

浅埋矿山法隧道联合支护监测及三维数值模拟分析

赵磊,王媛,牛玉龙

(河海大学 隧道与地下工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要:以某地铁工程区间隧道实际监测数据为基础,结合现场实际情况进行三维开挖模拟,在渗流应力耦合作用下获得在软弱破碎岩体中的隧道沉降及变形随开挖过程的变化规律。通过模拟计算与实际情况下的结果对比,发现引入渗流应力耦合的三维模型计算结果接近实测结果,结合实际情况的数值模拟,可以确定较好的联合支护方案,有效预估并且控制隧道开挖造成的位移变形。

关键词:隧洞围岩;稳定性分析;渗流应力耦合;变形监测;三维数值模拟

中图分类号:TU93

文献标识码:A

Combined support monitoring of a shallow tunnel excavation and 3D numerical simulation analysis

Zhao lei, Wang yuan, Niu yu-long

(Tunnel and Underground engineering Institute, Hohai University,
Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract:Based on the actual monitoring data of a metro tunnel and Combined with the actual situation in the field of three-dimensional excavation simulation, we'd like to explore the variation of tunnel settlement and deformation in weak rock mass with the coupling of seepage stress. Through the simulation calculation and the actual circumstances of the results, to determine the supporting effect of combined supporting method in the surrounding rock breaking and groundwater seepage. So we can ensure the safety of tunnel excavation and save the excavation period to make an effective assessment.

Key words:tunnel surrounding rock; stability analysis; seepage stress coupling; deformation monitoring; 3d numerical simulation

在隧道施工中,穿越软弱、破碎围岩等不良地质地区会产生较大的变形,在很多隧道浅埋段,过量的沉降会导致超出规范中预留的围岩变形量^[1],而导致隧道尺寸不满足设计建筑界限。因此在这些地段,通常采用联合支护的方法。王玉宝等^[2]通过对原型实验洞不同的开挖支护方式进行了监测,获得了隧洞选取不同支护类型的设计优化数据;宁殿晶等^[3]通过对阿拉坦隧道的地表与岩体的分层沉降监测数据进行分析,获得了在不同围岩类别下确定隧道进尺长度的安全值;郑俊清等^[4]通过对两条小间距短隧道的现场监测为衬砌施做时间及中间岩柱稳定性提供了设计依据。刘天宇等^[5]通过运用FLAC3D对导管注浆支

护进行模拟获得了解决隧道分步开挖时顶拱产生的急剧变形及围岩集中应力问题;张红等^[6]通过对湿陷性黄土隧道复合衬砌结构的模拟得出了黄土隧洞围岩与衬砌的安全系数参考值。但是之前的模拟大部分仅以二维模拟为主并且并没有将渗流应力耦合纳入考虑,部分模拟开挖的结果与实际结果有较大出入。本文结合实际监测数据,对联合支护下的隧道变形及地表沉降数据进行分析,运用数值软件对存在渗流应力耦合情况下的结果分析,获得隧道联合支护安全稳定性评价。

1 隧道概况与监测结果分析

收稿日期:2015-09-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51179060)

作者简介:赵磊(1991-),男,安徽宣城人,硕士,主要从事岩土工程数值模拟等领域的科研工作。

1.1 隧道概况与联合支护措施

该条隧道为区间隧道。从盾构工作井向北进入山体,下穿某水泥厂铁路专线后出山到达明挖段,全长 900 多米。里程桩号为右 DK42 + 065.333 ~ DK42 + 995.000,左 DK42 + 070.967 ~ DK42 + 995.000。隧道为双洞单线,马蹄形断面,虽然结构简单,但是地质条件较差,不良地质体发育,给掘进工作带来较大困难。

山体出露的地层岩性主要为周冲村组灰岩,节理裂隙发育。岩溶裂隙发育,地下水补充充足。孔隙裂隙水稳定埋深 3.1 ~ 4.8 m,隧道周围为 V 或 IV 中强风化围岩,上覆土层为混合土或第四系素填土。

隧道在出山段由于地质条件较差,埋深较浅,且隧道上方地表为居民区,本段隧道均采用锚杆加超前小导管注浆与钢桁架支护。其中 $\Phi 25$ 中空注浆锚杆 $L=3\text{ m}@1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 梅花形布置; $\Phi 42$ 超前小导管 $L=3.5\text{ m}@0.3\text{ m}\times 2\text{ m}$,小导管与隧道纵向呈 $10^\circ\sim 15^\circ$;格栅钢架采用 HRB400-25 间

距 0.5 m,中间采用双层 $\Phi 8@150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 钢筋网片,喷射 C25、P6 混凝土。

1.2 隧道监测方案

根据规范^[7-8]编制的检测方案采取对洞周收敛、洞顶下沉、地表下沉、临近建筑物沉降作为主要监测项目。

在隧道内部,超前支护打入后,进行岩土体开挖,然后将拱圈支护安装。此时监测元件被焊接到支护钢筋上。隧道内部纵向每 10 m 为一个断面,每个断面布置 1 个拱顶点以及 2 个收敛点,在部分沉降较大的地段加密;地表监测沿隧道纵向在 DK42 + 065 ~ DK42 + 210 每 10 m 布置一个断面,每个断面布置 5 ~ 11 个测点,周边建筑物测点布置在其四角、大转角及伸缩缝处。

1.3 监测结果

通过对现场的长期监测,选取具有代表性的数据,可得到如下结果:

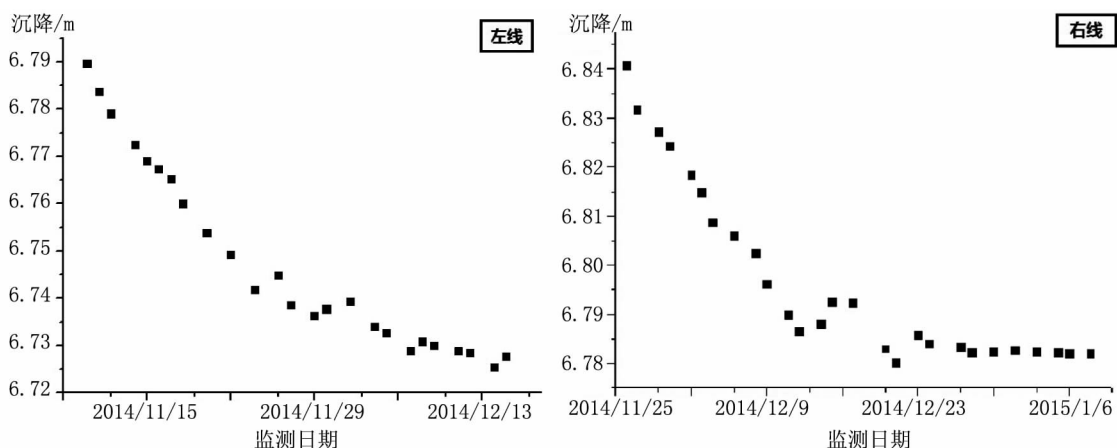


图1 KD42+140断面拱顶沉降-时间关系曲线

Fig.1 Curves of subsidence displacement and time for vault

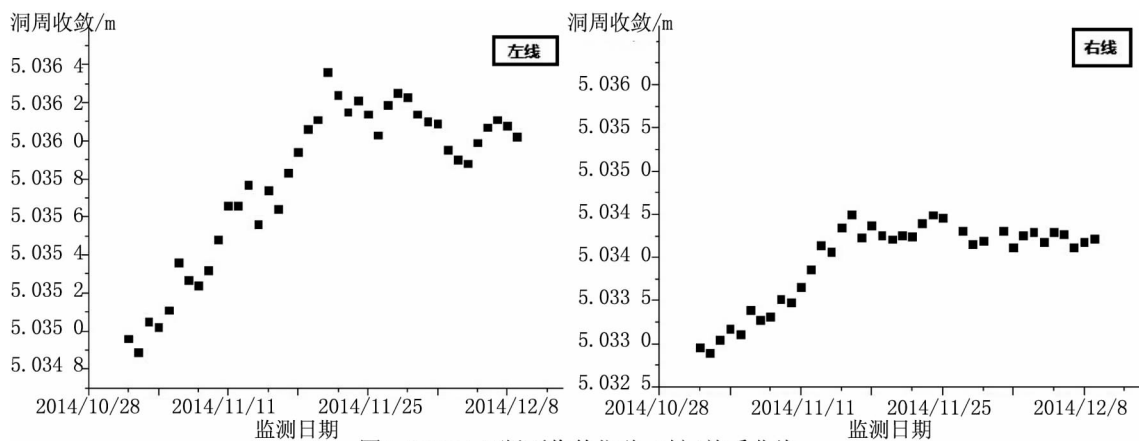


图2 KD42+140断面收敛位移-时间关系曲线

Fig.2 Curves of convergence displacement and time

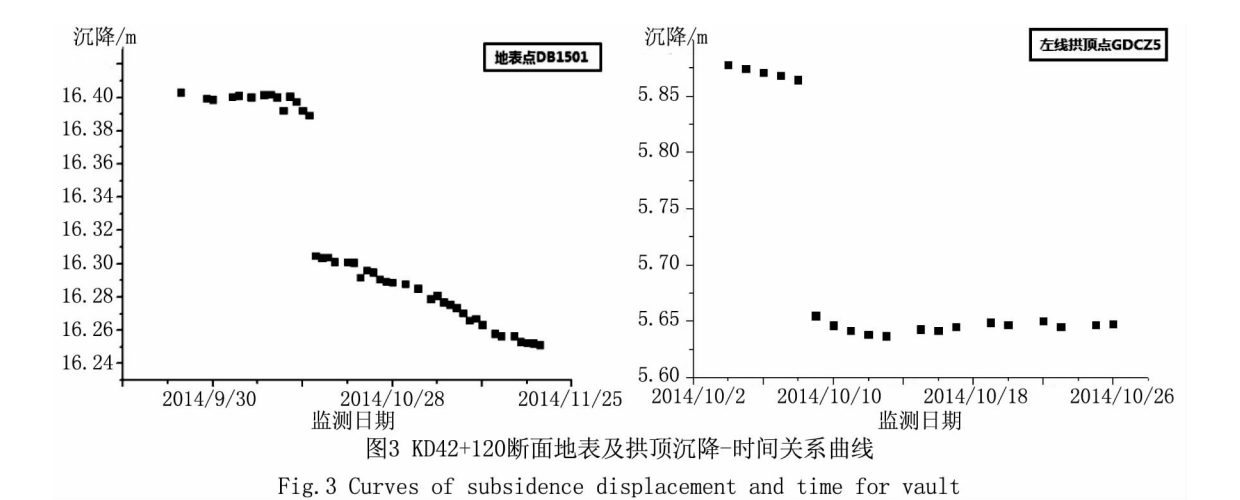
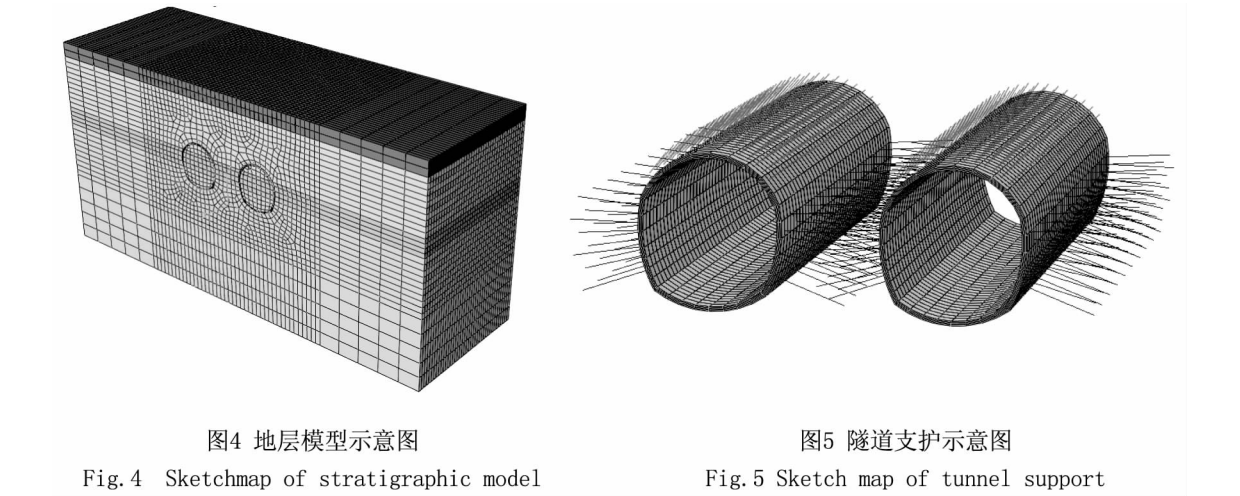


表 1 模型部件物理力学参数表							
Tab. 1 Physical and mechanical parameters in the model							
项目	重度 /kN · m ⁻³	弹模 /MPa	珀松比	粘聚力 /kPa	摩擦角 /°	渗透系数 /cm · s ⁻¹	孔隙率
围岩	②-1b2-3	18.7	5.25	34	43	4e-6	0.85
	②-2b3-4	18.5	4.16	26	39	7e-6	0.85
	③-3b1-2	19.3	7.53	46	45	3e-7	0.8
	T2z-2	21.0	10e3	46	33	6e-4	0.8
	T2z-3	25.5	40e3	670	40		
超前小导管	30.0	100e3	0.25				
锚杆	40.0	210e3	0.20				
初期支护	25.0	15e3	0.20			1e-8	0.2



(1)如图 1 与图 2 所示,测点在刚刚开挖完之后的位移量比较大,一般在 20 d 左右趋于稳定,不再发生大的位移。

(2)拱顶最终沉降数据,在隧道的不良地质段,拱顶沉降有多个点超过了 30 mm 监测预警值。拱顶最终沉降量在不良地质段均已超出规范^[1]给定的预留值,所以后期必须对隧洞部分初期支护进行拆除和重新安装。

(3)在左 DK42 + 124 处初期支护发生较大变形,地表塌陷,大量地下水涌入隧洞。其地面与拱

顶的位移监测如图 3 所示。

2 施工开挖分步模拟及结果分析

2.1 模型基本信息

根据勘察报告与设计图纸及之前的监测数据,选取隧道中间 KD42 + 130 ~ KD42 + 150 这不良地质段进行数值模拟分析。分析软件采用 ABAQUS。分析模型尺寸我们取 60 m × 20 m × 30 m 隧道围岩特性按地层性质不同,采用不同的弹塑

性模型考虑^[9],土体采用 Mohr - Coulomb 屈服准则,岩体采用 Druck - Prager 屈服准则。锚杆、超前小导管、初期支护均视为弹性体^[10]。图4为隧道穿越地区的地层网格计算模型,图5为隧道内支护系统的网格计算模型。

模型侧面与底面施加法向约束边界,侧面水头边界固定在地表以下3 m。模型中分步逐渐向前开挖会在隧道内部形成新的边界,因此针对每个分析步建立了不同的内水头边界条件。

2.2 施工步骤模拟

通过单元生死的功能实现隧道开挖的模拟,运用应力衰减实现对隧洞开挖的控制。衰减量的不同来表征衬砌在开挖后加上的时间,衰减量越大,加上的时间越晚,围岩应力释放越多^[11]。软件中通过:(1)先形成自重应力场和渗流应力场;(2)插入左洞第一段超前小导管并注浆加固^[12];(3)左洞第一段上台阶应力衰减;(4)左洞第一段

上台阶衬砌;(5)左洞第一段下台阶应力衰减;(6)左洞第一段下台阶衬砌;(7)插入左洞第一段内的锚杆及第二段的超前小导管并注浆加固;(8)左洞第一段开挖移除。每个开挖循环为1 m,重复第2至第8步,直至左洞开挖贯通,再对右洞进行开挖,整个开挖过程共计320个施工开挖步。

2.3 计算结果

通过对模型进行了四个工况的计算,计算结果如下图6~图9所示。

工况1:不存在渗流应力耦合状态下,应力衰减至40%,左洞开挖;

工况2:存在渗流应力耦合状态下,应力衰减至20%,左洞开挖;

工况3:存在渗流应力耦合状态下,应力衰减至40%,左洞开挖;

工况4:存在渗流应力耦合状态下,应力衰减至60%,左洞开挖。

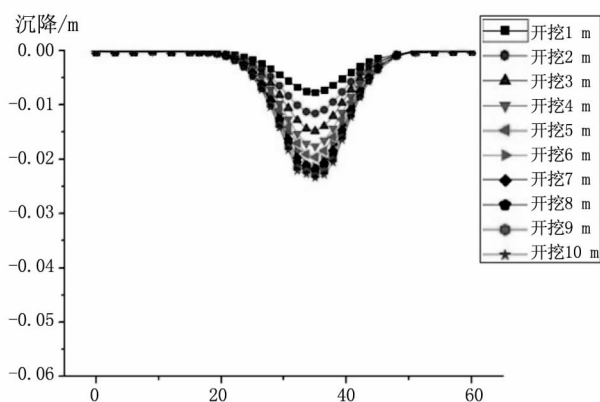


图6 工况1中不同进尺下地表沉降曲线图

Fig.6 Curves of surface subsidence with tunneling in condition 1

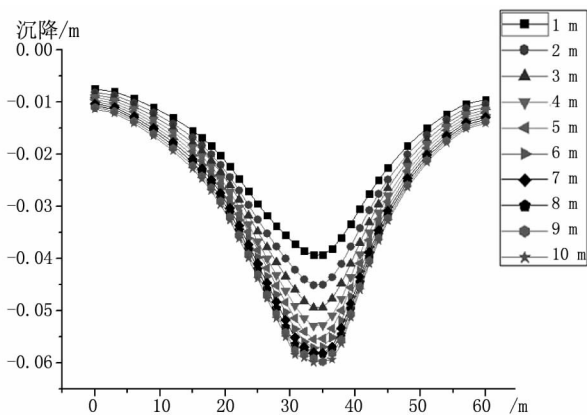


图7 工况2中不同进尺下地表沉降曲线图

Fig.7 Curves of surface subsidence with tunneling in condition 2

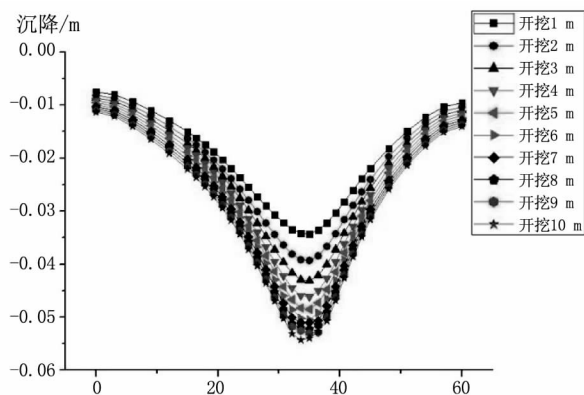


图8 工况3中不同进尺下地表沉降曲线图

Fig.8 Curves of surface subsidence with tunneling in condition 3

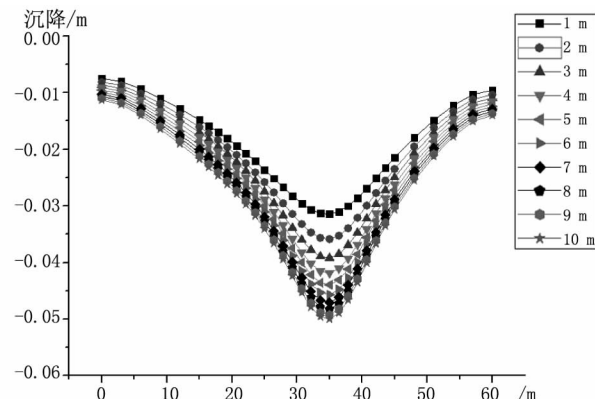


图9 工况4中不同进尺下地表沉降曲线图

Fig.9 Curves of surface subsidence with tunneling in condition 4

图 6 ~ 图 9 显示的是在不同工况下,隧道逐渐向前开挖时地表 $Z=0\text{ m}$ 处的沿 X 向的一排点的沉降曲线图。计算结果显示,随着隧道逐步向前开挖,地表点会继续发生沉降。在掌子面与地表点 Z 轴方向距离 5 m 范围内,开挖对于地表点的沉降影响内影响较大,超过 6 m 后地表沉降影响幅度减小。

通过之前的计算结果可选取 5 m 处地表沉降值作为最终沉降值,并绘制出在不同工况下的地表最终沉降量,并与实测值进行比较,见图 10。

本段的实际地表沉降位移量与工况 3 的结果最为接近。没有渗流作用下的模拟计算结果与实测结果偏离较大,而在有渗流应力耦合作用下,应力释放量越大,则沉降越大。实际情况中,应力释放量与支护时间相关,释放量越大,表明支护的时

间越晚,前期的应力释放主要由隧洞围岩承担。工况 2 应力衰减幅度较大情况下计算结果与实际值有较大偏差,这说明实际工程中一般在不良地质段都会通过快速支护来防止隧道发生更大变形,计算时应采用接近实际情况的应力衰减参数。与此同时,在城市隧道开挖过程中如果围岩性质较差,不能通过采用发挥围岩承载力来减少隧道衬砌变形的的方法。边开挖边支护,尽量缩短开挖支护过程时间能有效减少隧道变形。由于在本地区地下水位较高,隧道开挖后的水利梯度较大,没有渗流应力耦合的计算结果(工况 1)同相同衰减量下的有渗流应力耦合的计算结果(工况 2 ~ 工况 4)相比只有其结果的 $1/3$,地下水渗流对于隧道开挖稳定的影响非常大,运用数值方法计算模型时渗流的作用不可忽视。

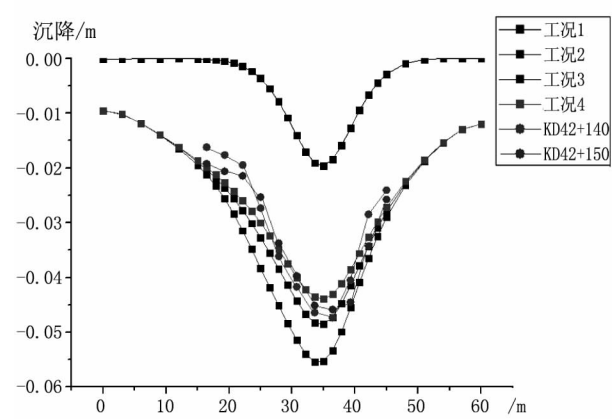


图10 不同工况下的地表沉降与实测值对比曲线
Fig.10 Comparison curves of surface subsidence and the actual value in different conditions

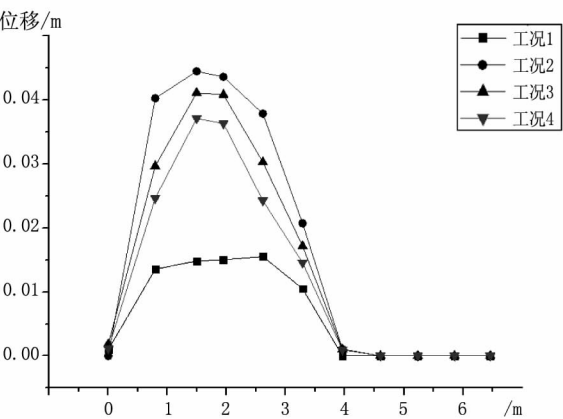


图11 掌子面沿竖直方向 临空面隆起曲线
Fig.11 Bump curve in the vertical direction of face

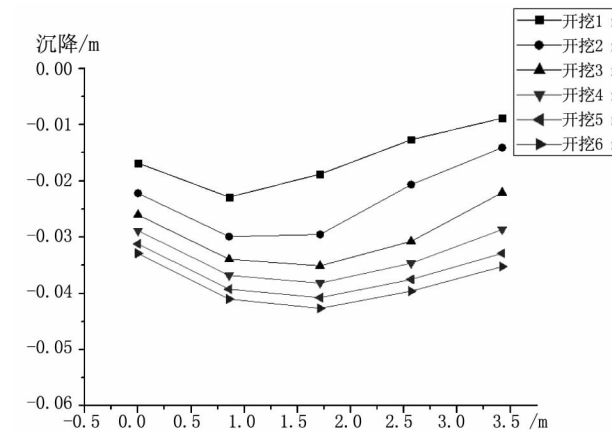


图12 工况1超前小导管竖向变形曲线
Fig.12 Curve of the vertical direction of Advanced small pipe in condition 1

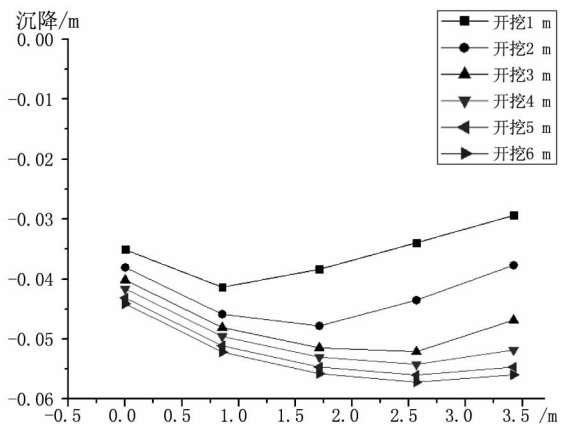


图13 工况2超前小导管竖向变形曲线
Fig.13 Curve of the vertical direction of Advanced small pipe in condition 2

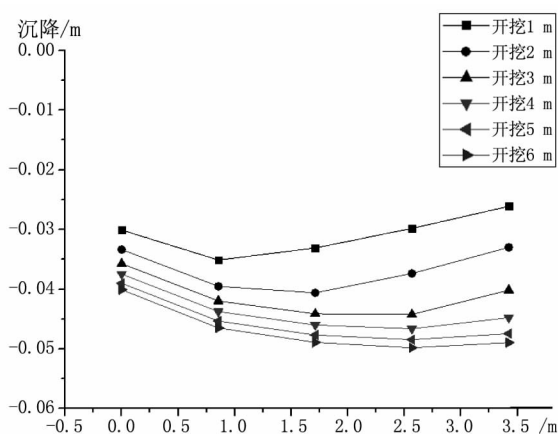


图14 工况3超前小导管竖向变形曲线

Fig. 14 Curve of the vertical direction of Advanced small pipe in condition 3

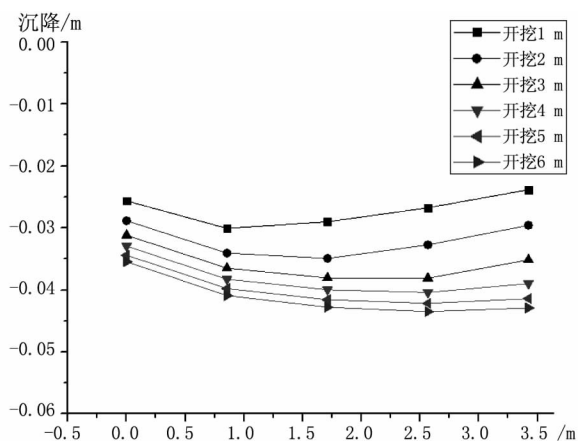


图15 工况4超前小导管竖向变形曲线

Fig. 15 Curve of the vertical direction of Advanced small pipe in condition 4

图 11 反映的是隧洞内部不同工况下随着隧道开挖掌子面的位移规律。隧道开挖引起的应力释放导致的超前小导管的变形图见图 12 ~ 图 15。

在图 12 ~ 图 15 中对比工况 1 与另外三个工况,开挖完成之后的掌子面在有渗流应力耦合的状况下,开挖出的临空面形成一个新的渗流边界,导致了这种隆起尤为明显,如图 11 所示。掌子面隆起后,这种状况下的掌子面后的围岩由于向掌子面这个临空面挤出,所以该处附近土体发生了应力松弛。此时打入的超前小导管与超前注浆阻止了相应变形的继续发展。由图 12 ~ 图 15 所示,此时打入的小导管发生了相同趋势的变形。掌子面变形越大的工况(工况 2)相应的超前小导管变形也越多,这也说明了小导管对于维持隧道稳定起了相当积极的作用。

3 结论

结合数值模拟结果与实测结果对比可以发现引入渗流应力耦合的三维模型计算结果接近实测结果,三维数值模拟可以通过模拟分步开挖,从而获得较为接近与可控的实际结果。施工设计前通过结合实际情况的数值模拟,可以确定较好的联合支护方案,有效预估并且控制隧道开挖造成位移变形。

参考文献:

- [1] TB10003 - 2005, 铁路隧道设计规范[S].
- [2] 王于宝, 王晓卫, 颜新荣, 等. 大坂引水隧洞工程变形监测及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3783 - 3787.
- [3] 宁殿晶. 浅埋隧道开挖洞顶岩体沉降监测及规律研究

- [M]. 西安: 长安大学, 2009.
- [4] 郑俊清. 复杂地质条件小净距短隧道现场监测分析及数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [5] 刘天宇. 超前小导管在隧道工程中的应用及数值模拟[J]. 土工, 2013, 27(2): 67 - 70.
- [6] 张红, 郑颖人. 黄土隧洞支护结构设计方法探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 473 - 478.
- [7] GB50308 - 2008, 城市轨道交通工程测量规范[S].
- [8] DB11/490 - 2007, 地铁工程监控量测技术规程[S].
- [9] 余健, 何川. 软弱围岩段隧道施工过程中围岩位移的三维弹塑性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 623 - 629.
- [10] 陈卫忠, 伍国军, 贾善坡. Abaqus 在隧道工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [11] 费康, 张建伟. abaqus 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [12] 孔恒. 城市地铁隧道浅埋暗挖法地层预加固机理及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2003.
- [13] 余熠. 浅埋大断面隧道核心土数值模拟与分析[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(3): 35 - 38.
- [14] 王铁男, 郝哲, 杨青潮. 超前小导管注浆布置范围对地铁隧道开挖的影响分析[J]. 公路, 2011(5): 54 - 58.
- [15] 陈秋南, 赵明华, 周国华, 等. 复杂层状岩层隧道塌方原因分析与加固后信息化施工技术[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 650 - 653.
- [16] 费康, 张建伟. Abaqus 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [17] 孔恒. 城市地铁隧道浅埋暗挖法地层预加固机理及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2003.

(特约编辑 李军)