

大跨暗挖车站叠合初支拱盖法施工适应性研究

赵 迎¹, 霍 奇^{2,3}, 宋战平^{2,3}, 胡 敏¹, 王军保^{2,3}, 周冠南^{2,4}

(1. 北京市政路桥股份有限公司, 北京 100045; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 4. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300)

摘要: 贵阳轨道交通 2 号线省医站位于上软下硬的复合地层中。为了分析叠合初支拱盖法对本工程的适应性, 本文采用数值模拟的方法, 对施工可能引起的地表沉降、拱顶沉降、管线竖向位移、支护结构轴力和围岩塑性区分布进行了分析研究。结果表明: 叠合初支拱盖法沉降控制效果理想、围岩塑性区分布范围和塑性应变值较小, 但初期支护拉压区转换频繁, 较为薄弱, 易受破坏。与现场实测地表沉降数据对比显示, 数值模拟结果在变化趋势上与实测结果基本一致, 最终沉降量值也较为接近。因此, 省医站主隧道选用叠合初支拱盖法进行施工合理、可行。

关键词: 上软下硬地层; 大跨暗挖车站; 叠合初支拱盖法; 适应性

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0688-07

Study on adaptability of overlapping primary support arch cover method for large-span embedded station

ZHAO Ying¹, HUO Qi^{2,3}, SONG Zhanping^{2,3}, HU Min¹, WANG Jungbao^{2,3}, ZHOU Guannan^{2,4}

(1. Beijing Municipal Road & Bridge Group Co. Ltd., Beijing 100045, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China;

3. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

4. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co. Ltd., Tianjing 300300, China)

Abstract: The Provincial Hospital Station of Guiyang Metro Line No.2 is located on the upper-soft lower-hard stratum. In order to analyze the adaptability of overlapping primary support arch cover method for the project, this paper adopts the numerical simulation method to analyze and study the surface settlement, vault settlement, vertical displacement of pipeline, axial force of supporting structure and plastic zone of surrounding rock caused by construction. Results show that the settlement control effect of overlapping primary support arch cover method is ideal, the distribution range of plastic zone and plastic strain value of surrounding rock are small, but the transformation of tension and compression zone of primary support is frequent, weak and vulnerable to damage. The numerical simulation results obtained by overlapping primary support arch cover method are consistent with the field data in terms of the change trend of surface settlement, and the final settlement value is also similar. Thus, the adoption of overlapping primary support arch cover method for the construction of the main tunnel of the Provincial Hospital Station is reasonable and feasible.

Key words: upper-soft lower-hard stratum; large-span embedded tunnel; overlapping primary support arch cover method; adaptability

地铁施工过程中经常遇到上软下硬的复合地层, 在这种复合地层中进行地铁建设, 隧道拱顶通常位于上部软弱土层中, 其成拱效应和自稳能力较差, 容易发生变形及诱发地表过大沉降^[1-2]。为了解决上述问题, 近年来, 在传统大断面施工方法的基础上逐渐形成了一种拱盖法, 其可以充分利用下伏围岩(上软下硬地层中的硬层)较强的

承载能力, 降低工程造价, 提高施工效率^[3-7]。

作为一种新型施工方法, 拱盖法在工程中的应用相对较少, 相关学者对其施工稳定性和开挖力学行为进行了研究。杨忠年等人^[8]通过大尺寸模型试验, 研究了拱盖法施工时隧道围岩的力学特性与变形规律, 将地表沉降过程分为三个阶段并进行了详细分析。Shang 等人^[9]采用数值模拟方

法,研究了拱盖法施工中不同支护措施组合控制围岩变形的效果,结果表明,采用双层初支和附加拱脚措施控制地表沉降效果最好.张光权等人^[10]对某地铁车站拱盖法施工过程中的地表沉降监测数据进行了分析,确定了地表沉降发展的变化规律,据此提出一系列控制对策,并经实践证明了其有效性.SONG and HE^[11]采用数值模拟方法,分析了在上软下硬岩质地层中进行大跨隧道施工时围岩的松动特性和拱盖法施工中二次衬砌与支护结构的受力特征,确定了影响围岩松动区大小的主要因素.刘涛等人^[12]采用数值计算的方法,研究了拱盖法施工过程中单次拆撑长度和拆撑顺序对周边环境和隧道结构的影响,研究结果表明,选择交替拆撑顺序和单次6 m的拆撑长度对周边环境影响较小,施工更为安全.上述研究介绍了拱盖法在上软下硬地层中的初步应用情况,但作为一种新的施工方法,拱盖法在工程中的应用远未普及,其施工过程中围岩和支护结构的力学响应有待进一步明确.

拱盖法包括二衬拱盖法、初支拱盖法和叠合初支拱盖法三种^[13],但后两者都是通过设置加强初支提高拱盖承载能力,仅在结构形式上有略微差别.本文以中国贵阳轨道交通2号线省医站为研究背景,针对大跨暗挖车站上软下硬复合地层特点,借助有限元软件,模拟了叠合初支拱盖法开挖主隧道的全过程,分析了叠合初支拱盖法施工引起的地表沉降、拱顶沉降、管线竖向位移、支护结构轴力和塑性区分布,并将现场实测地表沉降数据与数值模拟结果进行了对比,确定省医站主隧道选用叠合初支拱盖法施工是合理、可行的.

1 工程概况

1.1 车站概况

省医站位于贵阳市宝山南路与都司高架路交叉口北侧,是贵阳市轨道交通2号线工程的第23个车站,沿宝山南路呈南北向布置.站址范围内西北象限是省人民医院门诊大楼,距离车站主体约50 m;东北象限为依山碧玉小区和贵阳市公路管理局,距离车站主体约16 m;东南象限是半上坡的居民自建2~3层房屋,距离车站主体约10.4 m;南侧为蟠桃宫立交桥,与车站主体相距约39.3 m.省医站平面布置图如图1.

车站主体长度200 m,宽度约20.9 m,轨面埋深25.2~27 m,最大断面面积334 m²,拱顶上方覆土约7~11 m.站址范围宝山南路有双向5个

快速车道和4个辅道,为贵阳市重要干道,交通繁忙,设人行天桥一座.据市政提供的资料,场地地下管网密集,其中,Φ1 000污水管为控制性管线,埋深5.3 m,施工时无法改迁.若开挖引起较大地层变形,将严重破坏重要建(构)筑物和地下管网,因此,应选择合适的开挖方法以控制沉降在安全范围内.

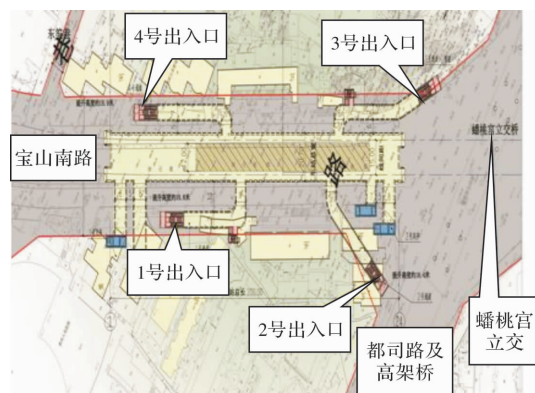


图1 省医站平面布置图

Fig. 1 Plane layout of the Provincial Hospital Station

依据现场地质勘察资料,代表性地层剖面从上到下依次为:3 m厚杂填土、13.2 m厚红黏土以及中风化白云岩,具有“上软下硬”特性.车站主要位于中风化白云岩层,大部分拱顶中风化岩层覆盖厚度仅0.5~5 m,局部位于红黏土层,开挖难度大.

1.2 施工方法

针对该大跨暗挖车站上软下硬地层条件及主隧道上部市政管线多、交通流量大及沉降控制要求严格这些特点,省医站主隧道拟采用叠合初支拱盖法进行施工,这样既可以有效控制沉降,也能安全、高效的进行施工作业,提高效率,还能够节省桩的施工成本.

叠合初支拱盖法的施工工序如图2所示,其主要施工步骤如下:

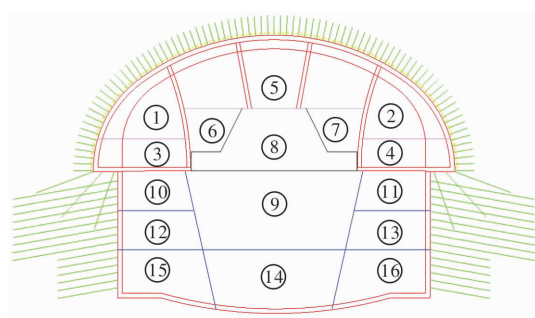


图2 叠合初支拱盖法施工工序

Fig. 2 Construction procedure of overlapping primary support arch cover method

(1)开挖左、右上导洞即图 2 中①~④部土体,施作初期支护(锚杆、小导管、钢架、喷混凝土、临时支撑);

(2)开挖中部上导洞即⑤部土体,并施作初期支护(锚杆、小导管、钢架、喷混凝土、临时支撑);

(3)开挖⑥~⑦部土体,施作横撑;

(4)在大拱脚部位打设锁脚锚杆(保证有 0.5 m 左右锚入加强初支中),凿除临时支护上部喷砼,模筑加强初支混凝土,以此循环施作;

(5)加强初支混凝土强度达标后,开始拆除临时支撑,并开挖⑧部核心土体;

(6)开挖下半部分中央⑨部土体,喷混后开挖左右两侧⑩~⑬部土体,施作侧墙部分初支;

(7)开挖下半部分中央⑭部土体,施作仰拱初支后开挖下半部分左右⑮~⑯部土体,初期支护完全封闭后铺设防水层,浇筑二衬。

2 数值模拟与分析

2.1 地质模型及边界条件

为全面分析叠合初支拱盖法施工引起的围岩沉降、支护结构受力和围岩塑性区等特性,本文采用数值模拟方法进行研究。选取车站代表性结构断面,利用大型有限元软件 Midas GTS NX,建立省医站叠合初支拱盖法开挖三维地质模型,见图 3,该模型包括 205 086 个单元,36 693 个节点。车站主隧道模型如图 4 所示,Y 的正向为隧道开挖方向。

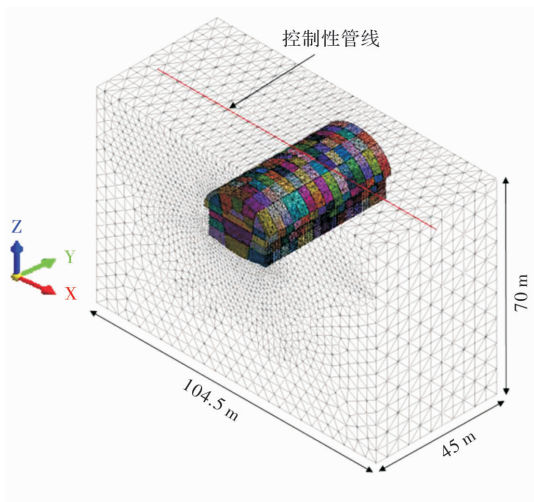


图 3 省医站整体模型

Fig. 3 Overall model of the Provincial Hospital Station

为消除边界尺寸对数值试验结果的影响,左右边界取距离车站隧道中线 5 倍隧道洞径($R=$

10.45 m),即为 52.25 m,底部边界取距离车站隧道中线 4 倍隧道洞径,上部边界按照地铁车站现场勘察埋深进行选取,埋深 28.2 m,则 X、Y、Z 方向边界长度分别为 104.5 m、45 m、70 m。围岩和加强初支采用实体单元进行模拟,本构关系为 Mohr—Coulomb;初期支护、临时支撑和二次衬砌采用板单元进行模拟,本构模型为弹性结构;污水管利用植入式梁进行模拟,本构模型为弹性结构。模型的四周立面与底部界面采用法向位移约束,地表设置为自由边界。各施工步紧密衔接,一次开挖进尺 3 m。

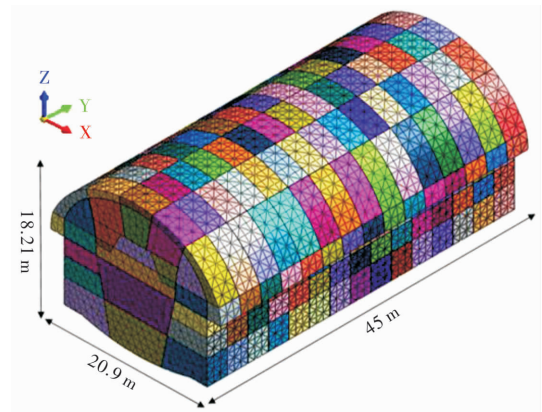


图 4 主隧道模型

Fig. 4 Model of the main tunnel

2.2 材料参数

根据地勘报告,各地层的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil layers

岩土层类别	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	内摩擦角/ $^{\circ}$	黏聚力 / kPa	弹模 / MPa	泊松比
杂填土	18.5	12	16	8.0	0.30
红黏土	17.1	16	50	70	0.35
中风化白云岩	27.5	30	600	2500	0.19

按照刚度等效方法^[14],利用式(1)等效计算支护结构的弹性模量。折算后的力学参数如下表 2 所示。

$$E_c = E_0 + \frac{A_s E_s}{A_c} \quad (1)$$

式中: E_c 为折算后混凝土弹性模量; E_0 为原混凝土弹性模量; A_s 为钢拱架或格栅截面积; E_s 为钢材弹性模量; A_c 为混凝土面积。

表 2 支护结构物理力学参数
Tab. 2 Physical and mechanical parameters of supporting structures

支护类型	支护形式				重度 / kN · m ⁻³	弹模 /GPa	泊松比	厚度/mm
	钢材		混凝土					
	型号	间距	形式	强度				
初期支护	I25b 工字钢	0.5 m	喷射	C25	25	30.043	0.2	330
加强初支	I25b 型钢	0.5 m	模筑	C30	25	36.096	0.2	500

2.3 计算结果分析

2.3.1 地表沉降与拱顶沉降

城市地区地铁车站隧道开挖，不可避免扰乱原地应力场，引起应力重分布，导致地表及重要建(构)筑物发生沉降^[15-16]。因此，预测施工过程中可能引起的沉降和破坏极为重要。图 5、6 分别给出了叠合初支拱盖法施工完成后 Y=20.45 m 处的地表沉降槽曲线和污水管竖向位移云图。

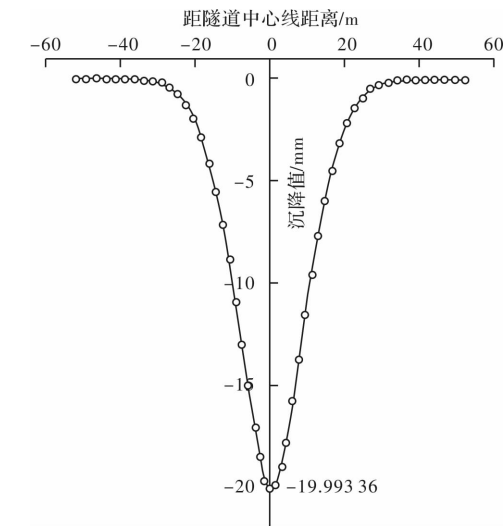


图 5 地表沉降槽

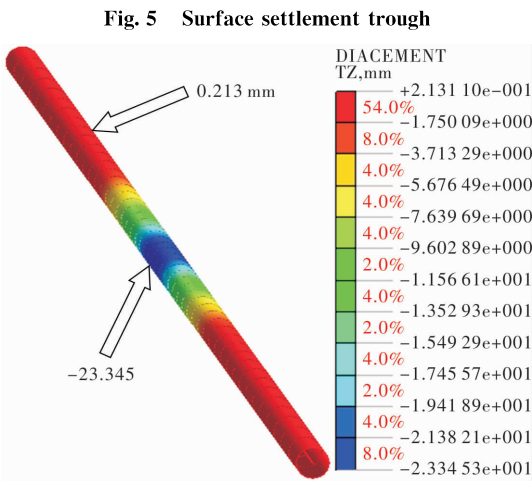


图 6 污水管竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement of the sewage pipe

从图 5 可以看出，叠合初支拱盖法施工引起地表发生的最大沉降量约为 19.99 mm，主要引起隧道中线两侧约 30 m 范围内地层发生沉降。图 6 显示，叠合初支拱盖法施工引起 $\Phi 1\,000$ 污水管的最大沉降、隆起值分别为 23.345 mm、0.213 mm，两者相距约 31.6m，倾斜率 0.0007，管线较安全^[17]。该方法对于地表沉降与控制性管线的影响均较小。

图 7 是叠合初支拱盖法开挖过程中距起始开挖面 8 m 处隧道中线上方地表沉降和拱顶沉降随开挖步的变化曲线图。图 7 表明，叠合初支拱盖法施工所引起的地表沉降值要小于拱顶沉降值；地表沉降方面，沉降过程持续时间短，尤其是沉降快速发展期，虽然在第二个开挖步(S2)进入，以平均 2.14 mm/开挖步的沉降速率增长，但在拱部加强初支(S10)施作以后，增长速率明显放缓，且在该位置处加强初支(S11)完成以后沉降开始趋于稳定，基本不再增加；拱顶沉降方面，起始与其地表沉降同步，而后较早快速发展，最终在 S10 以后增长速率放缓沉降基本不再增加，逐渐趋于稳定，与地表沉降一致。

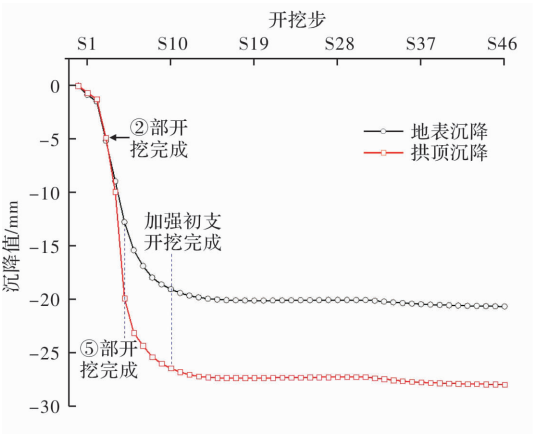


图 7 地表沉降和拱顶沉降

Fig. 7 Surface settlement and vault settlement

2.3.2 支护结构内力

初期支护作为隧道结构承载体系的一部分，对于充分发挥围岩自稳性、确保施工安全、保证

施工正常进行意义重大。取一榀初期支护中部板单元进行研究,图8为初期支护横向(X轴)和纵向(Y轴)轴力图。

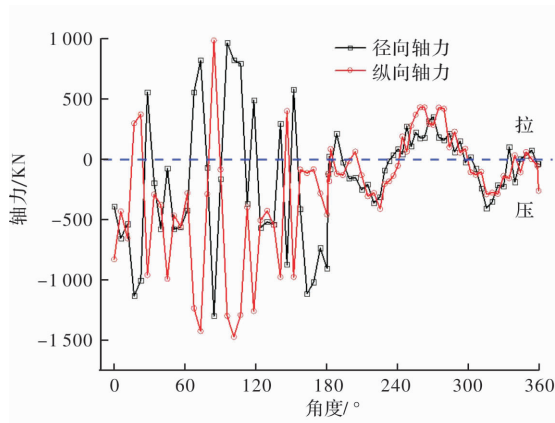


图8 初期支护轴力

Fig. 8 Axial force of primary support

从图8可以看出,叠合初支拱盖法施工引起的横、纵向最大拉力值和最大压力值分别为968.19 kN、-1297.40 kN和987.38 kN、1472.08 kN,主要引起支护结构受压。此外,叠合初支拱盖法施工引起的横、纵向轴力发生拉压变化的次数较多,引起初期支护受拉区和受压区频繁转换,从而会影响初期支护的安全性。这主要是因为叠合初支拱盖法上半断面开挖工序繁琐,导洞多且相互影响,导致支护结构分段多次合拢成型。因此,叠合初支拱盖法的初期支护易受破坏,对于支护结构稳定性要求更高。

2.3.3 围岩塑性区

围岩塑性区分布可直接反映地下结构围岩-支护体系的安全和稳定性。图9给出了两种方法施工完成后塑性应变在0.0005以上的塑性区分布,其中蓝色区域为围岩的塑性区。

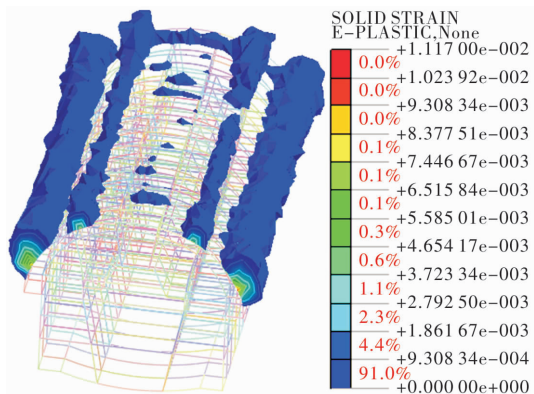


图9 塑性区分布

Fig. 9 Distribution of plastic zones

从图9可以看出,叠合初支拱盖法塑性区范围相对较小,塑性区集中在岩土分界面大拱脚上方,

最大塑性应变约为0.00112,数值较小,这是因为拱盖部位设置加强初支,上部荷载主要通过大拱脚承担,而后传递给中风化白云岩,充分发挥了中风化白云岩的承载能力。

综合以上分析,在上软下硬地层中进行大跨暗挖隧道施工,叠合初支拱盖法可以充分利用下伏围岩承载能力,有效控制沉降,引起围岩塑性区分布范围与围岩塑性应变值也较小。但是,采用叠合初支拱盖法施工时,初期支护拉压转换频繁,较为薄弱,易受破坏,现场施工时应针对性加强监控量测,及时施作加强初支。

3 现场监测

经综合比较分析,贵阳轨道交通2号线省医站主隧道选用叠合初支拱盖法进行施工,现场施工情况如图10所示。为确保施工安全,省医站施工过程中对该方法引起的地表沉降进行了跟踪监测,图11给出了省医站数值模拟范围内四个断面(I、II、III和IV)的监测点布置平面图。其中,红色双实线为车站轮廓线,蓝色虚线为数值模拟段轮廓线。各监测断面的间距为10m,且#1测点位于隧道中轴线上。数值模拟段左边界到监测断面I的距离为8m,数值模拟段右边界到监测断面IV的距离为7m。



(a) 加强初支施工 (b) 大拱脚纵梁加固

图10 省医站现场施工图

Fig. 10 On site construction drawing of the Provincial Hospital Station

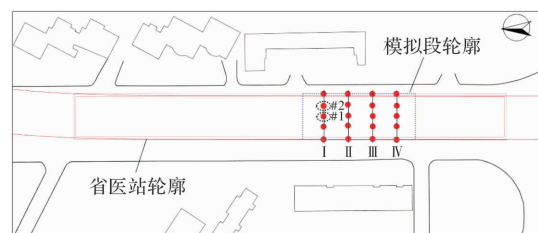


图11 省医站部分监测点布置图

Fig. 11 Layout of certain monitoring points of the Provincial Hospital Station

选取地表#1、#2两个测点变形稳定后的沉降数据与数值计算结果进行比较分析。图12为两

测点的沉降曲线,从图中可以看出,各测点沉降量随时间的变化具有相似性,主要包括先期沉降、快速沉降、基本控制、二次沉降及逐渐收敛五个阶段。受左、右上导洞①~④施工扰动影响,地表缓慢沉降1.02 mm和1.07 mm;当开挖至监测断面时,沉降快速发展,沉降量分别达到了9.41 mm和10.65 mm;而后左、右上导洞继续推进,支护结构及时施作,沉降基本不在发展,两测点的累积沉降量分别保持在7.74~9.41 mm和9.84~10.65 mm范围内;随着滞后的中部上导洞下穿监测点,地表发生第二次快速沉降,加之拆除临时支撑的影响,与前面的施工阶段相比,该阶段内地表沉降量更大,沉降持续时间更长,累积沉降量分别达到22.03 mm和19.94 mm,直到加强初支施作并发挥作用时沉降逐渐收敛,最终沉降值达到23.18 mm和19.99 mm。

图12中同时给出了通过数值模拟得到的测点#1和#2累积沉降量随施工步的变化规律。从图中可以看出,现场实测结果和数值计算得到的地表沉降规律基本相同,但前者存在沉降停止阶段,而后者曲线相对光滑,不存在停止阶段。这主要是因为数值模拟过程中考虑的是较为理想的情况,各施工步骤的衔接较为紧密。此外,与实测数据相比,数值计算结果总体偏小,测点#1和#2最终沉降量与实测结果的偏差分别为2.55 mm和2.43 mm。这是由于在进行数值计算时,假定岩(土)体材料为均匀和各向同性的连续介质,忽略了岩(土)体中的节理、裂隙等材料力学行为的影响,从而导致数值模拟结果小于实测数据,但这并不影响总体规律的正确性。

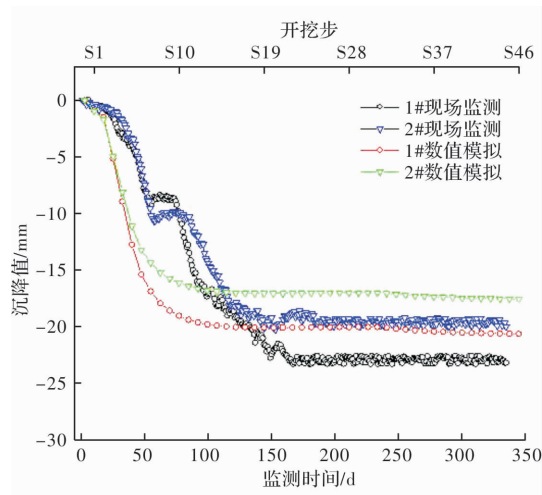


图12 地表沉降量变化曲线

Fig. 12 Surface settlement variation curve

4 结论

本文依托贵阳轨道交通2号线省医站主隧道工程,利用Midas GTS NX,模拟了叠合初支拱盖法开挖主隧道的全过程,分析了施工过程可能造成的沉降、支护结构安全性和围岩塑性区分布,并比较分析了现场实测地表沉降数据和数值模拟结果,主要得出以下结论:

(1)在上软下硬地层中进行大跨度暗挖车站施工,叠合初支拱盖法可以充分利用下伏围岩承载能力,有效控制沉降,且施工引起的围岩塑性区分布范围和围岩塑性应变值较小。

(2)采用叠合初支拱盖法施工时,初期支护拉压区转换频繁,较为薄弱,易受破坏,施工时有必要进行针对性的监控量测,并尽早施作加强初支。

(3)与现场实测地表沉降数据对比显示,叠合初支拱盖法数值模拟结果在地表沉降变化趋势上与实测结果一致,且二者的最终沉降量偏差较小。因此,省医站主隧道选用叠合初支拱盖法进行施工合理、可行。

参考文献 References

- [1] 李辉,田小旭,宋战平,等.基于谢家杰公式的浅埋隧道开挖进尺计算方法研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2018,50(5):662-667.
LI Hui, TIAN Xiaoxu, SONG Zhanping, et al. Study on calculation method of digging length for shallow tunnel based on Xie Jiajie's surrounding rock pressure Formula[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(5): 662-667.
- [2] 宋战平,张丹锋,曲建生,等.承压富水砂土地层桩洞法施工变形控制研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(1):33-38.
SONG Zhanping, ZHANG Danfeng, QU Jiansheng, et al. Study on the deformation control of PBA construction method in pressure water sand stratum[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 33-38.
- [3] 钟国.地铁车站的一种新型暗挖施工工法——拱盖法[J].城市轨道交通研究,2012,15(8):145-148.
ZHONG Guo. Arch-cover method: a new subsurface excavation construction for metro stations[J]. Urban Mass Transit Urban Mass Trans, 2012, 15(8): 145-148.
- [4] 吕波.暗挖地铁车站拱盖法关键施工技术[J].现代隧道技术,2014,1(3):181-187.

- LV Bo. Key techniques of the arch-cover method for bored metro stations[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2014, 51(3): 181-187.
- [5] JI Z Q, JIA Y G. Study of model tests on large-span tunnel's damage caused by overload with arch cover method[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 941-944: 717-722.
- [6] 熊田芳, 宋超业, 乔春生. 上软下硬复合地层中拱盖法单拱大跨地铁车站的埋深影响研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(2): 222-228.
- XIONG Tianfang, SONG Chaoye, QIAO Chunsheng. Impacts of depths on the large-span and single-arch subway station with arch cover method in hard-soft heterogeneous stratum[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14(2): 222-228.
- [7] 陈安惠, 鲁彬, 邓昆, 等. 层状岩地层超大断面暗挖车站双层叠合初支拱盖法施工技术[J]. *施工技术*, 2018, 47(19): 29-34.
- CHEN Anhui, LU Bin, DENG Kun, et al. Construction technology of double overlapping and primary support arch cover method for ultra large section tunnel in layered rock stratum[J]. *Construction Technology*, 2018, 47(19): 29-34.
- [8] 杨忠年, 纪召启, 刘泉维. 拱盖法隧道围岩稳定性模型试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2014, 51(5): 85-91.
- YANG Zhongnian, JI Zhaoqi, LIU Quanwei. Model test on the stability of the surrounding rock of a tunnel constructed by the arch-cover method[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2014, 51(5): 85-91.
- [9] SHANG Y L, DU S J, HAN T Y, et al. Case study on deformation control of upper-soft and lower-hard large span tunnel station using combined control technology and monitoring demonstration[J]. *Sains Malaysiana*, 2017, 46(11): 2091-2099.
- [10] 张光权, 杜子建, 宋锦泉, 等. 地铁车站拱盖法施工沉降监测分析及控制对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S1): 3413-3420.
- ZHANG Guangquan, DU Zijian, SONG Jinquan, et al. Monitoring and analysis of excavation-induced subsidence of subway station constructed by arch cover method and control measures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31 (S1): 3413-3420.
- [11] SONG C Y, HE W G. Structural design of the stacked loaded arch of large-span tunnels in upper-soft lower-hard rock stratum[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(1): 17-26.
- [12] 刘涛, 黄永亮, 雷刚. 土岩复合地层浅埋暗挖车站拆撑方案优选分析[J]. *现代隧道技术*, 2015, 2(5): 131-137.
- LIU Tao, HUANG Yongliang, LEI Gang. Analysis of the optimum support dismantling scheme for shallow bored subway stations in a soil-rock compound stratum[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2015, 2 (5): 131-137.
- [13] 王安东. 一种新拱盖法——叠合初支拱盖法的特点与应用[J]. *现代城市轨道交通*, 2016(1): 48-52, 57.
- WANG Andong. Characteristics and application of laminated primary support arch-cover method [J]. *Modern Urban Transit*, 2016(01): 48-52, 57.
- [14] SONG Z P, CAO Z L, WANG J B, et al. Optimal analysis of tunnel construction methods through cross passage from subway shaft[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018(3): 1-14.
- [15] FANG Q, ZHANG D, WONG L N Y. Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2012, 29(3): 10-30.
- [16] CHEN R P, ZHU J, LIU W, et al. Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2011, 26 (1): 163-171.
- [17] 吴贤国, 曾铁梅, 张立茂, 等. 地铁施工邻近管线安全风险研究[J]. *铁道工程学报*, 2013(9): 127-132.
- WU Xianguo, ZENG Tiemei, ZHANG Limao, et al. Research on safety management of adjacent underground pipelines in metro construction[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2013(9): 127-132.

(编辑 沈 波)