

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 4 - 385 - 06

# 山地陡倾小交角层状岩体隧道围岩变形模拟

曹兴松<sup>1</sup> 吴梦军<sup>2</sup> 刘世雄<sup>1</sup> 方林<sup>2</sup> 王波<sup>1</sup>

(1. 重庆建工集团股份有限公司, 重庆 401122; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

**摘 要:** 陡倾小交角层状岩体隧道围岩变形特征和一般的均质岩体隧道是不一样的。通过有限元计算和模型试验研究手段,以重庆涪南高速公路鸭江隧道工程为例,对陡倾小交角层状岩体隧道开挖过程中围岩的变形特征和机理进行了深入分析。研究表明:对于陡倾小交角层状岩体来说,层理面是主要控制结构面,隧道的开挖会导致一定范围内的岩层形成临空面,这部分岩层会向洞室产生滑移,从而引起地表的较大沉降;岩层倾角越大,地表沉降也会随之增大;与一般均质岩体隧道不同,陡倾小交角层状岩体隧道围岩变形具有非对称性,最大变形一般发生在顺层向。研究结论可供今后陡倾层状岩体隧道的施工设计参考。

**关键词:** 陡倾;层状岩体;围岩变形;模拟试验

**中图分类号:** P642, P554

**文献标志码:** A

陡倾岩层目前没有一个统一的概念。一般来说,按照岩层面与水平面的交角可划分为水平岩层、倾斜岩层和直立岩层,有学者将倾斜岩层细分为缓倾岩层、陡倾岩层、陡立岩层,以区别体现各自的不同现状和工程特性。岩层面与水平面的交角小于 $20^\circ \sim 30^\circ$ 时被称为缓倾斜岩层;交角在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 以上时称为陡立岩层;介于缓倾斜岩层和陡立岩层之间的称为陡倾岩层<sup>[1-2]</sup>。陡倾小交角层状岩体隧道在施工期可能发生较大的松动压力,斜倾的破碎岩层很可能向隧道临空面发生滑移破坏。

目前国内外对于陡倾小交角层状岩体隧道研究较少。赵大洲等人通过建立可反映互层岩体中砂岩与板岩组成、岩层倾角、岩层走向等因素变化对岩体变形影响的互层岩体本构模型,研究了砂板互层岩体中隧道围岩的力学特性<sup>[3]</sup>。贾蓬、唐春安等通过引入细观层次的微元体,采用损伤力学和统计理论的单元本构模型,利用岩石破裂过程分析软件对具有不同倾角层状软弱结构面岩体中隧道的变形破坏特征、隧道周边关键部位的位移进行了分析<sup>[4]</sup>。李丹、夏彬伟等以渝湘高速公路共和隧道为工程背景,

采用围岩应变监测、洞室内窥摄影、试件破坏形态的研究与分析,对缓倾角层理岩体中隧道的二次应力分布特征及破坏机制进行了研究<sup>[5]</sup>。可见,大多数研究只针对层状岩体的岩层倾角变化对隧道围岩稳定性的影响,而对隧道与岩层走向呈小角度相交这种不利情况没有加以考虑。

本文针对陡倾小交角层状岩体隧道的两个基本特征,即隧道与岩层走向小交角相交和陡倾岩层,并以实际工程为背景,通过数值计算和模型试验手段对陡倾小交角层状岩体隧道围岩变形机理进行研究。

## 1 工程背景

重庆涪(陵)南(川)高速公路全长 55.848 km,沿线地形起伏大,基岩主要是倾斜层状岩体,岩层倾角较陡。涪南高速全线分布有多处隧道,如分水岭隧道、鸭江隧道(图 1)、岩口隧道、酒店隧道等。隧道围岩软弱、破碎,最大埋置深度近 200 m,岩性以砂岩、页岩、泥岩、粉砂质泥岩等软岩为主。

收稿日期(Received date): 2013 - 05 - 25; 改回日期(Accepted): 2013 - 06 - 21。

基金项目(Foundation item): 重庆市交通委员会科技项目 2010 - 5。[Chongqing Municipal Committee of Science and Technology Project No. 2010 - 5.]

作者简介(Biography): 曹兴松(1972 -),男,天津人,教授级高级工程师,博士后,主要从事道桥及岩土、地下工程的研究。[Cao xing Song (1972 -), male, Tianjin, senior engineer, postdoctoral, mainly engaged in bridge and geotechnical and underground engineering.] E-mail:

songcx@126.com

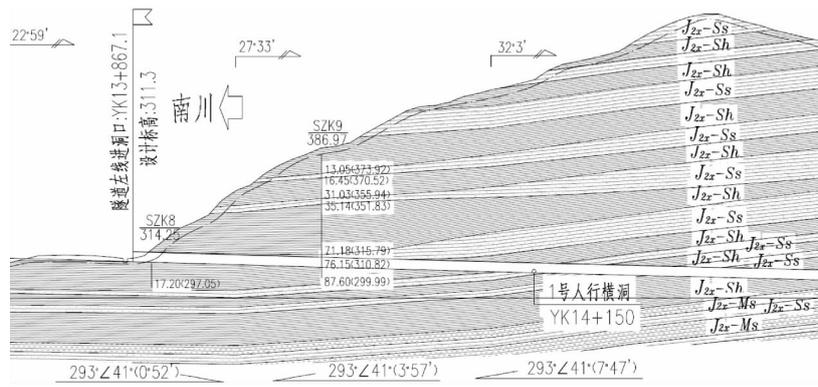


图1 鸭江隧道地质纵断面示意图

Fig. 1 Yajiang river tunnel geological profile

文中的研究工作依托于鸭江隧道工程。鸭江隧道为双向四车道,建筑限界净宽为 10.25 m,净高为 5 m。隧道左线长 1 056.81 m,右线长 1 058.4 m,隧道大体沿构造线方向布设,与岩层走向呈小角度相交。

隧址区处于弹子山背斜北西翼,为单斜构造,岩层倾向 293°~320°,倾角 26°~41°,产状较稳定,未见次级褶曲和断层,构造简单,分布地层主要为第四系残坡积层及侏罗系中统新田沟组。

## 2 数值计算分析

采用有限元方法来模拟不同倾角的层状围岩中开挖隧道后围岩的变形趋势,计算模型中,岩层倾角分别取 30°、40°、50°、60°,隧道轴向和岩层走向交角取 10°,岩层厚度为 2 m。

模型左右边界约束 X 方向上的位移,前后边界约束 Y 方向上的位移,底边界约束 Z 向位移,如图 2、图 3。

隧道施工采用全断面开挖方法,模拟的隧道长

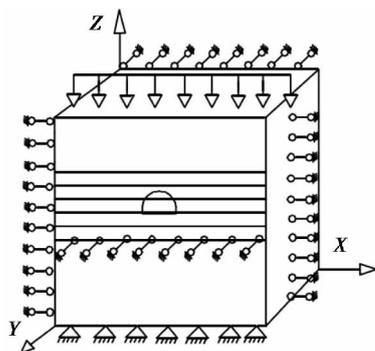


图2 计算模型边界条件

Fig. 2 Model boundary conditions

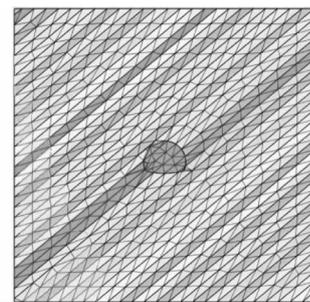


图3 计算模型(岩层倾角为 40°)

Fig. 3 Calculation models (rock angle is 40°)

度为 40 m,开挖进尺为 4 m,共 10 个开挖步。

### 2.1 地表沉降特征

选取隧道轴线对应的地面位置关键点,得到地表沉降趋势,如图 4 所示。

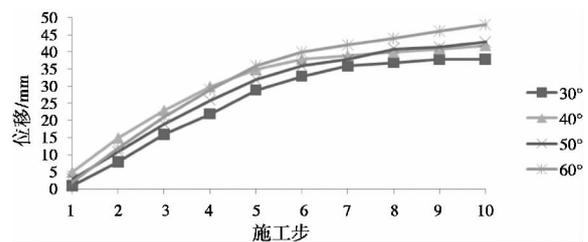


图4 地表沉降随各施工步的变化

Fig. 4 Surface subsidence changes with each construction step

从图 4 可以看出,随着隧道的开挖,地表沉降值在前 6 步变化速率比较大;随着岩层倾角的增加,地表沉降也会增大,倾角为 60°时沉降值达到 48 mm。

### 2.2 围岩变形特征

提取隧道拱顶、拱脚、拱底、左边墙和右边墙处位移,汇总如图 5~10 所示。

由图 5 可知,拱顶位移在开挖面离目标面 1 倍

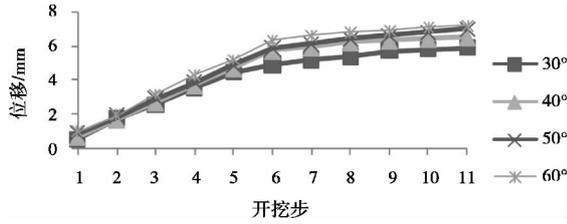


图 5 拱顶位移  
Fig. 5 Vault displacement

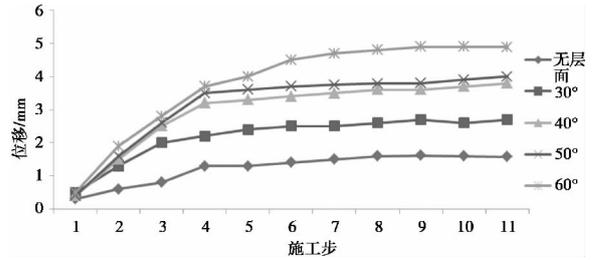


图 10 右边墙位移  
Fig. 10 On the right wall displacement

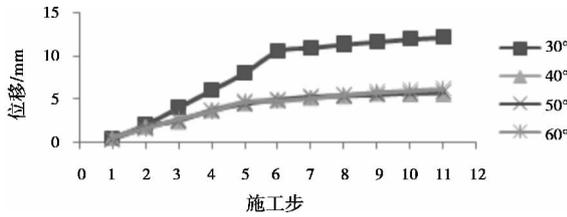


图 6 仰拱位移  
Fig. 6 Invert displacement

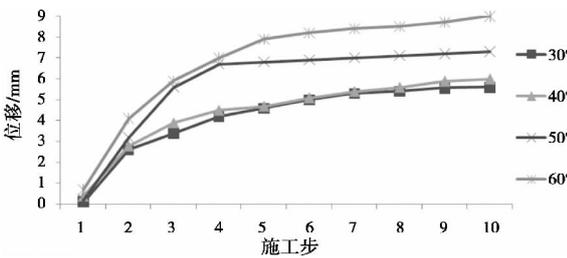


图 7 左拱脚位移  
Fig. 7 Left arch foot displacement

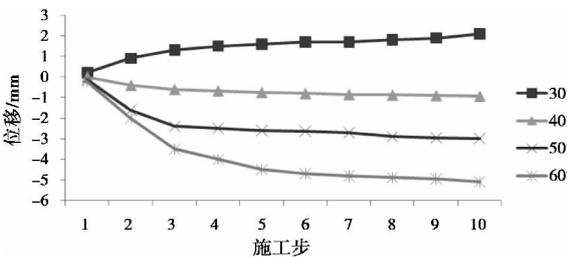


图 8 右拱脚位移  
Fig. 8 Right arch displacement

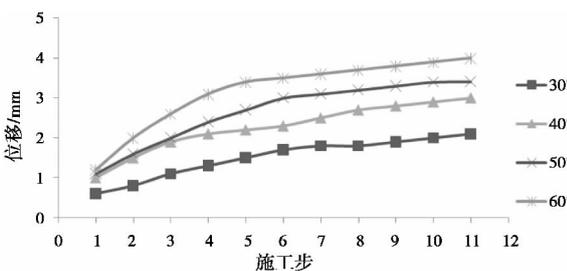


图 9 左边墙位移  
Fig. 9 On the left wall displacement

洞径范围内变化较大,当开挖面通过目标面后,在后续的开挖步骤中,拱顶位移下沉速率相对较小,最终阶段以 60°模型位移量最大,达到了 7.3 mm。随着陡倾角的增大,拱顶下沉量也会增大,但数值相差都不是太大。

由图 6 可知,各工况仰拱隆起量在前 5 步急剧增加,后逐渐趋于稳定,而岩层倾角为 30°时仰拱隆起量最大,约 12 mm。

由图 7、图 8 可以看出,左右拱脚的位移变化趋势差别较大。随着倾角的增大,左拱脚位移增大,其位移值在前 5 步急剧增加,后趋于稳定。右拱脚位移随着岩层倾角的增大,位移方向会由向隧道内侧转为向隧道外侧,当倾角为 30°时,位移值最小。

由图 9、图 10 可以看出,随着岩层倾角的增大,各模型的左右边墙水平位移急剧增大。各工况左右边墙水平位移都在前 5 步急剧增加,然后慢慢趋于稳定。左、右边墙的最终阶段水平位移都是 60°倾角时最大。

以上可见,陡倾岩层倾角的变化对隧道左拱脚位移的影响最为显著,隧道开挖后左拱脚的位移显著增大,且岩层倾角越大,隧道左拱脚处的位移也越大。

### 3 模型试验

针对鸭江隧道的工程特征,确定模型试验模拟对象为隧道洞身段,埋深为 30 m,纵向范围为 40 m,隧道轴向和岩层走向交角取 10°,岩层倾角取 40°,岩层厚度为 10 m。

试验中,围岩准确分层浇筑,并保证岩体倾角、层间厚度的准确性以及岩层面的紧密接触。此外,考虑模型相似材料在干燥过程中,受材料物理性质的影响而产生的伸缩变形,以避免影响模型浇筑质量。

将相似材料往模型箱填筑之前,按照试验拟定的岩层倾角、岩层与隧道的交角及岩层的厚度,在模

型箱内壁用粉笔画出每层填筑界线,计算出每层的填筑量(图 11);标示完成后进行相似材料的人工拌和 秤出填满每层所需的各种相似材料重量(为了保证每层填筑材料的密实性和均匀性,采用先松后紧的方法填筑);填筑过程中将每个测点准确定位,当填料到该位置时,埋入相应的传感器,并检查传感器是否完好。整个模型制作完成后,盖上薄膜,尽量减小空气湿度的变化对相似材料的力学性能的影响。



图 11 围岩的分层浇筑  
Fig. 11 Stratified rock pouring

模型隧道纵向长为 1.0 m,隧道模拟开挖分为 5 个开挖步进行,每次开挖 0.2 m,模拟的施工方案为全断面开挖,当每步开挖完后稳定 1 h(表 1)。

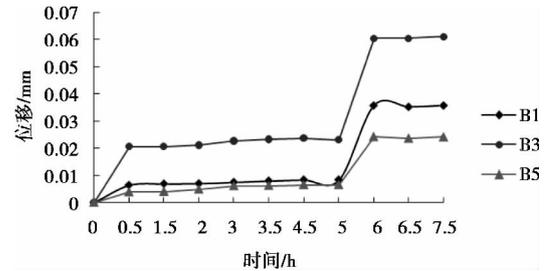
表 1 隧道开挖过程

时间/h	开挖过程
0	初始状态
0.5	第一步开挖
1.5	第一步开挖稳定 1 h 后
2.0	第二步开挖
3.0	第二步开挖稳定 1 h 后
3.5	第三步开挖
4.5	第三步开挖稳定 1 h 后
5.0	第四步开挖
6.0	第四步开挖稳定 1 h 后
6.5	第五步开挖
7.5	第五步开挖稳定 1 h 后

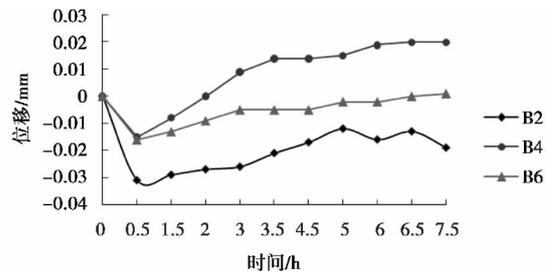
3.1 模型地表沉降特征

用百分表在开挖前先记下初值,然后开挖第一步后记一次数据,稳定 1 h 后再记一次数据,以此类推。

图 12 为百分表记录的地表沉降时间曲线,其中, B1、B3、B5 为隧道轴线左侧地表测点, B2、B4、B6



a) 隧道轴线左侧地表测点记录 (left side of the tunnel axis surface measuring points record)



b) 隧道轴线右侧地表测点记录 (the right of the tunnel axis surface measuring points record)

图 12 地表沉降

Fig. 12 Surface subsidence

为隧道轴线右侧地表测点。B2、B4、B6 测点所在位置的岩层相对于测点 B1、B3、B5 来说为下伏岩层,反之称之为上覆岩层(图 13)。

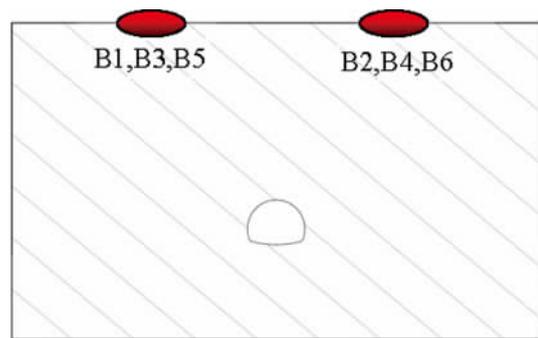


图 13 百分表布置示意图

Fig. 13 Schematic layout of the dial indicator

从图 13 可以看出,因为隧道的开挖,洞室左侧地表沉降要远大于右侧,其中, B3 测点记录的最大位移达到 0.612 mm,而右侧 B4 测点最大位移仅 0.02 mm。对于陡倾层状岩体来说,层理面是主要控制结构面,因为隧道的开挖,一定范围内的岩层形成临空面,这部分岩层会向洞室产生滑移,从而引起地表的较大沉降。

从隧道开挖过程来看,当隧道开挖时,洞室上方左侧地表沉降值缓慢增大,当沿纵向开挖 0.2 m 后,

地表沉降处于稳定状态,而当开挖至 0.8 m(5 h)后,地表沉降值突增,后又趋于稳定。而右侧地表沉降在开挖之初,有一个微微隆起的过程,后又随着开挖的继续,其沉降值逐渐增大,整个变化过程较为缓慢。

### 3.2 模型围岩变形特征

试验共布置了三个隧道洞周围岩变形监测断面,分别为监测断面 1 至监测断面 3,考虑到边界效应等影响因素,选取监测断面 2 作重点分析。图 14 为该断面位移计测点布置图。

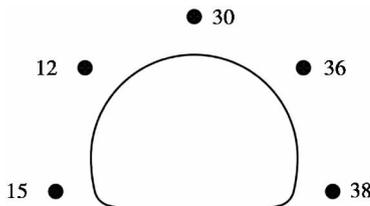


图 14 洞周测点布置

Fig. 14 Holes weeks measuring points

试验共记录了 5 组围岩变形数据,分别对应监测断面拱顶、左右拱脚及左右墙角位置。记录的数据经过快速傅里叶变化平滑处理如图 15 所示。

由图 15 可知,随着隧道的开挖,拱顶沉降值逐渐增大,后趋于稳定,沉降值最大为 0.23 mm,左拱脚围岩变形值最大为 0.21 mm,右拱脚最大变形值为 0.14 mm,左墙角围岩变形最大为 0.16 mm,右墙角变形最大值为 -0.04 mm。

绘制隧道开挖断面最终状态变形图,如图 16 所示。显然,与一般均质岩体隧道不同,陡倾小交角层状岩体隧道围岩变形具有非对称性(图示岩层倾角见图 13),拱顶、左右拱脚及左墙角围岩均向内变形,右墙角则向外侧变形。

总体来看,洞周围岩变形以拱顶最大,左拱脚次之,而右墙角最小,这主要是因为陡倾层状岩体各向异性的力学性质,层状岩体节理面的存在导致隧道开挖引起相邻岩层相对滑移。可见,对于陡倾层状岩体隧道,岩层层面的抗剪能力是影响其开挖稳定性的主要因素之一。

## 4 结论

通过数值计算和模型试验手段,分析了陡倾小交角层状岩体隧道围岩变形特征,得到如下结论:

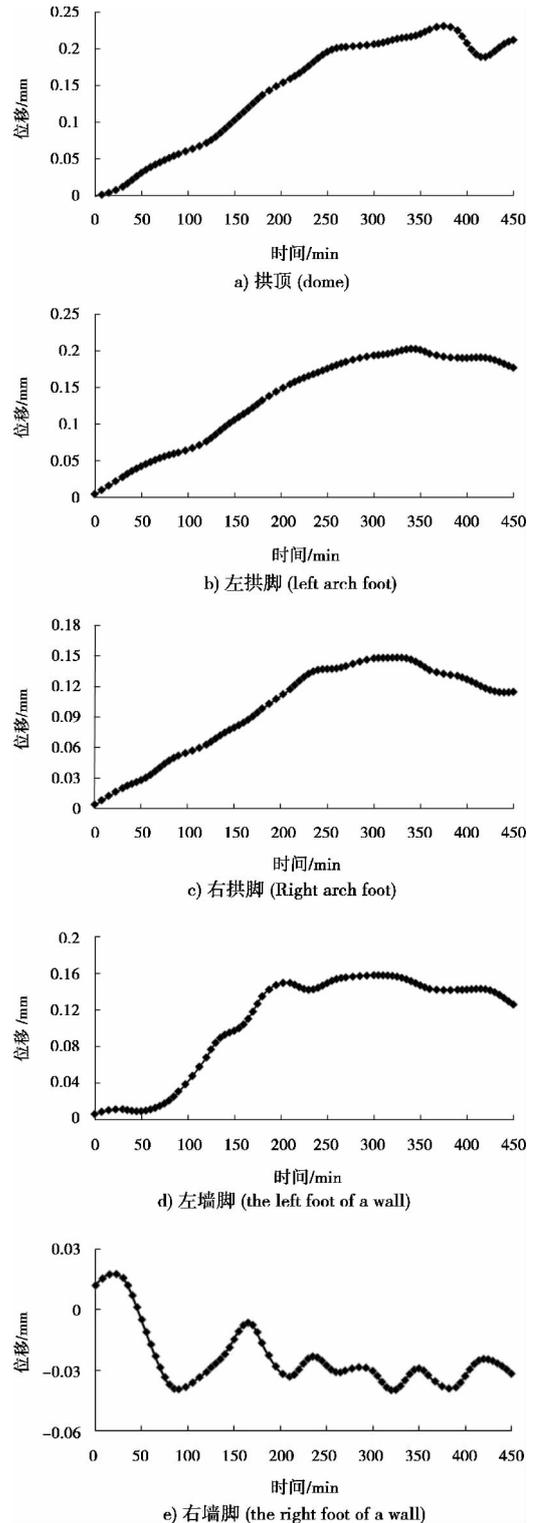


图 15 围岩变形曲线

Fig. 15 Rock deformation curve

1. 对于陡倾小交角层状岩体来说,层理面是主要控制结构面,隧道的开挖会导致一定范围内的岩层形成临空面,这部分岩层会向洞室产生滑移,从而引起地表的较大沉降。因此,地表沉降最大值出现的

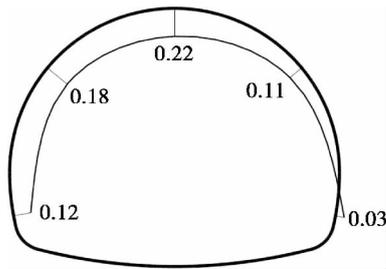


图 16 围岩变形(单位:mm)

Fig. 16 Rock deformation (unit: mm)

位置可能在滑移岩层顶部,这和一般均质岩体隧道最大地表沉降出现在拱顶正上方是有区别的。

2. 陡倾层状面的存在对地表沉降产生了明显的影响,随着倾角的增大,地面沉降也会随着增大。

3. 与一般均质岩体隧道不同,陡倾小交角层状岩体隧道围岩变形具有非对称性,最大变形一般发生在顺层向。这同样是因为陡倾层状岩体各向异性的力学性质,层状岩体节理面的存在导致隧道开挖引起相邻岩层相对滑移。因此,对于陡倾层状岩体隧道,岩层层面的抗剪能力是影响其开挖稳定性的主要因素之一。

## 参考文献(References)

- [1] Hu Houtian, Bai Zhiyong. Civil engineering geology (Second Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. [胡厚田,白志勇. 土木工程地质(第2版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.]
- [2] Zhao Shude, Liao Hongjian, Xu Linrong, et al. Advanced engineering geology [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. [赵树德, 廖红建, 徐林荣, 等. 高等工程地质学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.]
- [3] Zhao Dazhou. Study on Mechanical Properties of Surrounding Rock for Tunnels in Rock Mass of Inter bedded Sandstone and Slate [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 12(12): 105-111 [赵大洲. 砂板互层岩体中隧道围岩力学特性研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 12(12): 105-111]
- [4] Jia Peng, Tang Chunan, 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 [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]
- [5] Li Dan, Xia Binwei, Chen Jie, et al. Research on stability of tunnel in anisotropic layered rock mass with low inclination angle bedding by model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1933-1938 [李丹, 夏彬伟, 陈浩, 等. 缓倾角层理各向异性岩体隧道稳定性的物理模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1933-1938]

## Deformation Simulation of Steep over-dip Stratified Surrounding Rock for Small Angle between Tunnel and Rock Strike

CAO Xingsong<sup>1</sup>, WU Mengjun<sup>2</sup>, LIU Shixiong<sup>1</sup>, FANG Lin<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>

(1. Chongqing Construction Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 401122, China;

2. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd. Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Deformation characteristics of surrounding rock of tunnel in layered rock mass with steep dip angle and tunnel in homogenous rock mass is different. Based on Yajiang tunnel in funan highway in Chongqing, this paper makes a thorough analysis on deformation characteristics and mechanism of surrounding rock during excavation of tunnel in layered rock mass with steep dip angle by finite element calculation and model test. Research results show that: For layered rock mass with steep dip angle, bedding plane is the main structural plane, the tunnel excavation will cause the rock stratum in a certain range to become a free face, which will slip to the cavern to cause larger ground surface settlement. As the dip angle of rock stratum increases, the ground surface settlement will also increase. Deformation of surrounding rock of tunnel in layered rock mass with steep dip angle is asymmetric, and the Maximum deformation generally occurs in the bedding position, which is different from tunnel in homogenous rock mass. The conclusions can provide reference for future construction design of tunnel in layered rock mass with steep dip angle.

**Key words:** steep over-dip, stratified rock mass; surrounding rock deformation; model test