

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.05.002

结构面特性对深埋隧洞稳定性的影响研究

刘 强

(中铁广州工程局集团有限公司, 广东 广州 510660)

摘 要: 结构面特性对深埋隧洞的受力和变形有重要影响。以某水电站引水隧洞为例,采用数值计算方法,对结构面不同倾角以及结构面与隧洞不同距离时深埋隧洞的稳定性进行分析。结果表明:隧洞左侧水平位移与底部突起量显著小于隧洞顶部沉降与右侧水平位移;结构面倾角对隧洞各关键部位位移有较大影响,而结构面至隧洞的距离仅对拱顶及隧洞右侧最大位移有一定影响;结构面与隧洞之间的距离在3 m以内时,塑性区沿结构面方向进行扩展,而距离大于6 m后,塑性区面积和形状趋于稳定,最大塑性应变降到较低水平并保持平稳。

关键词: 深埋隧洞; 结构面; 倾角; 距离; 位移; 塑性区

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)05-0008-06

引文格式: 刘 强. 结构面特性对深埋隧洞稳定性的影响研究[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(5): 8-13.

Study on the Influence of Structural Plane Characteristics on the Stability of Deep Buried Tunnels

LIU Qiang

(China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510660, China)

Abstract: The characteristics of structural plane have an important influence on the stress and deformation of deep buried tunnels. With the diversion tunnel of a hydropower station as our research target, by using the numerical method, a study has thus been carried out on the stability of deep buried tunnels with different dip angles of the structural plane and different distances from the structural plane to the tunnels. The results show that the horizontal displacement on the left side and the protrusion on the bottom of the tunnel are significantly smaller than the settlement on the top and horizontal displacement on the right side of the tunnel. The dip angle of the structural plane has a great influence on the displacement of the key parts of the tunnel, while the distance from the structural plane to the tunnel only has a certain effect on the maximum displacement of the top and the right side of the tunnel. With the distance between the structure plane and the tunnel being less than 3 m, the plastic zone expands along the direction of the structure plane. With the distance being more than 6 m, the area and shape of the plastic zone tends to be stable, and the maximum plastic strain decreases to a lower level and remains stable.

Keywords: deep buried tunnel; structural plane; dip angle; distance; displacement; plastic zone

1 研究背景

隧洞开挖及运营时的稳定性,是地下工程建设中

最为关切工程问题^[1-2]。在长期地质构造作用过程中,工程岩体会被各种裂隙、节理等形成的结构面所

收稿日期: 2018-10-12

作者简介: 刘 强(1971-),男,广东肇庆人,中铁广州工程局集团有限公司高级工程师,主要研究方向为铁路施工,

E-mail: 307287762@qq.com

分割,且隧洞围岩的应力和变形与岩体内部间的结构面有重要关系。结构面直接关系着工程岩体破坏过程^[3-4],因此科学研究其特性对深埋隧洞稳定性的影响具有重要的理论与工程实践意义。

国内外学者们针对结构面对隧道围岩稳定性的影响已作了大量有益的研究:为了探究含软弱结构面隧洞的破坏失稳机理,李文增等^[5]利用 RFPA 2D 软件分析了具有不同倾角层状软弱结构面,对隧洞的变形破坏特征、隧洞周边关键部位的位移、应力变化以及隧洞的安全储备等方面的影响。罗忆等^[6]对大量理论计算结果及实测资料数据进行分析后发现,导致电站地下厂房围岩变形突变的关键因素是动态卸荷过程中围岩结构面的张开和滑移。丁王飞等^[7]认为,结构面倾角与支护应力状态下的破裂角的相对大小关系,对深部岩体的破裂状态有重要影响,且深部岩体可随最小主应力的降低,先发生局部材料破坏,后沿结构面大规模破坏。赵景彭^[8]对不同节理倾角的隧道围岩的稳定性进行了数值分析,结果表明,拱顶在倾角较小时易发生弯折破坏,节理面是隧道失稳破坏的主要原因。段艳燕等^[9]建立了非连续平面应变模型,并采用有限元软件分析了非连续面的摩擦系数、力学性能、倾角以及与隧道间距等因素与隧道稳定性的关系。贾蓬等^[10]研究了层状软弱结构面倾角对岩体隧道自身的变形以及隧道周边关键位置位移的影响,结果表明,随着结构面倾角的增大,隧道周边应力分布的非对称性逐渐增强,并导致隧道破坏模式呈现非对称性。

上述研究虽取得了较为丰硕的成果,促进了隧洞工程相关理论与技术的发展,但其研究对象主要针对浅埋隧洞,而关于深埋隧洞稳定性的研究鲜有所见,且深埋隧洞与浅埋隧洞的应力环境有显著差异,针对浅埋隧洞稳定性分析结果并不一定适用于深埋隧洞。因此,研究深埋隧洞在不同特性的结构面影响下的稳定性十分必要。

本文在他人研究的基础上,应用有限元计算软件进行深埋隧洞的数值建模,研究结构面倾角及结构面至隧洞的距离对深埋隧洞位移的影响,并分析深埋隧洞塑性区的分布规律,以期类似工程的建设提供参考依据。

2 工程概况

2.1 工程资料

本工程为中国西南某水电站,共有6条引水隧洞,洞线平均长度为16.67 km。隧洞横断面采用圆形设

计,隧洞开挖洞径为13 m,且支护后洞径为11.8 m;隧洞处于地下1 500~2 000 m处,其最大埋深(约为2 525 m)下的最大地应力为69.94 MPa。其均属于深埋高地应力硬岩引水隧洞,具有埋深大、洞径宽、洞线长等特点。

2.2 材料参数

本文以中国西南某水电站引水隧洞中部区域的平均埋深最大段为研究对象,此区域主要分布白山组大理岩,岩体的具体力学参数采用摩尔-库伦准则输入,如表1所示。围岩中存在随机分布的硬性结构面,表2为岩体结构面具体参数。

表1 岩土力学参数

Table 1 Geotechnical mechanical parameters			
容重/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)
25	20	0.25	35
黏聚力/MPa	岩体抗拉强度/MPa	侧压系数	膨胀角/(°)
10	5	1.0	10

表2 基准结构面参数

Table 2 Datum structural plane parameters				
法向刚度模量/ GPa	剪切刚度模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	膨胀角/ (°)
2	200	100	25	5

2.3 研究方案

结构面不同倾角以及结构面与隧洞不同距离,对深埋硬岩隧洞稳定性的影响也不相同^[11-12],因此有必要对其进行研究。

计算中,隧洞直径取12 m,围岩截面取正方形,边长为55 m,隧洞埋深取1 600 m。分析不同倾角的结构面对深埋隧洞稳定性的影响时,倾角控制在0°~90°范围内变动,并以15°为单位变化量;结构面与隧洞之间的距离始终保持为0.25D(D为隧洞直径)不变,即3 m。具体的稳定性影响研究方案如表3所示。

表3 不同倾角结构面对隧洞的稳定性影响研究方案

Table 3 Research schemes on the stability of tunnels affected by structural planes with different inclination angles					
方案序号	距离/m	倾角/(°)	方案序号	距离/m	倾角/(°)
T1	3	0	T5	3	60
T2	3	15	T6	3	75
T3	3	30	T7	3	90
T4	3	45			

分析与隧洞不同距离的结构面对隧洞的稳定性影响时,距离控制在0.25D~1.25D范围内变动,并以0.25D为单位变化量,此外额外设置结构面距隧洞1 m和2 m两种情况;结构面倾角始终保持为45°不变。具体研究方案如表4所示。

表 4 与隧洞不同距离结构面对隧洞稳定性影响研究方案
Table 4 Research schemes on the influence of structural plane faces at different distances from tunnels on tunnel stability

方案序号	距离/m	倾角/(°)	方案序号	距离/m	倾角/(°)
T8	1	45	T12	9	45
T9	2	45	T13	12	45
T10	3	45	T14	15	45
T11	6	45			

3 计算模型

研究深埋隧洞稳定性与结构面特性的关系时,以结构面距隧洞 $0.5D$ (6 m)、倾角 45° 为例,计算模型见图 1。硬性结构面处于图中粉色斜直线位置,中间蓝色部位为隧洞模型,其余黄色部位为白山组 T_{2b} 大理岩岩体。模型顶部施加 50 MPa 均布荷载模拟埋深 $2\ 000\text{ m}$ 处围岩竖向地应力;取侧压力系数为 1.0 施加水平应力,以模拟水平地应力。考虑隧洞实际运行条件,围岩各面均进行法向约束。

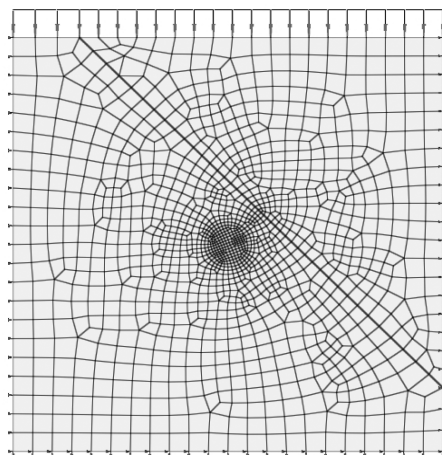


图 1 隧洞开挖模型

Fig. 1 Tunnel excavation model

4 计算结果与分析

结构面的角度或距离不同时,隧洞围岩由于承受的荷载方式、大小不同,其变形也不相同,为排除其他因素引起的围岩变形,定量分析结构面对隧洞稳定性的影响。

4.1 不同倾角结构面对隧洞稳定性的影响

4.1.1 不同倾角结构面下隧洞的变形

表 5 为不同倾角结构面下隧洞拱顶、底部、右侧及左侧最大位移的计算结果。由表 5 可以得知,结构面倾角引起的隧洞左侧水平位移与底部位移,显著小于隧洞顶部沉降与右侧水平位移。拱顶最大沉降为 17.0 mm ,方向沿竖直向下;隧洞右侧围岩的最大水平位移为 13.7 mm ,方向水平向右;隧洞左侧的最大水平位移为 3.7 mm ,方向水平向左;隧洞底部最大

位移为 1.8 mm ,方向竖直向下。

表 5 不同倾角结构面下隧洞主要部位位移

Table 5 Displacement of main parts of tunnel under different dip angles of structural planes

方案序号	倾角/(°)	位移/mm			
		拱顶	底部	右侧	左侧
T1	0	17.0	-1.1	2.5	2.6
T2	15	16.3	-1.0	3.6	-0.2
T3	30	14.1	-0.4	4.6	-2.5
T4	45	10.8	-0.1	5.8	-3.7
T5	60	7.4	0.2	9.1	-3.7
T6	75	5.0	0.9	12.9	-2.9
T7	90	3.5	1.8	13.7	-2.5

注:竖直方向以向下为正,水平方向以向右为正。

根据表 5 中数据可得到隧洞各关键位置位移随结构面倾角的变化曲线,如图 2 所示。

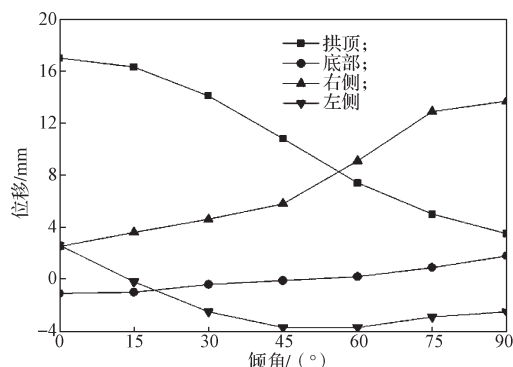


图 2 隧洞各处位移随结构面倾角的变化曲线

Fig. 2 Curves of displacement of tunnels with inclination of structural planes

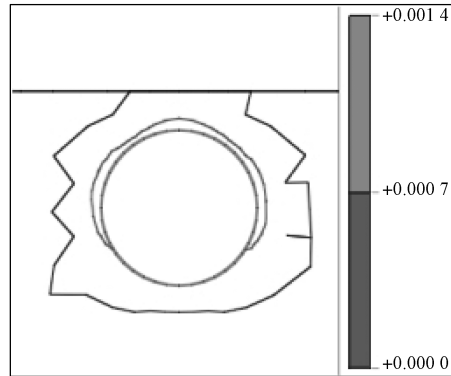
由图 2 可知,结构面倾角对隧洞各关键位置位移有较大影响,且不同位置的影响规律不同。拱顶最大位移随倾角的增大而减小;隧洞底部最大位移随倾角的增大先缓慢减小后缓慢增大;隧洞右侧最大位移随倾角的增大而增大;隧洞左侧的最大位移随倾角的增大整体是先增大后减小,并在 45° 至 60° 之间存在最大位移。

4.1.2 不同倾角结构面下隧洞围岩塑性区的变化规律

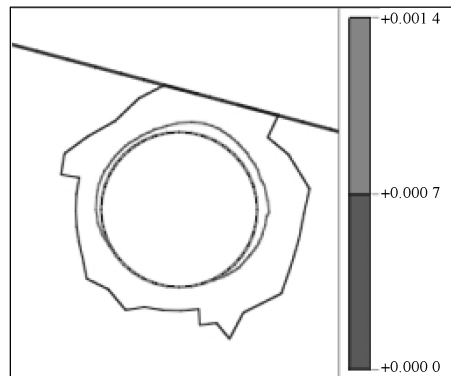
结构面至隧洞距离为 3 m 时,不同倾角结构面下隧洞围岩塑性区变化规律如图 3 所示。图中右侧数据为不同区域的塑性变形值;图中外围蓝色折线范围内即围岩的塑性区,其中中间红色折线范围内为塑性区内塑性应变大于 0.7% 的区域;粗黑直线为结构面。

由图 3 可知,当存在结构面时,深埋高地应力硬岩隧洞开挖后的塑性区面积较无结构面时增加,但由于围岩在高地应力作用下塑性变形已经很大,故增加的幅度较小。不论结构面倾角为何值,塑性区面积的增加与塑性变形较大值都主要出现在隧洞近结构面方向。但当结构面倾角为 0° 和 90° 时,塑性区的增

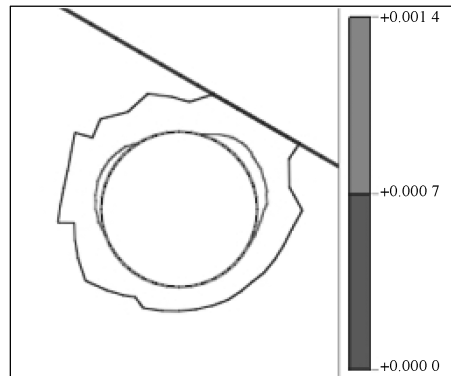
加规律有所不同: 0° 倾角时, 塑性区面积增大不仅发生在隧洞近结构面方向, 而且在隧洞左右两侧也有显著增大; 90° 倾角时, 塑性区面积在隧洞顶部和底部显著增大。



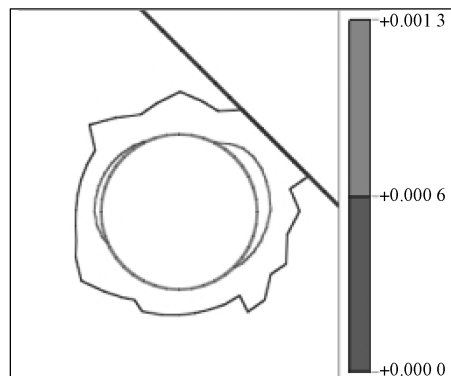
a) 结构面倾角为 0°



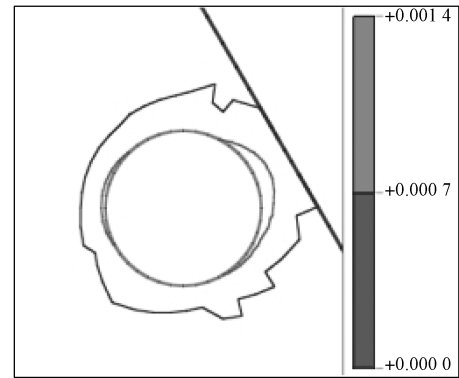
b) 结构面倾角为 15°



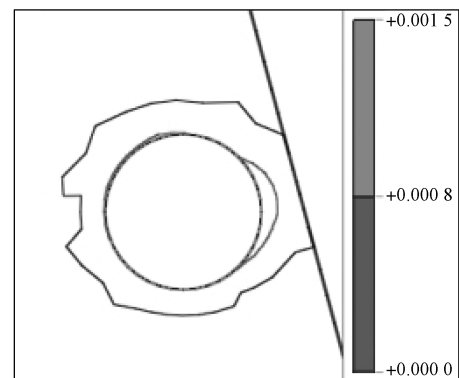
c) 结构面倾角为 30°



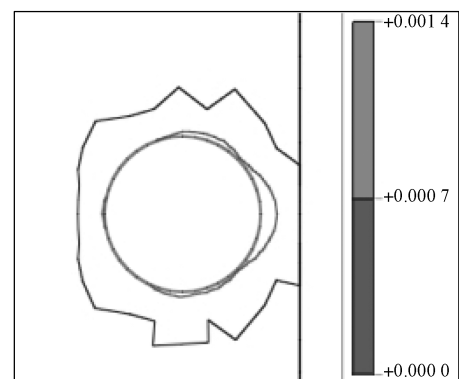
d) 结构面倾角为 45°



e) 结构面倾角为 60°



f) 结构面倾角为 75°



g) 结构面倾角为 90°

图3 不同倾角结构面下围岩塑性区的变化规律图

Fig. 3 Variation diagram of plastic zone of surrounding rock under different dip angle of structural planes

4.2 不同距离结构面对隧洞稳定性的影响

4.2.1 不同距离的结构面下隧洞的变形

表6为结构面至隧洞的距离不同时, 隧洞拱顶、底部、右侧及左侧最大位移的计算结果。由表可知, 至隧洞不同距离的结构面引起的隧洞左壁中点的水平位移与底部位移, 显著小于隧洞顶部沉降与右壁中点位移。拱顶最大沉降为 40.9 mm, 方向竖直向下; 右壁中点最大水平位移的 34.8 mm, 方向水平向右; 左壁中点最大水平位移为 3.8 mm, 方向水平向左; 洞底部最大位移为 0.7 mm, 方向竖直向下。

表 6 与隧洞不同距离的结构面下隧洞主要部位位移
Table 6 Displacement of the main parts of the tunnel under the structural planes at different distances from the tunnel

方案序号	距离 /m	位移 /mm			
		拱顶	底部	右侧	左侧
T8	1	40.9	0.7	34.8	-2.5
T9	2	24.5	0.1	18.9	-3.5
T10	3	10.8	-0.1	5.8	-3.7
T11	6	4.9	-0.1	1.6	-3.8
T12	9	2.9	-0.2	0.1	-3.6
T13	12	2.0	-0.1	-0.4	-3.2
T14	15	1.2	-0.1	-1.1	-3.2

注：竖直方向以向下为正，水平方向以向右为正。

根据表 6 中数据可得到隧洞各关键位置位移随结构面至隧洞距离的变化曲线，如图 4 所示。由图可知，结构面至隧洞的距离对隧洞各关键位置位移有一定影响。拱顶及隧洞右侧最大位移随结构面至隧洞的距离的变化规律一致，即随距离的增大位移先急剧减小，后趋于平稳；洞底部及左侧最大位移随结构面至隧洞的距离影响规律一致，即距离的变化对位移的影响不大。

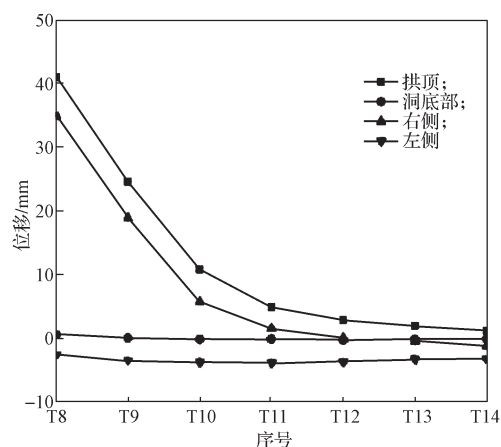
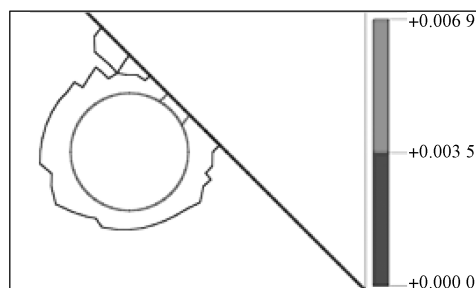


图 4 隧洞各处位移随结构面至隧洞距离的变化曲线

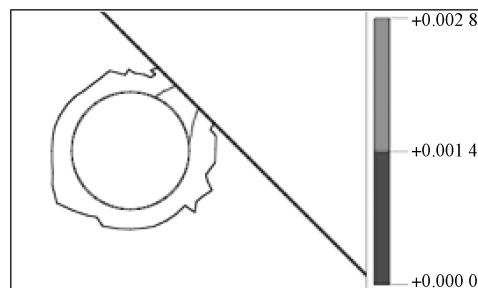
Fig. 4 Variation curves of displacement of the tunnel with the distance from the structural plane to the tunnel

4.2.2 不同距离结构面下隧洞围岩塑性区的变化规律

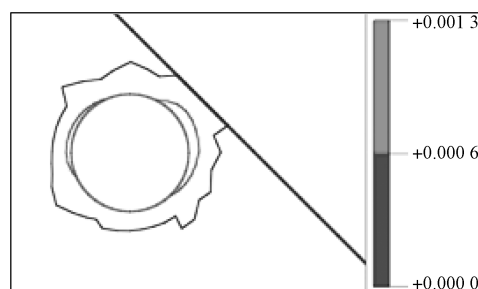
结构面倾角为 45° 时，至隧洞距离不同的结构面下隧洞围岩塑性区变化规律如图 5 所示。由图可知，结构面距隧洞较近时（3 m 以内），塑性区向结构面方向扩展，结构面与隧洞距离增加时，围岩塑性区面积相应减小，最大塑性应变也随之减小，但由于较高的地应力水平，塑性区面积变化幅度较小。当距离超过结构面的有效影响距离（即 6 m）后，塑性区面积和形状趋于稳定，最大塑性应变也减小到较低水平并保持平稳。



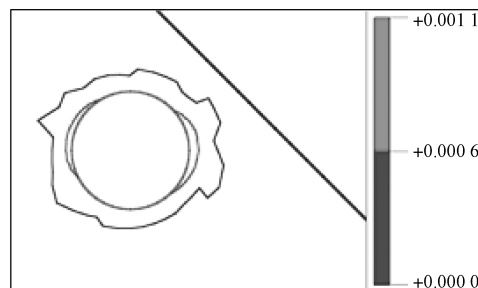
a) 距隧洞 1 m



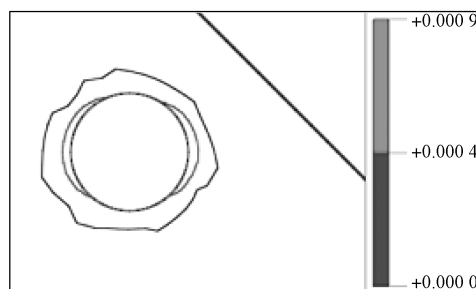
b) 距隧洞 2 m



c) 距隧洞 3 m



d) 距隧洞 6 m



e) 距隧洞 9 m

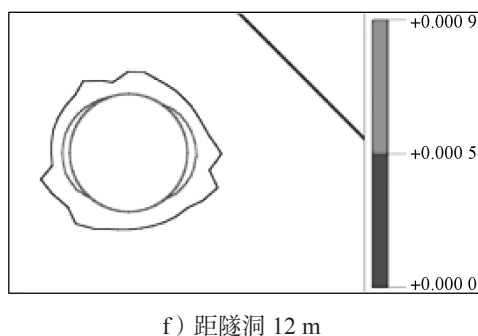


图5 与隧洞不同距离的结构面下围岩塑性区的变化规律图

Fig. 5 Variation diagram of plastic zone of surrounding rock under structural planes at different distances from the tunnel

5 结论

本文利用迈达斯软件建立三维有限元模型,对深埋隧洞稳定性进行数值分析,可得出以下结论。

1) 结构面倾角及结构面至隧洞的距离引起的隧洞左侧水平位移与底部位移的改变均显著小于隧洞顶部沉降与右侧水平位移。

2) 隧洞右侧最大位移随倾角的增大而增大,隧洞左侧的最大位移随倾角的增大整体是先增大然后减小。

3) 拱顶及隧洞右侧最大位移随结构面至隧洞的距离的增大先急剧减小,后趋于平稳;洞底部及左侧最大位移随结构面至隧洞的距离的增大变化不大。

4) 塑性区面积的增加与塑性变形较大值都主要出现在隧洞近结构面方向。 0° 倾角时,塑性区面积增大发生在隧洞近结构面方向,且在隧洞左右两侧也有显著增大; 90° 倾角时,塑性区面积在隧洞顶部和底部显著增大。

5) 结构面距隧洞 3 m 以内,塑性区向结构面方向扩展,结构面与隧洞距离增加时,围岩塑性区面积均相应减小,最大塑性应变也随之减小,但塑性区面积变化幅度较小;当距离超过 6 m 后,塑性区面积和形状趋于稳定,最大塑性应变减小到较低水平并保持平稳。

参考文献:

[1] 宋成科,王成虎,黄禄渊,等. 结构面分布特征对隧道围岩变形影响的数值模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(5): 611-616.
SONG Chengke, WANG Chenghu, HUANG Luyuan, et al. Numerical Simulation of Influence of Structural Plane Distribution Characteristic on Deformation of

Tunnel's Surrounding Rock[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(5): 611-616.

- [2] 张 凯,徐建平. 公路大跨度隧道开挖及初期支护施工技术[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(2): 26-30.
ZHANG Kai, XU Jianping. Large Span Road Tunnel Excavating and Its Initial Supporting Construction[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2007, 21(2): 26-30.
- [3] 郑颖人,王永甫,王 成,等. 节理岩体隧道的稳定性分析与破坏规律探讨: 隧道稳定性分析讲座之一[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 649-656.
ZHENG Yingren, WANG Yongfu, WANG Cheng, et al. Stability Analysis and Exploration of Failure Law of Jointed Rock Tunnel: Seminar on Tunnel Stability Analysis[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 649-656.
- [4] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 153-174.
HE Manchao, JING Haihe, SUN Xiaoming. Mechanics for Soft Rocks[M]. Beijing: Science Press, 2002: 153-174.
- [5] 李文增,马 群,王计宝. 层状结构面对巷道稳定性影响的数值模拟分析[J]. 金属矿山, 2007(11): 22-25.
LI Wenzeng, MA Qun, WANG Jibao. Numerical Simulation Analysis of Bedded Structural Plane on Tunnel Stability[J]. Metal Mine, 2007(11): 22-25.
- [6] 罗 忆,李新平,董 千,等. 动静力组合作用下深埋隧洞开挖卸荷诱发围岩动力损伤诱因研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3365-3371.
LUO Yi, LI Xinping, DONG Qian, et al. Damage Cause Study for Static and Dynamic Combination of Excavation and Unloading in Deep Underground Tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3365-3371.
- [7] 丁王飞,邓鑫洁. 深部隧道单节理岩体开挖卸荷破裂及锚杆加固研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(1): 168-175.
DING Wangfei, DENG Xinjie. Rupture of Single-Jointed Rock Mass Caused by Unloading Excavation and Reinforcement of Anchor Bolt in Deep Tunnels[J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(1): 168-175.
- [8] 赵景彭. 节理倾角对层状岩体大断面隧道稳定性研究[J]. 铁道建筑, 2011(9): 58-61.
ZHAO Jingpeng. Study of Tunnel Stability with Respect to Inclination Angle of Joints in Layer Rock[J]. Railway Engineering, 2011(9): 58-61.
- [9] 段艳燕,宋宏伟,赵 坚,等. 岩体非连续结构面对隧道稳定性影响的数值模拟[J]. 岩土工程界, 2004, 7(9): 34-35.

(下转第 91 页)

$$\begin{aligned} & \frac{4\,521\,984b^6e^8\ln 2}{(3b+2e)^{11}} - \frac{131\,072b^5e^9\ln 2}{(3b+2e)^{11}} + \frac{1\,048\,576b^4e^{10}\ln 2}{3(3b+2e)^{11}} - \frac{884\,736b^8e^5\ln 2}{(3b+2e)^{10}} + \frac{737\,280b^7e^6\ln 2}{(3b+2e)^{10}} + \\ & \frac{1\,769\,472b^6e^7\ln 2}{(3b+2e)^{10}} + \frac{327\,680b^5e^8\ln 2}{(3b+2e)^{10}} - \frac{524\,288b^4e^9\ln 2}{3(3b+2e)^{10}} - \frac{119\,439\,360c^9e^5\ln 2}{7(3c+2e)^{11}} - \frac{3\,981\,312c^8e^6\ln 2}{7(3c+2e)^{11}} + \\ & \frac{238\,878\,720c^7e^7\ln 2}{7(3c+2e)^{11}} + \frac{230\,031\,360c^6e^8\ln 2}{7(3c+2e)^{11}} + \frac{58\,982\,400c^5e^9\ln 2}{7(3c+2e)^{11}} + \frac{4\,775\,744c^8e^5\ln 2}{7(3c+2e)^{10}} - \\ & \frac{71\,663\,616c^7e^6\ln 2}{7(3c+2e)^{10}} - \frac{60\,662\,048c^6e^7\ln 2}{7(3c+2e)^{10}} + \frac{5\,898\,240c^5e^8\ln 2}{7(3c+2e)^{10}} - \frac{21\,233\,664c^6e^6\ln 2}{7(3c+2e)^9} - \\ & \left. \frac{17\,694\,720c^5e^7\ln 2}{7(3c+2e)^9} + \frac{2\,211\,840c^6e^5\ln 2}{7(3c+2e)^8} - \frac{3\,686\,400c^5e^6\ln 2}{7(3c+2e)^8} - \frac{2\,048a^4e^6\ln 4}{3(3a+e)^7} + \frac{2\,048a^5e^5\ln 8}{3(3a+e)^7} \right\}, \end{aligned}$$

式中 $\operatorname{arccoth}[\cdot]$ 表示复数的反双曲余切。

.....

(上接第13页)

DUAN Yanyan, SONG Hongwei, ZHAO Jian, et al. Numerical Simulation of the Influence of Discontinuous Rock Mass Structure on Tunnel Stability[J]. Geotechnical Engineering World, 2004, 7(9): 34-35.

[10] 贾蓬, 唐春安, 杨天鸿, 等. 具有不同倾角层状结构面岩体中隧道稳定性数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(11): 1275-1278.

JIA Peng, TANG Chun'an, YANG Tianhong, et al. Numerical Stability Analysis of Surrounding Rock Mass Layered by Structural Planes with Different Obliquities[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(11): 1275-1278.

[11] 刘耀儒, 武哲书, 何柱, 等. 基于非线性动力分析的隧洞稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,

36(增刊1): 3156-3163.

LIU Yaoru, WU Zheshu, HE Zhu, et al. Stability Evaluation of the Tunnels Based on Nonlinear Dynamic Analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3156-3163.

[12] 李宁, 刘乃飞, 李国峰. 软岩及土质隧洞围岩稳定性评价新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1812-1821.

LI Ning, LIU Naifei, LI Guofeng. New Method for Stability Evaluation of Soil and Soft Rock Tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1812-1821.

(责任编辑: 邓光辉)