

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.198



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 不同大变形等级下层理角度对层状软岩隧道的影 响

潘文韬<sup>1</sup>, 何川<sup>1</sup>, 吴枋胤<sup>1</sup>, 徐迪<sup>2</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 杨文波<sup>1</sup>, 寇昊<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;

2. 四川绵九高速公路有限责任公司, 四川 江油 621700)

**摘 要:**为探究不同大变形等级下层理角度对层状软岩隧道的影 响, 依托九绵高速全线软岩大变形隧道, 通过岩石力学试验确定遍布节理模型参数, 基于数值模拟, 探究不同软岩大变形等级(轻微、中等、强烈)下层理角度对层状软岩大变形隧道围岩及支护体系受力变形的影响, 并通过现场统计的层理角度与大变形情况对数值模拟结果进行验证。结果表明: 1) 层理小角度(0°、15°)与大角度(90°)围岩变形、支护结构受力变形较大, 随着大变形等级的增大, 层理角度引起的围岩支护变化效果越明显。2) 随着层理角度的增大, 围岩变形从拱底逐渐转移到右拱腰。围岩变形主要发生在隧道轮廓与层理面相切位置, 其中拱底及左拱脚对层理角度变化较敏感。3) 初支应力偏向及节理塑性区大致与层理弱面法向一致, 随着层理角度的增大, 节理的剪切塑性区由拱顶、拱底转移到左拱脚、右拱肩, 最终偏移到左右拱腰上下位置; 相比初支压力, 初支拉应力对层理角度更敏感, 垂直节理增大了张拉剪切破坏塑性区贯通的风险, 但剪切破坏塑性区半径反而有可能减小。4) 现场的统计规律表现为小角度与大角度大变形等级较高, 层理角度为60°以下时, 岩层破坏发生在拱腰及拱肩处, 随着层理角度的增大, 有向拱肩发展的趋势, 大角度层理时岩层破坏主要发生在拱腰处。

**关键词:**层状软岩隧道; 大变形等级; 层理角度; 遍布节理模型; 数值分析; 现场实测

中图分类号: TU457 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)05-0094-12

## Effect of bedding angle of layered soft rock tunnels with different large deformation grades

PAN Wentao<sup>1</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, WU Fangyin<sup>1</sup>, XU Di<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, YANG Wenbo<sup>1</sup>,  
KOU Hao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Sichuan Mianjiu Expressway Co., Ltd, Jiangyou 621700, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** This paper aims to explore the influence of bedding angle on layered soft rock tunnel under different deformation grades. Based on the large deformation soft rock tunnels along the Jiumian Expressway, the parameters of ubiquitous joint model were determined through rock mechanical test. Based on the numerical simulation, the influence of bedding angle on the stress and deformation of surrounding rock and supporting

收稿日期: 2021-06-18

基金项目: 四川省科技计划(2019YFG0001)

作者简介: 潘文韬(1998-), 男, 主要从事隧道与地下工程研究, E-mail: 1403334583@qq.com。

杨文波(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yangwenbo1179@hotmail.com。

Received: 2021-06-18

Foundation items: Science and Technology Program Support of Sichuan Province(2019YFG0001)

Author brief: PAN Wentao(1998-), main research interests: tunnel and underground engineering, E-mail: 1403334583@qq.com.

YANG Wenbo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yangwenbo1179@hotmail.com.

system of large deformation tunnel in layered soft rock was studied under different soft rock large deformation levels (slight, medium and strong). The results of numerical simulation were verified by field statistical law of bedding angle and large deformation. The results show that: 1) The deformation and stress of surrounding rock and the supporting structure with small angle ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ) and large angle ( $90^\circ$ ) of bedding are large, with the increase of large deformation grade, the effect of surrounding rock and support changes caused by bedding angle is more obvious. 2) The deformation of surrounding rock gradually shifts from the arch bottom to the right arch waist with the increase of bedding angle. The surrounding rock deformation mainly occurs at the position where the tunnel contour is tangent to the bedding plane, and the arch bottom and left arch foot are sensitive to bedding angle. 3) The deflection of the initial support stress and the plastic zone of the joint are roughly consistent with the normal direction of the weak plane of bedding. With the increase of bedding angle, the shear plastic zone of joints shifts from vault and arch bottom to left arch foot and right arch shoulder, and finally shifts to the upper and lower position of left and right arch waist. The initial support tension stress is more sensitive to the bedding angle than the compressive stress, vertical joints increase the risk of tensile and shear failure plastic zone transfixion, but the radius of plastic zone in shear failure may decrease. 4) The statistical law of the site is that the large deformation grade of small angle and large angle is higher, strata failure occurred in the waist and shoulder of the arch when the bedding angle is below  $60^\circ$ , the failure of rock strata tends to develop to the spandrel with the increase of bedding angle. Rock failure mainly occurs in the arch waist at large bedding angles.

**Keywords:** layered soft rock tunnel; large deformation grade; bedding angle; ubiquitous-joint model; numerical analysis; field monitoring

随着中国交通隧道网逐渐向西部山区布置,遇到的地质条件越来越复杂多样<sup>[1]</sup>。隧址区的软弱围岩具有分布广、互层现象严重、变形大、持续时间长等特点,在高地应力及不良地质条件下受到挤压产生软岩大变形,造成初支剥落开裂、钢拱架扭曲变形、边墙鼓包等现象,给隧道运营及安全保证带来极大挑战。与此同时,软岩大变形隧道往往还存在层理、节理等软弱面,修建过程中呈现各向异性的特点。因此,有必要针对不同大变形等级的层状软岩隧道进行研究,探究不同层理角度对其安全稳定性的影响。

在软岩大变形隧道变形破坏机理及分级研究方面,徐国文等<sup>[2]</sup>通过对鹧鸪山软岩大变形隧道的大变形特征进行分析,将大变形隧道围岩破坏分成3种情况。陈子全等<sup>[3]</sup>对高地应力情况下层状软岩隧道的非对称围岩与支护结构变形破坏特征展开研究,提出了基于最大变形及强度应力比的幂指数变化规律的大变形预测分级指标。李国良等<sup>[4]</sup>提出以强度应力比、地应力量值作为高地应力划分标准,并将大变形等级划分为4级。张广泽等<sup>[5]</sup>发现,应力场、地质构造及岩性等是造成隧道发生大变形的主要原因,综合考虑多个因素后,提出了构造软岩大变形的分级方法。在层理角度影响研究方面,徐国文等<sup>[6]</sup>基于离散元建立了新的层状软岩隧道数值模拟方法,研究了不同层理角度及层理间距对软岩隧道的影响。吴迪等<sup>[7]</sup>通过数值模拟与现场监测,对不同地应力及层理角度下隧道变形及初支、二衬受力规律展开了研

究。李江腾等<sup>[8]</sup>利用模型试验分析了不同板岩试件层理角度与其抗压韧性之间的关系。

目前,针对软岩大变形破坏机理及层理角度影响均有一定研究,但没有针对不同大变形等级分析不同层理角度对层状软岩隧道影响的系统研究。笔者依托九绵高速全线软岩大变形隧道,通过岩石力学试验确定遍布节理模型参数,基于数值模拟,探究不同软岩大变形等级(轻微、中等、强烈)下层理角度对层状软岩大变形隧道围岩及支护体系受力变形的影响,并通过现场统计的层理角度与大变形情况统计规律对数值模拟结果进行验证。

## 1 工程概况

九绵高速起于四川省和甘肃省交界处的青龙桥附近,止于绵阳市游仙区张家坪附近,跨越九寨沟县、平武县、北川县、江油市、绵阳市游仙区。线路全长244.026 km,共有隧道42座,总长度120.960 km,占线路全长的49.6%。其中22座隧道的IV、V级围岩占比超过70%,大量分布以千枚岩、板岩等为代表的层状变质软岩,隧道层间连接较差,具有明显的各向异性及流变特征,在不良地质及高地应力等因素共同作用下,自开工以来,九绵高速全线软岩隧道均出现了不同程度的大变形灾害。

九绵高速中的大变形隧道主要有水牛家隧道、白马隧道及五里坡隧道,根据大变形分级的相关研究<sup>[2-5]</sup>并结合全线大变形隧道情况,根据《公路隧道

设计规范第一册:土建工程》(JTG 3370.1—2018)<sup>[9]</sup>中大变形分级方案(表1),对全线软岩大变形等级进行判定,水牛家、白马、五里坡隧道中均有大变形等级为轻微、中等、强烈的监测断面,其中,水牛家隧道以轻微为主,白马隧道以中等为主,五里坡隧道以强烈为主。现场大变形情况如图1所示。



图1 九绵高速现场大变形情况

Fig. 1 Large deformation of Jiumian Expressway

表1 规范中大变形分级方案

Table 1 Large deformation classification scheme in the code

| 大变形分级 | 名称    | 相对变形量判据            |
|-------|-------|--------------------|
| I     | 轻微大变形 | $2 \leq U_a/a < 3$ |
| II    | 中等大变形 | $3 \leq U_a/a < 5$ |
| III   | 强烈大变形 | $5 \leq U_a/a$     |

注:  $U_a$ 为量测的围岩绝对变形量;  $a$ 为隧道当量半径。

## 2 岩石力学试验确定大变形参数

### 2.1 遍布节理模型

在层状软岩隧道中存在层理及节理等软弱面,相比普通围岩,软弱面更容易产生滑移及张拉破坏,因此,除了考虑普通围岩外,还需对层理、节理等软弱面进行考虑分析。

遍布节理模型是摩尔库伦模型的扩展<sup>[10]</sup>,即在摩尔库伦模型上增加节理面,节理面同样服从摩尔库伦屈服破坏准则,遍布节理模型同时考虑了围岩本体与节理面,岩体可以同时两者中产生破坏,节理面的倾向与倾角由笛卡儿坐标系确定,节理面的参数主要考虑内聚力、剪胀角、摩擦角、抗拉强度、倾向与倾角等<sup>[11-12]</sup>。

节理方位由笛卡儿坐标系在弱面法线向量以全局坐标表示,遍布节理模型下屈服准则如图2所示,剪切破坏包络线AB及拉伸破坏包络线BC满足  $f_j^s = 0$ 、 $f_j^l = 0$ ,且二者分别满足式(1)、式(2)所示关系式。

$$f_j^s = \tau + \sigma_{33'} \tan \varphi_j - c_j \quad (1)$$

$$f_j^l = \sigma_{33'} - \sigma_j^l \quad (2)$$

式中:  $\varphi_j$ 、 $c_j$ 、 $\sigma_j^l$ 分别为节理摩擦角、黏聚力及抗拉强度;  $\sigma_{33'}$ 为广义应力张量;  $\tau$ 为剪切应力;  $f_j^s = 0$ 为坐标转换后剪切包络线AB;  $f_j^l = 0$ 为坐标转换后拉伸包络线BC。

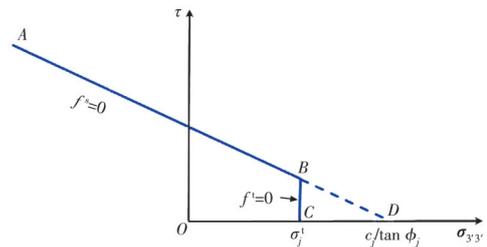


图2 遍布节理屈服示意图

Fig. 2 Yield diagram of ubiquitous joint model

### 2.2 确定遍布节理模型参数

从白马隧道和五里坡隧道现场选取采集多个断面位置岩体相对较完整、层理明显的变质板岩和变质千枚岩试块,通过后续试验确定围岩力学参数,而不同大变形等级主要通过调整地应力数值落入规范中的不同大变形等级强度应力比来实现。具体采样过程:在九绵高速层状变质软岩典型隧道施工现场采集原始尺寸大于  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的完好岩块,从而保证试样加工的完整性。岩样采取过程如图3所示。

将岩体取芯制样,加工好的圆柱体试样直径约为  $50 \text{ mm}$ ,长度约为  $100 \text{ mm}$ ,误差  $\pm 0.5 \text{ mm}$ ,端面平行度  $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。

采用 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统与程控三轴流变仪对大变形下围岩的弹性模量、泊松比、黏聚力、摩擦角参数进行确定。试验装置如图4所示。

节理面的参数较难通过试验确定,在试验确定大变形下围岩力学参数的基础上,考虑节理面对围岩力学参数的折减及弱化,主要借鉴文献[13]的方法进行折减,节理摩擦角略低于完整岩体,模型中节理抗拉强度取完整岩体的10%,节理黏聚力取完整岩体的30%,得到最终的围岩节理面物理力学参



(a) 板岩现场取样(白马隧道)



(b) 千枚岩现场取样(五里坡隧道)

图 3 九绵高速现场岩样采取

Fig. 3 Rock sampling of Jiujian Expressway



图 4 岩石力学试验系统与程控三轴流变仪

Fig. 4 Rock mechanics test system and program controlled triaxial rheometer

数,见表 2,相关节理参数通过现场监测信息反算得到验证。岩石试验表明,页岩及板岩的单轴抗压强度会随层理角度出现 U 型变化<sup>[14]</sup>,但在实际工程中,不同层理角度下抗压强度的变化对隧道及支护结构受力变化影响较小,且本文主要研究围岩支护结构受力及塑性区分布随层理角度的变化特征,因此,不考虑层理角度变化引起的岩体抗压强度变化,将不同层理角度围岩参数取为相同值。

表 2 围岩和节理参数

Table 2 Parameters of surrounding rock and joint

| 弱面倾向/(°) | 节理参数        |             |             |              | 围岩参数         |             |             |      |              |                             |
|----------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|------|--------------|-----------------------------|
|          | 黏聚力/<br>kPa | 剪胀角/<br>(°) | 摩擦角/<br>(°) | 抗拉强度/<br>MPa | 弹性模量/<br>GPa | 黏聚力/<br>kPa | 摩擦角/<br>(°) | 泊松比  | 抗拉强度/<br>MPa | 密度/<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| 90       | 60          | 0           | 22          | 0.03         | 1.5          | 200         | 25          | 0.35 | 0.29         | 2 100                       |

### 3 数值模拟

#### 3.1 模型情况

根据隧道相关尺寸及埋深,在 CAD 中绘制隧道横断面线框图,在 ANSYS 中完成网格的精细划分,通过拉伸生成实体模型,最后导入 FLAC 中进行后续数值模拟。

计算模型采用遍布节理模型,初支、二衬采用摩尔库伦本构。模型纵向为 50 m、长为 84 m、高为 75 m,四周及底部设置法向约束。初支为锚喷联合支护,二衬厚度为 0.6 m,强度为 C30。超前加固方

式为注浆小导管,拱顶范围注浆加固,锚杆采用梅花形布置。围岩、第 2 层初支(大变形等级为强烈时采用双层初支)、二次衬砌采用实体单元,锚杆、小导管采用 cable 单元,第 1 层初支采用 shell 单元。第 1 层初支在开挖面后 2 m 施作,第 2 层初支在第 1 层初支施作后 2 m 施作,二衬在初支施作后 10 m 施作。计算模型如图 5 所示,不同大变形等级下采用的工法及超前支护体系如表 3 所示。

针对不同大变形等级设置不同的层理倾角,探究层理角度对不同大变形等级软岩大变形隧道的

表 3 不同大变形等级下工法及超前支护体系

Table 3 Construction method and advance and support system under different large deformation levels

| 大变形等级 | 工法                       | 超前加固方式   | 锚杆   | 锁脚锚杆  | 初支                        |
|-------|--------------------------|--|--|---|---------------------------|
| 轻微    | 二台阶(上下台阶步距 5 m)          | 单层小导管( $\phi 42, 4.5$ m), 搭接长度 1.5 m, 环向间距 40 cm       | 短锚杆( $\phi 22, 3$ m)                             | $\phi 42 \times 4$ mm 注浆小导管(6 m)                    | 单层初支(C25, 24 cm)          |
| 中等    | 三台阶(台阶步距均为 5 m)          | 单层小导管( $\phi 51, 6$ m), 搭接长度 3 m, 环向间距 40 cm           | 长短锚杆(自进式 $\phi 32, 8$ m 和注浆小导管( $\phi 42, 4$ m)) | $\phi 42 \times 4$ mm 注浆小导管(6 m, 上下台阶分别为每处 4 根、2 根) | 单层初支(C30, 24 cm)          |
| 强烈    | 三台阶留核心土(台阶步距分别为 4、5、5 m) | 双层小导管( $\phi 51, 6$ m), 搭接长度 3 m, 环向间距 30 cm, 拱顶注浆范围增大 | 长短锚杆(自进式 $\phi 32, 8$ m 和注浆小导管( $\phi 42, 4$ m)) | $\phi 108$ 钢管(6 m, 上下台阶分别为每处 4 根、2 根)               | 双层初支(C30, 厚度分别为 30、25 cm) |

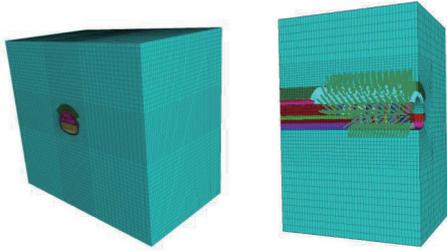


图 5 计算模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of calculation model

受力变形塑性区等的影响,设置 6 组不同的层理倾角(0°、15°、30°、45°、60°、90°),如图 6 所示。

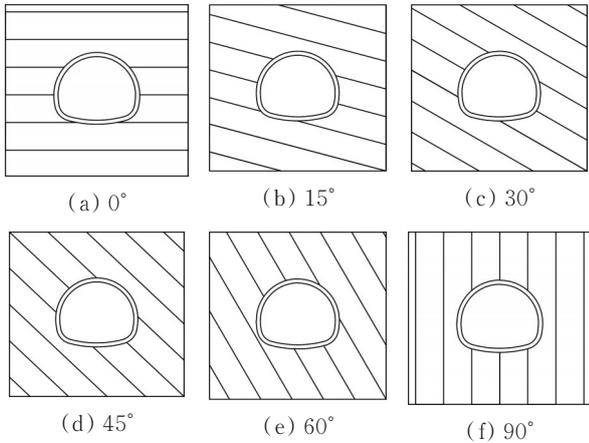


图 6 层理角度设置

Fig. 6 Setting of bedding angle

大变形除了与层理角度有关,还与主应力的方向密切相关,根据白马隧道现场地应力测试及地应力反演结果发现:最大水平主应力方向为水平,垂向主应力方向为竖直,由水平主应力及垂向主应力求得隧道平面应力状态,如图 7 所示,大变形等级为轻微、中等、强烈时的最大主应力大致分别在 10、14、19 MPa 附近,最小主应力数值为最大主应力数值的一半,施加相应地应力后,围岩强度应力比落

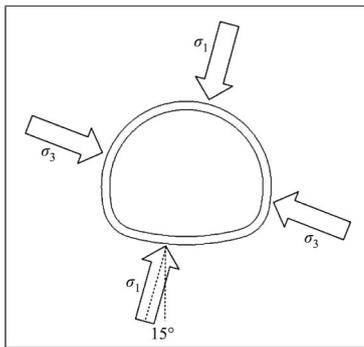


图 7 地应力情况

Fig. 7 Ground stress condition

在不同的大变形等级范围内。

### 3.2 计算结果

#### 3.2.1 围岩隧道变形

不同大变形等级下不同层理角度的围岩最大变形如表 4 所示。从围岩最大变形来看,不同大变形等级下层理角度对最大变形的影响规律基本一致,均为在角度较小(0°、15°)及角度较大(90°)时围岩变形较大,即较小或较大的层理角度将增大围岩位移,使围岩处于危险之中,最危险的层理角度在 15°附近,最安全的层理角度在 45°~60°之间。围岩最大变形大致呈先减小后增大的趋势,大变形等级越高,由层理角度引起的围岩最大变形效果越明显。

表 4 不同大变形等级下层理角度对围岩变形的影响

Table 4 Influence of bedding angle on deformation of surrounding rock under different large deformation levels

| 大变形等级 | 围岩最大变形/cm |        |        |        |        |        |
|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 0°        | 15°    | 30°    | 45°    | 60°    | 90°    |
| 轻微    | 8.623     | 8.632  | 8.293  | 8.276  | 8.423  | 8.578  |
| 中等    | 23.161    | 21.873 | 20.586 | 19.539 | 19.139 | 22.946 |
| 强烈    | 37.512    | 38.985 | 33.267 | 31.753 | 32.275 | 34.294 |

围岩变形主要集中于隧道四周,为了更好地揭示层理角度对围岩变形的影响,将隧道四周放大,并读取变形较大处的数值,得到不同大变形等级、不同层理角度下各位置的最大变形(图 8)。

围岩在隧道的拱顶、拱底及左右拱腰至拱肩之间产生较大变形,不同层理角度下产生较大变形的部位基本一致。围岩变形有向层理角度增大方向倾斜的趋势,这种趋势在隧道拱底变形处最为明显,随着层理角度从 0°增大到 30°,隧道拱底变形顺着层理角度增大方向向左倾斜,30°时倾斜最大,继续增大层理角度,隧道拱底的倾斜又逐渐向中间回靠。

分析围岩产生较大变形时数值的变化规律可得:拱顶变形小于拱底,围岩的最大变形出现在拱底或右拱腰处,从左右拱腰变形差距上来看,0°时左右拱腰变形一致,随着层理角度的增大,拱腰变形顺着层理角度增大方向偏移,右拱腰变形逐渐大于左拱腰,两者之间的差值在 45°时达到最大,继续增大层理角度,两者之间的拱腰变形差异又逐渐减小。拱底变形在 0°、15°时较大,整体上层理角度越大,拱底变形逐渐减小,随着层理角度的增大,围岩变形有从拱底转移到左右拱腰的趋势。不同大变形等级围岩变形随层理角度变化的规律基本一致,大变形等级升高时,相比另外 3 个位置,拱底变形变化更明显。

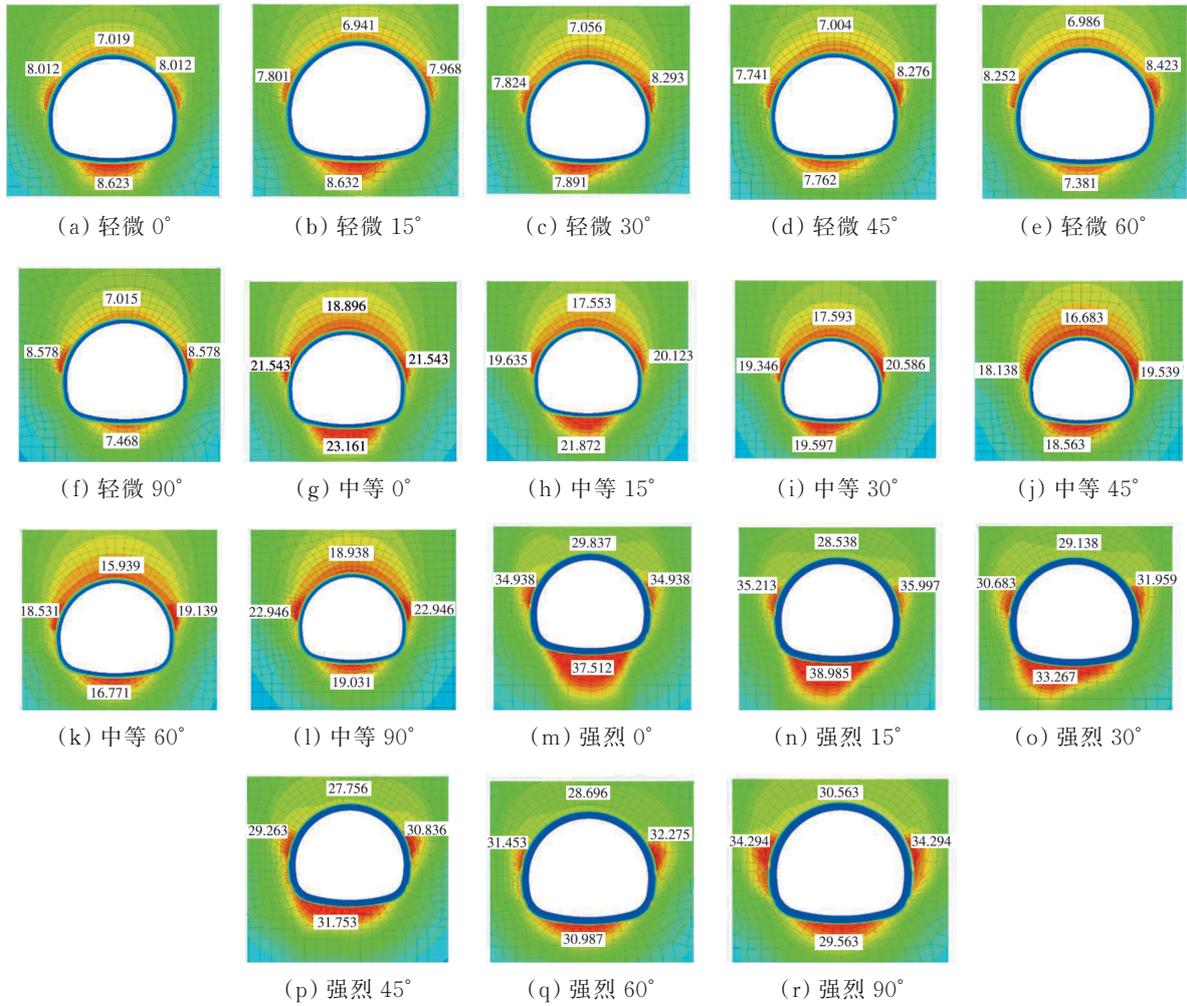


图 8 不同大变形等级、不同层理角度下各位置最大变形

Fig. 8 Maximum deformation at various positions under different large deformation levels and bedding angles

为更直观地表现层理角度对围岩变形的影响,在图 8 中轻微大变形时各位置围岩变形的基础上,提取出不同层理角度的 8 个位置(拱顶、右拱肩、右拱腰、右拱脚、拱底、左拱脚、左拱腰、左拱肩)的水平竖向变形,以层理角度 0° 为基础,绘出不同层理角度下隧道变形轮廓趋势的变化,如图 9 所示。由于不同层理角度之间围岩的变化相比隧道尺寸较小,将不同层理角度之间的差异放大 100 倍,以便研究变化规律。

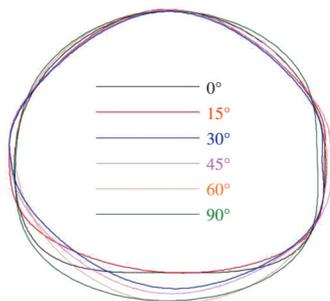


图 9 不同层理角度隧道轮廓变化

Fig. 9 Tunnel contour changes with different bedding angles

图 9 中的变化规律与 4 个方向围岩较大变形规律基本一致。不同层理角度下,隧道拱顶变化较不明显,拱底变化较为明显,左拱脚次之。层理角度较小(0°、15°)时,隧道拱底隆起较为突出,层理角度越大,隧道拱底隆起越小,当层理角度达到 60°~90° 后,隧道拱底隆起不明显。当层理角度较大(如 90°)时,隧道右拱腰收敛极明显;层理角度为 45°、60° 时,右拱腰收敛较小,隧道处于较安全状态。垂直层理下左拱腰收敛也较大,且将导致左右拱肩及左右拱脚向外扩张,较不利。这是由于围岩变形主要发生在隧道轮廓与层理面相切的位置,随着层理角度的变化,隧道在与层理面相切处发生了较大变形。

### 3. 2. 2 初支受力变形

提取不同大变形等级(轻微、中等、强烈)下不同层理角度初支的变形,如图 10 所示。由图 10 可知,不同大变形等级下,层理角度对初支变形的影响规律基本一致,且与围岩变形规律大致吻合,这主要是由于初支与围岩紧密贴合,变形具有一定的协同性。整体上来看,随着层理角度的增大,初支

变形先减小后增大,即在层理小角度(0°、15°)与大角度(90°)时初支变形较大,在30°~60°时初支变形较小,初支变形最危险的层理角度大致在15°左右,最安全的层理角度大致在45°左右。

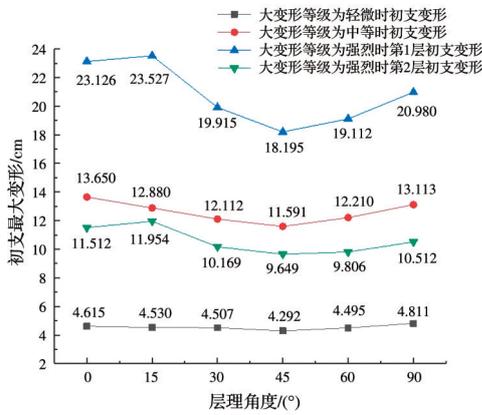


图 10 不同大变形等级下不同层理角度的初支变形

Fig. 10 Primary support deformation at different bedding angles under different large deformation grades

大变形等级越高,层理角度对初支变形的影响越大,因此,在大变形等级较高时,必须考虑层理角度对初支变形的影响。比较初支变形与围岩变形结果可知,第1层初支大约承担了围岩变形的60%。在大变形等级为强烈时,第2层初支的变形量及层理角度对其变形影响的变化量均有较明显的减小,第2层初支的变形约为第1层初支的50%。

提取的不同大变形等级下不同层理角度的初支最大拉、压应力如图11、图12所示。层理角度对初支应力和变形的影响规律基本一致,即在层理小角度(0°、15°)与大角度(90°)时初支应力较大,在45°~60°时初支应力较小,最安全位置大致出现在层理角度45°左右,且随着大变形等级的升高,层理角度

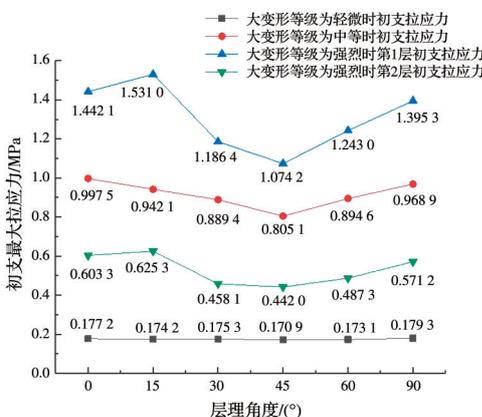


图 11 不同大变形等级下不同层理角度的初支拉应力

Fig. 11 Initial support tensile stress at different bedding angles under different large deformation grades

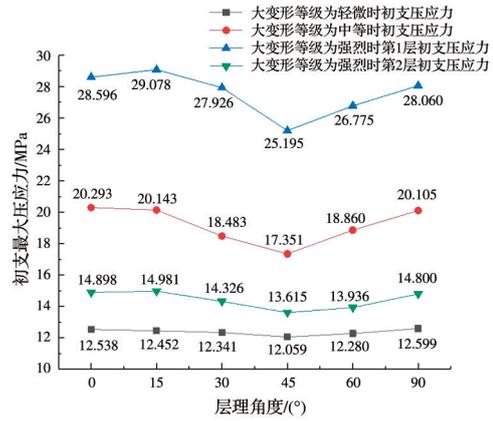


图 12 不同大变形等级下不同层理角度的初支压应力

Fig. 12 Initial support compressive stress at different bedding angles under different large deformation grades

引起的初支应力变化更明显。初支拉应力比压应力对层理角度更加敏感,数值变化更为明显。随着大变形等级的升高,初支的拉、压应力不断增大,当大变形等级为强烈时,第1层初支压应力达到混凝土抗压强度,出现开裂情况,此时需要增设第2层初支,以确保隧道结构安全稳定。

为更好地分析不同大变形等级下层理角度对隧道初支应力分布的影响,以大变形等级为轻微为例,提取不同层理角度下隧道的最大压应力,如图13所示。

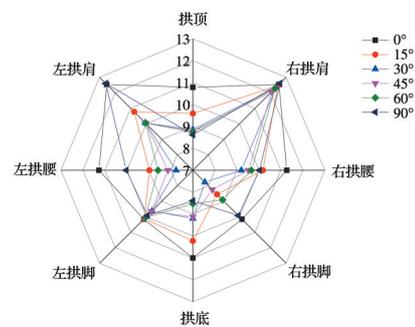


图 13 不同层理角度对初支压应力分布的影响

Fig. 13 Influence of different bedding angles on the distribution of primary support compressive stress

初支压应力主要受地应力及层理角度共同控制,最大主应力方向大致沿右拱肩方位,这也是无论层理角度如何变化,右拱肩均为初支压应力最大位置的原因。当层理角度为0°时,初支压应力主要集中于左右拱肩及拱底,随着层理角度的增大,拱顶及拱底位置初支压应力逐渐减小,左右拱腰附近的初支压应力先减小后增大,最小值大致出现在30°层理附近。初支的压应力较大部位也有随着层理角度增大逐渐偏移的现象,初支应力偏向大致与层

理角度法线方向一致。

### 3.2.3 二衬结构受力

提取不同大变形等级、不同层理角度下二衬的最大拉、压应力,如表 5 所示。不同层理角度下,二衬受力的变化规律与初支基本一致,这主要是因为

初支和二衬紧密贴合,共同承担荷载。大变形等级从轻微到中等,二衬拉应力有着较为明显的增大,而由于大变形等级为强烈时设置了 2 层初支,二衬不再像大变形等级为轻微、中等时一样作为承载的主体,因此其受力明显减小。

表 5 不同大变形等级下层理角度对二衬受力的影响

Table 5 The influence of bedding angle on the stress of secondary lining under different deformation grades

| 大变形等级 | 二衬最大拉应力/MPa |       |       |       |       |       | 二衬最大压应力/MPa |       |       |       |       |       |
|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 0°          | 15°   | 30°   | 45°   | 60°   | 90°   | 0°          | 15°   | 30°   | 45°   | 60°   | 90°   |
| 轻微    | 0.071       | 0.069 | 0.067 | 0.065 | 0.067 | 0.070 | 7.757       | 7.705 | 7.609 | 7.299 | 7.376 | 7.688 |
| 中等    | 0.627       | 0.592 | 0.520 | 0.526 | 0.536 | 0.569 | 9.602       | 9.471 | 9.022 | 8.985 | 9.059 | 9.513 |
| 强烈    | 0.069       | 0.072 | 0.052 | 0.051 | 0.054 | 0.063 | 1.437       | 1.333 | 1.239 | 1.153 | 1.258 | 1.343 |

### 3.2.4 围岩节理塑性区分布及半径

提取不同大变形等级下不同层理角度的围岩节理塑性区,如图 14 所示。塑性区分为围岩塑性区与节理塑性区,围岩塑性区基本呈对称分布,主要集中于隧道四周,层理角度对其影响较小,而且受拱顶加固区影响,拱顶塑性区明显小于拱底。隧道拱顶到拱腰附近围岩可能会发生张拉、剪切破坏。

节理塑性区伴随层理角度偏转的现象极明显:0°层理时,节理主要在拱顶及拱底发生剪切破坏,受拱顶注浆区的影响,相比拱底,拱顶节理的剪切破

坏并不明显;当层理角度增大时,塑性区逐渐顺着层理角度增大方向倾斜,节理的拱底剪切破坏塑性区逐渐向左偏移至左拱脚,拱顶剪切破坏塑性区逐渐向右偏移至右拱肩;当层理角度增大至 90°时,节理剪切破坏塑性区又重新呈对称状态,并在左右拱腰上下位置产生剪切破坏。在隧道拱肩至拱脚附近,节理可能产生张拉、剪切破坏塑性区,随着层理角度的倾斜,节理的张拉、剪切破坏塑性区也有顺着层理角度增大方向倾斜的趋势,并且在层理角度为 90°时,节理的张拉、剪切破坏塑性区有贯通的风险。

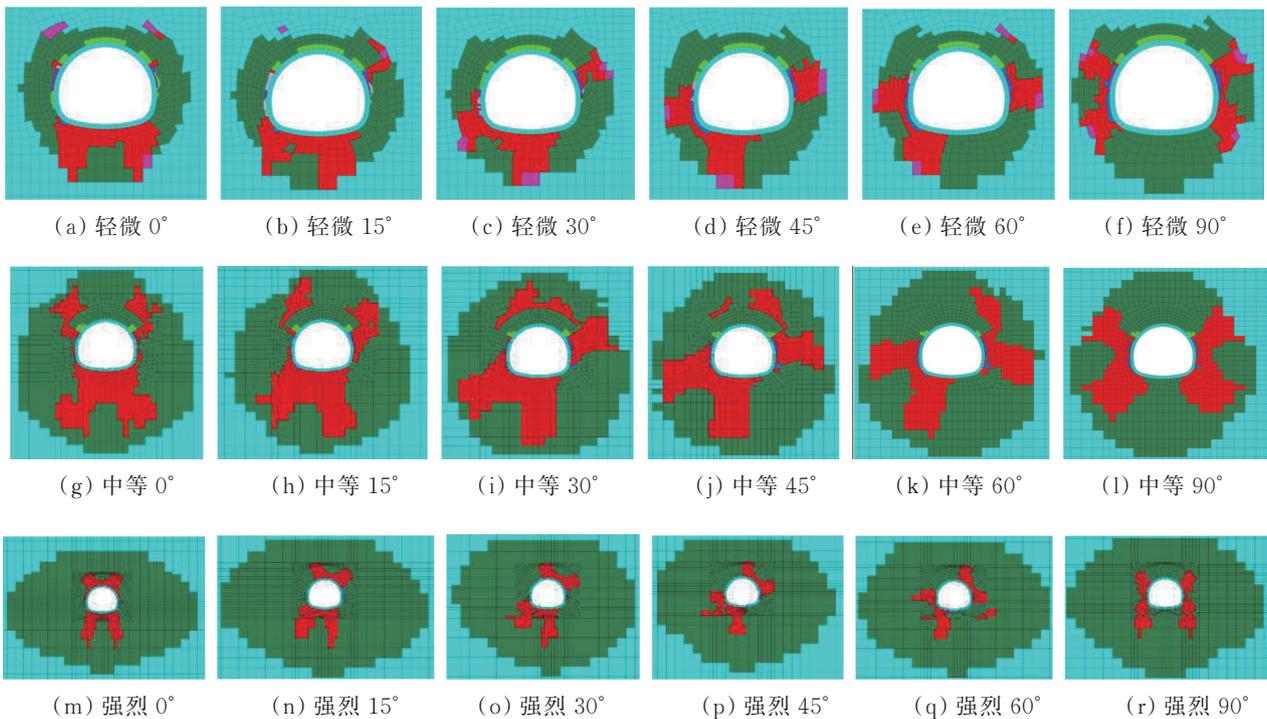


图 14 不同大变形等级下围岩节理塑性区分布

Fig. 14 Distribution of the plastic zone of the joints and surrounding rock under different deformation grades

不同大变形等级下层理角度对围岩节理塑性区的影响规律基本一致,并且随着大变形等级的增大,围岩塑性区及节理塑性区的范围均有较明显的增大,围岩塑性区范围增大更为明显。节理剪切破坏塑性区大致出现在层理弱面的法向方位。

提取不同大变形等级、不同层理角度下节理塑性区的半径,如表6所示。从表6可得,层理角度较小( $0^\circ$ 、 $15^\circ$ )时节理塑性区半径较大,当层理角度达到 $90^\circ$ 时,由于节理剪切破坏塑性区转移至左右拱腰,其半径有可能减小。随着大变形等级升高,节理剪切破坏塑性区半径不断增大,相比大变形等级

表6 不同大变形等级、不同层理角度下节理剪切塑性区半径  
Table 6 Shear plastic zone radius of joints with different large deformation grades and bedding angles

| 大变形等级 | 节理塑性区半径/m |            |            |            |            |            |
|-------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
|       | $0^\circ$ | $15^\circ$ | $30^\circ$ | $45^\circ$ | $60^\circ$ | $90^\circ$ |
| 轻微    | 6.82      | 6.50       | 6.35       | 6.68       | 5.36       | 4.51       |
| 中等    | 13.48     | 13.59      | 12.94      | 12.32      | 11.61      | 10.61      |
| 强烈    | 13.50     | 13.23      | 12.95      | 10.06      | 10.79      | 11.70      |

为中等时,大变形等级为强烈时其半径没有进一步增大,说明大变形等级为强烈下的工法及支护有效抑制了塑性区的进一步扩大,起到了较好的支护效果。

### 3.2.5 层理角度影响系数

将分析结果以影响系数的形式进行表述,以 $60^\circ$ 层理角度为基准(设为1),得到不同大变形等级下围岩变形、支护结构受力变形及节理剪切破坏塑性区半径的相对值并作为不同层理角度的影响系数,如表7所示。不同大变形等级下层理角度影响系数规律基本一致,即大致为先减小后增大,在层理角度较小( $0^\circ$ 、 $15^\circ$ )及较大( $90^\circ$ )时,对围岩变形、塑性区分布、支护结构受力较不利。随着大变形等级的不断升高,层理角度影响系数有所增大,但大变形等级为中等及强烈时,影响系数增大并不明显,表明大变形等级越高,层理角度引起围岩衬砌受力变形的效果越明显,但通过有效超前支护等一定程度上能抑制这种变化。表7中的影响系数可作为不同层理角度下支护加强修正的依据。

表7 不同大变形等级、不同层理角度的影响系数

Table 7 Influence coefficient of different large deformation grades and different bedding angles

| 轻微/中等/强烈(相应大变形等级数值) | $0^\circ$         | $15^\circ$        | $30^\circ$        | $45^\circ$        | $60^\circ$ | $90^\circ$        |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|-------------------|
| 围岩最大变形              | 1.024/1.210/1.162 | 1.025/1.143/1.207 | 0.985/1.076/1.031 | 0.983/1.021/0.984 | 1          | 1.019/1.199/1.062 |
| 节理破坏塑性区半径           | 1.272/1.161/1.251 | 1.213/1.171/1.226 | 1.185/1.114/1.200 | 1.246/1.061/0.932 | 1          | 0.841/0.914/1.084 |
| 初支变形                | 1.026/1.118/1.210 | 1.008/1.055/1.231 | 1.002/0.992/1.042 | 0.954/0.949/0.952 | 1          | 1.070/1.074/1.098 |
| 初支最大主应力             | 1.023/1.115/1.160 | 1.006/1.053/1.232 | 1.013/0.994/0.954 | 0.988/0.899/0.864 | 1          | 1.036/1.083/1.122 |
| 初支最小主应力             | 1.021/1.076/1.068 | 1.014/1.068/1.086 | 1.005/0.980/1.043 | 0.982/0.920/0.941 | 1          | 1.026/1.066/1.048 |
| 二衬最大主应力             | 1.064/1.170/1.280 | 1.032/1.104/1.320 | 1.005/0.970/0.956 | 0.981/0.981/0.941 | 1          | 1.052/1.062/1.159 |
| 二衬最小主应力             | 1.052/1.060/1.142 | 1.045/1.045/1.059 | 1.032/0.996/0.985 | 0.990/0.992/0.917 | 1          | 1.042/1.050/1.068 |
| 第2层初支变形(大变形强烈时)     | 1.174             | 1.219             | 1.037             | 0.984             | 1          | 1.072             |
| 第2层初支最大主应力(大变形强烈时)  | 1.238             | 1.283             | 0.940             | 0.907             | 1          | 1.172             |
| 第2层初支最小主应力(大变形强烈时)  | 1.069             | 1.075             | 1.028             | 0.977             | 1          | 1.062             |

## 4 层理角度的现场统计验证

五里坡隧道左洞以垂直节理为主,隧道大变形等级以强烈为主;水牛家隧道进出口位置以 $60^\circ$ 节理为主,而大变形等级以轻微为主,此层理角度及大变形等级规律与前文中层理小角度、大角度时围岩支护结构变形较大、 $45^\circ\sim 60^\circ$ 时围岩较为安全的结果吻合。然而现场情况复杂多变,即使是一个隧道的不同断面,层理产状及大变形情况均不同,因此,

有必要统计全线大变形断面,探究不同层理角度与大变形情况。

现场发生的大变形中,由于洞周围岩层理方向的差异导致不同部位的鼓包和挤出(图15、图16),严重时会导致断面严重侵限,现场发生的由于层理弱面方向导致的边墙鼓包和挤出如图15(a)、(b)所示,岩层产状基本与隧道中轴线平行,在重力和山体压力下随时会发生竖向位移和沿约束差方向发生垂直于围岩走向(水平方向)的鼓出(不利结构面

造成的潜在偏压),具体表现为边墙鼓入和拱顶变形小。

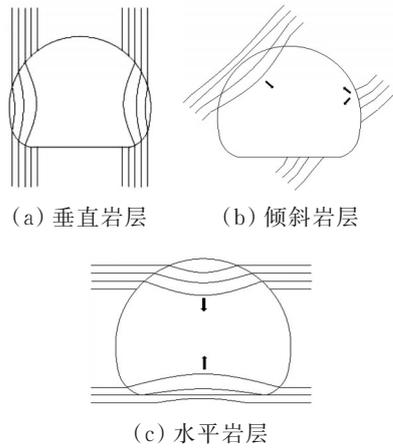


图 15 不同层理角度的破坏类型

Fig. 15 Failure types of different bedding angles

按层理弱面的角度特征将节理面方位角分为 3 类:节理面方位角 $\leq 30^\circ$ 、 $30^\circ <$ 节理面方位角 $\leq 60^\circ$ 和  $60^\circ <$ 节理面方位角 $\leq 90^\circ$ 。提取不同层理角度下的大变形等级情况及大变形破坏位置情况,如图 17、图 18 所示。

从图 17 可知,每个层理角度类别中均发生轻微、中等、强烈大变形,且以轻微大变形为主,占该类别层理角度的 50% 以上。不同层理角度下的大变形占比有所变化,可以看到,斜交角度下,大变形等级为轻微的比例增大,大变形为强烈的比例有所下降,相比斜交层理,水平-小角度及垂直-大角度下大变形等级为轻微的比例小一些,大变形等级为强烈的比例大一些,表明在小角度及大角度下,隧道将呈现出更不利的力学和变形特征,与数值模拟情况较贴合。现场中,斜交角度相比层理小角度与大角度的优势没有数值模拟中明显,这主要是由于随



图 16 现场不同隧道鼓包情况

Fig. 16 Bulging of different tunnels

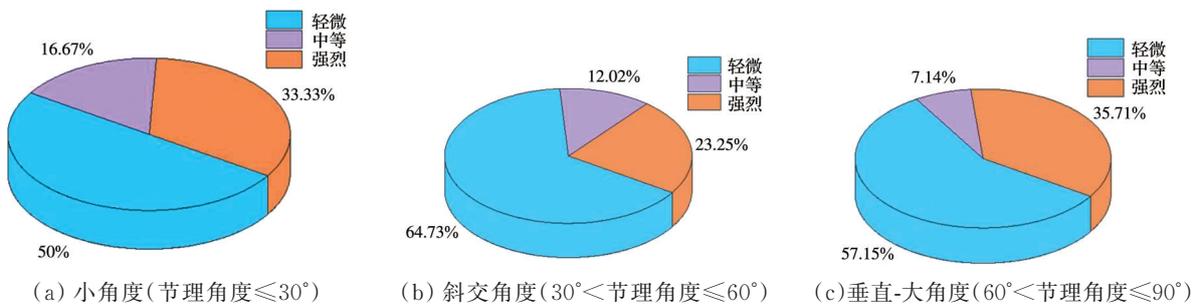


图 17 现场不同层理角度大变形等级情况

Fig. 17 Large deformation grade under different bedding angles

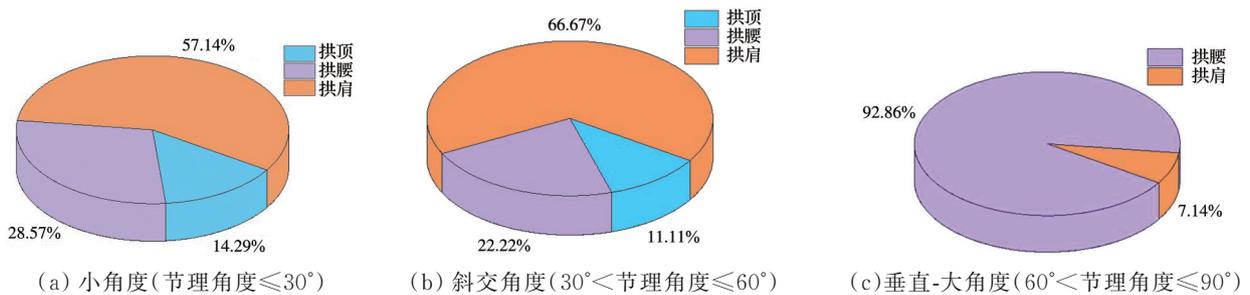


图 18 现场不同层理角度大变形破坏部位情况

Fig. 18 Large deformation and failure position of different bedding angles

着层理角度的增大,岩体抗压强度呈U型,在斜交层理中抗压强度反而较低所致。

层状岩体隧道大变形集中发生在主应力与层理弱面垂直的部位,现场为层理小角度时,岩层主要变形部位为拱肩和拱腰,斜交角度下岩层主要变形部位依然为拱肩和拱腰,但拱肩部位发生变形的比例增大,这主要是层理角度的移动造成的,垂直-大角度时,岩层主要变形部位为拱腰,占比高达93%。上述岩层变形部位与数值模拟中围岩变形及塑性区的偏移规律基本一致,且分析可得,较大层理角度下的岩层破坏主要为水平应力造成的垂直层理弱面方向的弯曲、折断型破坏,主要表现为向隧道内的挤压变形,鲜有沿节理面的顺层滑移破坏。

## 5 结论

依托九绵高速全线软岩大变形隧道,通过岩石力学试验确定了遍布节理模型参数,基于数值模拟,探究不同软岩大变形等级(轻微、中等、强烈)下层理角度对层状软岩大变形隧道围岩及支护体系受力变形的影响,并通过现场的层理角度与大变形情况对数值模拟结果进行验证。主要结论如下:

1)层理小角度( $0^\circ$ 、 $15^\circ$ )与大角度( $90^\circ$ )下围岩变形、支护结构受力变形较大,最危险与最安全的层理角度分别为 $15^\circ$ 和 $45^\circ\sim 60^\circ$ 左右,大变形等级越高,层理角度变化导致围岩支护变形的效果越明显。

2)随着层理角度的增大,围岩变形从拱底逐渐转移到右拱腰,右拱腰与左拱腰收敛的差异先增大后减小。围岩变形主要发生在隧道轮廓与层理面相切的位置,拱底及左拱脚对层理角度变化较敏感。

3)初支应力偏向及节理塑性区大致与层理弱面法向一致,随着层理角度的增大,节理的剪切塑性区由拱顶、拱底转移到左拱脚、右拱肩,最终偏移到左右拱腰上下位置。相比初支压应力,初支拉应力对层理角度更为敏感,垂直节理增大了张拉、剪切破坏塑性区贯通的风险,但剪切破坏塑性区半径反而有可能减小。

4)现场统计规律为岩层小角度与大角度下大变形等级较高,且层理角度为 $60^\circ$ 以下时,岩层破坏主要发生在拱腰及拱肩处,随层理角度的增大,有向拱肩发展的趋势,垂直-大角度层理时岩层破坏主要发生在拱腰。

## 参考文献

- [1] 陈子全,寇昊,杨文波,等.我国西南部山区隧道施工期支护结构力学行为特征案例分析[J].隧道建设(中英文),2020,40(6):800-812.  
CHEN Z Q, KOU H, YANG W B, et al. Cases analysis of mechanical behavior characteristics of tunnel supporting structure in mountainous areas in southwest China [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(6): 800-812. (in Chinese)
- [2] 徐国文,何川,代聪,等.复杂地质条件下软岩隧道大变形破坏机制及开挖方法研究[J].现代隧道技术,2017,54(5):146-154.  
XU G W, HE C, DAI C, et al. Failure mechanism and excavation method for soft-rock tunnels with large deformation under complex geological conditions [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(5): 146-154. (in Chinese)
- [3] 陈子全,何川,吴迪,等.高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究[J].西南交通大学学报,2018,53(6):1237-1244.  
CHEN Z Q, HE C, WU D, et al. Study of large deformation classification criterion for layered soft rock tunnels under high geostress [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6): 1237-1244. (in Chinese)
- [4] 李国良,李宁,丁彦杰.高地应力软岩大变形隧道防控关键技术研究[J].中国铁路,2020(12):69-73.  
LI G L, LI N, DING Y J. Research on key prevention and control technologies for large-deformation high geostress soft rock tunnel [J]. China Railway, 2020(12): 69-73. (in Chinese)
- [5] 张广泽,邓建辉,王栋,等.隧道围岩构造软岩大变形发生机理及分级方法[J].工程科学与技术,2021,53(1):1-12.  
ZHANG G Z, DENG J H, WANG D, et al. Mechanism and classification of tectonic-induced large deformation of soft rock tunnels [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 1-12. (in Chinese)
- [6] 徐国文,何川,汪耀,等.层状软岩隧道围岩破坏的连续-离散耦合分析[J].西南交通大学学报,2018,53(5):966-973.  
XU G W, HE C, WANG Y, et al. Failure analysis on surrounding rock of soft-layered rock tunnel using coupled continuum-discrete model [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(5): 966-973. (in Chinese)
- [7] 吴迪,陈子全,甘林卫,等.高地应力深埋层状围岩隧道非对称变形受力机制研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(11):1813-1821.  
WU D, CHEN Z Q, GAN L W, et al. Study of force mechanism of asymmetrical deformation of deep-buried

- layered surrounding rock tunnel under high ground stress [J]. *Tunnel Construction*, 2018, 38(11): 1813-1821. (in Chinese)
- [8] 李江腾,王慧文,林杭. 横观各向同性板岩层理角度与抗压强度及断裂韧度的相关规律[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(7): 126-131.
- LI J T, WANG H W, LIN H. Relationship among stratification angle, compressive strength, and fracture toughness of transversely isotropic slate [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(7): 126-131. (in Chinese)
- [9] 公路隧道设计规范第一册土建工程:JTG 33701.1—2018[S].北京:人民交通出版社,2019.
- Specifications for design of highway tunnels-Section 1-Civil engineering: JTG 33701.1—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese)
- [10] 赵永,杨天鸿. 基于遍布节理模型的深埋巷道稳定性分析[J]. *金属矿山*, 2016(5): 36-41.
- ZHAO Y, YANG T H. Stability analysis of deep buried tunnel based on ubiquitous-joint model [J]. *Metal Mine*, 2016(5): 36-41. (in Chinese)
- [11] 罗福君,周晓军. 基于遍布节理模型的顺层边坡稳定性影响因素分析[J]. *铁道标准设计*, 2017, 61(7): 141-146.
- LUO F J, ZHOU X J. Analysis of influence factors on the stability of bedding slope based on joint model [J]. *Railway Standard Design*, 2017, 61(7): 141-146. (in Chinese)
- [12] 张权,姜谔男,吴洪涛,等. 基于遍布节理模型的隧道循环开挖进尺优化研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(6): 70-77.
- ZHANG Q, JIANG A N, WU H T, et al. Research on optimization of tunnel cyclic advance rate based on ubiquitous joint model [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(6): 70-77. (in Chinese)
- [13] SAINSBURY B, PIERCE M, IVARS D M. Simulation of rock mass strength anisotropy and scale effects using a Ubiquitous Joint Rock Mass(UJRM) model [C]// *Proceedings First International FLAC / DEM Symposium on Numerical Modeling*. Minneapolis: Itasca, 2008: 1-10.
- [14] 张伯虎,马浩斌,田小鹏,等. 层状页岩力学参数的各向异性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(Sup2): 634-638.
- ZHANG B H, MA H B, TIAN X P, et al. Deep layered shale mechanical parameters anisotropy study [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(Sup2): 634-638. (in Chinese)

(编辑 黄廷)