# 第 29 卷 第 2 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 29 No. 2

2016年6月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE) Jun. 2016

# 浅埋大跨黄土隧道下穿公路方案比选

王文胜

(中铁十一局集团 第一工程公司,湖北 襄阳 441104)

摘要:以大跨黄土隧道下穿公路安全施工为背景,对隧道下穿公路的安全施工方案进行研究。基于公路路面破损指数与下穿公路施工风险事件引起路面最大沉降之间的关系确定了隧 道下穿施工可能引起的路面最大允许沉降量,并据此制定出施工管理基准,对比分析了 CRD 和 CD 法引起的隧道拱顶沉降、地表最大沉降、支护受力和隧道周边地层塑性区特征,建议采用 CD 法进行下穿施工。下穿孙辛路施工监测结果表明,采用 CD 法保证了隧道施工安全和孙辛路的 正常通行。

关键词:路面破损指数(*PCI*);大跨黄土隧道;下穿施工;施工方案比选;地表下沉 中图分类号:TU45.3 文献标志码:A 文章编号:2095-0373(2016)02-0045-06

1 工程概况

周山隧道位于洛阳市高新区后五龙沟村与周山森林公园之间,为保护周山森林公园环境,改善既有 孙辛路的纵坡通行条件,并结合环城路的下穿周山而建。隧道分离式双向六车道,最大开挖跨度 16.2 m, 开挖高度 12.0 m,最大埋深 72 m,平均埋深 40~45 m。隧道下穿山顶分布有工厂厂房及村庄民房、高压 线电塔,下穿既有交通量较大的孙辛路。在下穿孙辛路施工过程中,需保证孙辛路的正常通行和隧道本 身施工安全。

虽然隧道下穿建筑物、公路等构筑物的工程案例有很多<sup>[1-3]</sup>,但由于周山隧道跨度大,围岩主要为黄 土地层,且通行车辆均为重载车辆,如混凝土罐车、运送钢筋、水泥及钢架的车辆,且这些车辆还常常超载 严重,因此仍需要对下穿公路的隧道合理的施工方案进行研究。为此,首先根据公路路面及通行车辆具 体情况确定路面允许沉降量,即路面沉降标准,然后依据沉降标准比选合理的隧道施工方案。

## 2 工程地质及水文地质情况

地表为杂填土,褐黄色,主要成分为粉质黏土,厚度 1.3~2.4 m。下部主要为第四系全新统褐黄色、 硬塑状、发育针状孔隙及白色网纹的粉质黏土,主要分布于隧道洞身及上部,其间夹有钙质胶结层,位于 隧道上方。距仰拱 5.2 m 处以下均为泥质砂岩及泥岩互层,风化严重,节理裂隙发育。

隧址区地表水不发育,主要受降水补给,沿山沟排泄。勘探期间勘探深度内未见地下水,但雨季可能 存在第四系松散层孔隙潜水及基岩裂隙水。

## 3 路面沉降控制标准

孙辛路为沥青路面,目前关于沥青路面的沉降标准的研究也有很多成果<sup>[4-6]</sup>,但是所确定的沉降控制标准相差较大。按照现行《公路沥青路面养护技术规范》<sup>[7]</sup>,根据路面破损情况,用沥青路面破损状况指数 PCI(Pavement Condition Index)量 $(\mathbf{L}, PCI = 100 - 15R_a^0412)$ 。

$$R_{d} = \frac{A_{p}}{A} \times 100\% = \frac{A_{\pi} \times K_{\pi} + A_{\frac{1}{W}} \times K_{\frac{1}{W}} + A_{\frac{1}{T}} \times K_{\frac{1}{T}}}{L \times B} \times 100\%$$
(1)

收稿日期:2016-01-03 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2016.02.09 作者简介:王文胜(1980-),男,工程师,主要从事铁路、公路项目施工组织管理。E-mail:149564789@qq.com 王文胜.浅埋大跨黄土隧道下穿公路方案比选[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(2):45-49.

(3)

式中, $R_a$  为路面破损率; $A_p$  为调查路段内的折合破损面积;A 为调查路段的路面总面积;L 为调查路段 的长度;B 为调查路段宽度,取隧道掘进坑道影响宽度  $B_1$ ,和路面行车道  $B_0$  两者中最小值,即  $B = \min$  $(B_1, B_0); A_{\pi}, A_{\#}, A_{\pi}$  分别为沉陷破损、车辙破损、坑槽破损的实际面积; $K_{\pi}, K_{\#}, K_{\pi}$  分别为沉陷破损、 车辙破损、坑槽破损严重程度的换算系数,参照表 1 取值。

破损类型	分级	破损描述	<b>深度</b> /mm	换算系数
沉陷	轻	深度浅,行车无明显不适感	≪25	0.4
	重	深度深,行车明显出现颠簸	>25	1.0
车辙	轻	变形较浅	≪25	0.4
	重	变形较深	>25	1.0
坑槽	轻	坑浅,面积小于1m <sup>2</sup>	≪25	0.8
	重	坑深,面积大于1m <sup>2</sup>	>25	1.0

表 1 沥青路面破损分类和换算系数

将路面质量分为优、良、中、次、差 5 个等级来对路面状况进行评价。通过建立隧道施工引起地表路 面破坏的风险事件导致的地表最大沉降值与路面状况指数 *PCI* 之间的关系,预测路面允许的最大沉降量 作为沥青路面破损控制的标准<sup>[7]</sup>。

依据 PCI 的大小将路面质量分为优、良、中、次、差 5 个等级,对应路面状况指数分别为 PCI≥85, PCI≥70,PCI≥55,PCI≥40。对已出现破损的路面进行质量评价的方法,属事后调查,破损面积均以实 际量测数据来计算。而研究沥青路面破损控制标准,属事前预测,破损面积需要通过理论计算获得<sup>[7-8]</sup>。 假设暗挖隧道引起的地表沉降曲线符合 Peck 公式的基础上,文献[9]得到了隧道施工可能引起的最大沉 降量与路面破损指数间的关系

$$S_{\max} = S_0 \exp\left\{\frac{1}{8} \left[\frac{\left(0.01(\frac{100 - PCI}{15})^{2.4272} - \eta K_{\text{ft}}\right)LB}{2iK_{\text{ft}} + 0.4iK_{\text{ft}}}\right]^2\right\}$$
(2)

式中, $S_0$ 为正常施工产生的最大沉降值; $\eta$ 为路面可能出现坑槽破损面积与总路面面积之比,工程实践表明,沥青路面出现坑槽破损的概率很小,对 $R_a$ 数值的影响不到1%,计算中取 $0.01^{[10-11]}$ ;L为隧道掘进影响公路的长度,L=152 m;B为路面宽度,B=17 m;i为沉降槽弯沉宽度之半<sup>[12]</sup>,即

$$i = 0.575 Z_0^{0.9} D^{0.1}$$

式中, $Z_0$ 为隧道断面中部至地表距离, $Z_0 = 38 \text{ m}$ ;D为隧道等效直径,D = 15.8 m,则 i = 20.0 m。

在隧道施工过程中,即使不发生事故,正常掘进 也会使地表产生一定的沉降变形,隧道正常施工时, 隧道拱顶的地表沉降量为 S。为

$$S_0 = \frac{0.313v_0 D^2}{i} \tag{4}$$

式中, $v_0$  为隧道施工过程中的土体损失率,对松散黄 土地层,取 4.5%,则  $S_0 = 17.6 \text{ mm}_{\circ}$ 

在最不利情况下,如表 1, *K*<sub>流</sub>、*K*<sub>糠</sub> 及 *K*<sub>坑</sub> 均取 1. 0,则最大沉降量与 *PCI* 的关系曲线如图 1。

从图 1 可以看出,当路面状况指数 PCI 大于 75 时,风险事件导致的地表最大沉降值 S<sub>max</sub>变化较小; 当 PCI 处于 75 和 65 之间时,地表最大沉降值 S<sub>max</sub>开 始显著增大;而 PCI 小于 65 之间的时, S<sub>max</sub>开始急剧



放大,此时可能是洞内出现坍塌引起。当  $PCI \ge 70$  时,路面质量处于良好状况,即风险事件导致的地表最大沉降值  $S_{max}$ 处于一种风险可控的范围,因而以 PCI = 70 时的沉降量[U] = 33.6 mm 作为隧道下穿孙辛

路的控制指标。

为了保证周山隧道下穿孙辛路施工过程中重载车辆能够顺利通行,要求路面破损指数 *PCI*≥70,此 时最大沉降量[*U*]=33.6 mm。由此可以根据隧道下穿孙辛路过程中路面实测位移 *U* 确定隧道施工管理 基准:

I: 当 $U \leqslant \frac{1}{3} [U]$ (即 $U \leqslant 11.2 \text{ mm}$ )时,隧道安全,正常施工;

Ⅱ:当 $\frac{1}{3}$ [U]≪U≪ $\frac{2}{3}$ [U](即 11.2 mm≪U≪22.4 mm)时,隧道变形较大,应加强监测,必要时加强支 护,谨慎施工:

Ⅲ:当*U*≥<sup>2</sup>/<sub>3</sub>[*U*](即*U*≥22.4 mm)时,隧道变形过大,应检查隧道喷层是否出现开裂,加强隧道变形和地表沉降监测,加强支护,确定隧道安全后可继续施工。

### 4 合理施工方案的确定

#### 4.1 计算方案的确定

这里对 CRD 法和 CD 法进行施工过程的力学分析,对比两种施工方案引起的路面沉降和支护受力。 以隧道右线隧道下穿孙辛路中心里程 YK3+10 前后共 72 m 范围建立三维数值模型。孙辛路与隧 道轴线夹角约 22°,路面宽度按 17 m 考虑。路面车辆荷载一般按均布荷载 P=20 kPa 考虑<sup>[11]</sup>。由于施工 过程中经常会有严重超载的运送钢筋及水泥的车辆,还有运输混凝土的罐车,因而取车辆地表荷载 P= 30 kPa,按道路走向满布于整个道路范围。

#### 4.2 计算模型及参数

埋深约 36 m,地层主要为粉质黏土、钙质胶结层和风化泥质砂岩。超前支护采用注浆小导管超前支 护,将其等效为加固区考虑。小导管超前支护每一个循环的长度 4.8 m,搭接 2.8 m。隧道开挖进尺为 0.6 m,支护采用 C25 喷混凝土厚 28 cm,间距为 60 cm 的工字钢 20b 拱架。模型中采用实体单元模拟地 层和预支护加固区,采用实体单元模拟支护结构。数值模型宽 80 m,沿隧道轴线方向长 72 m,高 79.1 m。 单元划分后的模型及断面局部图如图 2。

将钢架和喷混凝土层作为均匀的初期支护来考虑,通过提高支护单元的力学指标的方法间接考虑钢 架的作用。根据现场开挖揭示出的地层情况及勘察资料确定模型计算参数如表 2。

材料类型	容重/( $kN \cdot m^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉质黏土	18.0	100	0.38	40	24
钙质胶结层	19.0	150	0.34	150	30
泥砂岩砂岩互层	21.0	260	0.26	280	32
超前加固区	20.0	2 000	0.26	200.0	35
初期支护	23.0	24 700	0.2	_	—

表 2 地层和支护的物理力学性能指标

图 2 模型中上部地层为粉质黏土地层与钙质胶结层互层,厚度从上而下分别为 15 m、7 m、7 m 和 8 m,隧道洞身为粉质黏土,其下为老黄土。

4.3 计算结果对比分析

4.3.1 隧道拱顶及地表路面沉降对比

模型中部断面处,隧道两种工法施工过程中拱顶沉降及地表沉降随计算步的变化曲线如图 3。



图 2 计算模型示意图

图 3 两种工法的隧道拱顶及地表沉降曲线

从图 3 可以看出: CRD 和 CD 法引起的地表沉降均处于管理基准 Ⅲ; 和 CRD 工法相比, CD 工法临时 支护由于取消了横向临时支撑,支护刚度有一定程度的下降,CD法拱顶沉降(52.9 mm)比 CRD 法拱顶 沉降(50.0 mm)增大 10.5%。CRD 和 CD 工法引起的最大沉降位移分别为 22.6 mm 和 26.5 mm,CD 法 的地表沉降增大了17.3%。

4.3.2 隧道支护应力对比分析

CRD 和 CD 两种工法施工过程中隧道支护结构的特征点位处:拱顶(00)、两侧拱腰(L1、R1)、两侧拱 脚(L2、R2)、两侧墙中(L3、R3)和两侧墙脚(L4、R4)的第1主应力(S1)和第3主应力(S3)的历程曲线分 **别如图**4 和图 5。



图 5 CD 法支护各点主应力曲线

对比图 4 和图 5 可以看出:

(1) CRD 法支护中右侧拱腰(L1S1) 拉应力最大(7.18 MPa),其次为左侧拱腰处和拱顶处。CD 法支 护中最大拉应力仍出现在右侧拱腰(L1S1),最大拉应力为 7.37 MPa,增加幅度仅有 0.09 MPa。

(2)与 CRD 法相比,最大压应力的位置发生了移动; CRD 法支护中最大压应力出现在左侧墙中 (L3S3),为 8.89 MPa,而 CD 法的最大压应力出现在右侧墙中(R3S3),为 10.04 MPa,比前者大 12.9%。

从以上分析可知,两种工法的支护结构最大拉应力相差不大,CD法的最大压应力比 CRD 法的大 12.9%,但两种工法的最大拉应力和最大压应力都处于安全状态。

4.3.3 围岩屈服区对比分析

CRD 和 CD 两种工法施工完成后,隧道模型目标断面周边地层的塑性区分布分别如图 6 和图 7。

从图 6 和图 7 可以看出, CD 法断面屈服区面积比 CRD 法断面的屈服区面积大。断面两侧拱腰以下 及仰拱部位屈服区面积较大,拱顶范围处屈服区较小,主要是超前支护的作用。



图 6 CRD 法断面围岩屈服区分布



图 7 CD 法断面围岩屈服区分布

4.3.4 合理施工方案的确定

通过以上对 CRD 和 CR 两种工法施工过程中地表沉降位移、拱顶沉降、支护应力和隧道断面周边塑 性区分布及大小等方面的对比分析,虽然 CD 法引起的地表沉降比 CRD 法的略大,但省去了 CRD 工法的 临时仰拱,施工成本较低,且可以加快施工进度,因而决定采用 CD 法下穿孙辛路施工。在下穿孙辛路的 施工过程中加强隧道变形及路面沉降监测,可利用前述施工管理基准进行日常施工管理。

#### 5 施工效果

在采用 CD 法下穿孙辛路的施工过程中,对隧道拱 顶沉降及隧道上方路面沉降进行了监测,沉降位移曲 线如图 8。

从图 8 可知,隧道施工完成后,隧道拱顶最大沉降 为 49.6 mm,地表路面最大沉降量 28.4 mm,略大于计 算地表位移,但仍小于预测最大沉降控制基准[U] = 33.6 mm,保证了下穿施工过程中孙辛路的正常通行 和隧道施工安全。



#### 6 结论

基于公路路面破损指数 PCI 与下穿公路施工风险事件引起路面最大沉降之间的关系确定了周山隧 道下穿孙辛路可能引起的路面最大允许沉降量,并据此制定出施工管理基准。对比分析了 CRD 和 CD 法 引起的隧道拱顶沉降、地表最大沉降、支护受力和隧道周边地层塑性区特征,确定采用 CD 法进行下穿施 工。采用 CD 法下穿孙辛路施工,需要加强地表及隧道变形监测,谨慎施工。施工监测表明地表路面最大 沉降量 28.4 mm,保证了隧道施工安全和孙辛路的正常通行。

### 参考文献

[1]午向阳,蒋宗全,李鹏飞,等.大断面隧道下穿高速公路施工方案优化研究[J].铁道建筑,2010(11):40-42.

[2]王志,杜守继,张文波.浅埋铁路隧道下穿高速公路施工沉降分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):531-536.

[3]段恩新.铁路隧道下穿施工引起高速公路路基沉降规律研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2013, 26(2): 41-45.

[4]姚宣德,王梦恕.地铁浅埋暗挖法施工引起的地表沉降控制标准统计分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10). 2030-2035.

[5]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, 33(2): 558-563.

[6]易小明,张顶立.浅埋大跨隧道下穿建筑物时的变形控制标准[J].都市快轨交通,2008,21(6):46-50.

[7]中华人民共和国交通部.JTJ 073.2-2001 公路沥青路面养护技术规范 [S].北京:人民交通出版社,2001.

(下转第55页)

[7] 杨超,岳丰田.上海长江隧道联络通道冻结优化设计研究[J].隧道建设,2012(6):843-848.

[8] 鲍绥意. 盾构技术理论与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:249.

[9] 王天明,戴志仁. 盾构法隧道端头井地层加固方法及其应用研究[J]. 铁道工程学报,2014(8):90-95.

[10] 杨平,张婷. 城市地下工程人工冻结法理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2015:195.

# Selection and Application of Soil Reinforcement Method for Connecting Aisle in Water-rich Round-gravel Stratum

#### Zhang Xiaofeng

(China Railway First Survey & Design Group Co. Ltd, Xi'an 710043, China)

**Abstract**: According to the characteristics of Nanning water-rich round gravel stratum, comparison analysis is made of the reinforcement methods appropriate for the formation of the connecting passage of shield tunnel. The results of study showed that the plain concrete continuous wall curtain grouting reinforcement method and artificial freezing method have better advantages in the aspect of risk control and environmental protection, which may provide certain reference for similar projects.

Key words:gravel stratum; soil reinforcement of connecting aisle; method of plain concrete continuous wall and grouting; artificial freezing method

#### (上接第49页)

[8] Whitman R V. Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 126(7):583-593.

[9]姚国伟,孙河川,魏庆朝.以地表沉降量作为沥青路面破损控制标准的研究[J].北京交通大学学报,2008,32(1):40-43. [10]郭庆海,刘文,胡群芳,等. 盾构施工对沥青路面影响评估[J].郑州大学学报:工学版,2004,25(3):70-73.

[11]陈龙. 城市软土盾构隧道施工期风险分析与评估研究[D]. 上海:同济大学,2004.

[12]朱永全,宋玉香.地下铁道[M].2版.北京:中国铁道出版社,2012.

Scheme Comparison and Selection of Large-span

# Loess Tunnel Excavated Under Road

#### Wang Wensheng

(No. 1 Engineering Co. Ltd., China Railway 11th Bureau Group, Xiangyang 441104, China)

Abstract: Taken excavation of large-span loess tunnel under road as study background, the research of safety construction method has been carried out. Based on the relationship of pavement condition index(PCI) and the possible largest settlement of road induced by risk event of tunnel excavation, the settlement standard is achieved, according to which the construction management rules are established. The CD method is proposed to excavate the tunnel undercrosss the road on the basis of comparison analysis of tunnel crown settlement, road surface settlement, stress of support structure and characteristics of ground yielding zone around tunnel section. The settlement monitoring results during tunnel construction by CD method have shown that the proposed method can guarantee the safety of tunnel excavation underneath the road.

**Key words**: pavement condition index (PCI); large-span loess tunnel; excavate under road; comparison and choice of construction schemes; surface settlement