

文章编号: 1674-599X(2019)04-0078-07

浅埋偏压隧道洞口联合支护变形监测及模拟

姜冰, 常树芳, 王方立, 樊毅华, 赵超

(中交路桥华南工程有限公司, 广东 中山 528403)

摘 要: 为减少浅埋偏压隧道洞口段的施工风险, 有效控制洞口段的围岩变形。以贵州玉石高速白岩湾隧道进口段施工为例, 对超前管棚、偏压挡墙联合支护方案进行三维数值模拟分析, 并与实际工程监测结果进行对比, 探讨联合支护方案在浅埋偏压隧道洞口施工中的支护效果。研究表明: 在浅埋偏压隧道进口段变形控制方面, 采用超前管棚、偏压挡墙联合支护方案与未支护的工况相比, 联合支护能有效控制隧道的拱顶下沉、周边收敛及地表沉降, 实际工程监测数据也验证了数值模拟结果的准确性。在浅埋偏压隧道洞口段施工过程中, 超前管棚、偏压挡墙联合支护方案可靠有效, 可为类似工程提供参考。

关键词: 浅埋偏压隧道; 超前管棚; 偏压挡墙; 数值模拟; 监控量测

中图分类号: U453.1

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.012

Deformation monitoring and numerical simulation of combined support at portal of shallow buried bias tunnel

JIANG Bing, CHANG Shu-fang, WANG Fang-li, FAN Yi-hua, ZHAO Chao

(Road & Bridge South China Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528403, Guangdong, China)

Abstract: In order to reduce the construction risk of the portal section of shallow buried tunnel with bias pressure, the deformation of surrounding rock was effectively controlled. Taking the construction of the entrance section of the tunnel of expressway in Yushi county, Guizhou province as an example, the three-dimensional numerical simulation model was established to analyse the combined support scheme of advanced pipe shed and biased retaining wall. Compared with the monitoring results, the supporting effect of the combined support scheme was discussed. The results show that the deformation of surrounding rock at the portal section of shallow bias tunnel can be controlled satisfactorily using the combined support. The sink of tunnel at vault, the convergence of wall, the subsidence of surface can be effectively limited. The accuracy of the numerical simulation results is also verified by the monitoring data. Therefore, the combined support scheme of advanced pipe shed and bias retaining wall can be considered as a reliable and effective support in the construction process of the entrance of shallow buried tunnel with bias pressure. The research can provide reference for similar projects.

Key words: shallow buried bias tunnel; advanced pipe shed; biased retaining wall; numerical simulation; monitoring measurement

中国地域广阔, 中西部地区山脉纵横、沟壑交错, 地形陡峻险要, 地质条件复杂, 许多隧道建设在地质条件复杂的山区。建设山岭隧道中, 洞口段的开挖是重要环节, 特别是浅埋偏压隧道。

洞口围岩通常存在富水、滑坡等不良地质条件, 尤其是洞口开挖后非对称荷载会导致支护结构产生更大的弯矩和应力集中。如: 施工工艺与围岩力学环境不符合, 会导致隧道结构发生损坏, 延

收稿日期: 2020-12-17

作者简介: 姜冰(1979—), 男, 中交路桥华南工程有限公司高级工程师。

误工期,增加不必要的施工成本。

目前,很多学者从不同角度对浅埋偏压隧道进行了研究。刘小军等人^[1]采用FLAC3D计算了某隧道洞口段围岩及支护的受力特征,并结合现场监控量测结果,证明环形导坑预留核心土法的隧道掘进过程应先开挖浅埋侧较为合理,该结论与周玉宏等人^[2-5]的研究结果一致。雷明锋等人^[6]依托工程衬砌断面及相似性原理,采用偏压角模型对浅埋偏压隧道围岩压力的分布规律进行了研究,表明:浅埋偏压隧道开挖过程中,浅埋侧围岩压力逐步减小,而深埋侧围岩压力逐渐增大。来弘鹏等人^[7-8]针对偏压隧道的渐进破坏机理及围岩应力分布进行了试验模拟和分析,揭示了浅埋偏压隧道塌方破坏的形成和发展过程。王祥秋等人^[9]通过对比龙井隧道进口段施工过程现场监测数据和有限元分析结果,得出了偏压浅埋隧道在不同开挖阶段中围岩位移的变化规律。王明年等人^[10-11]通过物理模型试验,对软弱围岩下的小净距浅埋暗挖隧道的不同围岩预加固强度和施工进尺进行了研究。林希鹤等人^[12-14]结合宁杭高速公路宜兴段梯子山隧道工程实例,论证了超前管棚支护结合注浆技术改善松软破碎岩层的物理力学性质。张红卫等人^[15]通过对超前管棚注浆支护的加固机理及应用进行了分析,证明采用管棚注浆法能在不良地质条件下大跨度隧道施工过程中增强隧道自身的结构稳定性。苑俊廷等人^[16]研究了超前大管棚支护技术在某浅埋偏压黄土隧道的实际应用,并通过对工程量测的数据分析,证实了超前管棚支护控制隧道洞口段的地表下沉和围岩变形效果较好。戴俊^[17]通过对隧道施工所处的工程地质条件与超前管棚预支护在隧道开挖若干阶段的受力特点进行了分析,提出了超前管棚预支护的主要参数计算原则与方法。但对破碎、风化围岩条件下的管棚支护参数的确定及数值模拟研究少见。浅埋偏压隧道洞口段施工中,管棚参数的选取一般依靠工程经验选取,难以保证参数的准确性。因此,本研究拟采用数值模拟来研究浅埋偏压隧道施工中超前管棚、偏压挡墙联合支护参数的选取,并

以工程现场检测值进行对比,以期为类似隧道工程的设计和施工提供参考。

1 隧道联合支护施工

1.1 工程背景

贵州玉石高速白岩湾隧道进口位于直线型斜坡坡脚,自然坡度约 29° ,隧道起讫桩号ZK16+765~ZK16+955,长190 m,隧道最大埋深53 m,隧道净高、净宽都为5 m。基岩出露为奥陶系中下统湄潭组(1~2 m)泥质砂岩,岩层产状 $205^{\circ}\angle 32^{\circ}$,进洞口仰坡开挖坡向为 291° ,坡向与岩层倾向近似垂直,倾角略大于坡角,为切向坡,边坡整体较稳定。仰坡开挖坡面主要位于强风化泥质砂岩,风化强烈,稳定性较差,边坡开挖后强风化岩层易沿节理裂隙面滑塌。进口仰坡整体较稳定,但仰坡开挖强风化岩层面易沿节理裂隙面滑塌。围岩节理裂隙发育密集,裂隙水不发育,围岩极其破碎,岩体完整性较差,拱部易掉。

1.2 长管棚设计参数

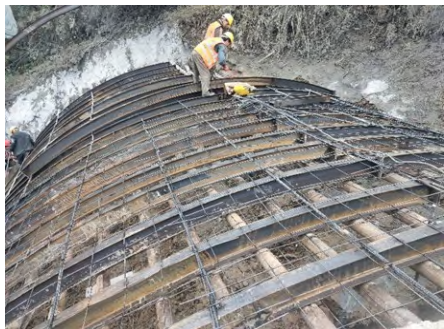
钢管规格: $\phi 108\text{ mm}\times 6\text{ m}$ 热轧无缝钢管,节长为3、6 m,钢管环向间距为40 cm,仰角为 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ (不包含路线纵坡),管棚支护长度为30 m。管棚注浆采用水泥浆液(添加水泥浆液体积5%的水玻璃),通过现场试验确定合理的注浆参数,初步拟定注浆参数如下:①水泥浆灰比取1:1;②水玻璃浓度取35波美度;③水玻璃模数取2.4;④注浆压力初压为1.2 MPa,终压为2.2 MPa。

1.3 工艺流程

先施作偏压挡墙,浇筑C20混凝土,养护15 d后拆模。再施作套拱,内模安装,预埋长管棚,定位定向钢管,安装外模,浇筑C25混凝土包裹钢支撑和导向管,养护15 d后才可拆模。然后进行长管棚施工。钻孔过程中,保证钻机不移位。每钻进5 m,用仪器检查角度是否偏离,确保钻孔方向的准确性。安装完毕后,封闭工作面,向棚管内注浆,如图1所示。



(a)施作偏压挡墙



(b)铺设型钢、管棚定位定向钢管



(c)棚管注浆



(d)偏压挡墙、超前长管棚拆模

图1 偏压挡墙、超前长管棚联合支护施工

Fig. 1 Combined support construction of biased retaining wall and advanced long pipe shed

2 隧道监控量测

隧道监测量控水平净空收敛、拱顶下沉和地

表沉降（洞口）。隧道地表沉降、拱顶下沉和周边收敛测点根据施工方法布置^[18]，如图2~3所示。

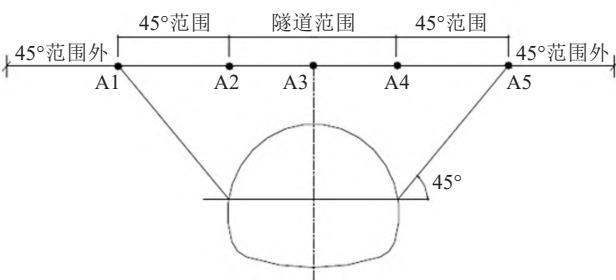


图2 地表沉降测点布置

Fig. 2 Layout of surface settlement measuring points

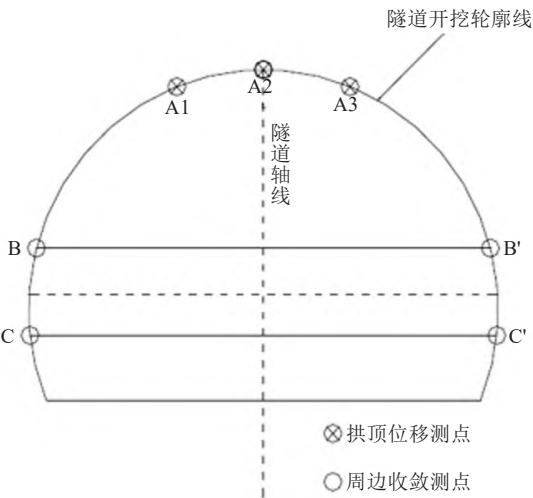


图3 拱顶位移及周边收敛测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points for displacement of vault and wall of the tunnel

对各测点进行连续监测，15 d后变形趋于收敛。由于监控量测数据过多，以K16+775断面为例，拱顶变形时程曲线如图4~6所示。

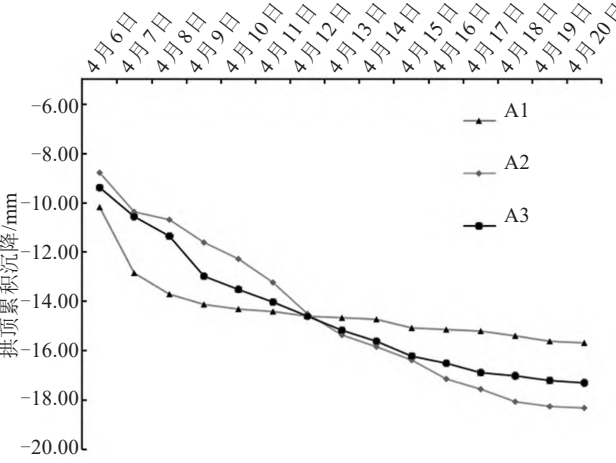


图4 K16+775拱顶累积沉降-时间曲线

Fig. 4 Cumulative settlement-time curve of vault at the K16+775

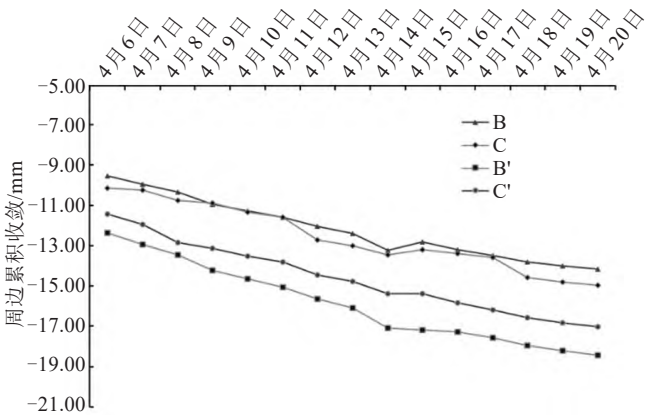


图5 K16+775周边累积收敛-时间曲线

Fig. 5 Cumulative convergence-time curve of wall at the K16+775

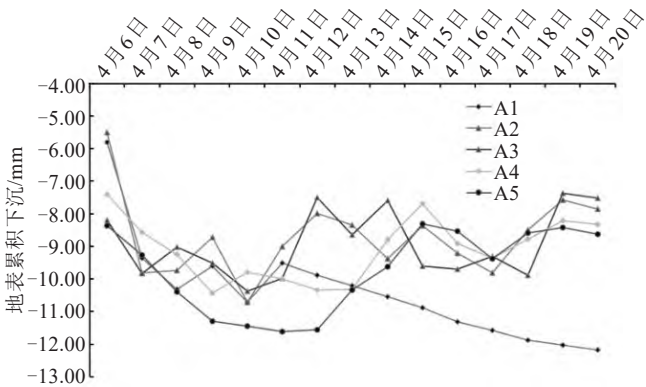


图6 K16+775地表累积下沉-时间曲线

Fig. 6 Cumulative subsidence-time curve of surface at the K16+775

从图4~6中可以看出,隧道拱顶的沉降量在14~18 mm之间,周边收敛在11~18 mm之间,洞口地表累计下沉在7~12 mm之间,各值均在工程规范允许范围内,与联合支护条件下的隧道开挖模拟结果接近。

3 隧道施工数值模拟

3.1 数值模拟模型

本研究采用岩土工程数值分析软件MIDAS GTX NX进行分析,计算考虑自重,边界条件采用位移边界条件。模型的上边界为自由边界,在下边界施加水平和竖向约束,两侧分别施加水平方向的约束。根据现场实际工况,计算中的覆土、围岩材料选择莫尔-库伦准则,喷混、偏压挡墙、管棚材料选择弹性准则。隧道的施工进尺取4 m,共计5个开挖步,管棚支护长度为30 m,钢管取 φ

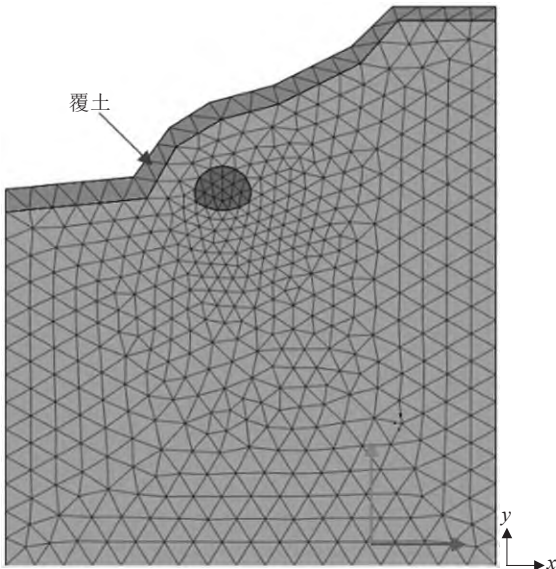
108 mm \times 6 m 热轧无缝钢管,钢管环向间距取40 cm,浆液扩散半径取30 cm。覆土、围岩、管棚、偏压挡墙和喷射混凝土的力学参数见表1。

表1 计算模型材料力学参数

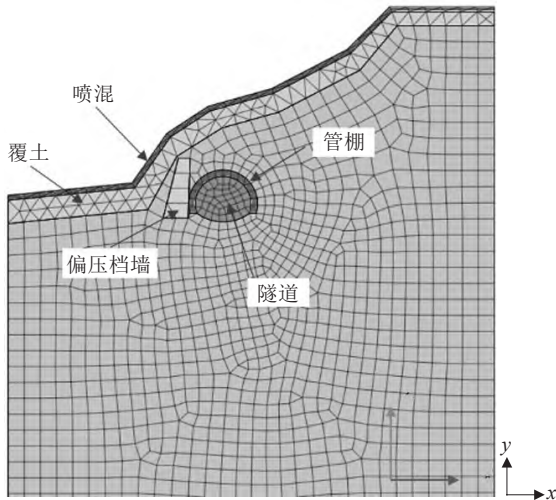
Table 1 Mechanical parameters of calculation model

材料	弹性模量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	泊松 比	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	内摩擦 角/($^{\circ}$)
覆土	9.0×10^3	0.45	16	20	15
砂岩	1.0×10^6	0.32	21	200	28
喷混	1.5×10^7	0.26	24		
管棚	2.4×10^7	0.22	22		
挡墙	3.3×10^7	0.20	25		

联合支护、无支护条件下的隧道计算模型网格划分如图7所示。



(a)无支护



(b)联合支护

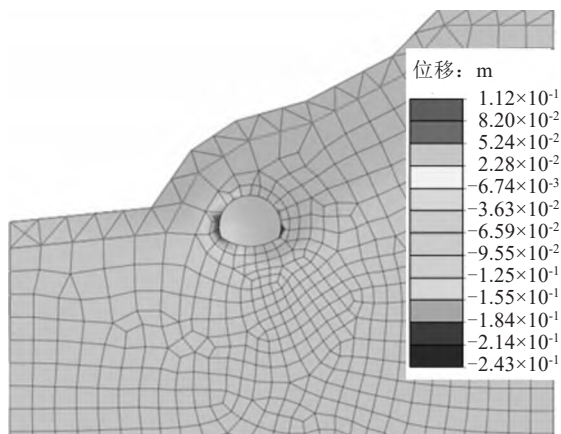
图7 模型网格划分

Fig. 7 Meshing diagram of the model

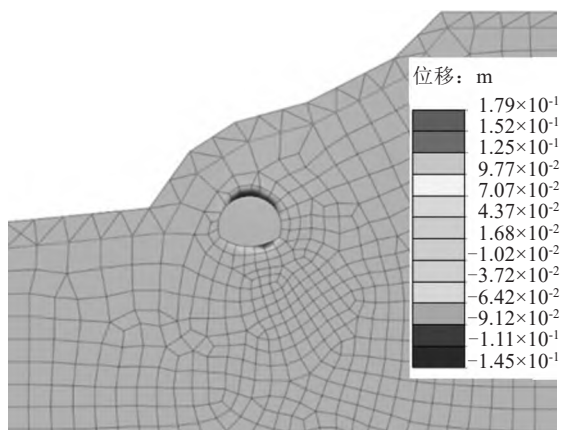
3.2 结果分析

3.2.1 无支护情况下位移场分析

计算可得到不同施工阶段隧道周边位移, 取有代表性的第1步开挖和第5开挖结束后的隧道周边位移计算结果进行展示, 如图8~9所示。



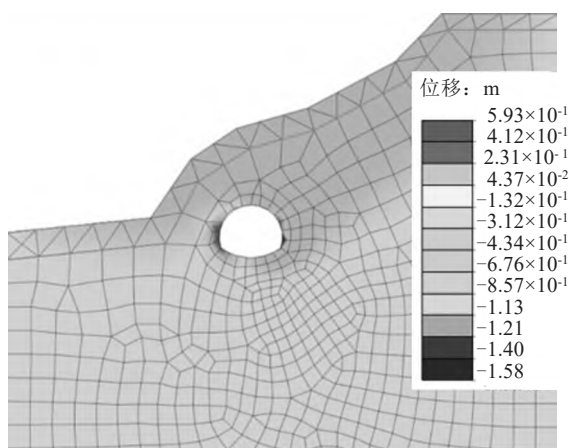
(a) X方向



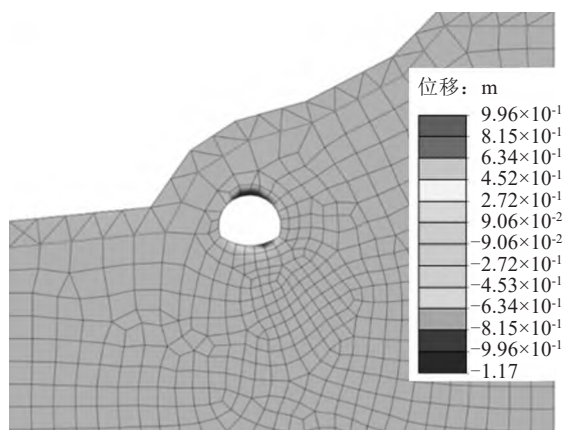
(b) Z方向

图8 无支护时第1开挖步后隧道周边位移计算结果

Fig. 8 Calculation results of displacement after the first excavation step without support



(a) X方向



(b) Z方向

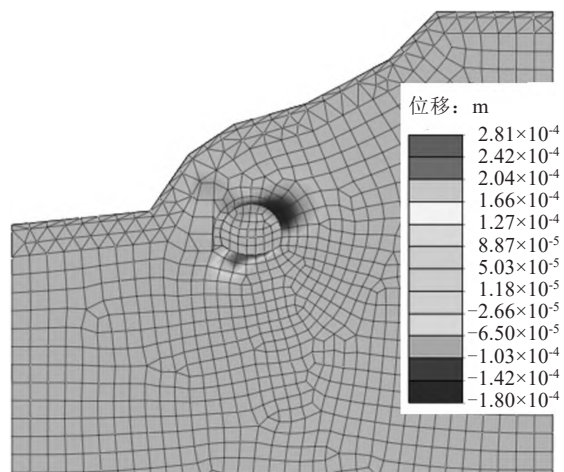
图9 无支护时第5开挖步后隧道周边位移计算结果

Fig. 9 Calculation results of displacement after the fifth excavation step without support

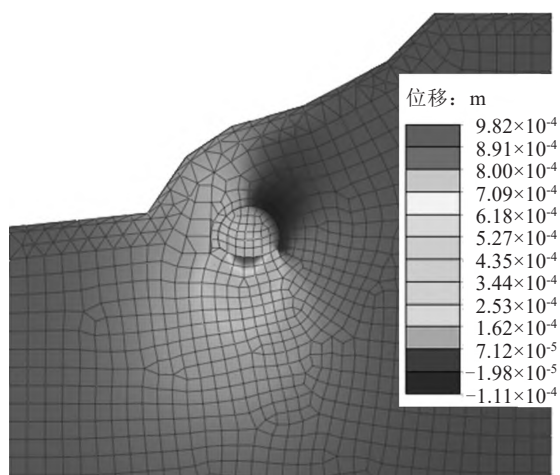
从图8中可以看出, 第1步开挖后, X 方向位移最大处在隧道的左侧和右侧, 隧道左侧向内偏移量高达11.2 cm, 右侧向内偏移量达24.3 cm。而在 Z 方向, 位移最大处为隧道拱顶和底板, 向内侧位移量分别是17.8、14.5 cm。第5步开挖结束后, 隧道周边位移更为明显。从图9中可以看出, 隧道在 X 、 Z 方向均变形严重, X 方向隧道左侧向内偏移量达59.3 cm, 右侧向内偏移量高达158.2 cm, Z 方向隧道拱顶向下偏移117.7 cm, 底板向上偏移99.6 cm。在这种情况下, 隧道会处于危险状态, 无法继续施工。

3.2.2 联合支护条件下位移场分析

计算可得到联合支护下不同施工阶段的隧道周边位移, 同样取有代表性的第1步开挖和第5开挖结束后的隧道周边位移进行分析, 如图10~11所示。



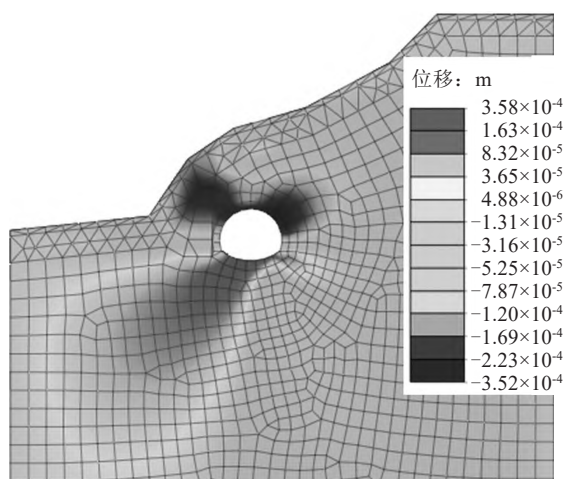
(a) X方向



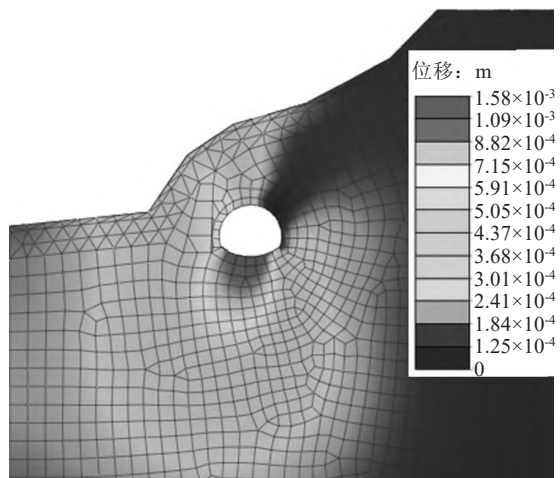
(b)Z方向

图10 联合支护时第1开挖步后隧道周边位移计算结果

Fig. 10 Calculation results of displacement after the first excavation step with combined support



(a)X方向



(b)Z方向

图11 联合支护时第5开挖步后隧道周边位移计算结果

Fig. 11 Calculation results of displacement after the fifth excavation step with combined support

从图10中可以看出, 相比没有支护条件的情况, 使用超前管棚支护和偏压挡墙措施后, 隧道周边位移得到了很好控制。第1步开挖后, 隧道周边在 X 方向最大位移值仅为 0.28 mm, 在 Z 方向最大位移量是 0.98 mm。从图11中可以看出, 第5步开挖结束后, X 方向隧道周边最大偏移量达 0.35 mm, Z 方向隧道周边最大偏移量 1.58 mm。位移值均符合实际工程标准。因此, 使用超前管棚支护和偏压挡墙技术进行施工, 可有效保证掘进施工和初期支护的安全。

从无支护条件下的隧道施工模拟结果可知, 无论是隧道的拱顶下沉、周边收敛, 还是隧道上方的地表沉降, 均远远超过设计要求, 隧道拱顶的下沉, 腰部的挤压扭曲, 甚至达到了米级, 在实际工程背景下, 这意味着隧道已经处于垮塌状态。因此, 超前管棚支护、偏压挡墙联合支护技术应用于浅埋偏压隧道洞口段的施工中, 可发挥良好的支护效果。

4 结论

有限单元法是研究浅埋偏压隧道洞口段施工中超前管棚、偏压挡墙联合支护技术的有效方法。利用有限元法, 可以定量地分析隧道开挖过程中围岩的应力及变位情况。本研究对比在有和无联合支护2种工况下隧道开挖稳定性的差异。通过 MIDAS GTX NX 计算模拟, 研究了2种工况下围岩的应力和变形的分布规律, 以及在不同开挖阶段过程中位移和应力的变化情况。由此判断出隧道在开挖后的稳定性, 这对类似工程背景下的隧道工程管棚支护的施工和设计, 具有一定参考意义。

在浅埋偏压隧道洞口段的施工中, 未采用超前管棚、偏压挡墙联合支护技术方案时, 隧道开挖后隧道边墙、拱顶和地表覆土均出现了米级大幅度位移。实际施工中, 这种量级形变, 意味着隧道已经发生垮塌, 完全不具备安全施工条件。而采用超前管棚、偏压挡墙联合支护技术方案后, 管棚注浆改善了软弱破碎围岩的物理力学性质, 在隧道开挖轮廓周围形成刚度较大、完整性好的混凝土注浆加固带, 隧道围岩位移、地表下沉得

到了很好地控制。偏压挡墙则很好地抵消了管棚结构在高海拔方向一侧受到的挤压应力,阻止了管棚结构在水平方向上发生明显偏移。

可见超前管棚、偏压挡墙联合支护技术是确保浅埋偏压隧道洞口段顺利完成施工及地面建筑物安全稳固的有效方法。

参考文献(References):

- [1] 刘小军, 张永兴. 浅埋偏压隧道洞口段合理开挖工序及受力特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3066-3073. (LIU Xiao-jun, ZHANG Yong-xing. Analysis of reasonable excavation sequence and stress characteristics of portal section of shallow tunnel with unsymmetrical loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 3066-3073.(in Chinese))
- [2] 周玉宏, 赵燕明, 程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679-683. (ZHOU Yu-hong, ZHAO Yan-ming, CHENG Chong-guo. Optimum analysis on the construction process for joint arch tunnels in partial pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 679-683.(in Chinese))
- [3] 刘元雪, 蒋树屏, 赵尚毅. 浅埋黄土连拱隧道施工方案优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 944-947. (LIU Yuan-xue, JIANG Shu-ping, ZHAO Shang-yi. Optimizing analysis for construction schemes of shallow multi-arch loess tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 944-947.(in Chinese))
- [4] 张志强, 何川. 偏压连拱隧道优化施工的研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 723-727, 732. (ZHANG Zhi-qiang, HE Chuan. Research on optimized construction procedure for double-arched tunnel in unsymmetrical pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 723-727, 732. (in Chinese))
- [5] 何川, 李永林, 林刚. 连拱隧道施工全过程三维有限元分析[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(2): 34-38 (HE Chuan, LI Yong-lin, LIN Gang. 3D FEM numerical analysis for the whole construction process of twin-bore tunnel[J]. China Railway Science, 2005, 26(2): 34-38(in Chinese))
- [6] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 浅埋偏压隧道衬砌受力特征及破坏机制试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3316-3325. (LEI Ming-feng, PENG Li-min, SHI Cheng-hua, et al. Model research on failure mechanism and lining stress characteristics of shallow buried tunnel under unsymmetrical pressure[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(8): 3316-3325.(in Chinese))
- [7] 来弘鹏, 杨万精, 谢永利. 软岩大变形偏压公路隧道变形与荷载作用特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 1924-1931. (LAI Hong-peng, YANG Wan-jing, XIE Yong-li. Analysis on deformation and load action features of large-deformation bias highway tunnel in soft rock[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(6): 1924-1931. (in Chinese))
- [8] 靳晓光, 刘伟, 郑学贵, 等. 小净距偏压公路隧道开挖顺序优化[J]. 公路交通科技, 2005, 22(8): 61-64. (JIN Xiao-guang, LIU Wei, ZHENG Xue-gui, et al. Optimization of excavating sequence for closely spaced bias doubletube tunnels[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(8): 61-64.(in Chinese))
- [9] 王祥秋, 杨林德, 高文华. 高速公路偏压隧道施工动态监测与有限元仿真模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 284-289. (WANG Xiang-qiu, YANG Lin-de, GAO Wen-hua. Dynamic monitoring and fem simulation analysis of an expressway tunnel with unsymmetrical loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 284-289.(in Chinese))
- [10] 王明年, 李志业, 关宝树. 3孔小间距浅埋暗挖隧道地表沉降控制技术研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 821-824. (WANG Ming-nian, LI Zhi-ye, GUAN Bao-shu. Research on controlling measures for ground surface settlement of three little distance parallel shallow embedded tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 821-824.(in Chinese))
- [11] 王明年, 李志业, 刘智成, 等. 软弱围岩3孔小间距平行浅埋隧道施工力学研究[J]. 铁道建筑技术, 2002(4): 11-14. (WANG Ming-nian, LI Zhi-ye, LIU Zhi-cheng, et al. Study on construction mechanics of 3-hole parallel shallow buried tunnel in weak surrounding rock [J]. Railway Construction Technology, 2002(4): 11-14. (in Chinese))
- [12] 林希鹤, 卢清国, 马艳春. 超前管棚支护在隧道工程中的应用[J]. 铁道建筑, 2006, 46(8): 58-60. (LIN Xi-he, LU Qing-guo, MA Yan-chun. Application of advanced

(下转第 107 页)

- cable-stayed bridge with single inclined pylon[J]. Fujian Architecture & Construction, 2017(10): 81-85. (in Chinese))
- [10] 宗周红, 黄学漾, 黎雅乐, 等. 强震作用下大跨度斜拉桥倒塌破坏及其控制研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 24-29. (ZONG Zhou-hong, HUANG Xue-yang, LI Ya-le, et al. Study of collapse failure and failure control of long span cable-stayed bridges under strong earthquake excitation[J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 24-29.(in Chinese))
- [11] 禹建兵. 斜拉桥地震响应特点及抗震设防标准的探讨[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(4): 51-54. (YU Jian-bing. Discussion on seismic response and seismic fortification criterion of cable-stayed bridge[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 26(4): 51-54. (in Chinese))
- [12] Li J Z, Yan J K, Peng T B, et al. Shake table studies of seismic structural systems of a Taizhou Changjiang highway bridge model[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(3): 04014065.
- [13] Zhou R, Zong Z H, Huang X Y, et al. Seismic response study on a multi-span cable-stayed bridge scale model under multi-support excitations. Part II: Numerical analysis[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2014, 15(6): 405-418.

(上接第84页)

- pipe roof support in tunnel engineering [J]. Railway Engineering, 2006, 46(8): 58-60.(in Chinese))
- [13] 贾宏宇. 超前管棚支护在隧道工程中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2010(3): 96-98, 122. (JIA Hong-yu. Application of advance forepoling in tunnel engineering[J]. Railway Construction Technology, 2010(3): 96-98, 122. (in Chinese))
- [14] 张长亮, 石平, 金美海. 公路隧道大管棚超前支护技术与工程实践[J]. 交通标准化, 2007, 35(8): 164-168. (ZHANG Chang-liang, SHI Ping, JIN Mei-hai. Exceeding support technology and project practice of highway tunnel large pipe-shelf[J]. Communications Standardization, 2007, 35(8): 164-168.(in Chinese))
- [15] 张红卫, 任建喜, 李振龙. 隧管棚注浆超前支护在特殊条件下的应用[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(2): 165-169. (ZHANG Hong-wei, REN Jian-xi, LI Zhen-long. Shed-pipe grouting technique application in shallow-buried and lateral pressure tunneling[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(2): 165-169.(in Chinese))
- [16] 苑俊廷, 林丽芳, 席继红, 等. 超前管棚支护在浅埋偏压黄土隧道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(6): 137-140. (YUAN Jun-ting, LIN Li-fang, XI Ji-hong, et al. Pipe-roof advanced support in shallow and bias loess tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(6): 137-140.(in Chinese))
- [17] 戴俊. 松散破碎地层隧道管棚超前支护技术应用研究[J]. 建井技术, 2010, 31(5): 35-38. (DAI Jun. Study on application of pipe roof advanced support technology for tunnel in loose and broken stratum [J]. Mine Construction Technology, 2010, 31(5): 35-38. (in Chinese))
- [18] 王春国. 新建隧道下穿对既有隧道稳定性影响研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 62-66. (WANG Chun-guo. Influence of underpass of new tunnel on stability of existing tunnel[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 62-66.(in Chinese))