

# 层状节理对软岩隧道的变形影响及对策研究

李赤谋<sup>1</sup>, 吴忠仕<sup>2,3</sup>, 褚存<sup>2,4</sup>, 袁青<sup>2</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 杨林<sup>2</sup>

(1. 中交文山高速公路建设发展有限公司, 云南 文山 663099; 2. 中交第二航务工程局有限公司技术中心;  
3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室; 4. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室)

**摘要:**大变形隧道往往位于层理较为发育的软岩地层中,因此研究不同层理角度下软岩隧道的变形特征以及应对措施非常重要。该文采取三维离散元法对层理角度分别为0°、30°、60°、90°的软岩隧道进行了数值模拟。研究表明:当层理角度为0°时,隧道变形表现出对称性的特点,变形最大位置发生在隧道顶拱,主要是由于层理的卸荷张开所致;当层理角度分别为30°、60°、90°时,隧道变形表现出非对称性的特点,最大位移发生在顺层理走向的结构面的隧道洞壁出露处,最大位移发生的原因主要是结构面两侧岩体向临空方向的滑动所致,同时隧道周围最大主应力较大时会导致围岩产生挤压大变形,因此层状软岩隧道的大变形问题是由结构面的滑移和挤压变形共同所致。针对以上变形破坏情况提出了合理的施工建议。

**关键词:**层状岩体;层理角度;软岩大变形;隧道工程;离散元法

随着中国交通运输网络向西南地区延伸,在修建穿山隧道的过程中,出现了较多软岩隧道的大变形问题,如成兰铁路的柿子园隧道、兰渝铁路的木寨岭隧道,成昆铁路的老东山隧道,川藏铁路的拉林段等,这些隧道在修建的过程中均出现了严重的大变形问题,如一些隧道的部分标段收敛变形量超过了1 000 mm,其中木寨岭隧道的极端收敛量甚至达到了罕见的4 000 mm。总结这些隧道发生大变形的原因,除了这些隧道大多位于高地应力、断层破碎带、复杂地质构造区域以外,还有一个重要的特点就是隧道穿越的地层岩性大多为千枚岩、板岩、砂岩等层理发育的层状软岩地层。这种受层状结构面控制的大变形属于产状不利型大变形,其变形具有明显各向异性的特点,且其力学机制主要受结构面控制而非是以往的对称变形力学机制。对于这种非对称的软岩隧道变形问题,目前的研究较少,因此研究不同层理角度下软岩隧道的变形特征,对隧道设计施工进行有效指导具有重要意义。对于层状结构面的模拟,该文选择离散元软件3DEC来进行,3DEC软件具有强大的结构面模拟功能,不但可以通过节理的地质编录资料来指定结构面的倾向、倾角和结构面上某一点的空间位置来对结构面进行快速精确的建模,而且可以模拟出结构面的滑移和扩容变

形,特别适合分析受结构面控制的软岩隧道的大变形问题。

## 1 模型建立

研究对象选用某层理发育的软岩地层双向高速公路隧道,该隧道主洞建筑限界净高5 m,净宽10.25 m,隧道线间距30 m。隧道围岩以千枚岩为主夹少量变质砂岩及薄层状灰岩,岩质极软,且层理发育,隧道围岩等级整体以V级围岩为主。为了考虑优势节理组以及不同节理倾角的作用,计算采用三维离散元软件3DEC来进行,同时为了消除模型的边界效应,隧道左右和上下侧各取30 m,隧道长度取100 m,模型具体尺寸为:顺隧道走向为100 m,横向宽110 m,高90 m。模型的初始地应力场由研究区域的7段水力压裂测试数据反演得到,通过试验结果耦合的压力与深度的关系如下:

$$\begin{aligned}\sigma_H &= 0.030\ 2H - 2.3 \\ \sigma_h &= 0.027\ 6H - 3.2 \\ \sigma_z &= \gamma H\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\sigma_H$ 为顺隧道走向应力; $\sigma_h$ 为侧向应力; $\sigma_z$ 为垂直方向应力; $H$ 为埋深; $\gamma$ 取20.52 kN/m<sup>3</sup>。获取地

应力分布方程以后,可以通过 3DEC 内置命令 Insitu Stress 施加到模型中。

层理倾角分别设置为 0°、30°、60°、90°,倾向均为 90°,层理之间整体上服从均匀分布,间距为 4 m,层理的设置通过 3DEC 软件内置的 FISH 语言编程来进行编录。模型坐标系采用左手法则,边界条件为底部和四周施加法向约束,模型顶部施加分布荷载代替上部约 370 m 埋深的岩体压力,为了保证计算精度,模型划分了约 10 万个单元,并对隧道周围的网格进行了加密。岩体、结构面等参数由现场的测试和变形监测数据反演得到(表 1、2),岩体的本构模型采用摩尔库仑弹塑性模型。层理模型见图 1,反演的模型初始地应力场见图 2。

表 1 岩体的相关参数取值

| 围岩名称 | 围岩级别 | 重度/(kN·m <sup>-3</sup> ) | E/GPa | 泊松比  | 内摩擦角/(°) | 黏聚力/MPa |
|------|------|--------------------------|-------|------|----------|---------|
| 灰岩   | V    | 21                       | 1.7   | 0.30 | 31       | 0.15    |
| 千枚岩  | V    | 20                       | 1.5   | 0.35 | 27       | 0.20    |
| 变质砂岩 | V    | 21                       | 1.8   | 0.25 | 35       | 0.50    |

表 2 结构面的相关参数取值

| 结构面类型 | 法向刚度 $K_n$ /(GPa·m <sup>-1</sup> ) | 剪切刚度 $K_s$ /(GPa·m <sup>-1</sup> ) | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|---------|----------|
| V     | 9.6                                | 2.8                                | 0.6     | 25       |

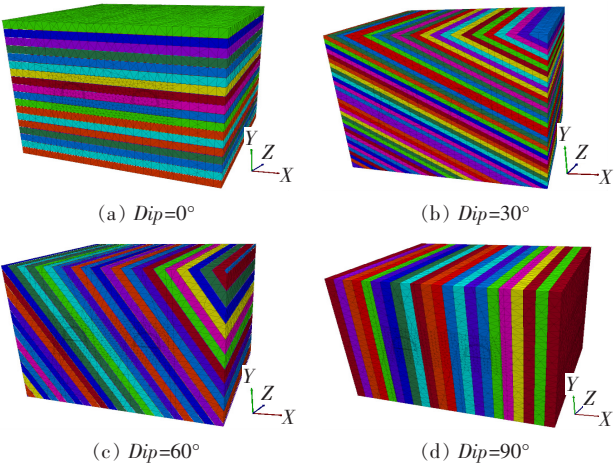


图 1 不同层理倾角的三维离散元模型

2 计算结果分析

不同层理倾角时围岩位移场分布云图见图 3。

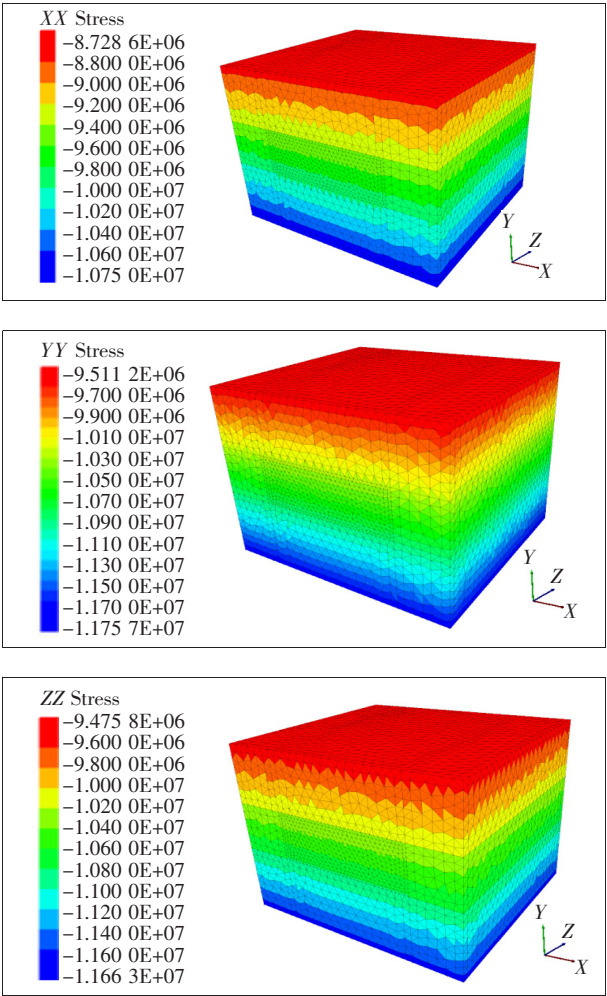


图 2 反演的模型初始地应力场(单位:Pa)

从图 3 可以看出:围岩位移场的分布与层理角度密切相关,且表现出了明显的各向异性特点。

(1) 当层理倾角为 0°时,隧道整体以顶拱的沉降为主,最大位移也发生在隧道的顶拱区域,其次为隧道底板的回弹,隧道侧向位移量值不大,隧道顶拱和底板变形较大的原因主要是由于层状结构面向临空方向的卸荷张开所致,其变形方向基本上与结构面的法向方向平行。

(2) 当层理倾角为 30°时,隧道整体的变形量明显变大,且表现出了非对称性的特点,隧道的最大变形发生在右侧隧道层理面在隧道底板的出露处,且两侧隧道的左侧变形量普遍大于右侧,顺层理走向导致的结构面向隧道临空方向的滑移是非对称位移产生的主要原因,且在隧道洞肩区域的位移量要偏大一些。

(3) 当层理倾角为 60°时,隧道整体变形量较 30°时小,但是非对称变形却更加明显,变形量最大的位置发生在右侧隧道的层理面洞角的出露处,是由于结构

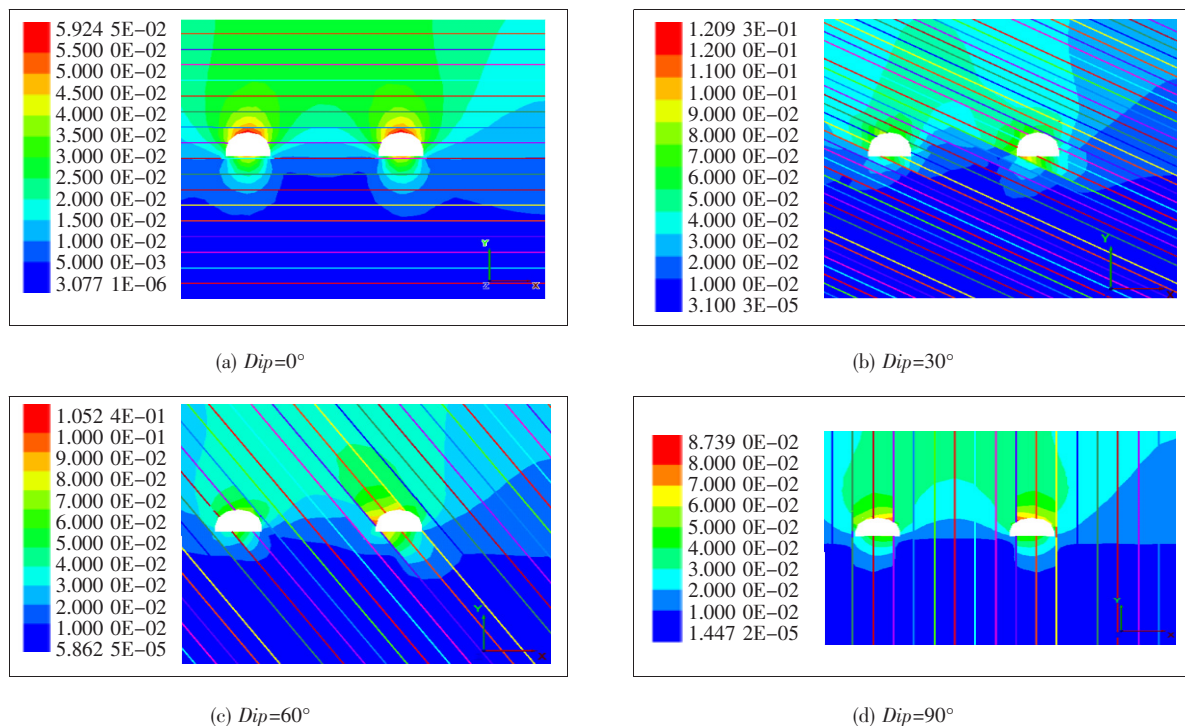


图3 围岩位移场分布云图(单位:m)

面面向临空方向的卸荷张开所致。

(4) 当层理倾角为  $90^\circ$  时,两个隧道整体变形表现出了对称性的特点,但是每个隧道的变形却表现出了非对称性,最大变形发生在两个隧道内侧的洞肩区域,主要是由于结构面两侧岩体向临空方向的滑移所致。

综合以上 4 种层理倾角的变形情况可以看出:倾角从  $0^\circ$  变化到  $90^\circ$ ,围岩整体位移表现出先变大后变小的特点,在倾角为  $30^\circ$  左右时,隧道围岩整体位移量级最大。当层理倾角为  $0^\circ$  时,隧道两侧的变形量较小较为安全,围岩位移以顶拱沉降为主,此时在隧道施工过程中可适当加大顶拱区域的预留变形量,加强顶拱区域的系统锚杆,以防止隧道洞顶的坍塌,同时隧道底部隆起量也较大,容易造成仰拱开裂,可在隧道底部增设系统锚杆进行加强支护,并及时封闭成环。当隧道围岩的层理倾角大于  $0^\circ$  时,此时隧道的变形会表现出非对称性的特点,变形量最大的位置发生在顺层理走向的结构面的洞壁出露处,主要是由于结构面两侧岩体向临空方向的滑移所致。此时在隧道施工时,可采取不等值预留变形量的方式,根据结构面的走向在隧道的不同位置预留不同的变形量来对隧道进行动态调控。同时,从数值模拟的结果可以发现:层状隧道发生大变形的原因是由于结构面两侧的岩体向临空方向的滑动所致,因此可以通过超前注浆预加固来提高结构面的强度,弱化节理的作用,以控制围岩的变形,同时

系统锚杆对层状围岩也有较好的加固效果,锚杆的施做方向尽量与结构面的走向垂直。

不同层理倾角时围岩最大主应力分布见图 4。

从图 4 可以看出:不同层理倾角会对围岩应力集中的部位产生影响,层理倾角为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时,应力集中主要发生在洞脚部位,当层理倾角为  $30^\circ$  时,应力集中主要发生在洞肩部位,而当层理倾角为  $60^\circ$  时,在洞肩和洞脚都发生了应力集中,而其他区域的最大主应力普遍为 25 MPa 左右,又因层状岩体的岩性极软,其弹性模量、黏聚力等参数都很低,在高地应力下极易导致挤压大变形,因此在施工过程中可通过径向注浆增加围岩的强度,提高围岩的自成拱能力,同时采用快挖快支的施工方式,开挖爆破以后及时初喷混凝土对围岩出露面进行及早封闭,防止围岩在空气中暴露时间过长导致围岩弱化,同时及早对仰拱进行封闭成环,以此来控制围岩的变形。综合以上分析可知,层状软岩隧道的大变形问题是由结构面的滑移变形和高地应力导致的岩块挤压变形共同所致。

### 3 结论

采用三维离散元软件 3DEC 对 4 种不同层理倾角的某软岩隧道的变形情况进行了分析研究,得出结论:



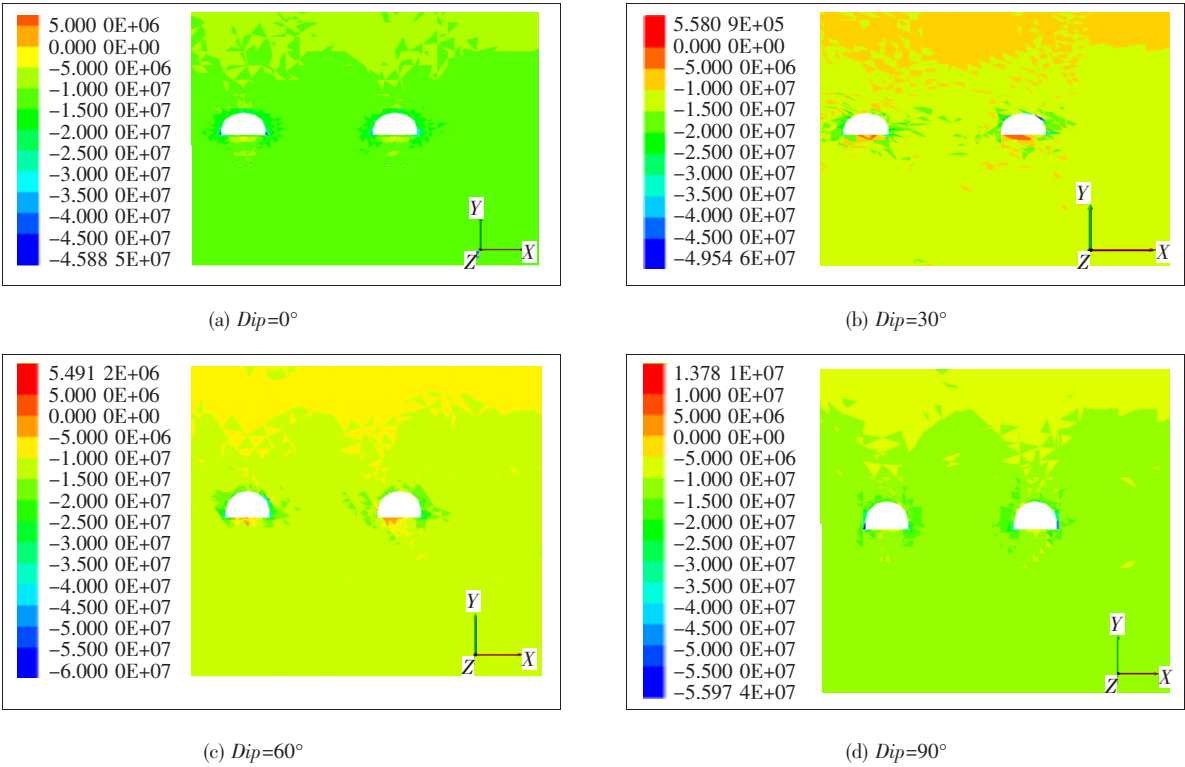


图 4 围岩最大主应力云图(单位:Pa)

(1) 围岩位移场的分布与层理角度密切相关,且表现出了明显的各向异性的特点。层理倾角为  $0^\circ$  时,隧道的变形主要发生在顶拱区域,当层理角度分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时,隧道最大位移主要发生在结构面的洞壁出露处。

(2) 不同的层理倾角会影响围岩应力集中的位置,高地应力又会引起软岩的挤压变形,因此层状软岩隧道的大变形问题是由结构面的滑移和高地应力挤压变形共同所致。

(3) 通过对围岩进行注浆加固以及设置系统锚杆,可以弱化节理的作用,提高围岩强度,增加隧道的稳定性,锚杆的施做方向宜与结构面的走向垂直,可根据数值计算的结果采取不等值预留变形量的方式,根据结构面的走向在隧道的不同位置预留不同的变形量来对隧道施工进行动态调控。

参考文献:

[1] 杨木高. 木寨岭隧道大变形控制技术[J]. 现代隧道技术, 2019(2).

[2] 叶康慨. 兰渝铁路木寨岭隧道岭脊核心段扩拆技术[J]. 隧道建设, 2018(4).

[3] 陈子全,何川,吴迪,等. 高地应力层状软岩隧道围岩变形特性及其大变形预测分级研究[J]. 西南交通大学学报, 2018(1).

[4] 李术才,徐飞,李利平,等. 隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(7).

[5] 汪波,郭新新,何川,等. 当前我国高地应力隧道支护技术特点及发展趋势浅析[J]. 现代隧道技术, 2018(5).

[6] 孙钧,潘晓明. 隧道软弱围岩挤压大变形非线性流变力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(10).

[7] 褚存,桂惠中,赵先宇,等. 基于离散元地下厂房围岩变形破坏特征分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2019(4).

[8] 徐建国,王复明,蔡迎春. 隧道收敛变形监测及围岩特性参数反演[J]. 中国公路学报, 2008(3).

[9] 刘宁,张春生,褚卫江,等. 超深埋长隧道地应力场综合分析方法与应用[J]. 中国公路学报, 2017(10).

[10] 李贤,蔡林真. 某软岩隧道变形规律和二衬最佳支护时机选择研究[J]. 中外公路, 2019(3).

[11] 习淑娟,万涛,王海彦. 软岩地层隧道支护体系受力特征研究[J]. 中外公路, 2015(4).

[12] 凌同华,高亮,李洁. 基于块体理论的隧道围岩稳定性数值分析[J]. 中外公路, 2015(6).