

doi:10.13582/j.cnki.1674-5876.2023.02.008

基于 FLAC^{3D} 模拟不同落差断层下 隧道围岩稳定性分析

张杨添, 罗文柯*

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:以狮子洋隧道工程为分析原型,利用 FLAC^{3D} 数值分析软件模拟 4 个不同落差的断层,旨在研究不同落差断层下隧道开挖前中后围岩应力和应变的变化特征.研究表明:断层破碎带处的初始地应力分布不均匀,在断层破碎带处会有一定的波动;在开挖至断层破碎带时,围岩应力会急剧下降,隧道变形也会激增;随着断层落差的增大,隧道开挖所产生的影响范围也随之增大,断层破碎带处的隧道位移更大更集中,隧道围岩应力的分布也更加不均匀,主要表现为断层处围岩应力下降幅度更大,隧道应力集中处的应力也更大更集中.

关键词:有限差分法;数值模拟;断层落差

中图分类号:U451.2

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)02-0050-08

Stability Analysis of Tunnel Surrounding Rock Under Different Drop Faults Based on FLAC^{3D} Simulation

ZHANG Yangtian, LUO Wenke

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Taking Shiziyang Tunnel project as the analysis prototype, this paper simulates four faults with different drop by using FLAC^{3D} numerical analysis software, in order to study the variation characteristics of stress and strain of surrounding rock before, during and after tunnel excavation under faults with different drop. The results show that the initial in-situ stress distribution in the fault fracture zone is not uniform, especially in the fault fracture zone. When excavating to the fault fracture zone, the surrounding rock stress will drop sharply and the tunnel deformation will surge. With the increase of fault drop, the influence range caused by tunnel excavation also increases, the tunnel displacement at the fault fracture zone is larger and more concentrated, and the stress distribution of tunnel surrounding rock is more uneven, which is mainly reflected in the greater decline of surrounding rock stress at the fault, and the stress at the stress concentration of tunnel is also larger and more concentrated.

Keywords: finite difference method; numerical simulation; fault drop

随着中国的加速发展,人们对基础设施的建设需求也日益提高,其中地质隧道和地下工程凭着复杂、危险等特点成为中国基建工程发展中的焦点问题之一.分析总结以往隧道工程中遇到的形形色色的问题,不难发现影响隧道开挖的众多因素中首当其冲的就是断层破碎带.由断层破碎带引起的工程问题不计其数,轻则会影响工程建设周期,重则危害人身安全.因此隧道穿越断层破碎带引发的工程问题引起了众多学者注意,并对此开展相关研究.

收稿日期:2022-03-15

* 通信作者, E-mail: hkdllw@tom.com

Bagio C A 等^[1]通过三维数值模拟评估 Bener 大坝的导流洞稳定性,发现隧道穿越断层会导致断层围岩稳定性降低,需要对支护系统进行加强设计;Xue Y 等^[2]利用 FLAC^{3D}建立断层带和隧道模型,对厦门海沧隧道开挖进行模拟,通过对比不同支护方式下围岩应力、应变特征来确定合适的隧道支护方案;雷喜良^[3]针对巷道过大断层提出了锚架联合的支护方式,并投入到实际应用中,支护能力得到显著提升;唐浪洲等^[4]通过分析不同走滑断层错动量下隧道的应力和形变,得出随着错动量的增加隧道结构位移变大的结论;王伟等^[5]基于巷道围岩支护理论,利用 FLAC^{3D}模拟锚杆加喷浆的支护方式,发现此支护方式可以缩小围岩塑性区范围,降低围岩应力,减少围岩变形;骆禹锦等^[6]以社官坝隧道工程为研究基础,利用数值模拟与现场监测数据进行对比分析,发现隧道地表坡度、埋深及围岩等级都对马蹄形隧道工程有重要影响;岳向红等^[7]通过对厦门高崎互通下穿嘉禾路隧道进行分析,总结浅埋暗挖公路隧道的特点,提出有效控制围岩变形的措施,为支护体系的优化提供依据;祁彬溪等^[8]以内马铁路隧道工程为研究依托,运用 ANSYS 软件数值建模,分析断层垂向错动速率与断层破碎带交界面摩擦系数对穿越断层隧道的影响,得出断层垂向错动是隧道主动盘发生竖向位移的主要原因,动摩擦系数影响相对较小;何川等^[9]对汶川等地震中穿越断层破碎带隧道进行资料收集,通过实验对跨断层破碎带隧道进行研究,实验结果表明断层破碎带隧道在地震中极易被破坏;Baziar M H 等^[10]用有限元模拟软件模拟逆断层活动与隧道和围岩之间相互作用的过程,结果表明隧道的存在对断层运动路径有重大影响;常建强等^[11]使用数值模拟分析马蹄形、圆形和椭圆形等 3 种隧道的应力场,研究表明马蹄形隧道较为稳定,并针对马蹄形隧道提出了合理的支护方式。

前人在隧道开挖方面的研究成果丰硕,不仅包括数值模拟,还有穿越断层的开挖支护方式以及隧道穿越各种断层可能遇到的问题等.这些成果为本次研究提供多样的研究思路和扎实的理论基础.本文从断层落差入手,对不同落差的断层进行模拟分析,探究穿越不同落差断层的隧道在开挖各个阶段中围岩应力和应变的特征,总结影响规律,讨论隧道开挖的安全性问题.通过这项研究,可以更好地解决隧道开挖过程中与断层相关的问题,并为未来的隧道建设提供有价值的参考.

1 工程背景与数值模型的建立

1.1 工程背景

珠江狮子洋隧道广州岸位于广州番禺区石楼镇菱东村,属南亚热带季风气候,日照充足,雨水充沛,年均气温为 21.4~21.9℃.该区域属珠江三角洲海陆交互相沉积平原地貌,地势平坦.狮子洋隧道主要通过的地层为第四系海相沉积及冲积淤泥、淤泥质土层等,土层稳定性较差,基岩软硬差异大,大多为软质岩.隧道围岩分级为 IV~VI 级,其中 VI 级围岩长 3 490 m,占总长的 58.2%;V 级围岩长 2 010 m,占总长 33.5%;IV 级围岩长 500 m,占总长 8.3%.区域内存在文冲-狮子洋断裂带,该断裂带总体走向 30°~50°,倾向南西,倾角 50°~80°,长约 120 km,施工过程中需要经历各种不同落差的断层,且断层带岩体破碎、含水,给工程带来极大影响.

1.2 数值模型的建立

查阅《工程地质学》^[12]发现,隧道开挖影响范围一般为隧道 3 倍直径范围内的岩土体.综合考虑以上理论和狮子洋隧道的实际工程条件,为方便观察研究,将模型边界设置为隧道宽度的 20 倍,并对模型周围施加法向约束,固定模型底面的点,模型地表部分不施加任何约束,以模拟岩土体自然的初始应力状态.模型尺寸设置为 217.5 m×200.0 m×166.5 m,模型三维透视图如图 1 所示.隧道为马蹄形隧道,截面尺寸如图 2 所示.隧道埋深为 96.5 m.断层破碎带倾角为 45°.目前对断层规模等级的划分尚不统一,本次研究在参考其他学者划分方式^[12]的基础上结合本次工程研究背景,将所模拟的不同落差断层划分为特大断层(落差 160 m)、大断层(落差 120 m)、中断层(落差 80 m)、小断层(落差 40 m).

1.3 相关参数的设定

断层破碎带内一般含有断层角砾岩、碎裂岩、断层泥等,使整个断层破碎带表现出很强的塑性,在塑性模型的选取中,考虑 Mohr-Coulomb 模型^[13]适合于松散胶结的颗粒材料,如土壤、岩石、混凝土等,综合性

很好,符合本次模拟的需求,故选取 Mohr-Coulomb 模型^[13]作为本次研究的本构模型.隧道穿越的围岩为Ⅲ级围岩,断层破碎带处的围岩为V级围岩,开挖隧道时采用台阶式开挖法,围岩及衬砌的物理力学参数详见表 1.

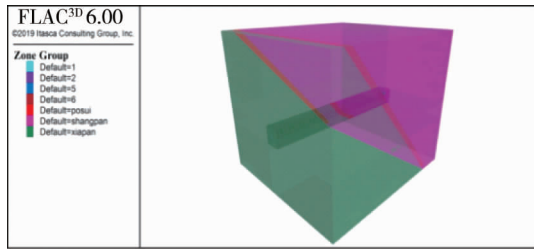


图 1 模型三维透视图

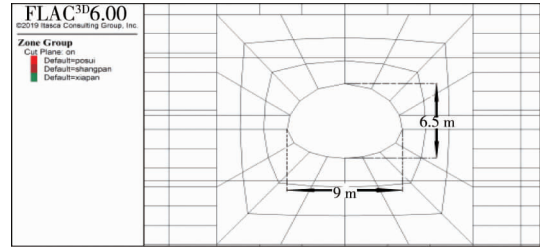


图 2 隧道断面尺寸

表 1 材料力学参数

材料	重度(kN/m ³)	弹性模量/Gpa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
围岩	23.0	6	700	39	0.25
断层破碎带	17.0	1	50	20	0.35
喷射混凝土	24.0	21			0.25
锚杆	78.5	210			0.20

2 数值模拟结果分析

2.1 未施工阶段

隧道未开挖前,岩土体在自重应力的作用下处于相对稳定的状态,岩土体中的应力也按照一定规律均匀分布.图 3 是各断层开挖前的垂直应力云图,图中虚线范围为断层破碎带范围.由图 3 可以看出,在自然状态下,岩体的自重应力随深度的增加而增加,呈层状分布.

自重应力公式^[13]为

$$\gamma = \rho G; \tag{1}$$

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i. \tag{2}$$

式中: γ 为上覆岩体的重度; ρ 为岩体的密度; G 为重力加速度; σ_z 为岩体的垂直应力; γ_i 为第 i 层岩体的重度; h_i 为第 i 层岩体的厚度.

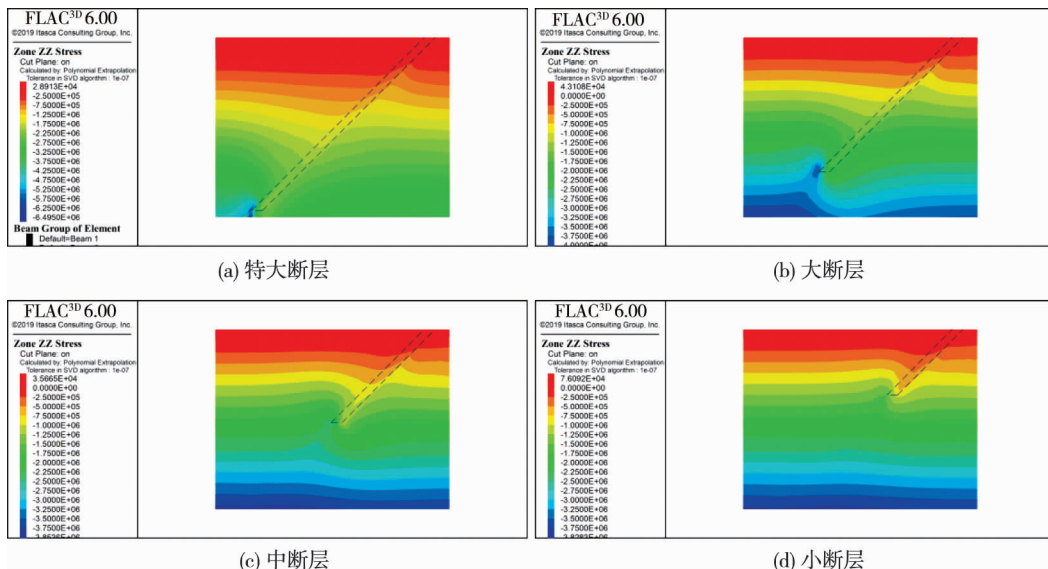


图 3 初始垂直应力云图

经式(1)和式(2)算出在远离断层处的岩体底面的自重应力为 3.826×10^6 Pa,与模拟结果 3.860×10^6 Pa 大致相同。

图 4 为断层的水平应力云图,与垂直应力特征相似,皆呈层状分布,应力大小也随着深度增大而增大。侧压力公式^[19]为

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_z. \quad (3)$$

式中: μ 为岩体的泊松比; σ_x 为岩体 x 方向的水平应力; σ_y 岩体 y 方向的水平应力。

经式(3)计算得出岩体底面的水平应力为 1.276×10^6 Pa,与模拟结果 1.287×10^6 Pa 大致相同。

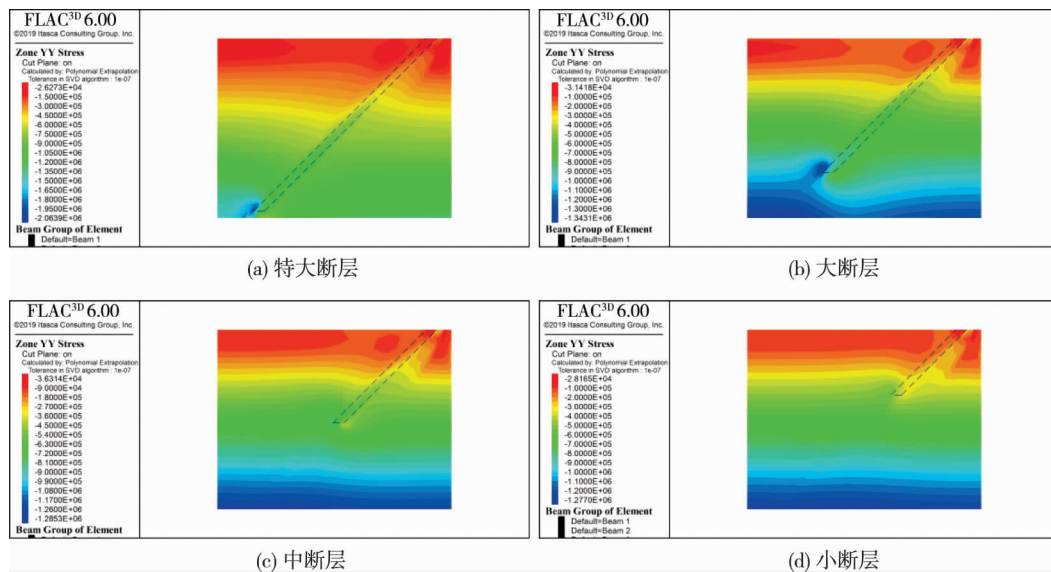


图 4 断层初始水平应力云图

综合分析以上初始应力云图,可以看出:远离断层破碎带的岩土应力在未开挖前呈层状分布,地应力与地层深度成正比。在接近断层破碎带处的地应力产生一定的波动,这是由于断层两侧的岩块形成应力传递,使得左侧上大下小的楔体产生卸荷作用,靠近断层破碎带的岩体应力降低;而上小下大的右侧楔体产生加荷作用,致使应力升高。在断层破碎带的底部与围岩交界处,产生应力集中点,且随着断层落差和深度的增加,该点应力会更大更集中。

2.2 施工开挖阶段

隧道开挖的每一步都是打破围岩稳定到趋于一个新平衡的过程。施工开挖打破岩体天然的平衡状态,隧道一定范围内的围岩发生形变,带动岩体应力发生变化,应力的变化又会造成新的变形,两者相互作用直至双方达到稳定状态。不同落差断层下的隧道在达到新平衡后,应力、应变都有不同的特点。

2.2.1 应变分析

隧道开挖后,围岩在垂直方向上的位移云图如图 5 所示。隧道开挖后隧道上部围岩由于失去支撑而向下发生沉降,底部围岩也因为上覆岩土消失,在不平衡力作用下产生向上的位移,总体呈直线型隆起。隧道最大沉降量从特大断层到小断层排序依次为 4.60, 4.27, 2.43, 2.17 mm, 隧道最大隆起量则依次为 3.47, 2.90, 0.62, 0.56 mm, 这些大幅度变形皆发生在断层破碎带段的隧道围岩,通过比较也能发现随着断层落差减小,隧道产生的变形也在减小,隧道整体变形更为均匀。从图 5 中我们还可以看出:随着断层落差减小,隧道开挖所引起的附近岩土体垂向位移的扰动范围也在缩小。

图 6 为隧道开挖过程中的总体水平位移云图。从图 6 中看出:水平位移集中发生在隧道两侧边墙,而拱顶和仰拱并无明显位移;随着开挖的深入,位移量先是逐渐减小,但在接近断层破碎带处急剧增大;隧道最大水平位移量由特大断层到小断层排序依次为 0.260, 0.200, 0.054, 0.048 mm, 最大变形处依然是断层破碎带段的隧道围岩;而且特大断层和大断层在穿越断层破碎带时,围岩运动方向突然发生变化,由向隧道

外挤压转为向隧道内挤压,中断层和小断层由于没有穿越断层破碎带,隧道整体水平位移方向不变。

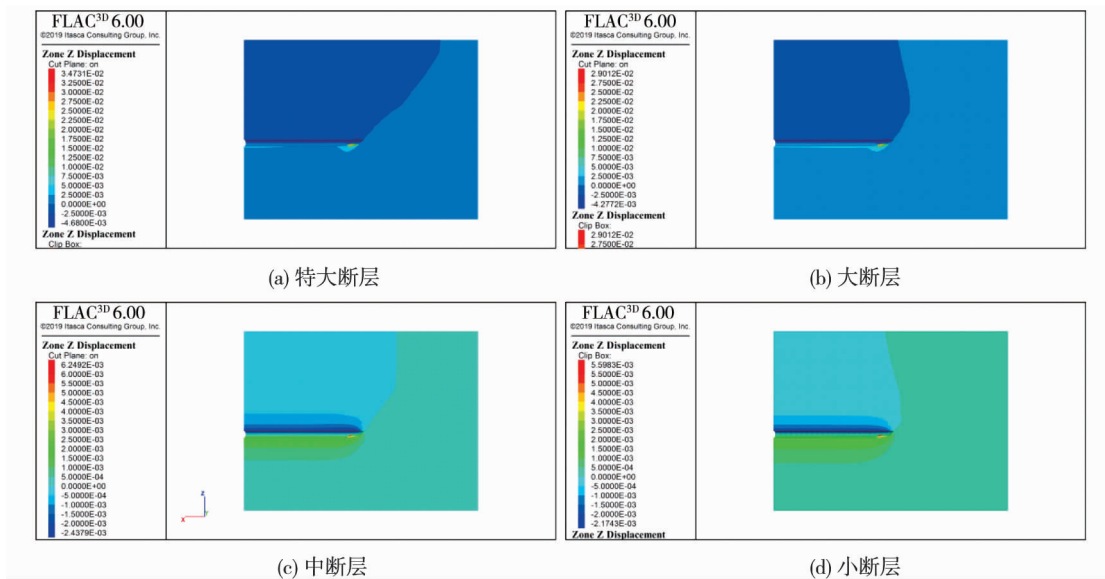


图 5 断层开挖阶段垂向位移云图

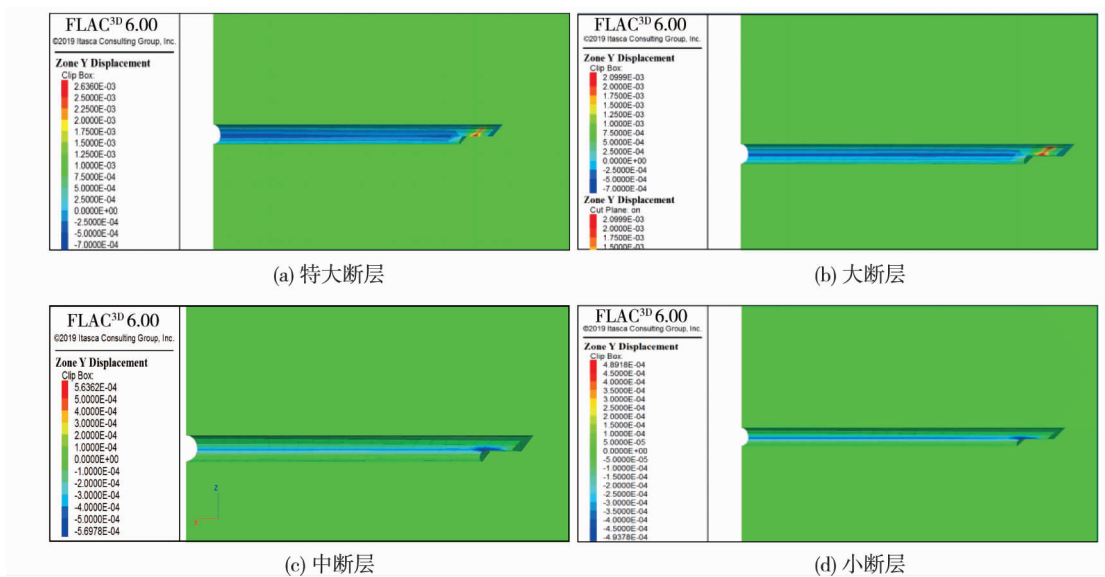


图 6 断层开挖阶段水平位移云图

2.2.2 应力分析

图 7 为隧道开挖阶段的主应力云图.隧道开挖后,隧道内岩土体经历一系列的变形后逐渐趋于稳定,岩土体内的应力也随着岩土变形而进行重新分布,4 种隧道的应力在重新分布后也产生多处异同的特征.从图 7 分析可知:4 种隧道的应力都集中在两侧边墙形成高应力带,而拱顶和仰拱分别由于失去下覆岩石的支撑和上覆岩石的挤压形成低应力带;比较这 3 处应力带,从大到小排序依次为边墙、仰拱、拱顶,三者的比例接近 8 : 2 : 1;随着隧道开挖的深入,除特大断层隧道,其他断层隧道应力与隧道开挖距离都存在不同程度的正比关系,大断层隧道应力增加最快,小断层最慢;隧道应力波动的幅度也会随着断层落差增大而增大,特大断层隧道边墙应力最高达到 0.992 MPa,最低降至 0.841 MPa,而小断层隧道边墙应力基本在 0.88 MPa 上下微微波动;在开挖至 95 m,即接近断层破碎带处,4 种隧道应力都会产生不同程度的下降,由特大断层到小断层,在经过断层破碎带前后,应力下降百分比分别为 49.8%,48.7%,35.1%,33.2%。

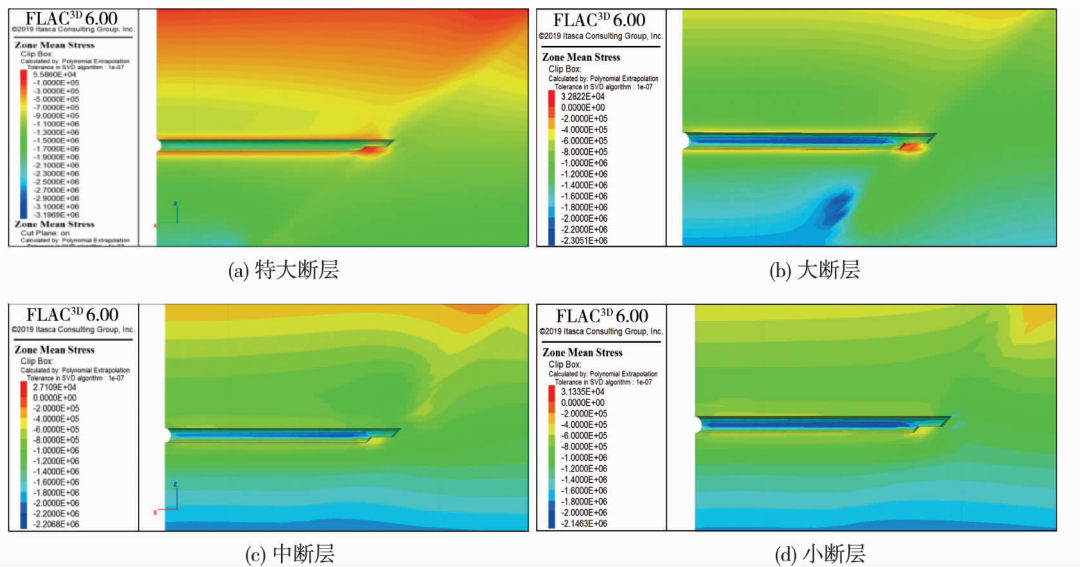


图 7 断层开挖阶段主应力云图

2.3 隧道贯通阶段

隧道贯通后,围岩的应力和位移与开挖阶段的变化情况有共同之处,但隧道贯通后所影响的范围更大更广,也产生一些开挖阶段中没有出现过的问题,值得我们去讨论分析.

2.3.1 位移分析

图 8 和图 9 分别为隧道贯通后竖直和水平的位移云图.隧道贯通后,隧道各处位移变化规律与开挖时基本一致,顶板向下运动,仰拱向上隆起,仰拱位移量要稍大于顶板位移量,左右边墙向隧道外侧位移.由特大断层到小断层排序,隧道最大沉降量依次为 4.80,4.48,2.71,2.26 mm;最大隆起量依次为 5.77,5.12,2.55,2.40 mm;最大水平位移量则依次为 1.33,1.19,0.43,0.39 mm.特大断层、大断层破碎带段隧道围岩的竖直位移量和水平位移量分别是非破碎带段围岩位移量的 1.95 倍和 3.26 倍,中断层、小断层破碎带段隧道围岩的竖直和水平位移量则是非破碎带段围岩位移量的 1.12 倍和 1.54 倍.这是由于特大断层和大断层穿越断层破碎带时,断层破碎带的软质围岩产生的位移要远大于普通围岩,而且破碎带处两侧边墙也由向外位移转为向内位移.中断层隧道和小断层隧道虽然没有穿越断层破碎带,但在接近断层破碎带前后,位移量也会产生波动,主要表现为先增后减.观察云图也能发现,断层落差越大,断层破碎带段位移会更加集中,变形量也更大.且在后续开挖中,断层破碎带覆盖范围内的隧道位移量也相对小于非断层破碎带覆盖范围内的隧道位移量,这是由于断层破碎带密度相对较低,对下覆岩体所产生的压力较小.

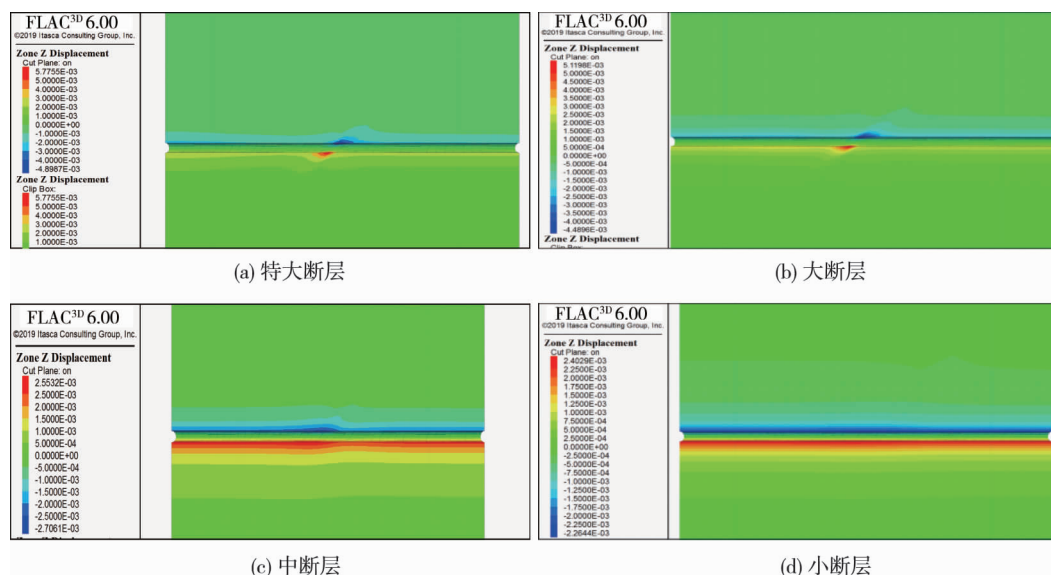


图 8 断层贯通阶段竖直位移云图

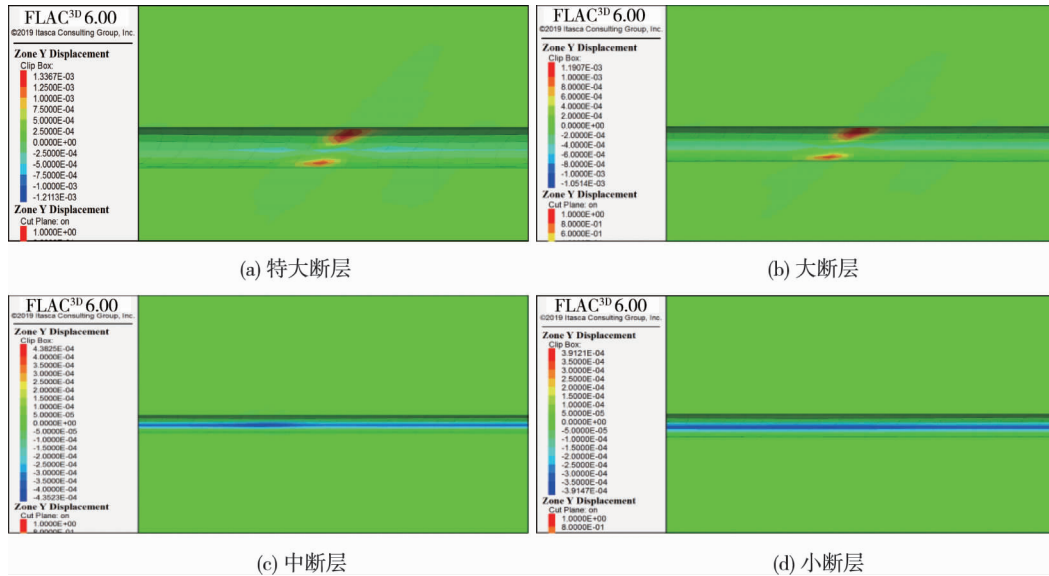


图 9 断层贯通阶段水平位移云图

2.3.2 应力分析

隧道贯通后,隧道应力保持一部分与开挖阶段相似的特征,同时也产生新的特点.应力依然集中于两侧边墙形成高应力带,拱顶和仰拱由于产生临空面而形成低应力带,边墙、仰拱、拱顶的主应力依旧保持着 8 : 2 : 1 的比例关系.通过断层贯通阶段主应力云图(图 10)可以看出:隧道在穿越断层破碎带后,应力会产生不同程度的回升,从特大断层至小断层,经过断层破碎带后应力依次回升 94.2%, 88.4%, 34.6%, 26.8%.穿越断层破碎带产生的低应力区的范围大小也不尽相同,特大断层隧道的过断层处低应力区沿着隧道延伸方向仅有 4 m 的长度,而大、中、小断层隧道则分别有 14, 23, 38 m,可以发现随着断层落差增大,穿越断层破碎带前后应力变化不单是数值上前后差异大,在施工过程中变化速度也会更快.过断层破碎带后,隧道各处的主应力基本都比前部分隧道的主应力低,主要原因是断层破碎带密度比一般岩土体低,给下覆岩体产生的应力也较低,所以在断层覆盖阶段的隧道各处应力都有所降低.

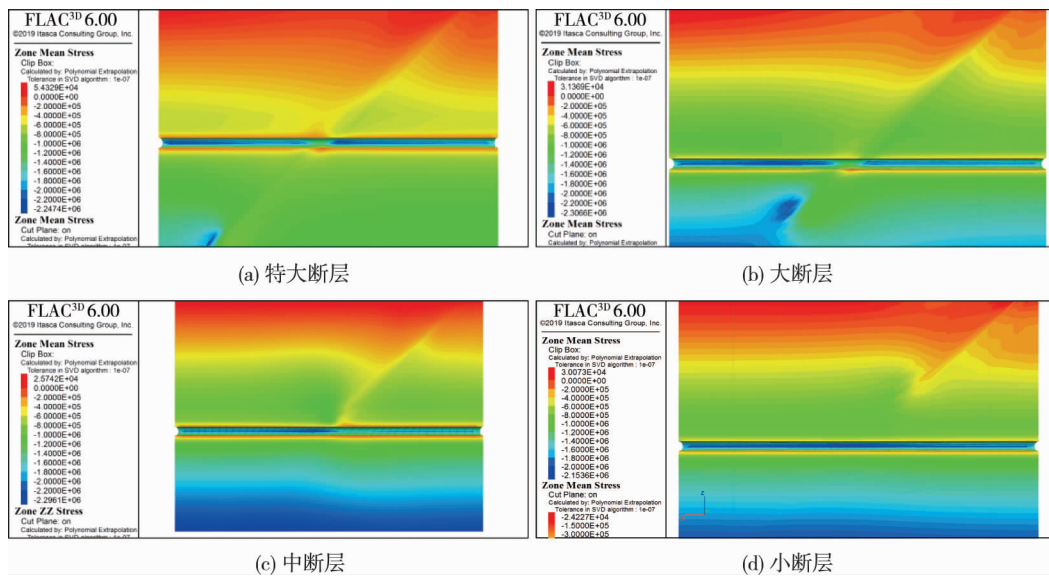


图 10 断层贯通阶段主应力云图

3 结论

1) 隧道开挖前,断层两侧由于应力传递产生的卸荷作用导致在断层破碎带附近的初始地应力产生一定的波动;隧道开挖过程中,顶板会向下位移,仰拱向上隆起,应力集中在左右两侧边墙上;断层破碎带段

的隧道围岩应力较非破碎带段围岩应力大大降低,围岩变形也较隧道其他位置更大。

2)随着断层落差的增大,隧道与断层耦合作用下的影响范围更广,隧道开挖对周围土体扰动导致围岩形变、位移的范围也越大。且隧道产生大变形的区域会更加集中,主要集中在断层破碎带段,位移量也更大。隧道应力随着断层落差的增大而分布得更不均匀,在隧道开挖过程中,应力变化幅度更大且变化迅速,对隧道开挖安全性和隧道稳定性有很大的影响。

参考文献:

- [1] BAGIO C A, RIFA'I A, ISMANTI S. Tunnel stability in fault zone base on 3D numerical simulation[C]// IOP Conference Series:Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021,871(1):012052.
- [2] XUE Y, ZHOU B, WU Z, et al. Mechanical properties of support forms for fault fracture zone in subseattunnel[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020,56:436-444.
- [3] 雷喜良.巷道过大型断层破碎带支护技术研究与应用[J].煤炭与化工,2020,43(7):21-25.
- [4] 唐浪洲,于丽,王玉锁,等.走滑断层错动量大小对铁路隧道结构安全影响的数值分析[J].现代隧道技术,2022,59(1):1-9.
- [5] 王伟,李小龙,宋彦琦.基于FLAC^{3D}的巷道分步开挖支护稳定性模拟研究[J].矿产勘查,2020,11(9):2045-2052.
- [6] 骆禹锦,李学军,曾开华,等.马蹄形截面隧道施工模拟与洞壁位移影响因素[J].南昌工程学院学报,2021,40(4):35-40.
- [7] 岳向红,杨永波,李祺,等.松软地层浅埋暗挖公路隧道现场监测分析研究[J].岩土力学,2010(S1):337-341.
- [8] 祁彬溪,王凡,陈捷翎.粘滑断层错动作用下穿越断层隧道结构响应数值模拟[J].建筑结构,2020,50(S2):753-758.
- [9] 何川,李林,张景,等.隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J].岩土工程学报,2014,36(3):427-434.
- [10] BAZIAR M H, NABIZADEH A, KHALAFIAN N, et al. Evaluation of reverse faulting effects on the mechanical response of tunnel lining using centrifuge tests and numerical analysis[J]. Geotechnique, 2020,70(6):490-502.
- [11] 常建强,张继华,朱鞠兵.基于FLAC^{3D}的隧道断面形状优化与支护技术研究[J].西部交通科技,2019(12):76-80.
- [12] 宿文姬,李子生.工程地质学[M].广州:华南理工大学出版社,2006.
- [13] 沈明荣,陈建峰.岩体力学[M].上海:同济大学出版社,2015.