表3 两台阶法施工数值模拟计算步骤

Tab.3 Numerical simulation procedures of construction in two-step method

计算步骤	计算施工步
1	安装超前大管棚至0~15 m
2	开挖、初衬支护上台阶0~6 m
3	开挖、初衬支护下台阶0~6 m,开挖初衬支护上台阶6~12 m
4	安装超前大管棚至15~30 m
5	开挖、初衬支护下台阶6~12 m,开挖、初衬支护上台阶12~18 m
6	二衬支护0~6 m
7	开挖、初衬支护下台阶12~18 m,开挖、初衬支护上台阶18~24 m
8	开挖、初衬支护下台阶18~24 m,开挖、初衬支护上台阶24~30 m
9	二衬支护6~12 m
10	开挖、初衬支护下台阶24~30 m
11	二衬支护12~18 m
12	二衬支护18~24 m
13	二衬支护24~30 m

3 计算结果与监测结果分析

3.1 两种工况变形规律对比分析

经FLAC^{3D}模拟两种工况下隧道开挖支护引起地表沉降、拱顶沉降、水平收敛和拱底变形量分别如图3(a)所示。

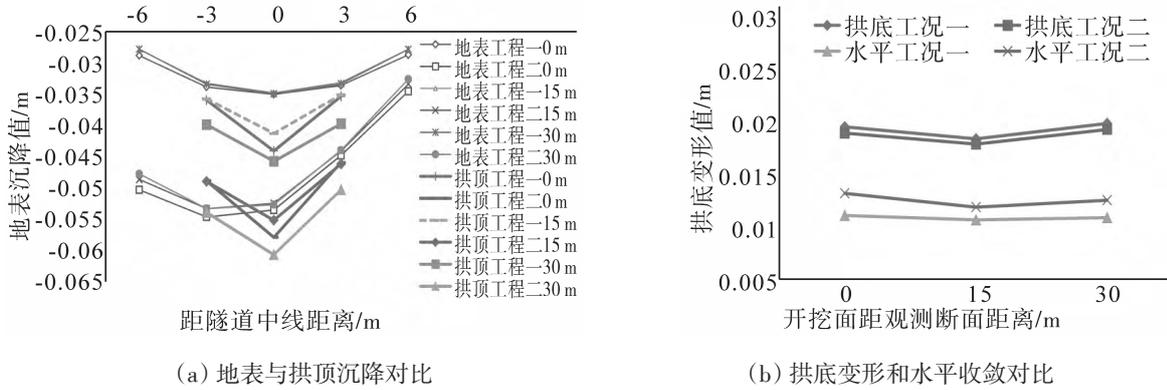


图3 不同工况变形对比

Fig.3 Comparison of different working conditions

取开挖面距观测断面分别为0, 15, 30 m时各变形量的平均值,对比分析重载对各类变形量的影响大小,结果如表4所示。在对车辆重载保守静态替代模拟下,道路重载对地表沉降和拱顶沉降影响显著,影响量分别达36.38%和32.59%;而重载车辆对拱底变形影响基本可以忽略,仅为-2.58%;重载对水平收敛的影响也并不显著。

出于对隧道施工安全和运煤道路运营安全考虑,建议采取隧道施工期间停止运煤通道运营。考虑周边地形条件,为保证不影响当地煤矿正常出煤,减小经济损失,研究决定修筑临时替代道路方案来保证隧道正常施工。

表4 地表、拱顶、拱底变形比较

Tab.4 Comparison of surface, arch and bottom deformation

分析对象	地表沉降		拱顶沉降		拱底变形		水平收敛	
	工况一	工况二	工况一	工况二	工况一	工况二	工况一	工况二
均值/mm	31.61	43.11	39.21	51.99	21.04	20.49	10.63	12.24
绝对误差/mm	11.5		12.78		-0.55		1.61	
相对误差/%	36.38		32.59		-2.61		13.25	

3.2 拱顶沉降规律及变形速率规律分析

采用替代道路方案施工时,沿隧道纵向每5 m一个断面设置了拱顶沉降测点(如图1所示),并在隧道开挖后每天进行观测。本节选取有代表性的九个断面,其均为隧道在浅埋软弱围岩段的施工断面,对各断面开挖后隧道拱顶沉降的规律进行统计,结果如图4所示。

由图4可看出拱顶沉降明显分为3个阶段,依次对应于隧道施工的上台阶开挖、下台阶开挖、仰拱开挖和初衬支护3个阶段,沉降曲线的阶段性表明,不同开挖阶段对隧道拱顶沉降的影响比较明显。由于观测日期与隧道掘进工作面到达相应断面的日期的差别,造成以上各图第一阶段日期参差不齐。由D1K34+510, D1K34+505, D1K34+500, D1K34+495, D1K34+490等断面沉降规律可看出,上下台阶开挖造成的拱顶沉降量占总沉降量主要部分;D1K34+485, D1K34+480中第三阶段沉降量占该断面总沉降量比重较大且依次增加,这是由于这两个断面逐渐向超浅埋过渡并位于8 m高边坡边缘附近,工程施工期间时有降雨天气造成边坡轻微滑坡所致。

各断面拱顶沉降速率曲线如图5所示。图5可看出,各断面拱顶沉降速率除某些断面在观测初期个别观测日期沉降突变外的沉降规律基本相同,可见收敛速率逐渐减小稳定小于 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,说明拱顶沉降区域收敛稳定。断面D1K34+495, D1K34+490和D1K34+480分别在第20, 28个观测日左右出现速率突变,可以看到与图4中沉降变化阶段对应,这是由于开挖开挖施工部变化所致,由此在施工中应及时加强相应支护措施。隧道拱顶收敛时间为38天左右,结合隧道施工钻爆进度平均 $1 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,可以得出隧道拱顶收敛距离为38 m左右,即约为 $4B_0$ (B_0 为隧道净空)。

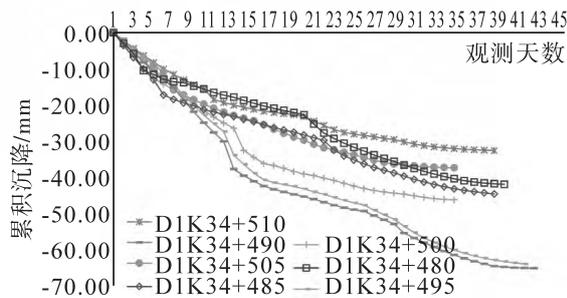


图4 不同断面拱顶沉降曲线

Fig.4 Subsidence curve at different sections

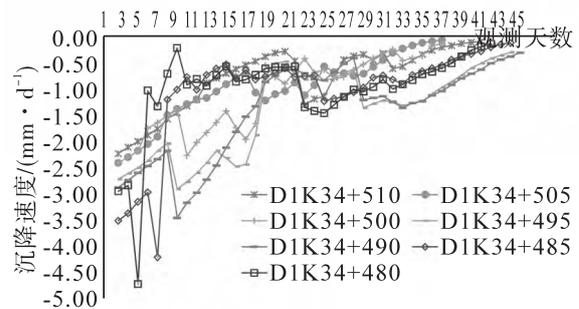


图5 不同断面拱顶沉降速率曲线

Fig.5 Subsidence curve rate at different sections

现场观测资料显示在隧道中线、右3 m、右6 m、右16 m、左3 m、左6 m各测点隧道中心附近沉降量向外递减,最大值为47 mm,符合V级围岩浅埋地表沉降要求。地表在上台阶开挖之后开始发生较明显沉降,这是由于开挖后应力释放造成;并且在上台阶开挖后约两周时间后,在下台阶开挖前或刚开挖时地表沉降开始较为明显,这个时间节点对内蒙地区类似黄土地质有借鉴意义。沉降随着距离的增加而减小,呈现出横向沉降槽^[6]特征,整个沉降横向影响的范围大约为16~24 m。

4 浅埋隧道下穿重载道路施工变形控制措施

敖包沟隧道下穿建筑物段埋深较浅,由于土层粘结性较小,为固结完全,只要一开挖,上部土层失去支撑就会垮塌,因此采用长管棚形成保护壳,再挖除土堆。隧道内堆积的土堆同样由于无粘结,型钢拱架不能一次安装到底,故先安装拱顶型钢,采用满堂式钢管脚手架将拱顶型钢撑住,直接在拱墙上掏槽,将型钢拱脚斜向安装在槽内,打上锁脚锚杆,喷射混凝土形成保护壳,再开挖土堆,当有条件实施型钢至基底时,及时安装型钢,与拱顶型钢采用焊接固定,槽内撑脚不拆除,保持整体受力,如此循环反复直至隧道掘进工作面。

根据实测数据的分析和现场施工经验,提出了以下开挖支护控制措施:

- 1) 在隧道爆破施工时,为了隧道施工和地表道路的安全,必须对隧道开挖引起的爆破振动进行控制,减缓对周围环境的影响;
- 2) 取消下穿段前后10 m超前小导管,并在隧道下穿道路向外10 m范围内增设5根 $\Phi 42 \text{ mm}$ 的超前小导管,外插角为 15° ,对坍塌体进行注浆加固;
- 3) 在距道路中线量测24 m范围内采用长15 m, $\Phi 108 \text{ mm}$ 的大管棚,环向间距40 cm,管棚内插入钢筋笼,并灌注M30水泥砂浆,型钢钢架由原来的1 m/榀调整为0.5 m/榀;
- 4) 在距道路中线量测24 m范围内系统锚杆全长仍在中风化岩石内的,保持不变仍采用 $\Phi 25 \text{ mm}$ 砂浆锚杆,如系统锚杆全长或者其中一段在土层或强风化岩层中的,则采用 $\Phi 25 \text{ mm}$ 自进式中空注浆锚杆。

5 结论

通过对浅埋软弱隧道下穿重载道路的数值模拟与实测对比分析,可以得到以下结论:

- 1) 采用FLAC^{3D}模型计算结果与实测结果基本一致,重载运煤车辆对地表沉降和拱顶沉降影响显著,

影响量近 1/3,重载车辆对水平收敛影响较小,对拱底变形影响可以忽略;

2) 出于对隧道施工安全和运煤道路运营安全考虑,建议采取隧道施工期间停止运煤通道运营,后经施工采用改路方案使工程顺利完成;

3) 隧道拱顶收敛距离约为 4B0(B0 为隧道净空);隧道水平收敛速度小于 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时围岩基本稳定,判定本隧址隧道开挖水平净空变化稳定期限为 32 天左右;可为黄土地区类似下穿工程提供参考;

4) 运煤道路中线横向沉降影响范围为 16~24 m,需重点对道路影响范围内隧道支护进行加强。

参考文献:

- [1] 王伟. 浅埋大断面黄土隧道下穿高速公路的地表沉降控制研究[D].北京交通大学,2007.
- [2] 孙坚,宋宏伟,王天春.隧道下穿对道路结构应力及沉降变形的影响研究[J].水利与建筑工程学报.2001,9(5):18-23
- [3] 汪宏,蒋超.浅埋偏压隧道洞口坍方数值分析与处治[J].岩土力学,2009(11):3481-3485.
- [4] ITASCA SOFTWARE COMP. Theory and back ground,constitutive model:theory and implementation[P]. User Manual of FLAC3D3.0,2005.
- [5] 陈育民,徐鼎平. FLAC3D 基础与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [6] 刘学力,马连丛. FLAC3D 在软土基坑开挖计算中的应用[J].路基工程,2008,141(6):166-168.
- [7] 朱正国,黄松,朱永全.铁路隧道下穿公路引起的路面沉降规律和控制基准研究.岩土力学[J].2012,33(2):558-564.
- [8] 李继升.北京地铁浅埋暗挖法施工引起地表沉降规律的研究[R].北京:中国地质大学,2012.
- [9] 王志强.内蒙古 110,210 国道重载交通沥青路面设计参数研究[D].长沙理工大学,2008.

Deformation Regularity and Control of Shallow-buried Tunnel Undercrossing Heavy-load Road

Wu Dongpeng¹, Yang Xin'an¹, Wu Chong²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shenhua Baoshen Railway Group Corporation, Erdos 017000, China)

Abstract: Aiming at the Aobaogou railway tunnel, using Mohr-Coulomb model, this study conducts the numerical simulation for the excavation of shallow-buried tunnel undercrossing heavy-load road to discuss effects of heavy load on the deformation based on software FLAC3D. A comparative analysis is then made between the calculated result and the simulated one. It has proved the rationality of the proposed model and parameters, showing that the impact of overloading coaler on surface and the vault subsidence accounts for nearly a third, with little on deformation of the vault bottom. It also suggests the coal transportation be suspended during the construction of tunnel with four aspects of control measures. The research results have ensured safety of Aobaogou Tunnel in construction, which may be used as reference for similar constructions.

Key words: shallow-buried tunnel; undercrossing heavy-load road; numerical simulation; monitor; deformation regularity