

文章编号:1005-0523(2016)02-0035-07

浅埋黄土隧道下穿道路施工沉降及控制研究

何知思,杨新安

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:以李家圪卜1号隧道浅埋下穿城大高速公路工程为背景,基于相关规范以及类似下穿工程,提出浅埋黄土隧道下穿道路的地表沉降应在50 mm以内的控制标准。通过监测隧道下穿旅游公路试验段的地表路面沉降值,改进了下穿高速公路段的施工工法。基于FLAC^{3D}有限差分软件,对改进施工工法后隧道的开挖以及支护过程进行动态模拟,通过分析计算和实测下穿道路的路面沉降及隧道拱顶沉降值,验证六步CRD法在浅埋黄土隧道下穿道路的施工中能较好地控制沉降值,说明了计算模型和计算参数的合理性,并给出合理的施工控制技术措施,对同类浅埋黄土隧道开挖施工工法改进有一定的借鉴作用。

关键词:浅埋隧道;下穿道路;数值计算;沉降控制

中图分类号:U25 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.02.006

目前,隧道下穿道路对地表沉降控制尚没有统一的技术标准。根据国内大量隧道下穿高速道路以及城市地铁施工的实际工程调查分析,大多数要求地表最大沉降量小于30 mm。只要采取适当的开挖和支护措施,这一技术要求大部分情况下可以得到满足;但在一些埋深较小或地质条件较差的工程中,地表沉降值往往会超过了这一标准,所以国外如日本、法国、德国等规范要求地表最大沉降值控制在50 mm以内即可。根据《公路工程质量检验评定标准》对高速公路质量控制的要求,路面结构在3 m范围内的平整度应该限制在3 mm以内,亦即其局部倾斜度不超过0.1%。当满足这一要求时,隧道下穿高速公路施工对高速公路的质量和运行不产生影响^[1]。

结合李家圪卜1号隧道的特点,将隧道出口处DK58+512新增的一条地区性旅游公路作为试验段,隧道采用四步CRD法,即将隧道断面分为上下左右4个不同的部位开挖,并通过临时支护和临时仰拱对每一分部及时支护,施工时监测道路路面沉降及隧道拱顶沉降值。监测结果表明,四步CRD法施工时旅游公路路面最大沉降达到了372 mm,决定改用六步CRD法施工,即将即将隧道断面分为6个部分进行开挖,以减小导坑开挖面积,并在下穿旅游公路段的施工工法及工艺基础上对做了相应的调整。根据李家圪卜1号隧道与城大高速之间的位置关系,制定地表沉降监测方案,地表监测断面共3个,里程分别为DK57+950、DK57+960、DK57+970,以研究浅埋黄土隧道下穿道路施工的变形规律。

1 浅埋黄土隧道下穿道路沉降控制标准

控制限值的基准值是保证施工安全的指标值,基准值的设定主要考虑:规范限值、工程类比值和实际监测的最大值,来确定李家圪卜1号隧道下穿城大高速公路路面的沉降控制标准^[2-3]。

1.1 道路路面平整度评价

平整度是路面服务质量的重要指标之一,它是指以规定的标准测量,间断或连续地量测道路表面的凹

收稿日期:2015-11-25

作者简介:何知思(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为隧道工程。

通讯作者:杨新安(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为隧道工程,城市地下工程。

凸情况。当隧道下穿高等级公路时,引起路面的沉降和变形应满足正常行车的舒适性以及安全性。路面变形可采用 3 m 直尺法或水准测量法,根据规范《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80/1—2004)以及有关等级公路的技术要求,给出了路面平整度的检验标准,具体见表 1。

表1 沥青、混凝土路面平整度控制标准
Tab.1 Flatness control standards of asphalt and concrete pavement

检查项目		规定值	检查方法和频率	备注
平整度/mm	最大间隙 h	3.0	3 m 直尺,连续测量十尺	推荐
	标准差 σ	1.8	平整度仪,全线连续测,每 100 m 计算	

1.2 类似下穿工程实例分析

通过总结多条相似隧道工程下穿地表构筑物地表最大沉降值,如表 2 所示,可知浅埋隧道工程施工产生的沉降值较大,控制地表和隧道拱顶沉降值需要采取合理支护措施^[4-6]。

表2 类似工程下穿道路地表沉降统计
Tab.2 Surface settlement statistics of similar underpass road projects

工程	地质概况	埋深/m	隧道断面面积/m ²	最大地表沉降值/mm
台湾三义一号铁路隧道	砾石层	8~20	95	60
朔黄线三家村隧道	新黄土	7	121	72
郑西客专函谷关隧道	新黄土	30	170	138~529
郑西客专盘东隧道	新黄土	21.2	170	345
郑西客专高桥隧道	新黄土	13	170	100

1.3 隧道下穿道路沉降控制标准

1.3.1 下穿旅游公路试验段

巴准铁路李家圪卜 1 号隧道全长 1 030 m,隧址区位于内蒙古鄂尔多斯境内,隧道最大埋深 30 m。隧道在 DK57+953~DK57+988 段下穿城大高速公路,下穿距离有 35 m,隧道下穿段拱顶距离高速公路路面仅为 16 m,为了使隧道在下穿段能够安全通过城大高速公路,结合李家圪卜 1 号隧道的特点,将隧道出口处 DK58+512 处的一条埋深 12 m 的旅游公路作为试验段,以研究浅埋黄土隧道下穿道路的施工变形规律,隧道与旅游公路的位置关系如图 1 所示。

在李家圪卜 1 号隧道下穿旅游公路试验段的施工中,拱顶沉降最大值达到了 300 mm,旅游公路路面最大沉降达到了 372 mm。结合李家圪卜 1 号黄土隧道浅埋下穿城大高速公路的施工现场情况,为了保证下穿城大高速公路的施工安全及行车安全,并使隧道造价控制在合理范围之内,建议李家圪卜 1 号隧道在下穿城大高速公路施工中,路面的沉降值控制在 50 mm 以内,并做好高速公路路面快速铺填的预案。

1.3.2 隧道施工工法及施工工艺调整

大量的工程实践都表明浅埋黄土隧道施工产生的沉降值较大,地表沉降控制较难,根据李家圪卜 1 号隧道下穿旅游公路试验段的实测地表沉降值为 280~372 mm,地表沉降值远远超过了 50 mm 以内标准值。因此,李家圪卜 1 号隧道下穿城大高速公路段必

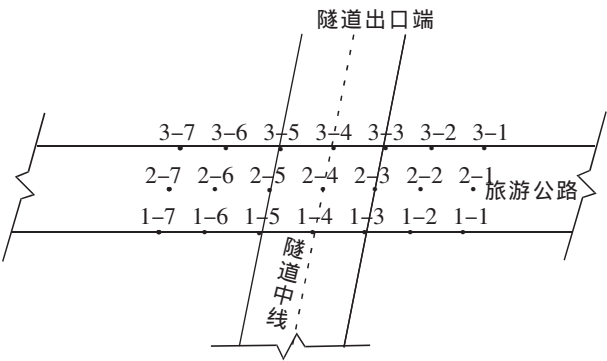


图 1 隧道与旅游公路之间的平面位置关系
Fig.1 Plane positional relationship between the tunnel and the tourist highway

须改进施工工法,调整施工工艺,将原先的四步 CRD 法改为六步 CRD 法,以减小导坑开挖面积;并针对砂质黄土稳定性较差的特点,加强隧道初期支护以及对围岩的超前支护,提高围岩的稳定性。

2 浅埋黄土隧道下穿道路数值模拟分析

2.1 围岩及材料的参数选取

在分析黄土围岩工程特性的基础上,通过 FLAC^{3D} 建立三维数值模型对隧道开挖以及支护过程进行动态模拟,黄土围岩的力学参数按照室内试验选取,支护结构参数按隧道设计资料进行选取,对于 I 级围岩采用钢拱架喷锚联合支护,钢拱架与钢筋网支护参数采用等效方法计算,即将钢拱架与钢筋网弹性模量折算给混凝土,其计算方法为

$$E_c = E_0 + \frac{A_s E_s}{A_c}$$

式中: E_c 为折算后混凝土弹性模量; E_0 为原混凝土弹性模量; A_s 为钢拱架截面积; E_s 为钢材弹性模量; A_c 为混凝土面积。围岩及支护材料详细计算参数见表 3。

表 3 围岩及支护材料计算参数
Tab.3 Calculation parameters of surrounding rock and supporting material

参数	E/MPa	μ	$\varphi/(\text{^\circ})$	c/kPa	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
黄土	70	0.3	21	12.4	17.6
超前支护	1 050	0.25	40	100	20
锚杆加固	2 100	0.20			77
初期支护	31 400	0.25			24
二次衬砌	31 000	0.20			24

2.2 模型的建立

本次计算范围选取为:模型上部取至地表,左右部及下部边界取至洞径 2~3 倍距离,即计算模型地层尺寸定为 50 m×80 m×60 m(垂直于隧道方向水平×竖向×平行于隧道方向),隧道埋深为 16 m;左右为水平约束边界,下部为垂直约束边界,地表为自由边界;模型每施工步台阶长度为 3 m,每次进尺 1 m。计算中用八节点六面体实体单元模拟围岩、初期支护、二次衬砌,临时支护等采用 shell 单元模拟。模型的初始条件没有考虑构造应力的作用,仅仅是在自重应力的作用下形成了初始地应力场。隧道计算模型及模型的局部网格划分如图 2 和图 3 所示^[7-8]。

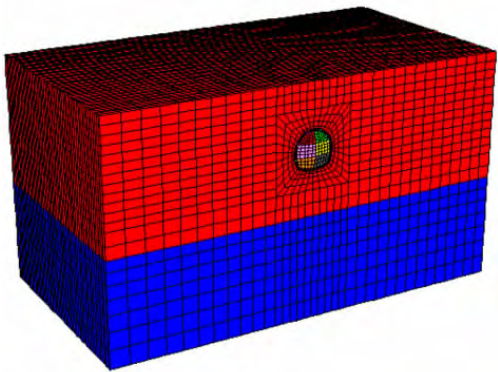


图 2 隧道计算模型
Fig.2 Calculation model of the tunnel

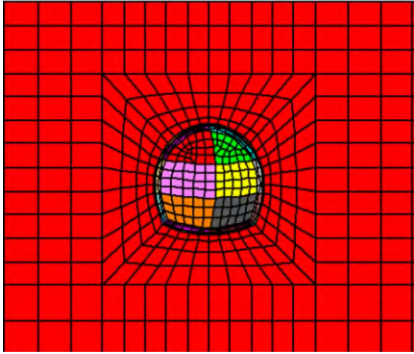


图 3 网格划分局部示意图
Fig.3 Partial schematic diagram of meshing

2.3 数值模拟结果分析

2.3.1 围岩位移场分析

通过监测隧道开挖后关键点位移变化,左上导坑开挖后拱顶最大沉降值为 43 mm,底部围岩的最大隆起值为 67.5 mm;开挖左中导坑后,沉降影响范围延伸至地表;右下导坑开挖完成后,在中隔壁两侧的左拱顶和右拱顶出现最大沉降值为 52 mm,隧道拱顶由于中隔壁的支撑作用,沉降值较左、右拱顶小。全断面开挖后,隧道拱顶沉降值因中隔壁和临时支撑的拆除增大到 77 mm,而隧道因仰拱回填、浇筑底部隆起有所减小,这表明,隧道支护对变形有较好的抑制作用,二衬的施做对控制变形很关键。

2.3.2 支护结构应力分析

隧道全断面开挖完成后,中隔壁拆除之前初衬以及中隔壁的最大主应力云图如图 4 所示。隧道开挖后,地层围岩应力重新分配,在隧道轮廓四周处的围岩产生了较大变化,部分区域存在应力集中现象,在初衬上应力集中出现在隧道墙角处,而中隔壁以及临时支撑应力集中出现在第二道临时支撑与隧道接触处。

将初支关键部位,包括拱顶、拱脚、墙角和仰拱的应力值列于表 4 中,各部位的拉应力和压应力是满足要求的。

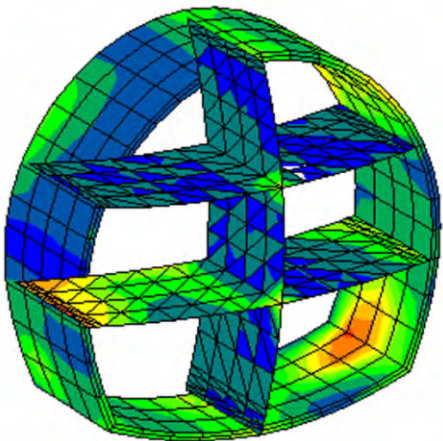


图 4 隔壁拆除前初支的最大主应力云图
Fig.4 Cloud branch of maximum beginning principal stress before demolishing the wall

表 4 中隔壁拆除前初支应力
Tab.4 Initial supporting stress before demolishing the wall

部位	最大主应力/MPa	安全性	最小主应力/MPa	安全性
拱顶	1.85	安全	-2.5	安全
左拱脚	0.233	安全	-17.7	安全
右拱脚	0.205	安全	-3.25	安全
左墙角	-2.11	安全	-4.39	安全
右墙角	-4.79	安全	-7.53	安全
仰拱	1.58	安全	-3.64	安全

拆除中隔壁和临时支撑后施做二次衬砌后,围岩的主应力较之前有了明显的变化,二衬的拱顶处出现拉应力集中现象,拱腰处出现压应力集中现象。在其他部位没有出现明显的应力集中,整体受力情况较好。

2.3.3 地表沉降分析

隧道下穿段各个施工阶段的地表沉降曲线如图 5 所示,隧道开挖后直至二衬施做完成隧道中心线处的沉降为 27 mm,其中隧道左上导坑开挖对地表沉降有较大的影响,占总沉降的 40.6%,因此,在隧道开挖时,应在左上导坑开挖阶段对隧道进行及时支护,并加强支护参数,以控制地表沉降。在后期各导坑开挖时,也要及时进行支护,下导坑开挖完成后,及时进行仰拱回填和二衬封闭也有助于控制地表沉降。

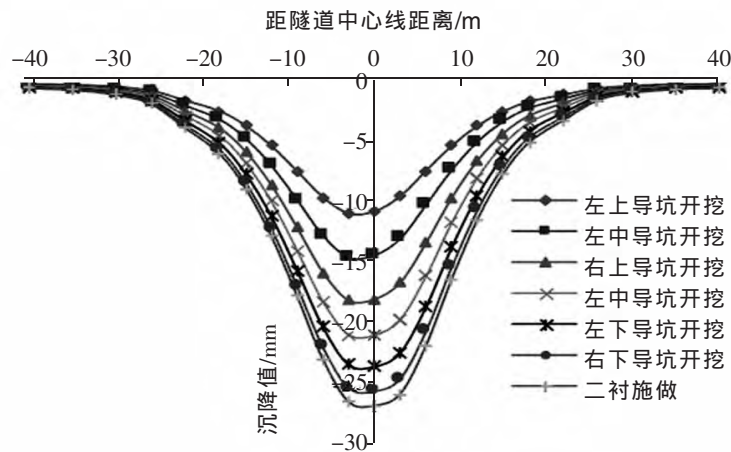


图 5 地表沉降曲线

Fig.5 Curve of surface settlement

根据李家圪卜 1 号隧道下穿高速公路段地表沉降控制在 50 mm 标准,以及相关规范规定的隧道拱顶沉降和收敛值,数值模拟计算结果表明,采用六步 CRD 法施工隧道的拱顶沉降值为 46 mm,地表沉降值为 34 mm,各项指标均在控制范围内。

3 实测下穿高速公路段施工变形分析

隧道下穿城大高速公路段采用优化后的工法和施工工艺,并在下穿高速公路段布置了监测点对高速公路路面、隧道拱顶的沉降值以及隧道的水平收敛进行监控量测。

下穿高速公路段路面的沉降曲线如图 6 所示,隧道在二衬施作完成后观测时间较短,但沉降速率基本较小,隧道沉降值也基本稳定。

从图 6 可以看出,开挖掌子面距离 DK57+950 断面约 20 m 时,地表产生先期位移为 3.2 mm,占总沉降值的 10%,随着导坑的开挖,各导坑开挖产生的地表沉降值为 25.1 mm,占总沉降值的 78%,二衬施作完成后,地表沉降值达到基本稳定状态。拆除隔壁后至二衬施作前,地表产生的沉降值为 5.1 mm,占总沉降值的 12%。最终高速公路地表沉降值为 30.2 mm,没有超过地表变形控制标准。

下穿高速公路段隧道拱顶沉降时态曲线如图 7 所示。

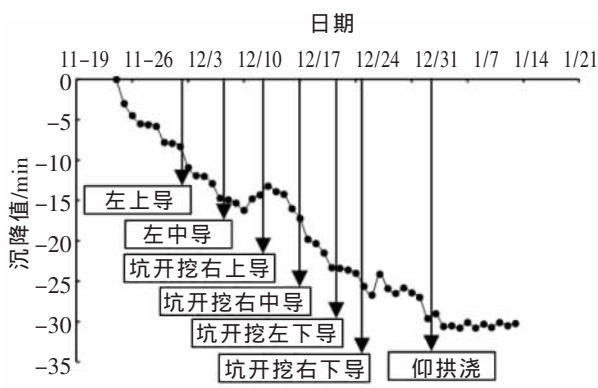


图 6 DK57+950 断面中心线的地表沉降时态曲线

Fig.6 Surface settlement-time curve of centerline DK57+950

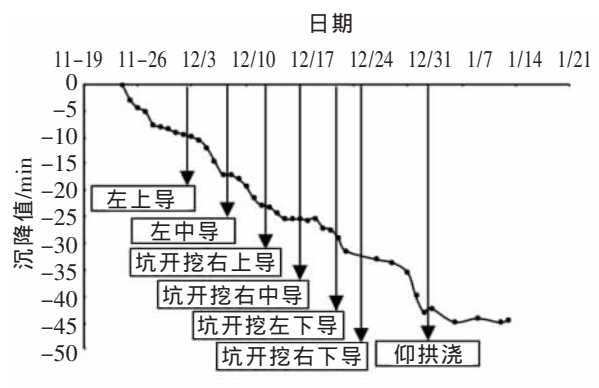


图 7 DK57+950 断面拱顶沉降时态曲线

Fig.6 Vault settlement-time curve of centerline DK57+950

从图 7 中可以看出,拱顶沉降规律与地表沉降基本类似,仰拱回填,二衬施做后,拱顶沉降值基本稳定,拱顶沉降值为 46.7 mm,没有超过限值,满足隧道施工的要求。

4 浅埋黄土隧道下穿道路施工变形控制措施

根据李家圪卜 1 号隧道施工工法调整方案,利用数值模拟分析,结合调整后的施工效果,提出以下浅埋黄土隧道下穿道路施工变形控制措施。

1) 采用 CRD 法开挖,减小了每个开挖导坑的面积,由四步开挖变为六步开挖,在每一个导坑开挖后及时施做临时支撑,避免因开挖后围岩长时间悬空引起过大的变形。

2) 导坑采用人工开挖方式,严格控制进尺为 2 榀钢架,在开挖后对隧道墙部施做 I20 b 钢拱架,间距为 0.5 m;导坑开挖后,及时施做中隔墙和临时支撑,并在围岩拱部打小导管并注浆以加固前方土体;然后对掌子面进行注浆封闭,使之成为整体,防止开挖后由于悬空时间较长发生滑动,引起上部围岩坍塌。

5 结论

以李家圪卜 1 号隧道浅埋下穿城大高速公路为工程背景,通过分析下穿道路试验段产生过大沉降的原因,调整施工工法,并采用 FLAC3D 数值模拟软件对施工方案做了分析,最后成功的应用于李家圪卜 1 号隧道下穿城大高速公路工程,得到的主要结论有:

1) 结合隧道浅埋下穿道路试验段的施工情况以及相关规范和类似下穿工程,提出了浅埋黄土隧道下穿公路施工时,高速公路路面的沉降值应在 50 mm 以内的控制标准。

2) 为了控制隧道施工变形,对下穿段的施工工法以及施工工艺进行了优化,隧道拱部采用注浆小导管超前支护,采用六步 CRD 法开挖减小开挖面积,并且在每个导坑开挖后及时施做临时支撑,隧道全断面开挖完成后,拆除隔壁后及时施做二衬。

3) 根据隧道下穿城大高速公路段的实测数据,拱顶下沉最大值为 46.7 mm,地表最大沉降值为 30.2 mm,说明浅埋黄土隧道采用六步 CRD 法施工是可行的,对于控制地表沉降有较好的效果。

参考文献:

- [1] 张鹏,谭忠盛. 浅埋隧道下穿公路引起的路面沉降控制基准[J]. 北京交通大学学报,2008(4):137-140.
- [2] 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[J]. 岩土力学,2012(2):558-563+576.
- [3] 王道远,袁金秀,朱永全. 铁路隧道下穿既有专线地表沉降控制基准研究[J]. 地下空间与工程学报,2013(S2):1945-1950.
- [4] 颜治国. 西安地铁黄土地层中盾构隧道地表沉降控制理论与技术[D]. 北京:中国矿业大学,2012.
- [5] 陈星欣,白冰. 隧道下穿既有结构物引起的地表沉降控制标准研究[J]. 工程地质学报,2011(1):103-108.
- [6] 朱正国,李兵兵,李文江,等. 新建铁路隧道下穿既有铁路施工引起的地表沉降控制标准研究[J]. 中国铁道科学,2011(5):78-82.
- [7] 陈育民. FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [8] 张银屏,雷震宇,周顺华. 浅埋暗挖隧道对地表变形影响的三维数值分析[J]. 华东交通大学报,2005(5):58-61.

Research on Settlement Control of Shallow Buried Loess Tunnel Underpass Road

He Zhisi, Yang Xinan

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

Abstract: The surface settlement of shallow buried loess tunnel underpass road is an important safety factor for the tunnel construction. Under the background of Lijiagebu NO.1 loess tunnel passing through Chengda Highway, based on relevant specifications and similar projects, this paper proposed that the settlement standard of the shallow buried tunnel underpass road should be controlled within 50mm. By monitoring and analyzing the surface settlement of test section of tourist highway, this paper modified the construction method and construction technology. Based on FLAC3D, the excavation and the process of supporting with improved construction method were dynamically simulated. By analyzing the calculation and monitoring settlement value of road surface and vault of tunnel, this paper proved that 6-step CRD method in shallow buried loess tunnel underpass road can better control surface settlement, which indicated the rationality of the calculation model and parameters; and it provided reasonable control measures with high referential value for improving analogous construction methods of shallow buried loess tunnel undercrossing road.

Key words: shallow buried tunnel; underpass road; numerical calculation; settlement control

(责任编辑 王建华)