

# 浅埋地铁隧道下穿高速公路施工方法比选

宋战平<sup>1,2</sup>, 王凯蒙<sup>1,2</sup>, 王 涛<sup>1,3</sup>, 王军保<sup>1,2</sup>, 唐坤尧<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学, 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300)

**摘要:** 以贵阳地铁 1 号线下麦西隧道 YD1K1+395~+505 段下穿既有环城高速公路及高速公路交通涵洞施工为工程背景, 采用 Midas GTS/NX 软件对该段浅埋隧道下穿高速公路及高速公路涵洞施工方案进行优化研究, 分析了台阶法、CD 法、CRD 法和双侧壁导坑法四种施工开挖工法施工时隧道围岩的变形及运营高速公路路面的沉降变形特性; 对比研究了不同施工方案引起的围岩塑性区及支护结构受力特性的变化。基于数值模拟分析的研究结果表明, 下麦西隧道近距离穿越既有运营高速公路施工时, 选用 CRD 法开挖对路面及隧道拱顶的沉降均可起到很好的控制作用, 隧道支护结构的受力特性良好, 施工中既有高速公路及隧道本身的稳定性良好。基于数值模拟分析确定了经济、合理的施工开挖方案及施工参数, 跟踪施工进行的现场监测及与数值分析结果的对比分析表明了推荐方案的合理、可行性。贵阳地铁 1 号线下麦西隧道下穿既有运营高速公路及公路涵洞的工程实例为同类工程的建设提供了有意义的参考和借鉴。

**关键词:** 浅埋隧道; 施工方法; 数值模拟; 隧道开挖; 路面沉降

中图分类号: TU 45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0503-08

## Analysis of construction method of shallow metro tunnel under the crossing highway

SONG Zhanping<sup>1,2</sup>, WANG Kaimeng<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1,3</sup>, WANG Junbao<sup>1,2</sup>, TANG Kunyao<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;  
3. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** YD1K1+395~+505 mileage of the Ximaixi tunnel of Guiyang urban rail transit No. 1 line under the existing highway and traffic culvert is taken for study. The Midas GTS/NX software was used to simulate the deformation of the surrounding rock and the settlement of the highway pavement during the construction of the tunnel under the highway. At the same time, the changes of the mechanical properties of the surrounding rock plastic zone and supporting structure caused by different construction methods were compared. The four types of excavation methods including the bench cut method, CD method, CRD method and double side drift method are analyzed. Results show that CRD method has good control effect on the settlement of the road surface and tunnel, and the mechanical properties of the tunnel support structure are good. In the construction, the stability of the highway and the tunnel itself is good. Based on numerical simulation analysis, the economical and reasonable construction excavation plan and construction parameters were determined. The onsite monitoring of the follow-up construction and the comparison analysis with the numerical analysis results showed that the recommended plan was reasonable and feasible. The project example of the Ximaixi tunnel of Guiyang urban rail transit No. 1 line under the existing highway and traffic culvert for the construction of similar projects provide a meaningful reference.

**Key words:** shallow tunnel; construction method; numerical simulation; tunnel excavation; land settlement

近年来, 伴随着国家城镇化进程的不断加速, 城市地铁隧道下穿既有建(构)筑物在工程建设中不可避免。国内外的专家学者结合具体的工程实例, 在理论分析、数值计算、试验研究以及现场监测等方面对隧道的开挖方法和辅助施工措施进

行了大量的研究, 取得了卓越的研究成果。

袁驰宇<sup>[1]</sup>使用数值模拟软件分析研究了山区浅埋地铁隧道下穿既有运营高速公路的四种常用施工工法, 并通过对比数值模拟和隧道监控量测的数据, 推荐浅埋隧道下穿施工采用 CRD 法。张

著<sup>[2]</sup>结合背阴坡隧道现场监控量测结果,模拟并对比了不同施工方法的下穿隧道有限元计算模型,结果表明山区公路路基的稳定性随着开挖进尺的减小而提高,侧壁导坑法效果最好,其次是台阶法,全断面法对稳定性影响最大.研究了下穿隧道位置对于公路路基地表沉降的影响;刘松涛<sup>[3]</sup>等以湘桂铁路石头岗隧道工程实例,使用数值分析软件对多种施工方法进行了分析研究,并结合实际施工结果,验证了上部中隔墙法较好地控制了高速公路路面沉降.在理论分析方面,为解决浅埋隧道周边应力场及位移场的精确性,提出了复变函数法、随机介质理论等计算方法,结合收集到的监控量测数据,得到了符合工程实际情况的解析解<sup>[4-6]</sup>.但从相关研究文献可以看出,由于现场情况复杂,理论分析有着局限性,对于山区浅埋隧道下穿既有构筑物的绝大多数研究是通过测量人员定期监测现场布置的监控测量点或使用自动化采集装置收集数据,通过监控测量隧道关键断面及部位在开挖过程中的沉降值以及收敛位移值.施工方法主要是选用双侧壁导坑法、CRD法、CD法等,在控制隧道沉降和收敛方面比较好的工法,保证施工和隧道的安全,同时结合地质超前预报、大管棚超前支护等施工方法控制隧道以及既有建(构)筑物的位移变形情况<sup>[7-10]</sup>.但是,采用监测方式进行研究存在着不足,监测点受地形及施工影响布置不够精准,人员或自动采集装置收集的监测数据通常存在着一定地滞后性及误差性等,隧道在开挖施工过程中不能对围岩变形情况以及施工附近区域的地表沉降、原有建筑物结构的安全进行精准控制.且当前浅埋隧道下穿既有构筑物的数值模型多为二维平面模拟,由于实际情况较为复杂,在建立模型时不得不进行一定程度的简化,而且计算时没有考虑在隧道开挖和支护过程中的三维空间效应<sup>[10-13]</sup>.

本文以贵阳地铁1号线下麦西车站YD1K1+395~+505段浅埋地铁隧道下穿既有高速公路项目为工程背景,使用Midas GTS/NX有限元软件建立三维有限元计算模型,通过模拟隧道在施工时采用四种不同的施工工法,同时考虑软件里隧道开挖过程中的三维空间效应,比较不同工法下的位移场变化和支护结构受力情况,得到模拟施工的最优工法.运用数值模拟软件计算不同施工工法下隧道变形及高速路地表沉降量,并结合现场监控量测数据分析发现CRD法为最优施工工法.本文为西南山区浅埋地铁隧道的施工安全和正常

运营的高速公路的行车安全予以技术指导,同时进一步为西南山区浅埋地铁隧道下穿既有高速公路及交通涵洞提供施工上的理论支持.

## 1 隧道工程概况

下穿环城高速公路段浅埋地铁隧道全长528 m,线路设计为单洞双线,其中共有110 m隧道下穿高速公路路堤及涵洞出口,隧道与高速公路成 $50^\circ$ 夹角相交,如图1所示.其中:YD1K1+395~+456段共61 m下穿公路路堤,YD1K1+456~+505段共49 m下穿涵洞出口地段及附近地面,其平面布置见图2.该段浅埋隧道下穿高速公路所处的地质条件较差,岩土勘察报告显示下穿段地质主要为页岩和第四系土层,岩石破碎程度大属于V级围岩.高速公路路面距离下穿地铁隧道拱顶高度为23 m,涵洞形式为拱涵,其洞口孔径和高度为别为4 m、5 m,翼墙受地质条件所限露出地表处的高度为2~5 m,翼墙墙背后为高速公路路堤.该段下穿地铁隧道埋深较浅,与涵洞

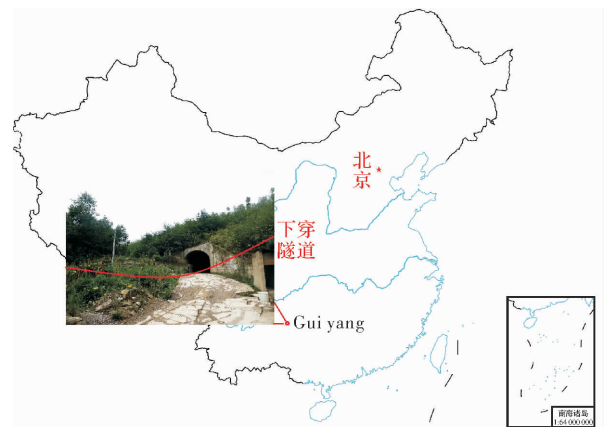


图1 隧道位置图

Fig. 1 The location of the tunnel

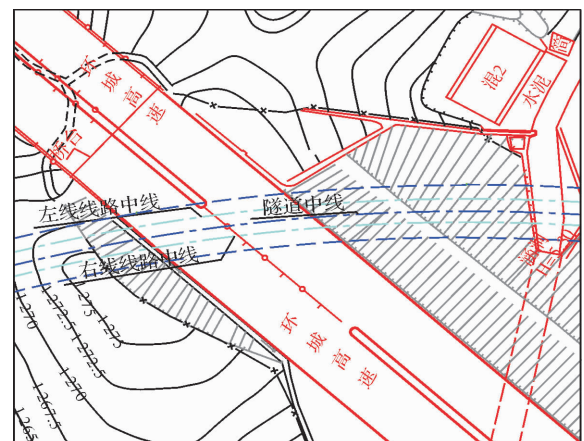


图2 隧道—高速路—涵洞位置关系示意图

Fig. 2 The relationship between tunnel, highway, and culvert

处的最小水平距离只有 2.2 m，下穿隧道在涵洞出口处最小埋深只有 0.8 m，在涵洞出口右侧 20 m 范围内埋深在 2.5 m 以内。因为涵洞为通向拌合厂的出口，为保证施工进度，不能封闭路段。

2 建立计算模型

下穿地铁隧道线路方向与既有高速公路成 50° 角斜交，通过建立隧道的三维几何模型，反映出隧道和高速公路的实际位置关系，同时也能更好和高效地分析隧道施工过程中对高速公路地面的影响。同时考虑到现场地质条件的复杂性，模型对土层和建筑材料进行了一定简化，将隧道围岩和土体都视为各向同性体，屈服准则采用 Mohr-Coulumb 准则，使用 3D 实体单元进行模拟，土体参数来源于地质勘察报告。在实际施工中，锚杆使用钢筋制作，初次支护、二次衬砌主要为钢筋拱架和混凝土，故屈服准则均为线弹性，采用 2D 单元划分，初期支护的等效弹性模量使用模拟法计算得出<sup>[14-15]</sup>。计算参数详见表 1。

同时为了尽可能减少使用模拟软件建立模型时产生的尺寸效应，减轻模型边界约束的影响，提高软件分析计算时的精度，取模型的边界为地铁隧道跨度的 3~5 倍。计算模型在 X、Y、Z 方向上分别取 171 m×100 m×100 m，即为实际工程的 YD1K1+327~YD1K1+498 段，具体的隧道模拟模型如图 3 所示。计算模型边界约束使用软件提供的自动约束功能添加，模型四周和地面为法向约束，地表不添加约束为自由面。高速公路车辆荷载的取值按规范取公路 I 级荷载 10.5 kN/m。

表 1 模型的力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of the model

材料名称	$E/\text{GPa}$	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$\mu$	$c/\text{kPa}$
强风化层	0.000 7	22.0	0.43	38.3
软弱夹层	0.005 5	17.7	0.35	40
中风化层页岩	3.0	25.9	0.30	200
弱风化层灰岩	3.5	26.4	0.40	450
管棚等效加固	3.2	26.3	0.34	—
初期支护	28.0	23.0	0.20	—
二次衬砌	31.5	25.0	0.20	—
锚杆	29.5	25.0	0.30	—
路基	5.0	2.3	0.28	—

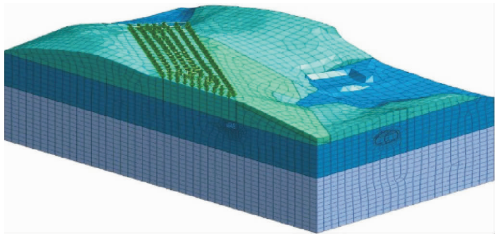


图 3 计算模型

Fig. 3 The model of computation

3 模拟计算结果及分析

山区浅埋下穿隧道施工时，通常选用的施工工法为：CD 法、CRD 法、双侧壁导坑法这类强调小断面强支护的工法。本文在以上三种工法的基础上增加了台阶法进行了模拟及计算。为了尽量减少数值软件模拟的边界条件在计算时对结果的影响，选取隧道中间断面即  $X=85.5\text{ m}$  处进行分析比较，从而得出最有效且适合的施工方法。

运用 Midas 软件模拟施工时，台阶法施工步骤为：先施工上台阶部分，由于隧道围岩是 V 级围岩，上台阶长度考虑取 1~2 倍隧洞宽，模拟时上台阶每轮进尺取 20 m，再施工下台阶，上下台阶间距取 20 m，最后施作仰拱部分；CD 法施工步骤为：先开挖 1-3 隧道左侧断面，然后开挖 4-6 隧道右侧断面；CRD 法施工步骤为：隧道左侧断面和隧道右侧断面交替开挖；双侧壁导坑法施工与 CD 法类似，其步骤为：先施作隧道左侧超前导洞，再施作隧道右侧导洞，在此期间保留中间核心土区域，最后再进行隧道中间断面的开挖施工。除台阶法外，模拟其余三种施工方法时，每一施工步的进尺取 3 m。具体步骤见图 4。

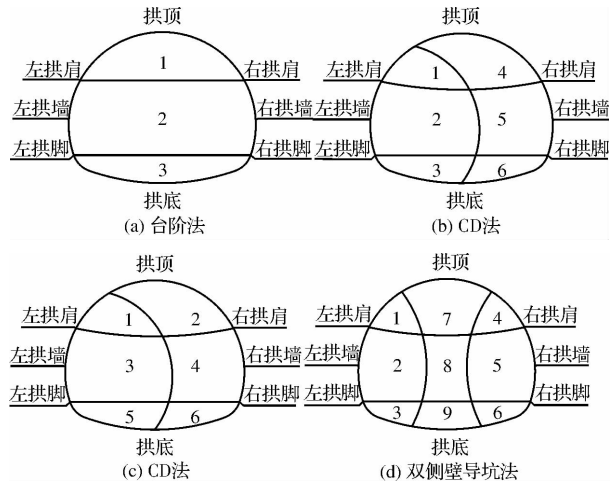


图 4 观测点位置图

Fig. 4 Location of observation points

3.1 四种施工工法位移场分析比较

3.1.1 垂直方向位移

由表 2 和图 5 可以发现,在四种不同的施工工法下,隧道施工至相同地点时,隧道四周各观测点竖向位移的监测数据:双侧壁导坑法的拱顶沉降值在完成施工后为-3.217 cm,左、右拱肩的沉降值分别为-0.821 cm 和-2.303 cm,通过比较可知,其各监测点的沉降值是四种施工工法中最小的.其次是 CRD 法和 CD 法,比较 8 个监测点的沉降值,这两种工法的沉降值大小相当,台阶法的沉降值最大,拱顶沉降达到了-3.995 cm.从左右边墙处的竖向位移值来看,四种工法几乎没有差别,左边墙位移值在 1 cm 左右,右边墙位移在-0.2 cm 左右.隧道底部的情况与拱顶相似,采用台阶法施工时隧道拱底隆起值最大,达到了 6.640 cm,CRD 法和 CD 法较小,而且两种施工方法在监测点所得到的位移值基本没有差异,隆起值都在 6.5 cm 左右,双侧壁导坑法最小,隆起值只有 6.074 cm.

通过分析观测点所得的拱顶沉降值,其余三种施工方案同双侧壁导坑法相比,台阶法的沉降值增大了 24.2%,CD 法和 CRD 法的沉降值分别大了 19.8%、17.8%;而在拱底隆起值方面,三种施工方法分别增大了 9.3%、7.3%、7.2%,工法排序与上文相同.可以看出,在控制隧道拱顶沉降和拱底隆起方面,台阶法都不能取得理想的施工效果,CD 法和 CRD 法较为接近双侧壁导坑法,且两种工法在各观测点所得到的数据相差不大.通过比较可知,采用双侧壁导坑法施工效果最好,其次是 CRD 法和 CD 法,考虑到施工复杂程度和经济成本,推荐采用 CRD 法施工.

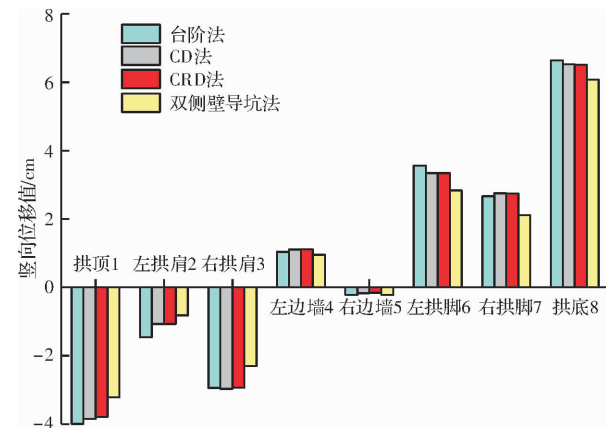


图 5 不同工法下各观测点竖向位移图

Fig. 5 The vertical displacement of observation points under different construction methods

表 2 各施工方法各观测点竖向位移情况表(单位: cm)

Tab. 2 The vertical displacement of observation points under different construction methods( Unit: cm)

	台阶法	CD 法	CRD 法	双侧壁导坑法
拱顶 1	-3.995	-3.854	-3.790	-3.217
左拱肩 2	-1.459	-1.070	-1.069	-0.821
右拱肩 3	-2.942	-2.968	-2.935	-2.303
左边墙 4	1.038	1.104	1.114	0.952
右边墙 5	-0.218	-0.171	-0.158	-0.218
左拱脚 6	3.563	3.346	3.346	2.829
右拱脚 7	2.666	2.750	2.742	2.108
拱底 8	6.640	6.522	6.514	6.074

3.1.2 水平方向位移

表 3 和图 6 为浅埋隧道在四种施工工法下,模拟隧道施工至指定位置并施作支护措施后,得到的 8 个监测点水平位移的具体数值情况:通过比较可知,台阶法、CD 法、CRD 法这三种施工工法引起的水平位移值都比双侧壁导坑法要小,综合比较这三种施工工法,台阶法引起的水平位移值在 8 个监测点中,只有左边墙 4 号点的数值小于其余两种工法,其余各观测点的水平位移均大于 CD 法、CRD 法. CRD 法所引起的水平位移值是四种工法中最小的,CD 法次之.

表 3 各施工方法各观测点水平位移情况表(单位: cm)

Tab. 3 The horizontal displacement of observation points under different construction methods (Unit: cm)

	台阶法	CD 法	CRD 法	双侧壁导坑法
拱顶 1	0.695	0.615	0.594	0.773
左拱肩 2	0.726	0.609	0.612	0.704
右拱肩 3	0.500	0.477	0.487	0.701
左边墙 4	0.649	0.685	0.704	0.826
右边墙 5	-0.096	-0.004	0.043	-0.272
左拱脚 6	-0.117	-0.092	-0.070	0.177
右拱脚 7	-0.520	-0.447	-0.457	-0.821
拱底 8	-0.450	-0.315	-0.304	-0.399

分析图 6 可知,8 个监测点中,只在监测点左拱肩 2、拱底 8 处,双侧壁导坑法施工所导致的水平位移值比台阶法引起的水平位移值小,而在其余监测点处,双侧壁导坑法控制水平位移的效果都是最差的. 为了更直观的比较四种工法在控制隧道水平位移时的优劣,选择左边墙 4 号监测点作为研究对象. 双侧壁导坑法在此观测点的水平位



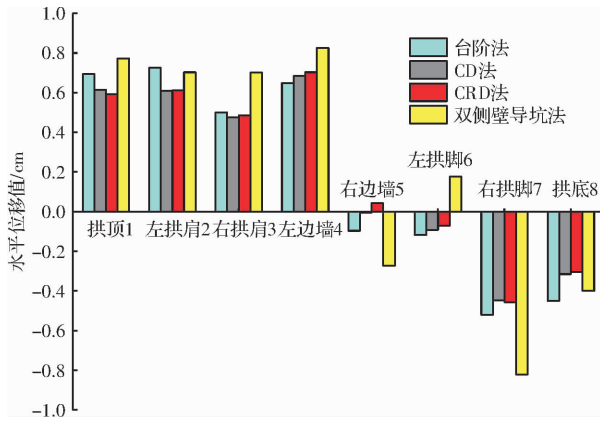


图6 不同工法下各观测点水平位移图

Fig. 6 The horizontal displacement observation points under different construction methods

移值是8个监测点上最大的,位移值达到了0.826 cm.在这一监测点上,其他三种施工工法同双侧壁导坑法相比较而言:台阶法减小了21.4%,CD法减小了17.1%,CRD法减小了14.8%.

通过上文的分析可知,四种施工工法在控制隧道水平收敛方面,双侧壁导坑法和台阶法表现出的控制效果较差,分析其原因,由于台阶法施工时掌子面开挖面积较大,施工对隧道扰动比较大,造成水平位移较大.双侧壁导坑法分部小断面保留核心土开挖,保证了施工时隧道的稳定,但其施工步骤较多,且工艺复杂,造成水平位移不能得到较好的控制.CD法和CRD法控制效果无明显差异,使用CD法开挖时造成的水平位移平均值比双侧壁导坑法小了20%左右,说明这两种施工方法在控制隧道水平位移方面较好.

### 3.1.3 地表沉降

图7为四种开挖工法的沉降曲线,四条沉降曲线都是两边沉降值小,中间沉降值大,表明地面有沉降形成.对比分析各施工方法,地表沉降最大值出现在5号观测点,台阶法的沉降最大,沉降值达到了-1.371 cm.在5号观测点,其他三种工法同台阶法进行比较可知,监测点处的地表沉降值分别减小了15.2%、17.6%、30.1%.其中,双侧壁导坑法在观测点CD1处沉降最小,只有一0.517 cm.控制高速公路地表沉降方面,四种施工工法都可以达到规范控制要求,双侧壁导坑法在控制地表沉降方面效果最好,其次是CRD法和CD法,CRD法的沉降值相较而言更小,这两种工法与双侧壁导坑法在相同监测点上的沉降值相差很小,台阶法的效果最差.

控制地表沉降是下穿施工的一个重点,模拟结果表明,四种施工方法引起的地表沉降在0.517

~1.371 cm之间,对高速公路的影响轻微.综合隧洞垂直、水平位移的模拟结果,施工方法的最优选择是双侧壁导坑法,但考虑到现场施工进度和工程造价,选择CRD法施工符合现场实际情况,且施工效果较好.

表4 不同工法下地表各测点沉降值(单位:cm)

Tab. 4 Settlement values of surface measurement points under different construction methods (Unit: cm)

地表测点	台阶法	CD法	CRD法	双侧壁导坑法
CD1	-0.74	-0.598	-0.576	-0.517
CD2	-1.061	-0.883	-0.857	-0.747
CD3	-1.269	-1.068	-1.039	-0.891
CD4	-1.363	-1.152	-1.121	-0.954
CD5	-1.371	-1.162	-1.13	-0.959
CD6	-1.31	-1.108	-1.076	-0.917
CD7	-1.184	-0.994	-0.963	-0.829
CD8	-1.002	-0.828	-0.798	-0.699

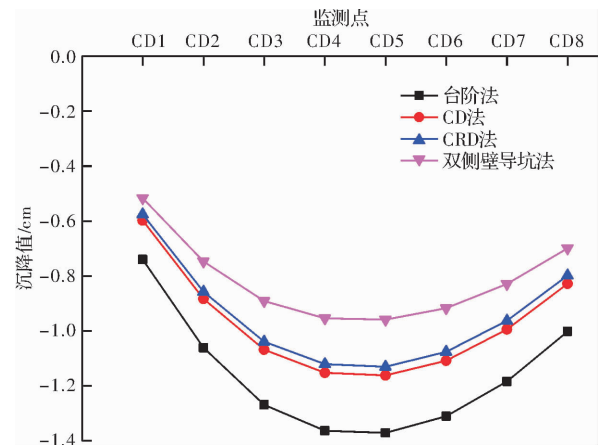


图7 不同工法下高速公路各测点沉降曲线图

Fig. 7 Settlement curve of measuring points under different construction methods

### 3.2 不同工法施工后的围岩塑性区分布及分析

图8为四种施工工法在隧道掌子面开挖完成后的剖面图,其塑性区的分布无明显差异,只是塑性区的占比和数值大小略有差异.各工法施工后的塑性区大小占模型截面总面积的情况:按图8中各施工工法的排列顺序来看,塑性区占比分别为39.2%、39.5%、48.5%、48.5%.双侧壁导坑法相较于其他三种工法,每次开挖面积较小,施工步骤复杂,造成开挖过程中对围岩的扰动较大,掌子面处的围岩应力需要较长的时间才能完成重分布,分析图8后可看出,双侧壁导坑法施工完成后,塑性区从隧道左上方地面经隧道右下方贯通至围岩底部.

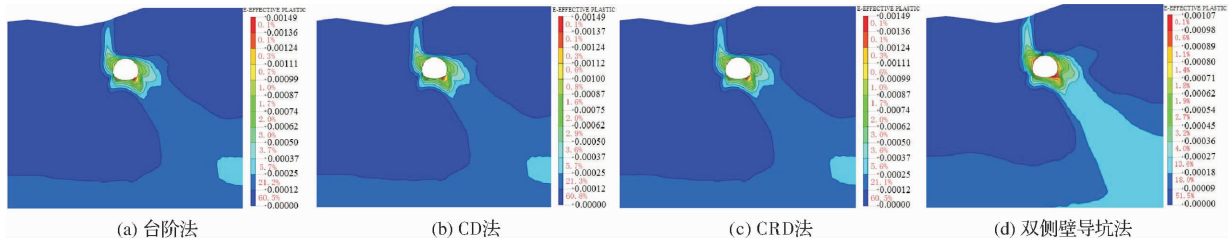


图 8 各工法下围岩塑性区云图

Fig. 8 The plastic zone of surrounding rock under different construction methods

### 3.3 不同工法施作支护结构后隧道的受力分析

各施工工法在完成初期喷混后,隧道支护结构的最大主应力分布云图见图 9,初期支护出现最大主应力的位置都位于隧道中部,出现区域位于隧道下穿高速公路施工处。比较四种施工方法的拱顶初喷最大主应力云图的区域大小,台阶法

云图面积最大且数值最大,CD法和CRD法次之,双侧壁导坑法最小。表 5 为初期喷混的第一主应力值,结合图 9 分析,台阶法的拉应力、压应力的极值相较于其他三种施工工法都是最大的,三种工法按受力效果的排序同上。比较出现最大值的台阶法和最小值的双侧壁导坑法,在最大拉应力和最大压应力上,分别增加了 41.1 % 和 58.2 %。

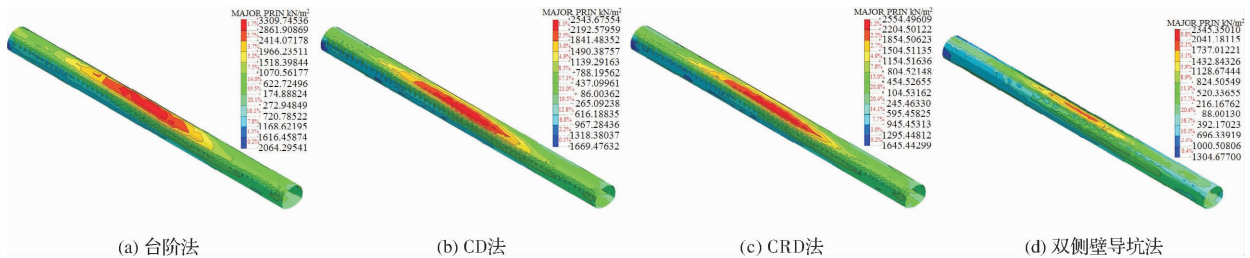


图 9 不同工法下初期喷混最大主应力云图

Fig. 9 The maximum principal stress of initial shotcrete under different construction methods

表 5 初期喷射混凝土第一主应力受力值(单位: MPa)

Tab. 5 The first principal stress value of initial shotcrete (Unit: MPa)

	台阶法	CD 法	CRD 法	双侧壁导坑法
最大拉应力	3.309	2.543	2.554	2.345
最大压应力	2.064	1.669	1.645	1.304

通过分析比较四种施工工法的模拟结果后,可以发现:隧道下穿浅埋地层施工时,台阶法的结果是最不理想的,由于施工时开挖面积较大对围岩扰动最为严重,其在施工过程中在拱顶和地表沉降的数值是最大的,表明其控制效果远不如其他几种工法。双侧壁导坑法同其他三种工法相比其在控制地表和拱顶竖直方向上表现最好,在控制隧道的水平位移方面较差。从模拟结果来看,CD法与CRD法在各项数据上都逊于双侧壁导坑法,但这两种工法没有明显的差异,CRD法要略微优于CD法。

从围岩塑性区的云图面积上来看,双侧壁导

坑法的塑性区占比最高。而在完成初期喷混后拱顶的受力情况方面,双侧壁导坑法最优,CRD法和CD法略为次之,台阶法施工后拱顶的最大拉应力值、最大压应力值是这些工法中最大的。

在实际施工的复杂程度方面:台阶法的施工工序较少,施工技术成熟,相较于其他工法而言比较简单,成本和效率上最好控制。CD法需要在分步施工时添加临时支撑,但较于CRD法和双侧壁导坑法还是较为方便。但在浅埋地层中开挖隧道,CD法在控制围岩变形方面稍差于这两种工法,但在施工速度和成本控制方面优于CRD法。双侧壁导坑的施工效果最好,但施工进度不快,其施工成本造价也高。

在实际施工时要考虑工期和成本,必须在满足工程本身安全可靠和质量的基础上,尽可能加快施工进度。通过上述比较,考虑到此段地铁隧道下穿既有高速公路及公路涵洞,为了保证高速公路的行车安全及正常运营,推荐此下穿段使用CRD法施工。使用CRD法施工能够很好的控制高

速公路地表沉降、隧道的收敛变形速率、围岩应力每步施工时都会得到一定地释放,使隧道保持相对稳定的状态。同时,分步小断面开挖并快速初喷和添加支护,使开挖部分封闭成环,能改善隧道初支的受力情况,保障隧道施工人员的安全。

## 4 现场监测数据分析

### 4.1 拱顶监测数据与模拟数据对比分析

拱顶下沉观测断面所在的里程为 YD1K1+450,拱顶沉降观测使用的仪器为 GFS-1 测微器。图 10 为模拟施工后得到的数据和现场监测数据,模拟施工和现场施工都选用的是 CRD 法施工,观测点位置在施工至断面前选择隧道拱顶上方地表,通过后选择隧道拱顶。由图中现场监测沉降曲线可知,在距离监测断面 30 m 的地方进行施工时,隧道拱顶地表的沉降开始逐渐增大,施工至 YD1K1+450 断面这段时间内,沉降值增大到 10 mm 左右后,沉降在隧道施工通过监测断面后基本没有增加,随着隧道接着施工,沉降值达到了 13 mm 左右,继续推进至 15 m 后,现场监测的沉降值急剧增加,推进到 16 m 后,拱顶沉降又再次保持稳定,在下穿施工期间,拱顶的总计沉降达到了 39.8 mm,沉降变化的平均速率达到了 2.487 5 mm/d。

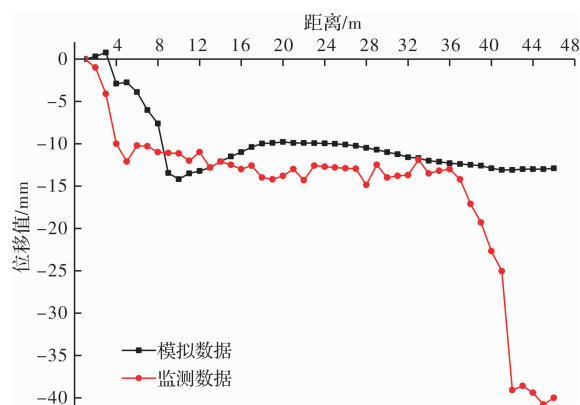


图 10 YD1K1+450 处沉降变化量曲线图

Fig. 10 The settlement variation curve of YD1K1+450 mileage

模拟沉降曲线同现场监测曲线相比,其模拟施工至监测断面时,沉降值只有 4.12 mm,再施工 2 m 后,沉降曲线同现场监测曲线相吻合,在 15 m 处,沉降值没有突然急剧增加,而是继续稳定在 13 mm 左右,同实际沉降曲线相背离。出现差异的原因是由于掌子面推进至此,因天气原因暂时停止施工,复工后,隧道因受降水影响,拱顶沉降突然变大,模拟施工时未考虑降雨因素,导致监测数据与模拟数据出现巨大差异,故其沉

降曲线波动很小,同实际情况相比有很大差异。

模拟沉降曲线的走势在未下雨前,与实际沉降曲线走势基本一致,说明实际施工中使用 CRD 法取得了预期效果。

### 4.2 地表沉降监测数据

图 11 为地表监测点布置图。从图 12 可看出,浅埋地铁隧道下穿高速公路施工,下穿隧道右线隧道上方的高速公路路面沉降比左线上方的路面大,监测点中 405-3 处的沉降值最大,为 86.07 mm。390、395 处的监测点路面沉降在 27~36 mm 之间,属于施工扰动的正常范围之内。395 至 410 监测点数据显示,有 8 个监测点处的路面沉降值在 50 mm 及以上,高速公路正常运营已受到影响。出现过大沉降的原因是,下穿隧道右线隧道靠近已有涵洞,受隧道开挖扰动的影响较大。

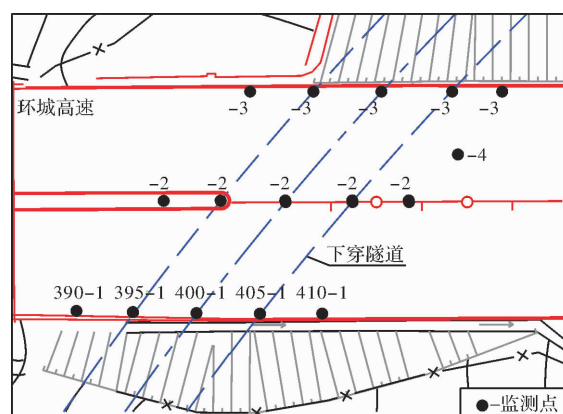


图 11 监测点布置图

Fig. 11 The layout of measuring points

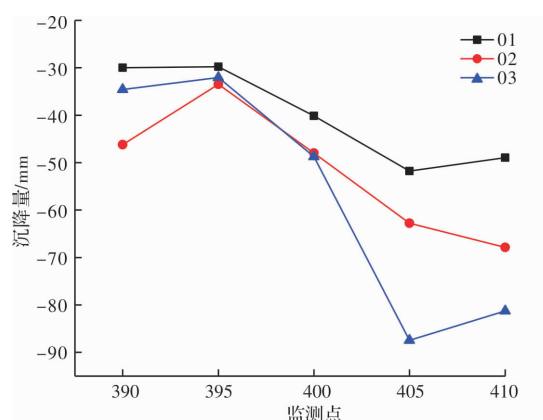


图 12 12月监测点累计沉降量

Fig. 12 The settlement of measuring points in December

从图 13 可看出,沉降最大处的 405-3 监测点在下穿高速公路施工完成后,其沉降值继续增加,从 86.07 mm 增大到 87.62 mm,累计沉降 1.55 mm。沉降基本保持稳定的原因有两个,一个是因为下穿施工前高速路基已受到扰动,路基沉降已基本

完成,二是CRD施工后沉降得到了有效控制,在施工过程中路面没有发生过大沉降,保证了高速公路的行车安全。

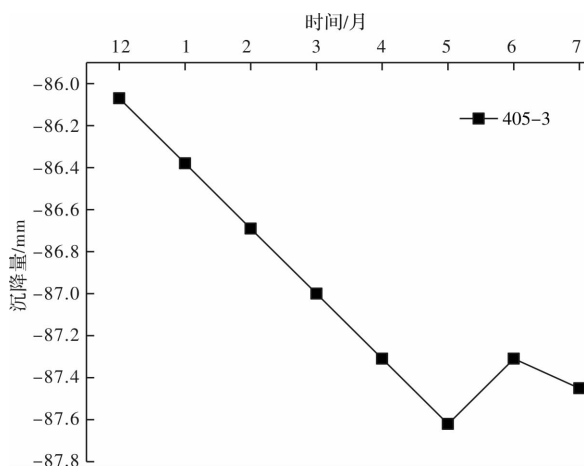


图 13 405-3 监测点累计沉降量

Fig. 13 The cumulative settlement at 405-3 measuring point

## 5 结语

经过以上的数值模拟计算和分析后,能得到下列结论:

(1)对于浅埋地铁隧道下穿既有高速公路的施工时,应分步小断面开挖,减少掌子面开挖面积,从而减轻施工对隧道周围土体的扰动。在控制地表沉降方面,CRD法仅次于双侧壁导坑法,但二者相差较小,台阶法引起的沉降最大。

(2)分析四种工法施工时隧道支护结构的受力状态,按照初喷施工后隧道拱顶的拉应力区域大小来排序为:台阶法、CD法、CRD法、双侧壁导坑法。CD法和CRD法完成初期喷混施工后,隧道拱顶处的受力状态几乎相等,台阶法中隧道支护的拉、压应力值为上述施工方案中的最大值。

(3)从施工工艺的复杂程度上看,台阶法的施工技术最为成熟且造价较低,双侧壁导坑法施工最为复杂,且施工造价高。为了尽量减少对正常运营的高速公路的通行产生影响,同时保证隧道和高速公路的安全,减少地表沉降。推荐下麦西浅埋地铁隧道下穿高速公路施工时采用CRD工法。

(4)通过对现场监测数据的分析,CRD工法在控制拱顶沉降、地表沉降方面起到了预期作用,所量测得到的沉降值在合理范围之内。

## 参考文献 References

- [1] 袁驰宇. 下穿复杂条件超浅埋暗挖隧道施工技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

YUAN Chiyu. A study on construction technology in

undercrossing ultra-shallow buried tunnel under complex conditions[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.

- [2] 张著. 下穿隧道施工对山区高速公路路基稳定性影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- ZHANG Zhu, Research on the stability of mountain areas highway road bed impacted by the construction of undercrossing tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [3] 刘松涛, 张国安, 杨秀竹, 等. 上软下硬地层铁路隧道下穿既有高速公路施工方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(5): 35-39.
- LIU Songtao, ZHANG Guoan, YANG Xiuzhu, et al. Study on the construction method of railway tunnel crossing under expressway and built in upper soft and lower hard stratum[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(5): 35-39.
- [4] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3310-3316.
- SHI Chenghua, PENG Chenghua, LIU Baochen. Influence of shallow tunnel excavation on ground surface buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3310-3316.
- [5] 晏莉, 阳军生, 刘宝琛. 浅埋双孔平行隧道开挖围岩应力和位移分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 413-419.
- YAN Li, YANG Junsheng, LIU Baochen. Stress and displacement of surrounding rock with shallow twin-parallel tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 413-419.
- [6] 韩凯航, 张成平, 王梦恕. 浅埋隧道围岩应力及位移的显式解析解[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2253-2259.
- HAN Kaihang, ZHANG Chengping, WANG Mengshu. Explicit analytical solutions for stress and displacement of surrounding rock in shallow tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2253-2259.
- [7] 赵纪平. 超浅埋隧道下穿高速公路、国道施工技术研究[J]. 隧道建设, 2009, 29(4): 441-445, 465.
- ZHAO Jiping. Construction technology for super-shallow-buried tunnels passing underneath expressways and national highways[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(4): 441-445, 465.
- [8] 王志, 杜守继, 张文波, 等. 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): 531-535, 572.

(下转第 596 页)



- thermal comfort environment of villages and towns in severe cold regions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006 (12): 2108~2111.
- [7] 刘加平. 建筑物理[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- LIU Jiaping. Building Physics [M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenzhao. Heat transfer theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [9] 金招芬, 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- JIN Zhaofen, ZHU Yingxin. Building environmental science [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2001.
- [10] IOS. Moderate Thermal Environments, Determination of the PMV and PPD indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort; ISO Standard 7730 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1984.
- [11] 刘抚英, 厉天数, 赵军. 绿色建筑设计的原则与目标[J] 建筑技术, 2013(3): 212-215.
- LIU Fuying, LI Tianshu, ZHAO Jun. Principles and Objectives of Green Building Design [J] Architecture Technology, 2013 (3): 212-215.

(编辑 桂智刚)

(上接第 510 页)

- WANG Zhi, DU Shouji, ZHANG Wenbo, et al. Analysis of construction settlement of shallow railway tunnel under crossing the highway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 531-535+572.
- [9] 姜波. 浅埋暗挖法地铁施工对周围建筑物影响规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 484-487.
- JIANG Bo. Surrounding buildings influence law under the condition of subway construction used by shallow tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2016, 35(05): 484-487.
- [10] 陈建平, 吴立. 地下建筑工程设计与施工[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- CHEN Jianping, WU Li. Underground engineering design and construction[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000.
- [11] 袁竹, 陈勇, 王柱. 山区单线铁路隧道下穿高速公路影响分区研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(2): 164-169.
- YUAN Zhu, CHEN Yong, WANG Zhu. Study on influence zoning of single-track railway tunnel underpassing expressway tunnel at mountainous areas[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(2): 164-169.
- [12] 雷位冰. 温福铁路垆头岭隧道下穿公路隧道施工技术[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 758-764.
- LEI Weibing. Construction technology for Wenfu railway guantouling tunnel under crossing the highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 758-764.
- [13] 陈彬科, 陈林杰, 吴建辉, 等. 新建地铁下穿既有轨道车站施工方案研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 186-189.
- CHEN Binke, CHEN Linjie, WU Jianhui, et al. Study on construction schemes of new metro downpassing existing metro station[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 186-189.
- [14] 李春清, 梁庆国, 吴旭阳, 等. 复合式衬砌初期支护刚度及影响因素分析[J]. 隧道建设, 2014, 34(8): 754-759.
- LI Chunqing, LIANG Qingguo, WU Xuyang, et al. Analysis on rigidity of primary support of composite lining and its influencing factors[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(8): 754-759.
- [15] 晏勤, 李树忱, 谢璨, 等. 锚杆加固作用下圆形隧道复合岩体围岩特征曲线解析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 3021-3027.
- YAN Qin, LI Shuchen, XIE Can, et al. Analytical solution for ground characteristic curve of composite rock mass reinforced by bolts in circular tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 3021-3027.

(编辑 桂智刚)