

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.041

浅埋大跨小净距公路隧道施工方法比选 及变形控制研究

郑广顺¹, 崔帅帅², 陈鲁川³

(1. 齐鲁交通发展集团有限公司建设管理分公司, 山东 济南 250102;

2. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061;

3. 齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南 250102)

摘 要: 为了对比分析上下台阶法和 CD 法(中隔墙法)施工引起的隧道变形及受力特点, 依托滨莱高速公路淄博西至莱芜段改扩建工程中的樵岭前隧道施工, 基于 FLAC^{3D}数值模拟软件, 并结合现场施工应用情况, 对比分析两种工法的优缺点, 进而提出了有效的变形控制措施。研究表明: CD 法施工在控制地面沉降及围岩变形方面优于上下台阶法, 且产生的围岩塑性区较小; 上下台阶法具有足够的施工空间与较快的施工速度, 且相对 CD 法施工成本降低, 但在浅埋隧道工程中易造成隧道围岩变形过大等问题, 更多的是采用 CD 法; 注浆加固可以有效地提高围岩的自稳性, 增加径向注浆长度以及预留段长度等措施具有较高的可操作性, 同时也有较好的加固效果。

关键词: 浅埋; 大跨小净距; 数值模拟; 变形控制

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)01—0227—06

Construction Method Comparison and Deformation Control of Shallow Buried Expressway Tunnel with Large Span and Small Spacing

ZHENG Guangshun¹, CUI Shuaishuai², CHEN Luchuan³

(1. Qilu Transportation Development Group Co., Ltd. Construction Management Branch, Jinan, Shandong 250102, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

3. Qilu Transportation Development Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250102, China)

Abstract: In order to compare and analyze the tunnel deformation and stress characteristics caused by the construction of the bench method and the CD (center diaphragm) method, the construction of the Qian Lingqian tunnel in the reconstruction and expansion project of Zibo West to Laiwu Section of Binlai Expressway is simulated by FLAC^{3D}. Combined with the on-site construction application, the advantages and disadvantages of the two methods are compared and analyzed, and then effective deformation control measures are proposed. The results are as follows: CD method is better than bench method in controlling ground subsidence and surrounding rock deformation, and the resulting plastic zone of surrounding rock is smaller; the bench method has sufficient construction space and faster construction speed, and the construction cost is lower than that of the CD method, but in the shallow buried tunnel construction, the deformation of the surrounding rock of the tunnel is likely to be too large, therefore the CD method is widely used; grouting reinforcement can effectively improve the self-stability of the surrounding rock. Measures such as increasing the length of the radial grouting and the length of the reserved section have higher operability and have better reinforcement effects as well.

Keywords: shallow buried; large span and small spacing; numerical simulation; deformation control

随着社会的发展,交通体系亦呈现出了空前的发展,随着高速公路运输能力的大幅度增加,我国正大力兴建低山重丘公路隧道工程,隧道建设进入到了“大断面化”时代^[1-5]。在公路隧道的建设过程中出现了许许多多的问题,大跨小净距隧道施工便是其中一种具有代表性的问题^[6-9]。虽然隧道建设的形式多种多样,但在一些地区,由于受地质地形条件和施工条件限制,往往采用扩大隧道净空断面的形式来增加行车车道,满足交通客流量增加的行车需求^[10-13],从而出现了越来越多的浅埋大跨小净距公路隧道。

目前针对浅埋大跨小净距隧道施工问题,国内外的专家学者做了大量的研究。川田等^[14]结合田真新镇公路上的尾山大理隧道对小净距隧道设计、开挖方式进行了系统研究。褚衍玉等^[15]依托广东省江罗高速大石岭隧道工程项目,针对双洞隧道在浅埋偏压地形的施工条件下,模拟施工过程中后行动与先行洞之间不同掌子面纵向间距对隧洞周围岩体的应力分布规律,得到了双洞隧道施工中掌子面的合理纵向间距。曹成勇等^[16]依托深圳市红棉路隧道下穿高速公路施工,通过数值计算及现场测试方法,对开挖力学行为进行了分析,并提出了相应加固措施。

本文依托滨莱高速公路淄博西至莱芜段改扩建工程中的樵岭前隧道工程,基于 FLAC^{3D}数值模拟软件,对上下台阶法、CD 法(中隔墙法)施工隧道变形及受力特点进行了对比分析,并结合现场施工应用

情况,对比分析两种工法的优缺点,进而提出了有效的变形控制措施。

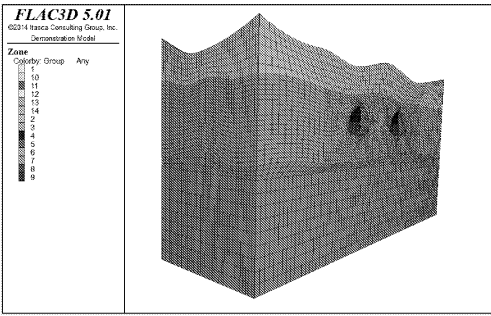
1 工程概况

以山东省滨莱高速公路隧道改扩建工程中的樵岭前隧道为例,该隧道为双向八车道分离式隧道,隧道净距为 20 m~30 m,左右线隧道断面宽度均为 20 m,隧道左线长 740 m,隧道右线长 695 m。在 YK107+640—YK107+720 段为浅埋段,最大埋深为 25 m,最小埋深为 10 m,大部分区域基岩埋深较浅,隧址区部分顶部基岩直接出露,风化现象严重,隧址区主要岩性为碎石土、灰岩和弱风化碎裂花岗岩,岩体破碎,顶板岩石厚度薄且破碎,层间结合较差。

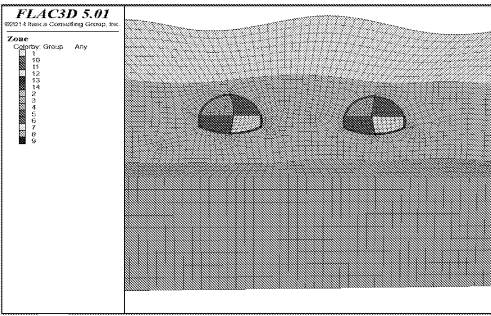
2 数值模拟方法

2.1 数值计算模型

根据地质报告 and 实际工程情况,本次数值模拟采用三维计算模型,隧道开挖断面宽度 $B=20\text{ m}$,洞高 $H=13.4\text{ m}$,隧道净距 $L=25\text{ m}$,隧道最大埋深 $h=30.0\text{ m}$,隧道最小埋深 $h=11\text{ m}$,并考虑到相关的尺寸效应,模型的最终尺寸分别为:长度为 55 m,宽度为 180 m,最大高度 103 m,最小高度 85 m,最终的数值模型与地质分层情况如图 1 所示。经过有限元网络划分 108 260 个单元和 114 784 个节点,模型自上而下的土层分别为:碎石土、灰岩、强风化花岗岩。



(a) 模型整体图



(b) 网格划分

图 1 数值计算模型

2.2 数值计算方法

具体数值计算分析方法如下:

(1) 边界条件:模型左右边界、前后边界法向方向位移约束,围岩体顶部为自由面,底部边界竖直方向位移约束。

(2) 开挖方法:分别采用上下台阶法和 CD 法进行开挖,单次开挖进尺均为 2.5 m。上下台阶法施工步骤如下:① 开挖上台阶;② 施作上台阶初期支护;③ 开挖下台阶;④ 施作下台阶初期支护;⑤ 整体浇筑二次衬砌。如图 2 所示。

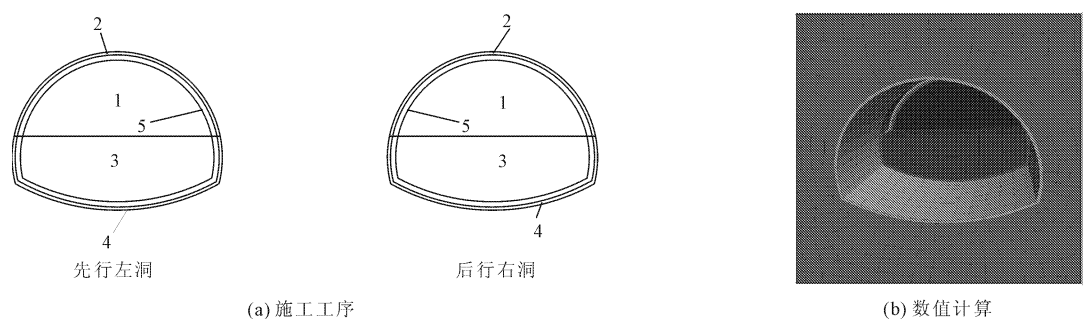


图 2 上下台阶法

CD 法施工步骤如下:① 开挖左导坑上台阶;② 施作左导坑上台阶初期支护、临时钢拱架;③ 开挖左导坑下台阶;④ 施作左导坑下台阶初期支护、临时支护;⑤ 开挖右导坑上台阶;⑥ 施作右导坑上台

阶初期支护;⑦ 开挖右导坑下台阶;⑧ 施作右导坑下台阶初期支护;⑨ 拆除临时支护,整体浇筑二次衬砌。如图 3 所示。

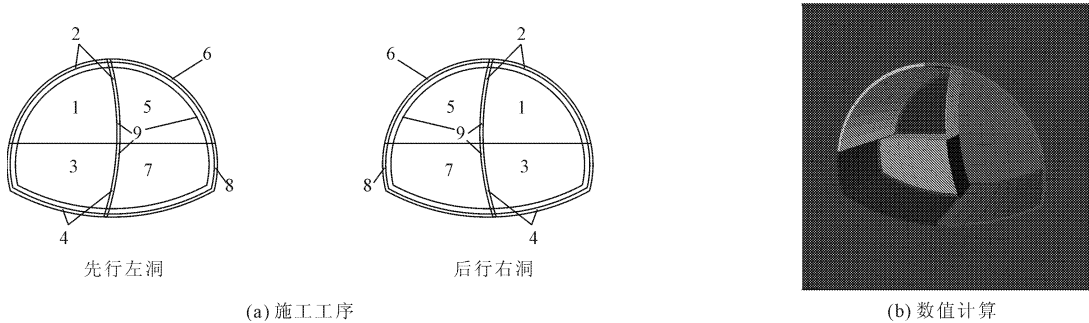


图 3 CD 法

(3) 重力荷载均采用重力的方式施加,自重应力的计算采用摩尔-库仑模型。

(4) 隧道开挖计算摩尔-库仑模型,隧道支护计算采用弹性模型,采用 C30 混凝土支护,初期支护厚度 25 cm。

2.3 材料参数

根据地质勘探报告以及相应数值模拟的经验,岩土介质力学参数选取情况如表 1 所示。

表 1 材料参数取值

项目	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
碎石土	≈20	2000	0.28	0.36	7	25
灰岩	≈33	2080	1.16	0.33	20	30
强风化花岗岩	≈50	2200	1.75	0.31	32	35
小导管注浆加固区围岩		2200	1.46	0.31	26	35
初期支护	0.25	2500	24.00	0.21		
二次衬砌	0.45	2600	26.00	0.20		
临时钢拱架	0.20	7800	2.06×10 ⁻⁴	0.25		

2.4 数值计算可靠性分析

将数值计算结果和现场监测数据对比论证,左线里程号为 ZK107+640、ZK107+660 的拱顶沉降随施工步的现场监测数据和数值模拟变化曲线分别如图 4、图 5 所示,其中数值模拟中的施工步与实际工程开挖时间严格对应。从图 4、图 5 中可以看出数值模拟结果和现场监测数据变化趋势相近,均是在

开挖进行到埋设里程附近时,隧道拱顶沉降变化曲线骤降,随着隧道开挖掌子面逐渐远离监测断面,沉降曲线逐渐趋于平缓直至稳定,且最大值在控制范围内,不会对现场施工安全产生影响,本文采用的数值计算方法接近实际工程,最大误差为 13.7%,在数值计算的误差允许范围内,由此可知,其数值计算结果具有一定的可靠性。

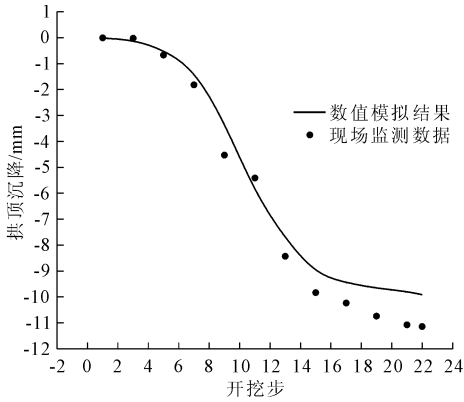


图 4 ZK107+640 处拱顶沉降随施工步变化曲线

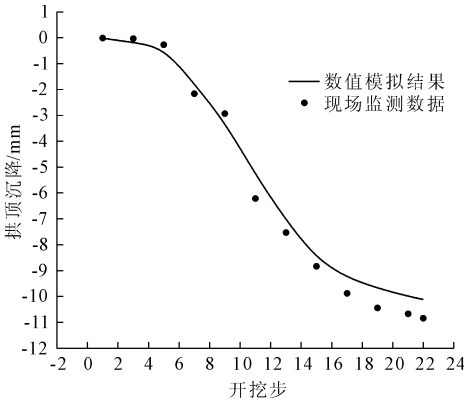


图 5 ZK107+660 处拱顶沉降随施工步变化曲线

3 结果分析

3.1 施工比选

3.1.1 地表沉降

在里程号 ZK107+680 和 YK107+680(即最浅埋深处)的地表设置特征点分析施工过程中的沉降,沿两隧道中点向两侧等距设置 10 个地表观测点,各测点在不同工况下的地表下沉变形趋势分别如图 6(a)、图 6(b)所示。从图 6 中可以看出,两种工况下的地表沉降趋势相似,均是右洞地表下沉值平均大于左洞,同时后行右洞开挖扰动使得先行左洞

地表下沉继续增大,且随着右线开挖掌子面与观测点的接近,曲线逐渐呈现出“W”形。上下台阶法施工下的地表最大沉降为 6.1 mm,CD 法施工下的地表最大沉降为 4.5 mm,均发生在后行右洞中心线的正上方地表,且均为超过规范规定的限值,满足施工要求。CD 法施工产生的地表沉降最大值小于上下台阶法,其值为上下台阶法的 74%,可见 CD 法施工对地表的扰动影响比上下台阶法小。

3.1.2 拱顶沉降

在里程号 ZK107+680(即最浅埋深处)设置特征点分析拱顶沉降,拱顶测点在不同工况下的沉降变形趋势如图 7 所示。从图 7 中可以看出,上下台阶法开挖与 CD 法开挖效果相似,均是在开挖进行到埋设里程附近时,隧道拱顶沉降变化曲线骤降,随着隧道开挖掌子面逐渐远离监测断面,沉降曲线逐渐趋于平缓直至稳定,且最大值在控制范围内,采用上下台阶法开挖至稳定后,拱顶沉降为 13.15 mm,CD 法开挖下最大位移为 10.90 mm,其值为上下台阶法的 84%,由此可见,在岩石深部的高应力状况下,采用 CD 法施工,可节约断面封闭时间,有效地对控制围岩变形。

3.1.3 围岩应力

选取分析特征部位的应力值,如表 2 所示。由表可知,由于开挖造成的应力释放效应,左右线隧道拱顶处的竖向应力会大幅度下降,左右线隧道拱腰处的竖向应力会大幅度增加,从而造成中间围岩处竖向应力增大,开挖完成后,会在左右线拱腰附近出现应力集中现象,在施工中应注意对相关部位的监测,必要时对拱腰附近围岩和支护结构进行加固。通过对比可以发现,两种工法均能保证施工过程中围岩自稳,但 CD 法开挖下的围岩应力比上下台阶法开挖下的围岩应力要小,较上下台阶法能更好地控制围岩变形和应力释放。

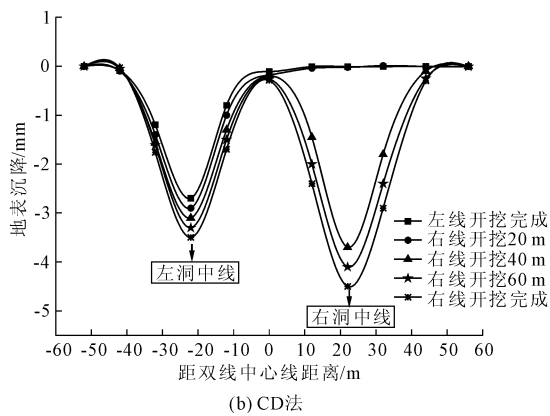
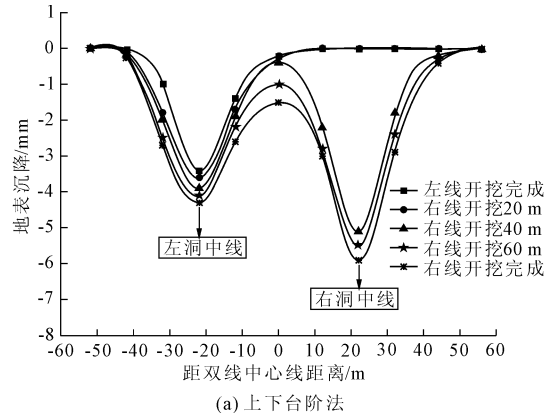


图 6 地表沉降

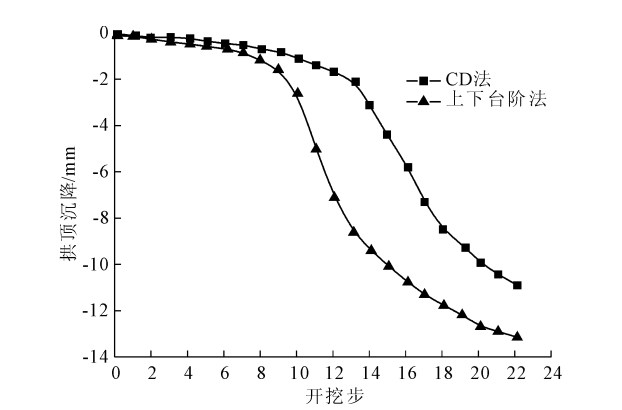


图 7 拱顶沉降

状态	特征部位的竖向应力				
	左线拱腰	右线拱腰	左线拱顶	右线拱顶	夹岩
开挖前	-1.37	-1.38	-1.25	-1.27	-1.45
CD 法	-2.29	-2.04	-0.17	-0.33	-2.48
上下台阶法	-3.40	-3.18	-0.22	-0.55	-2.90

3.1.4 塑性区

两种施工方法开挖后至隧道围岩稳定后,特征断面隧道围岩塑性区分布情况如下:上下台阶法开挖隧道四周的岩层均存在塑性区域,CD 法施工下的

拱顶处塑性区域显著减小,采用 CD 法拱顶与仰拱处较上下台阶法稳定。同时可以看出,由于右线隧道开挖产生的二次应力,右线塑性区范围较左线有所增大,所以在施工过程中,应加强对隧道拱腰和拱脚附近围岩的监测,并对两侧围岩和中夹岩柱采取加固措施,如适当加厚衬砌、在拱腰和拱脚部位打锚杆。

3.1.5 施工方法比选

根据上下台阶法与 CD 法数值计算结果,将两种施工方法的适用性特点列于表 3,得到:

(1) 在控制隧道围岩变形方面,CD 法相对上下台阶法的控制效果最佳,CD 法的初期支护与临时支撑较好的控制了围岩的变形。在控制围岩塑性区方面,CD 法较好地克服了上下台阶法开挖拱顶处塑性区的发展,隧道拱顶处围岩稳定性得到了控制。

(2) 在隧道施工适用性方面,CD 法能够很好的控制围岩变形,但施工工序比较复杂,临时钢支撑拆除比较困难,不利于对隧道施工工期与成本的控制。上下台阶法具有充足的施工空间与较快的施工进度,增大了机械施工的效率且相对 CD 法降低了施工成本,但在浅埋隧道工程中,易产生隧道围岩变形过大等问题,而采用 CD 法可较好控制围岩稳定性。

表 3 两种工法的适用性特点

工法	施工难度	施工工序	造价控制	工期控制	变形控制	适用性	施工难度
CD 法	较高	较多且复杂	高	较长	较好	IV—V 级围岩	较高
上下台阶法	低	少	低	短	一般	III—V 级围岩	低

3.2 变形控制

隧道加固目的是提高隧道围岩自稳能力和增强隧道衬砌强度,目前主要加固措施有围岩注浆、打设管棚法、锚杆锚固、边墙加固、局部表面补强(如喷混凝土)等。隧道注浆通常有两种:一种是超前注浆,即先注浆再开挖;另一种是隧道衬砌产生变形再注浆。隧道围岩注浆,一般采用水泥浆或砂浆,对一定范围内的隧道围岩进行注浆,使浆液充填在破碎、松散岩土体中,从而将破碎松散的岩土体固结起来,以提高围岩的整体稳定性。

本文研究了注浆工艺的各类参数在实际施工中对沉降控制效果。把实际工况作为基准组,针对加固后围岩强度、径向预注浆范围、注浆预留段长度和轴向预注浆范围四个方面,分别设置了 4 组对照进行研究,对照组具体到的参数如表 4 所示。

以表 4 中所列参数进行数值计算,以里程号 ZK107+640、YK107+640 所在断面为例,将各工况

地表沉降情况进行汇总,如表 5 所示。

表 4 对照组注浆参数

编号	注浆后围岩强度	径向预注浆范围/m (轮廓外)	注浆预留段长度/m	轴向预注浆范围/m
对照组 1	2E _s	4	3	10
对照组 2	3E _s	4	3	10
对照组 3	2E _s	4	4	10
对照组 4	2E _s	4	3	12

由表 5 可知,相比实际工况(对照组 1),对照组 2、3、4 中的变形均有所降低:(1) 其中通过增强注浆效果,对照组 2(使加固后围岩刚度为实际工况 1.5 倍)在模拟中表现出最好的加固效果,断面地表沉降最大值为 3.84 mm,相比于实际工况降低了 42.8%,加固效果显著提升;(2) 增加注浆预留段以及径向注浆长度对照组加固的效果相近,地表沉降最大值分别为 5.43 mm、5.72 mm,相比实际工况降低了

19.1%、14.8%，有效地提升了注浆加固效果。总体而言，增加径向注浆长度和增加预留段长度等措施在实际工程中具有很高的操作性，同时加固效果也较好，尤其是增加注浆预留段长度的措施，在实际施工中具有设计灵活、易于完成、效果明显等优点，适用于围岩较差以及对变形控制要求较高的工程。

表 5 不同注浆工况变形统计表

编号	代表工况	沉降最大值 /mm	沉降减小量 /%
对照组 1	实际工况	6.71	—
对照组 2	1.5 倍注浆刚度	3.84	42.8
对照组 3	4m 注浆预留段	5.43	19.1
对照组 4	10m 注浆长度	5.72	14.8

4 结 论

依托樵岭前隧道工程，基于 FLAC^{3D}数值模拟软件，对上下台阶法、CD 法（中隔墙法）施工隧道变形及受力特点进行了对比分析，并结合现场施工应用情况，对比分析两种工法的优缺点，进而提出了有效的变形控制措施，主要结论如下：

（1）CD 法施工在控制地面沉降及围岩变形方面优于上下台阶法，且产生的围岩塑性区较小，但两种工法施工均能满足围岩及支护稳定性的要求。

（2）上下台阶法具有足够的施工空间与较快的施工速度，增加了机械施工效率且相对 CD 法施工成本降低，但在浅埋隧道工程中易造成隧道围岩变形过大等问题，更多的是采用 CD 法。

（3）注浆加固可以有效地提高围岩的自稳性，改变注浆压力、延长注浆时间等是提升注浆加固效果的最佳措施，但增加径向注浆长度以及预留段长度等措施在实际工程中则具有较高的可操作性，同时也有较好的加固效果。

参考文献：

[1] 李君君,刘晓庆,万 涛.节理岩体偏压浅埋小净距隧道稳定性研究[J].建筑技术,2017,48(4):346-349.

[2] 李光凯,刘志龙.烟台某浅埋大跨小净距隧道施工方法优化分析[J].安徽建筑,2014,21(1):123-123.

[3] 白家设,赵绍鹏,齐 兵,等.软弱地层浅埋大跨双连拱

隧道支护结构变形研究[J].土木工程学报,2017(S2):45-50.

[4] 于雅琳,武 科,王亚君.深圳地铁在建明挖隧道区间基坑工程施工过程数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):158-162.

[5] 陶云平.软弱围岩隧道变形破坏机制及处治措施研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(1):69-72.

[6] Shi S S, Li S C, Zhou Z Q, et al. Influence law of structural inclination for the construction of shallow-buried highway tunnel[J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2014, 17(4):333-343.

[7] 尚淑萍,胡玉娇,徐彦妮.基于既有线平顺性浅埋暗挖隧道地面沉降控制标准[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):95-99.

[8] 孙景凤,李文华,董亥兴,等.超小净距大跨度隧道岩柱稳定性分析[J].中外公路,2014,34(2):210-214.

[9] 刘宝超,张兵兵.超大跨度隧道开挖方法与支护体系优化分析[J].中国市政工程,2014(5):72-74.

[10] Su J F, Xu Y F. Application of the CRD method in construction of an ultra-shallow, ultra-high section and large-span mined tunnel [J]. Advanced Materials Research, 2013,790:231-234.

[11] Cao C, Shi C, Lei M, et al. Deformation characteristics and countermeasures of shallow and large-span tunnel under-crossing the existing highway in soft soil: a case study[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2017(4):1-12.

[12] Dong L I, Xingling H E, Qin L, et al. Stability control of ultra shaallow-buried metro tunnel with super large-span in process of crossing bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2013,32:3636-3642.

[13] 熊慧中,王 平,吕 鑫,等.超浅埋大跨度连拱隧道下穿国道沉降控制研究[J].公路工程,2014,39(6):25-28,55.

[14] 川 田,魏 红.最小间距的大型双线公路隧道的观测施工[J].水电技术信息,1996(Z01):146-155.

[15] 褚衍玉,张聪瑞,任高峰,等.后行洞开挖对浅埋偏压小净距隧道影响研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016,40(5):919-922.

[16] 曹成勇,施成华,彭立敏,等.浅埋大跨下穿高速公路隧道施工风险评估及控制措施研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(7):1439-1446.