

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.011

施工工法对下穿公路隧道的影响探究

但路昭¹,王东英^{2,3},陈伟¹,郭琼华¹

(1.云南大永高速公路建设指挥部,云南大理 671000;

2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,湖北武汉 430071;

3.中国科学院大学,北京 100000)

摘要: 施工工法对下穿既有公路的隧道工程能否顺利施作起决定性作用。为探究施工工法对下穿公路隧道的影晌作用,基于 ABAQUS 平台有效模拟了采用上下台阶法、CD 法和 CRD 法三种工法时隧道围岩的应力、变位规律及地表沉降特征。结果表明:采用 CRD 法施工时,拱顶沉降为 5 cm,底部隆起为 6 cm,围岩变形控制效果较上下台阶法和 CD 法好;右幅隧道施工时左幅隧道围岩位移基本保持不变,左右幅隧道施工相互影响不大;隧道开挖对上方既有公路有影响,采用上下台阶法时地表最大沉降为 5.80 cm,CD 法为 2.70 cm,CRD 法为 2.65 cm。

关键词: 施工工法;隧道交叉段;围岩稳定性;路面沉降

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0060-06

Influence of Three Different Construction Methods on Shallow Tunnel Under-crossing Existing Highway

DAN Luzhao¹, WANG Dongying^{2,3}, CHEN Wei¹, GUO Qionghua¹

(1. YunNan Da - yong Highway Project Construction Headquarters, Dali, Yunnan, 671000, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: Construction method is one of the key factors to ensure the security of the excavation of tunnel. To figure out the effects of construction methods on the tunnel excavation, numerical models are developed based on the FEM software ABAQUS. And three construction methods the benching tunneling method, CD method and CRD method are considered to analyze the characteristics of the distribution of stresses and displacements. The conclusions are as follows. Firstly, CRD method has better ability in terms of controlling the deformation of surrounding rock compared with the other two methods because of the smaller displacements of vault 5 cm and the bottom of the tunnel 6 cm respectively. Secondly, the displacements of left hole are almost invariant while the right hole is excavated, which tells us that the interaction effects between two sides of tunnel are not obvious. Finally the influence of the tunnel excavation on the existing highway should not be overlooked. And the settlements of the earth's surface can reach 5.8 cm with the construction of benching tunneling, 2.7 cm with the CD method and 2.65 cm with CRD method respectively.

Keywords: construction methods; tunnel intersection; surrounding rock stability; settlement of the earth's surface

对于下穿既有公路或其他建筑物的隧道工程,施工工法的选择对保障工程的顺利实施至关重要^[1-3]。当前绝大多数研究着重于通过数值手段、针对特定工程、分析特定施工工法下隧道围岩变形

以及塑性区分布情况^[4-5]。而下穿公路隧道工程的突出特点为,隧道修建过程中产生的地表沉降可能会造成既有公路的不均匀沉降,从而干扰既有公路的正常运营^[6-10]。然而在这方面,相关的研究还不

充分。

针对以上问题,本文以在建的某下穿公路隧道工程为依托,基于 ABAQUS 有限元分析软件,分别就上下台阶法、CD 法和 CRD 法,对下穿公路隧道的开挖修建过程进行有效模拟,通过分析隧道洞顶、底部及两侧腰等关键位置处的位移以及洞周围岩的应力、塑性区分布情况,对不同工法下围岩的稳定情况进行分析,并通过对不同工法下地表沉降数值及沉降规律的分析,总结出不同施工工法下隧道修建对既有公路的影响,最后依据数值模拟的结果给出了合理的工程施工建议。本文研究结论对同类工程具有一定的借鉴意义。

1 工程概况

在建的某隧道位于大理至宾川段,靠近大理市区,其空间地理位置如图 1 所示。该隧道为一座分离式隧道,累计总长 1 434.56 m。隧道净宽 17.34 m,左右幅隧道净距在 28.21 m~29.00 m 之间。该隧道为双向六车道设计,路基宽度 33.5 m,设计速度 100 km/h,属于超大断面隧道。

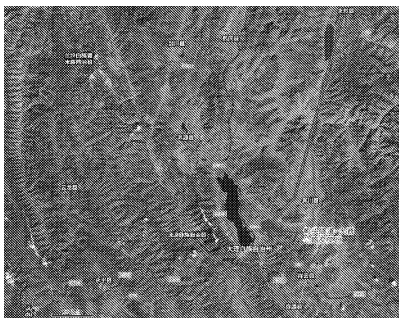
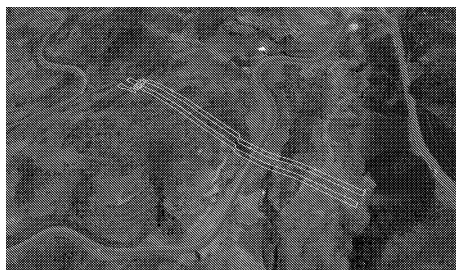
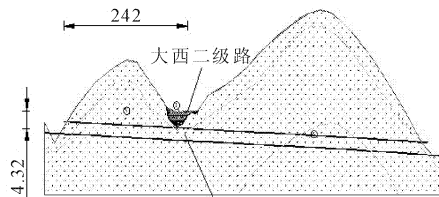


图 1 空间地理位置示意

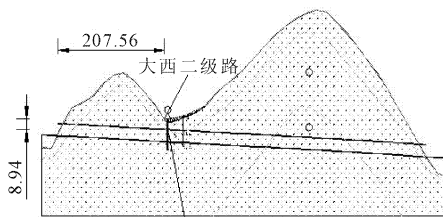
(如图 2 所示),右幅隧道交叉点埋深 14 m,左幅隧道交叉点埋深 10 m,属于近距离交叉工程。



(a) 平面位置关系



(b) 右幅纵面位置关系



(c) 左幅纵面位置关系

图 2 隧道与公路位置关系示意(单位:m)

根据工程地质勘察资料,隧道选址范围内未见明显构造形迹,且无大型河流过境。隧址区地层以二叠系玄武岩系为主,上覆人工填土、黏土,覆盖层总厚度仅为 10 m~14 m。地质钻孔揭示的数据详见表 1。

尚需说明的是,该隧道与大西公路近垂直相交

表 1 岩层信息统计

岩层(自上至下)	厚度/m		性 状	
	左幅	右幅	左幅	右幅
人工填土	3	9.0	黄褐色,稍密,稍湿	黄褐色,稍密,稍湿
黏土	—	2.3	—	褐红色,硬塑
全风化玄武岩	6	2.1	灰褐色,全风化	灰褐色,全风化
强风化、中风化玄武岩	—	—	灰褐色,致密块状	灰褐色,致密块状

2 施工工法比选

2.1 计算方案

2.1.1 计算模型

隧道与公路交叉段属于控制性工程,因此选取

交叉段作为研究对象。由于计算模型范围的选取,既要保证计算结果满足所需的精度,又要考虑计算机的运算能力。因而,计算模型的选取原则应在保证计算精度的前提下尽可能减小计算范围。参考类似工程的研究成果^[11-12],将计算范围确定为:水平

向宽 197 m, 竖向高为 60 m ~ 65 m, 两洞净距 28 m。依据相关工程经验, 该模型取值范围基本能消除边界效应影响, 模型尺寸见图 3。

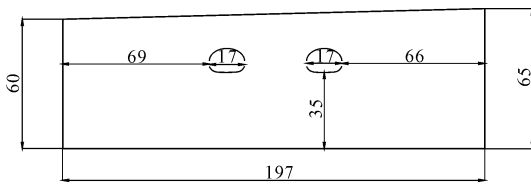


图 3 平面数值计算模型示意图(单位:m)

对应的二维数值模型如图 4 所示, 自上至下依次为人工填土、黏土、全风化玄武岩和强风化玄武岩。岩土体及初衬、二衬均采用三角形或四边形平面应变单元, 锚杆采用 Truss 单元, 共计 14 611 个单元, 6 605 个节点。计算时边界条件为: 两侧采用法向约束, 底边界采用固定约束, 上表面自由。分析时假定岩土体、初衬、二衬均符合弹塑性本构, 并服从 Mohr - Coulomb 屈服准则。岩土体力学参数依据现场试验获取, 支护参数则依据工程经验赋值, 具体材料力学参数统计见表 2。

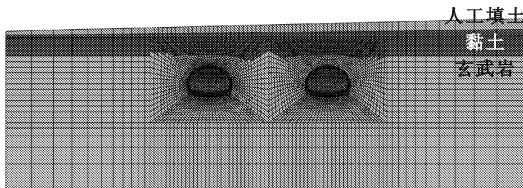


图 4 有限元模型图

表 2 工程区岩土材料力学参数统计

岩土名称	状态	天然密度 ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)	弹性模量 / GPa	泊松比
人工填土	稍密	1.85	15	11	0.005	0.35
黏土	硬塑	1.90	35	17	0.010	0.35
玄武岩	全风化	1.85	100	22	0.050	0.30
玄武岩	强风化	2.20	100	28	0.100	0.30
锚杆		7.80			20.000	0.20
初衬		2.60	2000	40	20.000	0.20
二衬		2.60	2500	45	30.000	0.20

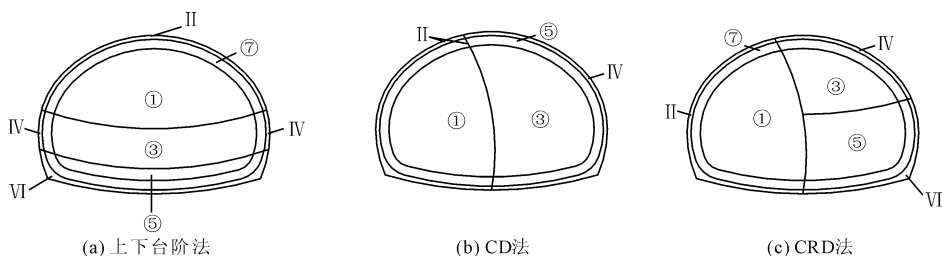


图 5 三种工法施工工序图

2.1.2 施工工法简介

上下台阶法^[13]、CD法^[14]以及 CRD法^[15]是隧道施工中经常采用的三种方法。其中上下台阶法是将整个隧洞断面大致分为上下两部分(或上中下三部分, 其中第三部分相对较小), 并自上而下开挖支护的方法。CD法是将整个断面分成左右两部分, 开挖完左侧断面, 及时施做初衬及中间竖向钢支撑, 而后再开挖右侧断面的施工方法。该方法多适用于地层较差或对地面沉降有要求的隧道工程。而 CRD法又称交叉中隔壁法, 是在 CD法的基础上将断面进一步细分为多个部分开挖的施工方法, 研究结果表明, CRD法控制地面沉降的能力比 CD法还好。数值分析时, 采用三种施工方法对隧道进行开挖的模拟过程详述如下:

(1) 上下台阶法(见图 5(a)): 首先进行地应力平衡, 而后进行左幅隧道的开挖与支护, 最后进行右侧隧道的开挖与支护。隧洞开挖、支护过程为: 开挖上台阶①→施作上半断面初期支护 II→开挖中台阶③→施作下半断面初期支护 IV→开挖下台阶⑤→施作下半断面初期支护 VI→施作二次衬砌⑦。右幅隧道开挖和支护过程与左幅隧道相同, 在此不再赘述。

(2) CD法(见图 5(b)): 同上下台阶法雷同, 首先进行地应力平衡, 而后分别进行左右侧隧道的开挖与支护。开挖和支护的具体过程可总结为: 开挖左侧①→施作左侧断面初期支护和临时支撑 II→开挖右侧③→施作右侧断面初期支护 IV→去除临时支撑并施作二次衬砌⑤。右幅隧道施工顺序与左幅隧道类似。

(3) CRD法(见图 5(c)): 同前两种方法, 首先进行地应力平衡, 而后分别进行左右侧隧道的开挖与支护。隧道开挖和支护过程可概括为: 开挖左侧①→施作左侧断面初期支护和临时支撑 II→开挖右侧上部③→施作右侧上部断面初期支护和横支撑 IV→开挖右侧下部⑤→施作右侧下部断面初期支护 VI→去除支撑并施作二次衬砌⑦。

需要指出的是,计算过程中采用空间应力翻转法对隧道在开挖中应力的释放过程进行了有效模拟。且认为岩体开挖过程中围岩的应力释放率为 50%,初衬施作过程中围岩应力释放率为 50%。

2.2 结果分析

2.2.1 关键点位移对比分析

为评价不同工法施工对围岩位移的影响,选取隧洞顶点、右侧腰和底部中点作为监测点(分别见图 6 中 1、2、3),结合整个研究区域内岩体的位移分布情况,对隧道开挖过程中围岩的变位规律进行综合分析。

不同施工工法下,左、右幅隧道关键点位移随开挖过程变化曲线分别见图 7、图 8,隧道周边围岩位

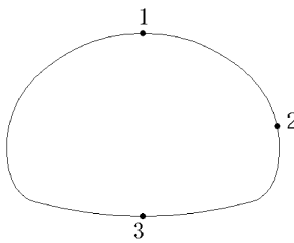
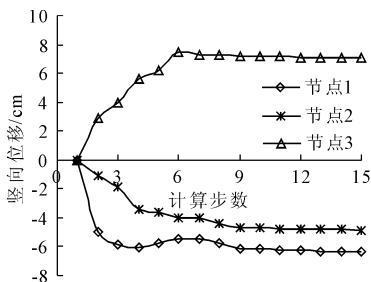
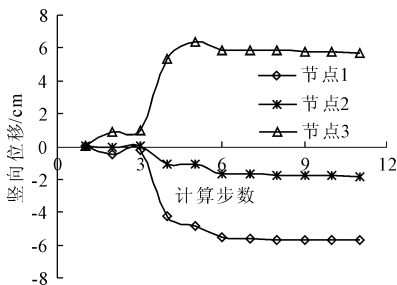


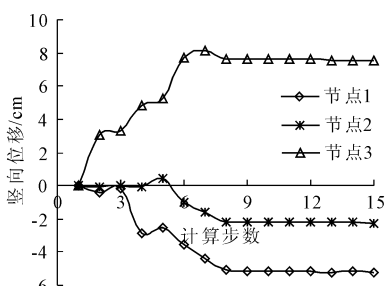
图 6 数值分析关键点示意图



(a) 上下台阶法



(b) CD法



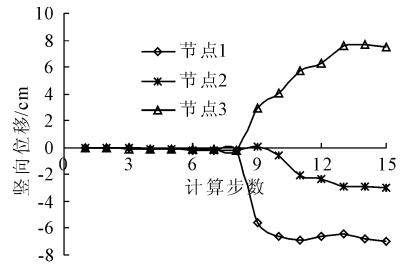
(c) CRD法

图 7 左幅隧道周边监测点的位移变化

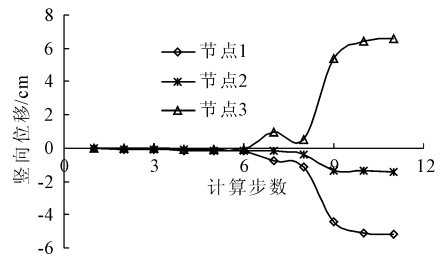
移分布规律见图 9。结合关键点位移变化曲线及围岩位移分布图,可以看出:

(1) 不同施工工法下围岩位移发展存在共性,洞内围岩最大沉降均在洞顶 1 位置处,最大隆起值均位于拱底 3 处,洞腰 2 处产生较小沉降,且右幅隧道施工对左幅隧洞位移发展基本没影响。

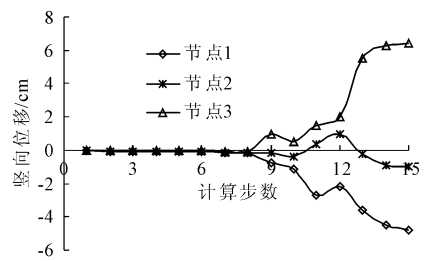
(2) 不同施工工法下,隧道洞顶沉降、洞底隆起的数值有所差异,上下台阶法施工产生的洞顶沉降值最大,为 7 cm; CD 法次之,为 5.9 cm; CRD 法最小,为 5.25 cm。同样地,对于底部隆起值,CRD 法仍为最小的,为 6 cm,而 CD 法和上下台阶法施工造成的洞底隆起值相差不大,均在 8 cm 左右。因而,从位移沉降以及底部隆起控制这两点来看,CRD 法相较于其他两种工法更有优势。



(a) 上下台阶法



(b) CD法



(c) CRD法

图 8 右幅隧道周边监测点的位移变化

2.2.2 围岩应力分布对比分析

洞室开挖会打破岩土体天然的平衡状态,导致围岩应力不同程度的释放,而不同的开挖方法也会影响围岩体应力的释放规律和程度,因而有必要对比分析采用上述三种施工工法对洞室进行开挖后,围岩的应力分布规律的差异。现将采用不同工法对对应的围岩的最大、最小主应力分布规律整理如图 10、图 11 所示。

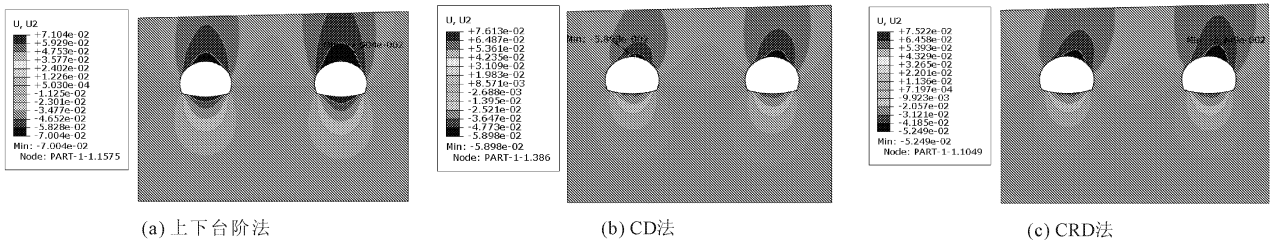


图 9 不同施工工法的隧道周边岩体位移分布图(单位:m)

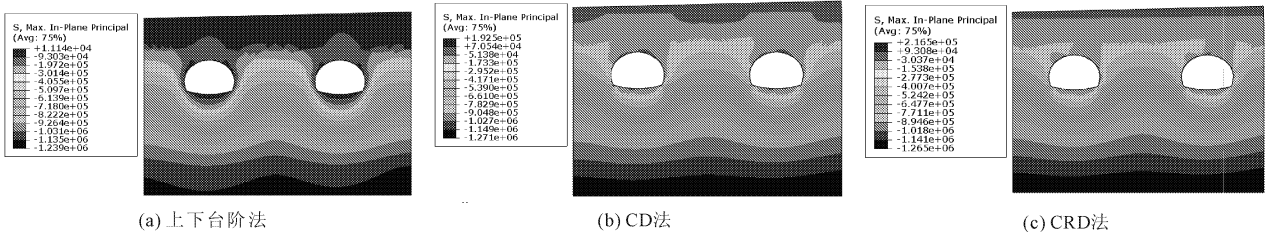


图 10 围岩最大主应力分布云图(单位:Pa)

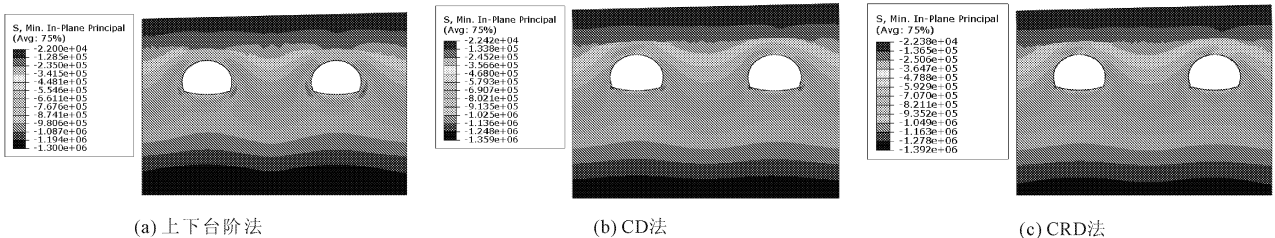


图 11 围岩最小主应力分布云图(单位:Pa)

从图 10、图 11 中可以看出:采用不同施工工法开挖洞室时,洞周围岩的应力分布数值及分布规律均有明显差异:上下台阶法施工时洞周拉应力集中于洞顶两侧和洞底位置,压应力集中在两拱脚一定位置处,分布范围较广,数值较小。而 CD 法和 CRD 法施工时,压应力集中于两拱脚点处,数值较大,应力较集中。应力数值及分布说明,上下台阶法施工产生的塑性流动较大,导致围岩应力部分释放。

需要指出的是,由于隧道埋设较浅,隧道围岩承受的压应力都较小。但考虑到隧道围岩强度参数较低,应重视应力集中部位的支护与加固,避免因局部损伤引起洞室整体垮塌。

2.2.3 围岩塑性区对比分析

塑性区的发展及分布情况是衡量围岩稳定性的重要依据之一。当围岩因应力调整处于较大、较复杂的应力状态时,很可能达到屈服极限进入塑性状态,当较大范围的岩土体都屈服后很可能因较大的塑性变形引起洞室垮塌。施工工法不同,围岩塑性区发展及分布规律一般也会有较大差异,因此有必要对不同施工工法下围岩塑性状态进行分析,从围

岩稳定性角度遴选较为合适的施工工法。

不同工法下围岩塑性区分布情况整理见图 12。从图 12 中可以看出:不同施工工法下,洞室围岩塑性区分布存在明显差异:采用上下台阶法开挖时,除洞顶部分区域,洞周围岩全部进入塑性,塑性区由洞壁向外光滑过渡。而 CD 法相应的围岩,除洞左侧部分岩体尚未进入塑性区,其余全部进入塑性。支撑部分和岩体接触部位出现了等效塑形应变集中区,最大等效塑性应变达到 0.262。CRD 法塑性区分布同 CD 法类似,在中隔壁、横隔板和围岩接触部位也出现了等效塑形应变集中区,最大值为 0.176。从左右幅隧洞塑性区分布还可以看出,不同施工工法下,右幅隧洞施工对左幅隧洞影响也存在差异:上下台阶法对应的左右幅塑性区分布基本一致;CD 法右侧塑性区范围略小于左侧塑性区范围;而 CRD 法左右幅隧洞塑性区分布范围差异较明显。这一规律进一步说明施工工法不同,围岩塑性区发展规律及分布存在差异,围岩稳定性也不相同。就塑性区分布范围而言,CRD 法施工围岩相对较稳定。

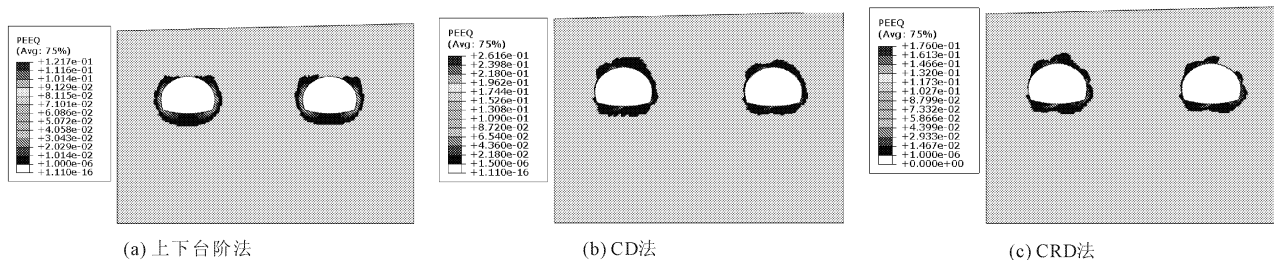


图 12 围岩塑性区分布情况

2.2.4 路面沉降对比分析

为了反映隧道开挖过程对路面沉降的影响,对不同施工工法下路面沉降情况进行统计,相应结果见图 13。从路面沉降图 13 可以看出隧道的开挖仅对其正上方路面变形有明显影响,对远离洞径范围内的地表变形影响不大,洞室开挖后,地表沉降成 W 型分布。上下台阶法施工产生的路面沉降值最大,左右幅隧道开挖完成后,路面最大沉降 5.8 cm;采用 CD 法开挖时,路面最大沉降为 2.7 cm,而 CRD 法对应的最大路面沉降为 2.65 cm,与 CD 法相近。从洞室开挖对既有公路的影响方面考虑,CRD 法产生的路面沉降最小,相对较优。

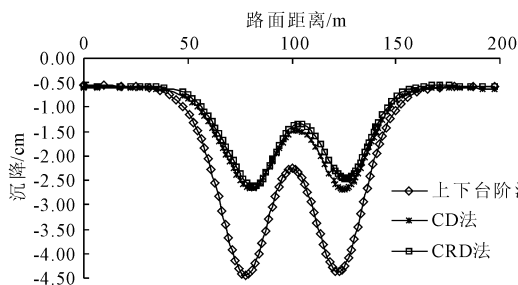


图 13 不同工法下路面沉降统计

3 结论

本文采用有限元方法分析了不同工法对隧道围岩稳定性以及既有公路的影响问题,得到以下结论。

(1) 洞室开挖引起的围岩变形以顶部沉降和底部回弹变形为主。采用上下台阶法施工时,洞顶最大沉降为 7 cm,洞底隆起值为 8 cm;相较于上下台阶法,CD 法、CRD 法对应的最大沉降分别减小 17% 和 29%,因此 CRD 法对围岩的变形控制效果较好。

(2) 不同施工工法下,洞室围岩的塑性区分布存在些许差异。就塑性区分布范围而言,CRD 法施工围岩相对较稳定。

(3) 洞室开挖使上方既有公路产生不均匀沉降,沉降最大值位于交叉位置。采用 CD 法和 CRD 法施工时,路面沉降相较于上下台阶法分别减小

53%和 54%。从洞室开挖对既有公路的影响方面考虑,CRD 法产生的路面沉降最小,相对较优。

参考文献:

- [1] 张 胜,沈洪波,王 飞.不同施工工法对既有隧道影响的数值模拟研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2007,30(5):611-615.
- [2] 阳军生,杨元洪,晏 莉,等.大断面隧道下穿既有高压输电铁塔施工方案比选及其应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(6):1184-1191.
- [3] 邵东辉,费鸿绿,杨朝阳,等.新建隧道爆破对既有隧道影响的数值模拟分析[J].工程爆破,2017,23(5):67-70.
- [4] 刘志强,宋 冶,吴 剑,等.大断面高含水率黄土隧道数值计算[J].科学技术与工程,2017,17(33):334-339.
- [5] 陈炳祥.连拱隧道两导洞工法施工力学特性分析与应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(S2):5153-5157.
- [6] 黄 腾,张书丰,陶建岳.地铁盾构隧道下穿公路隧道安全监控的研究[J].工程勘察,2004(2):60-62.
- [7] 曹成勇,施成华,彭立敏,等.下穿高速公路的浅埋大跨隧道开挖力学行为分析[J].现代隧道技术,2017(5):122-129.
- [8] 张 臻,志 鹏,房海勃.新建隧道下穿既有高速公路施工技术[J].建筑技术,2017,48(9):944-946.
- [9] 刘庭金.下穿隧道施工对高速公路影响的三维数值分析[J].广州建筑,2009,37(5):15-17.
- [10] 胡玉林.洺水隧道下穿邢台高速公路安全性分析[J].北方交通,2016(1):62-66.
- [11] 朱 玉,卫 军,李 昊,等.大跨径悬索桥隧道锚变位分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3588-3593.
- [12] 朱卫东.基于三维数值模拟的软岩超大断面隧道施工技术优化研究[J].隧道建设,2017,37(11):1462-1468.
- [13] 郗 锋.双连拱隧道主洞上下台阶法施工数值模拟分析[J].交通科技与经济,2011,13(5):24-27.
- [14] 贾晓旭,赵玉成.软弱围岩隧道 CD 法和台阶法施工力学行为分析[J].铁道标准设计,2016,60(7):121-125.
- [15] 韦秉旭,唐辉湘,陈 尤.CRD 法与上下台阶法在隧道开挖中的效果对比及数值分析[J].中外公路,2011,31(4):192-196.