

引水隧道下穿铁路线路路基沉降的数值分析

郑明新¹, 陈养强¹, 郑少弘², 蒲保新³, 欧阳林¹

(1. 华东交通大学 岩土与道桥工程研究所, 江西 南昌 330013;

2. 南昌铁路局福建地方铁路有限责任公司, 福建 福州 350013;

3. 南昌铁路局, 江西 南昌 360000)

摘要:以福建省九龙江北引水隧道下穿铁路为研究对象,采用软件FLAC^{3D}分析双洞引水隧道的下穿开挖对鹰厦铁路双线、厦深高铁双线的铁路路基的影响,通过模拟路基未加固和加固2种工况下,隧道单线贯通及双洞贯通后的路基的沉降情况.计算结果表明:最大沉降位于两隧道中心线正上方,路基未加固:右洞开挖对路基沉降的贡献64%左右,左洞贡献36%左右;路基加固:线开挖对路基沉降的贡献66%左右,左洞贡献34%左右.对比实测数据较为一致,证明拟合较好.

关键词:引水隧道;铁路线路;数值模拟;路基沉降

中图分类号:U455.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)02-0036-06

Numerical analysis on the subgrade settlements caused by tunneling across railway

ZHENG Ming-xin¹, CHEN Yang-qiang¹, ZHENG Shao-hong², PU Bao-xin³, OU Yang-lin¹

(1. Institute of Bridge & Road and Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Fujian Local Railway Co., LTD Of Nanchang Railway Bureau, Fuzhou 350013, China;

3. Nanchang Railway Bureau, Nanchang 360000, China)

Abstract: Based on the draw water tunnel of the Jiulong river across railway in Fujian Province as the research object, the finite element analysis software FLAC^{3D} was used to analysis the double draw water tunnel excavation influence of the subgrade, to the double railway of Yingtan - Xiamen and the double railway of Xiamen - Shenzhen. Through simulation the two condition of subgrade unreinforcement and subgrade reinforcement, the situation of settlement of subgrade was analysed when in single tunnel perforation and double tunnel perforation. Research shows that: the position of maximum settlement is just above the the tunnel centerline, the proportion of subgrade settlement caused by the right line excavation is 64% and caused by the left is 36% when subgrade unreinforcement, the proportion of subgrade settlement caused by the right line excavation is 66% and caused by the left is 34% when subgrade reinforcement. The results fit well with monitoring data.

Key words: draw water tunnel; railway; numerical simulation; subgrade settlement

随着我国高速铁路和客运专线建设规模的不断扩大,其它工程下穿既有铁路的情况也越来越严重,如何准确的预测隧道施工引起的地层位移,确

保既有铁路的正常安全运营和隧道的正常施工是隧道设计和施工的关键。

目前,对于隧道下穿既有铁路工程的研究主要

是通过现场监测来分析地表和铁路路基的变形规律,进而对隧道施工和铁路运营提出安全评价和沉降控制措施^[1]. 在地表变形分析和预测上常用的方法有:经验公式法、室内模型试验法、数值模拟法等^[2]. 基于各种数值模拟软件对新建隧道的施工对既有铁路的影响研究成果颇多^[3-6],主要是注重于分析单线隧道下穿单条或多条铁路线的路基沉降规律. 本文在前人研究的基础上,以三维模型分析在路基为加固、加固工况下双洞隧道下穿多条铁路线时隧道拱顶、铁路路基沉降规律,并与实测数据进行对比来验证数值模拟的可靠性.

1 工程概况与工程地质条件

1.1 工程概况

该工程系九龙江北溪引水左干渠改造二期工程的一部分,引水隧洞在夫人庙段与鹰厦铁路和厦深

高铁下穿交叉. 夫人庙段铁路与鹰厦铁路线交叉位置的在鹰厦铁路右洞上的桩号为 K 653 + 350,其下穿铁路线引水隧洞范围桩号为引 6 + 314. 688 ~ 引 6 + 414. 688,总长 100 m. 上部鹰厦右洞(已通车)、鹰厦左洞(在建)、厦深客运专线(即将通车)呈近东西向,现有地面标高为 17.45 ~ 22.95 m;其下穿引水隧道呈近南北向,设计洞底标高为 1.00 m,洞顶标高为 5.50 m(黄海高程),宽 5.94 m. 引水隧道下穿铁路线路情况如图 1 所示.

隧道采用 $\phi 108$ 、壁厚 6 mm、每根长 30 m、环向间距 0.4 m 的大管棚注浆结合 4.5 m 长 $\phi 42 \times 3.5$ mm 超前小导管进行隧道开挖的超前支护;对隧道下穿影响铁路路基两侧采用 $\phi 800$ mm 双管高压旋喷桩进行路基加固;洞身两侧采用 $\phi 600$ mm,桩距 1.2 m 的单管高压旋喷桩进行加固. 衬砌采用 C30 混凝土,旋喷桩采用 C25 的混凝土.

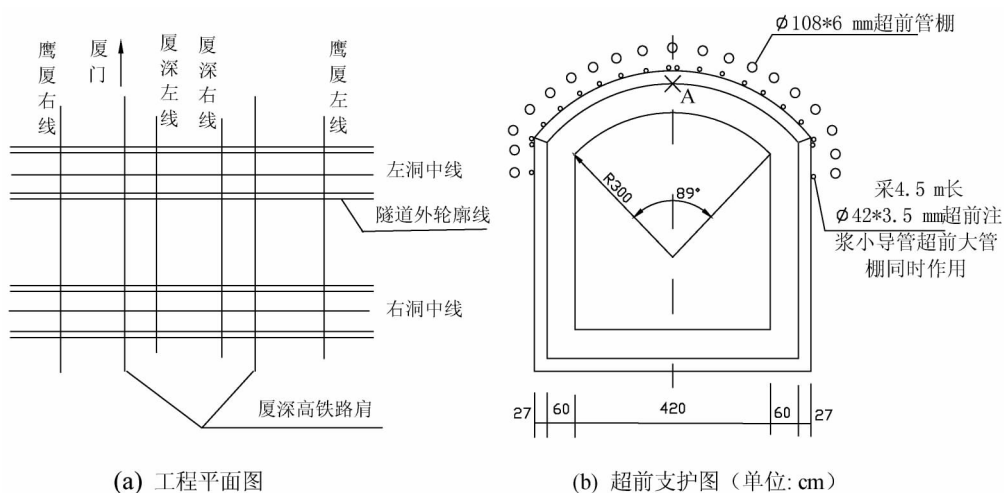


图 1 引水隧道下穿铁路线路图

1.2 工程地质条件

根据场地详细的岩土工程勘察报告以及部分地质钻孔资料,岩土体自上而下分别为:灰黄色素填土、浅黄色粉质粘土、浅黄色残积粘性土、浅黄色全风化辉石闪长岩~弱风化辉石闪长岩;隧道主要穿越浅黄色全风化和弱风化辉石闪长岩. 岩体裂隙较为发育. 场地周边无全新世活动性断裂和发震断裂通过,属构造稳定地块.

场地所属地貌属剥蚀低丘及丘间谷地. 场地地下水类型主要有:

1) 松散岩类孔隙潜水:赋存于素填土中,素填土层未经压实,且含有较多的碎块石,属强透水含水层,受降水的直接补给,但由于补给条件有限,其水量总体贫乏.

2) 风化带孔隙、网状裂隙承压水:含水层主要

为全~弱风化辉石闪长岩层,属于弱透水含水层,由于厚度较薄,其水量贫乏,主要接受松散岩类孔隙水下渗和侧向含水层地下水间接补给.

2 计算模型的建立

2.1 几何条件

采用大型数值计算软件 FLAC^{3D} 建立三维数值模型,模拟台阶法隧道施工穿越铁路路基过程中地表变形情况.

模拟过程中考虑的工程条件如下:

- 1) 隧道穿越的土层为水平层状为均质土层^[7];
- 2) 不考虑土体固结引起的长期沉降;
- 3) 铁路荷载按照均布静荷载来计算;
- 4) 采用无渗流模式^[8].

模型如图2所示,沿隧道纵向100 m,宽100 m,高40 m.隧道中心线距基床底部18.5 m,两隧道中心水平距离为20 m,隧道每次开挖5 m.土体采用摩尔-库仑本构模型,道砟层、衬砌材料和旋喷桩采用线弹性材料,土体、道砟层和旋喷桩采用实体单元模拟,衬砌采用壳单元模拟.模型共70 172个单元,73 660个节点.

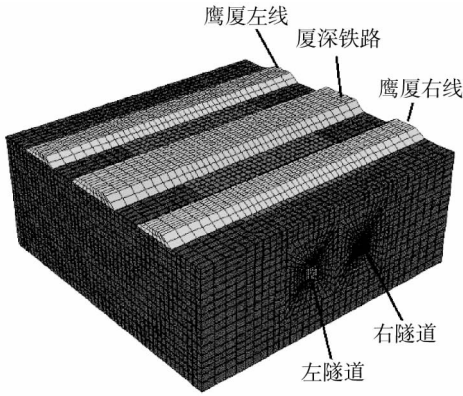


图2 计算模型

2.2 参数选取

铁路路基材料参数如表1所示.各层土体、衬砌和旋喷桩参数取值如表2所示.将列车荷载通过土柱换算法转化为静荷载,荷载值根据《高速铁路设计规范》取65 kPa均匀地分布在铁路路基上^[9-10].

2.3 分析方案

本模型是直接分析铁路上有车辆荷载情况下,是否采用旋喷加固路基情况进行模拟.具体分2种工况:

1) 工况1:有车辆荷载,未采取高压旋喷桩加固路基措施;

2) 工况2:有车辆荷载,采取高压旋喷桩加固路基措施.

由于高压旋喷桩加固路基所需的数目较大,且桩间距比较小,故将高压旋喷桩采用抗弯刚度等效原则等效成地下连续墙^[11];其中对超前支护的土层等效成均质、等厚的等代层,等代层厚度在0.6~1.2 m^[12].

表1 路基填料参数

填料名称	厚度/m	摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	密度/(kg/m ³)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
级配碎石	0.7	45.0	0.0	2 000	57.14	52.17
AB组土	2.3	30.0	20.0	2 000	28.57	26.09
填土	1.6	30.0	15.0	1 950	8.33	6.25
垫层碎石	0.4	46.0	0.0	2 000	57.14	52.17

表2 材料物理力学参数表

土层/材料	厚度/m	密度/(g/cm ³)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa
素填土	2.4	1.83	5	0.37	10	22
粉质粘土	4.5	1.78	20	0.35	20	15
残积砾石粘性土	3.1	1.85	800	0.45	35	10
全风化辉石闪长岩	8.5	1.95	1 200	0.40	40	20
弱风化辉石闪长岩	23.5	2.60	10 000	0.27	55	900
衬砌	0.6	2.50	1 500	0.20	—	—
C25混凝土	0.6	2.40	1 450	0.20	—	—
等代层	1.0	2.10	1 300	0.20	35	30

3 计算结果分析

由于引水隧道下穿鹰厦、厦深铁路,为保证铁路的安全运营,防止由于隧道开挖造成的铁路路基

沉降大变形,此处重点分析区间隧道开挖过程中,各铁路路基中线位置的竖向位移变形量以及隧道拱顶位置的沉降.

路基未加固工况下路基沉降分布见图3.

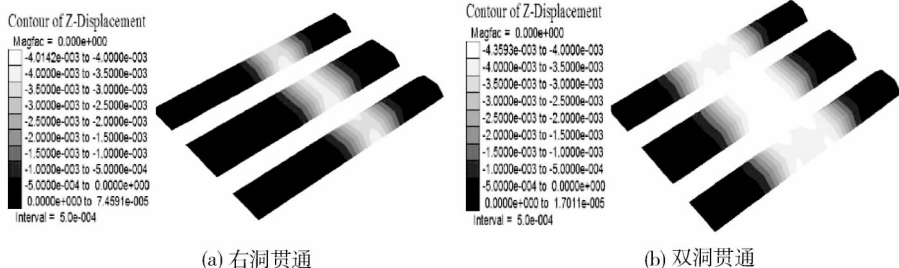


图3 路基未加固工况下路基沉降云图

路基加固工况下路基沉降分布见图 4.

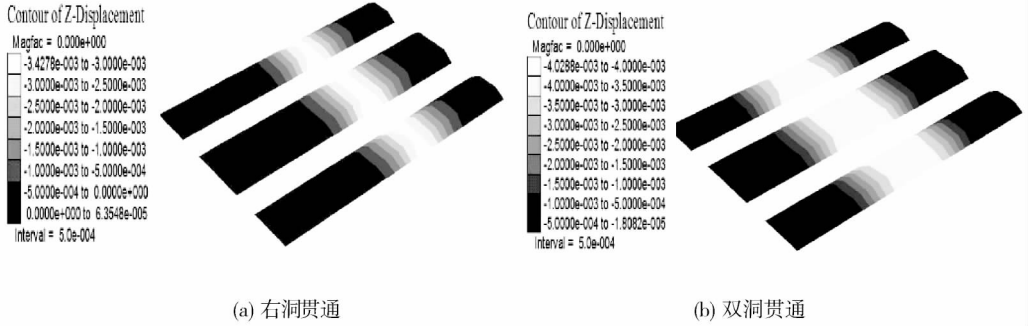


图 4 路基加固工况下路基沉降云图

由图 3 可知,右洞开挖完成造成的路基沉降为 4.01 mm、右洞开挖完成后左洞也开挖完成时造成的路基沉降为 4.36 mm;由图 4 可知,右洞开挖完成造成的路基沉降 3.43 mm、右洞开挖完成后左洞也开挖完成时造成的路基沉降为 4.03 mm. 即可知,右隧道的开挖造成土体的损失,使相邻土体间的应力发生重分布,这种应力重分布波及到地表,引起铁路路基的沉降. 左洞隧道在右洞已经开挖完成的基础上进一步开挖引起地层的移动,使地表的沉降范围增大,加大了铁路路基沉降.

1) 沿着隧道开挖方向拱顶沉降

选取部分测点进行分析,分别采用字母 R 和 L 来表示右洞隧道和左洞隧道,其中 R24.5 表示右洞拱顶与初始开挖面水平距离为 24.5 m 的测点, L24.5 表示左洞拱顶与初始开挖面水平距离为 24.5 m 的测点. 路基未加固时拱顶沉降如图 5 所示,右洞先贯通时洞顶最大沉降为 9.95 mm;右洞贯通之后左洞也贯通时洞顶最大沉降为 10.85 mm.

路基加固后,隧道拱顶沉降如图 6 所示,右洞先贯通时洞顶最大沉降为 8.99 mm;右洞贯通之后左洞也贯通时洞顶最大沉降为 9.59 mm.

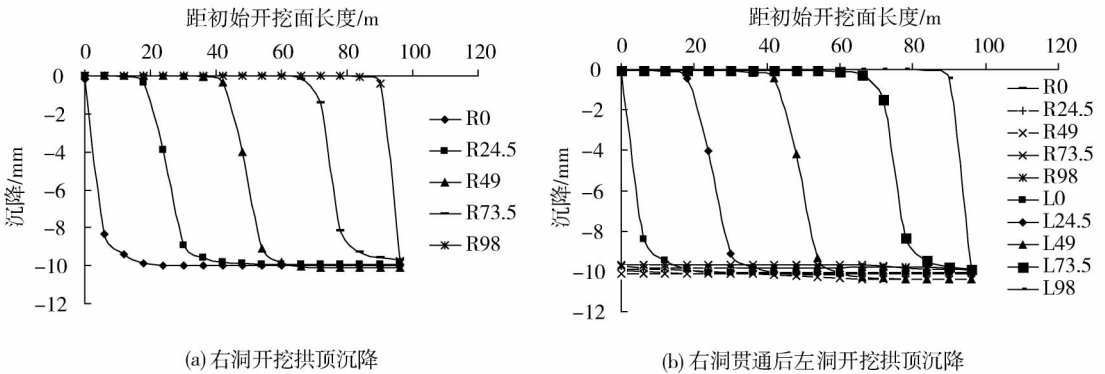


图 5 路基未加固时拱顶沉降变化图

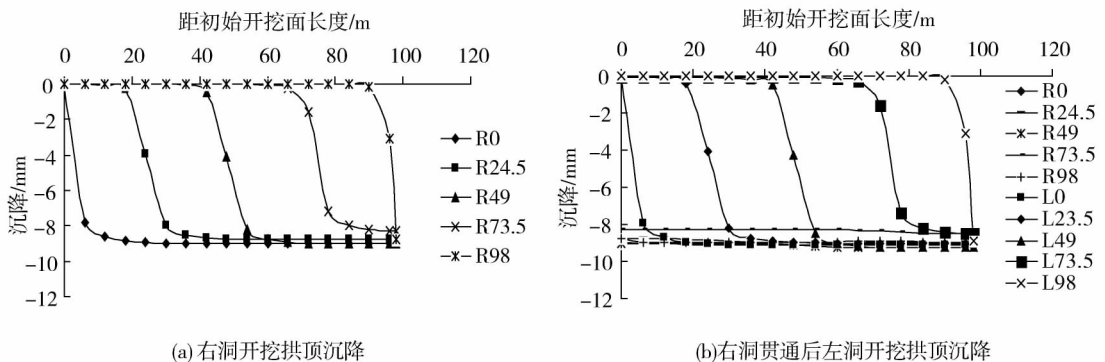


图 6 路基加固时拱顶沉降变化图

2) 垂直与隧道方向的路基沉降

不同顺序的隧道开挖必然对上部路基的沉降造成不同程度的影响。

路基加固时隧道开挖时路基监测点沉降如图7所示,图a表示对于鹰厦线,当右洞先开挖造成的最大沉降为4.03 mm,沉降中心与右洞隧道轴线位置对应(横坐标为10 m);左洞先开挖造成的最大沉降为2.7 mm,沉降中心与右洞隧道轴线位置对应(横坐标为-10 m);先右后左开挖造成的最大总沉降为4.33 mm,位于隧道中心线上,其中右洞贡献2.78 mm(占64.2%),左洞只贡献1.55 mm(占35.8%)。图b表示对于厦深线,当右洞先开挖造成的最大沉降为4.08 mm,沉降中心与右洞隧道轴线位置对应(横坐标为10 m);左洞先开挖造成的最大沉降为2.7 mm,沉降中心与右洞隧道轴线位置对应(横坐标为-10 m);先右后左开挖造成的最大总沉降为4.36 mm,位于隧道中心线

上,其中右洞贡献2.76 mm(占63.3%),左洞只贡献1.60 mm(占36.7%)。

路基加固时隧道开挖时路基监测点沉降如图8所示,图a表示对于鹰厦线,当右洞先开挖造成的沉降为3.3 mm,沉降中心与右洞隧道轴线位置对应(横坐标为10 m);左洞先开挖造成的沉降为2.6 mm,沉降中心与右洞隧道轴线位置对应(横坐标为-10 m);先右后左开挖造成的最大总沉降为3.95 mm,其中右洞贡献2.6 mm(占65.8%),左洞只贡献1.35 mm(占34.2%)。图b表示对于厦深线,当右洞先开挖造成的沉降为3.35 mm,沉降中心与右洞隧道轴线位置对应(横坐标为10 m);左洞先开挖造成的沉降为2.7 mm,沉降中心与右洞隧道轴线位置对应(横坐标为-10 m);先右后左开挖造成的最大总沉降为4.03 mm,位于隧道中心线上,其中右洞贡献1.36 mm(占66.3%),左洞只贡献2.67 mm(占33.7%)。

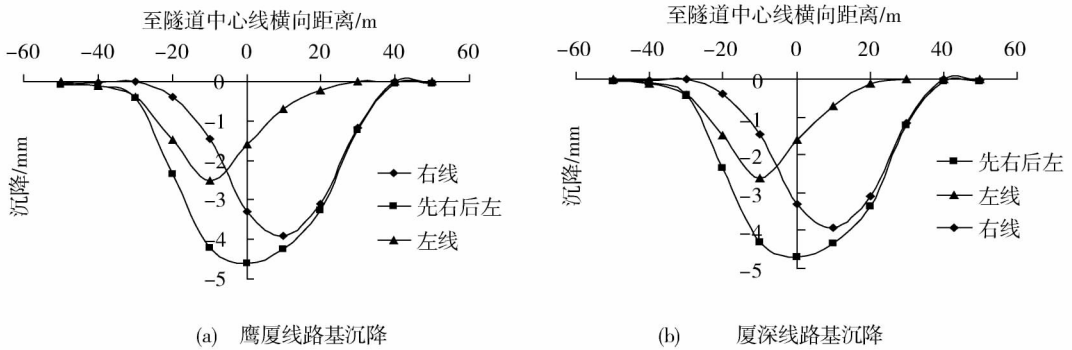


图7 路基未加固时隧道开挖引起的路基沉降

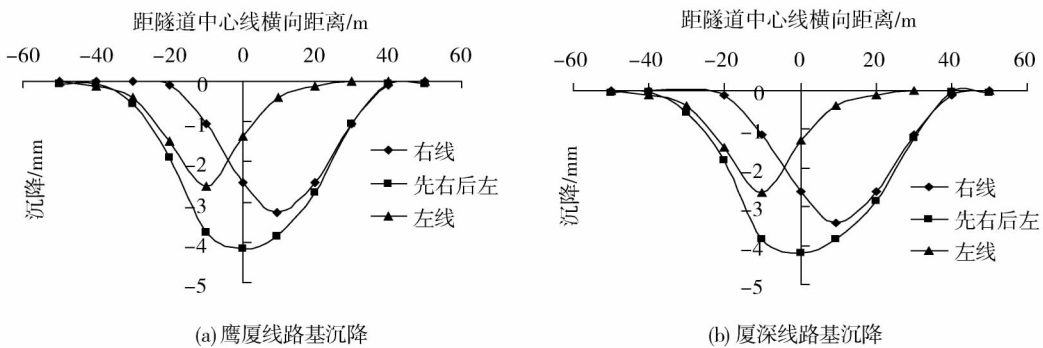


图8 路基加固时隧道开挖引起的路基沉降

4 与实际监测对比分析

选取具有完整数据的典型断面进行分析,测点布置如图9所示.监测结果和分析模拟结果对比如图10所示.

由图10可以得出,模拟值与监测数据规律一致,吻合较好.模拟值比监测值略大,一方面与数值模拟参数的选取有关;另一方面是由于实测点是设置在路基边缘,而模拟值的的监测点是设置在铁路中心线上.

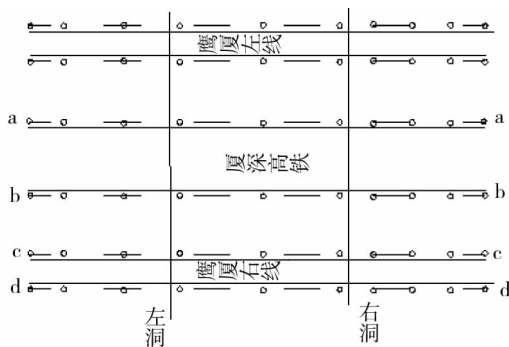
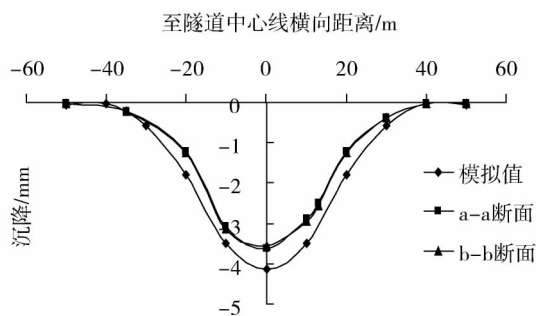
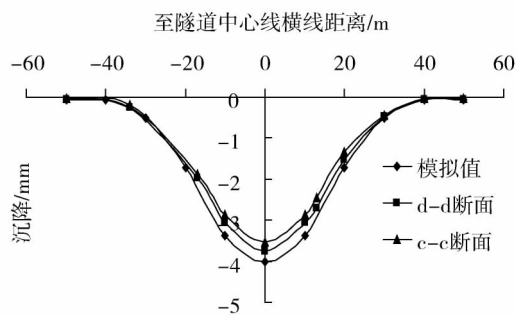


图9 测点布置图



(a) 模拟值与 a-a、b-b 断面实测值对比图



(b) 模拟值与 c-c、d-d 断面实测值对比图

图10 模拟值与实测值对比

5 结论

1) 通过对双洞隧道开挖的数值模拟, 得出当双洞隧道全部贯通以后, 上部3条铁路路基在列车荷载的作用下的最大沉降值在3.8~4.2 mm, 符合《高速铁路设计规范》中规定的最大沉降值控制在15 mm以内, 该模拟表明了隧道开挖前对铁路的旋喷处理以及隧道开挖后对其两侧和洞顶进行旋喷处理是有效的, 可以保证列车的正常运营。

2) 先开挖的隧道(右洞)引起铁路路基沉降远

大于后开挖的隧道(左洞)引起的铁路路基沉降, 路基未加固: 右洞开挖对路基沉降的贡献64%左右, 左洞只贡献了36%左右; 路基加固: 线开挖对路基沉降的贡献66%左右, 左洞只贡献了34%左右。这反映了右洞开挖完成以后所施做的旋喷和衬砌处理的效果显著。

3) 通过分析是否加固路基, 得出是否加固路基对隧道拱顶和路基的沉降都有影响, 但是对路基沉降影响相对来说比较大; 通过实测数据与模拟值的对比, 得出数值模拟结果比较符合实际的开挖沉降情况, 验证了数值模拟的有效性。

参考文献:

- [1] 肖立, 张庆贺. 铁路轨道下盾构施工所致地面沉降的数值模拟[J]. 同济大学学报, 2011, 39(9): 1286-1291.
- [2] 周文波. 双圆盾构法隧道施工对地面沉降的预测及控制研究[D]. 上海: 上海大学, 2006.
- [3] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报. 2005, 24(5): 755-762.
- [4] 徐干成, 李成学. 地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 269-276.
- [5] 李东海, 刘军. 盾构隧道斜交下穿地铁车站的影响与监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 3186-3192.
- [6] 孙文文, 刘涛, 单红仙. 地铁隧道的下穿施工对上部路基沉降影响分析[J]. 隧道建设, 2011, 31(1): 220-225.
- [7] 张生. 岩石隧道下穿建筑物施工变形控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [8] 王科甫. 盾构隧道下穿客运专线沉降预测及控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [9] 娄国充. 铁路隧道下穿既有路基沉降规律及控制标准研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [10] 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, 15(7): 1945-1950.
- [11] Lee I M, Nam S W. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels [J]. Tunnels and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 31-40.
- [12] 吴波. 复杂条件下城市地铁隧道施工地表沉降研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.