

跨软弱夹层隧道开挖扰动应力与变形特征分析

王 智¹, 黄承忠², 江立群¹

(1. 中机中联工程有限公司, 重庆 400039; 2. 重庆中煤科工工程技术咨询有限公司, 重庆 400042)

摘要:随着中国超长隧道的建设,难免会穿越不同构造地层以及一些软弱夹层、断层。软弱夹层本身是一种结构松散、力学性能弱、易变性强存在不同岩层之间的弱性地质结构,在隧道施工过程中,开挖扰动对原岩造成了应力重分布,使得软弱夹层处在不稳定或欠稳定状态,对隧道施工安全具有潜在威胁。因此,通过三维数值计算分析的方法,对跨软弱夹层隧道开挖扰动过程中结构不同部位的应力分布规律以及变形规律进行分析,基于应力、位移分布特征对隧道施工过程提出针对性支护措施,为隧道开挖稳定性研究提供参考。

关键词:软弱夹层;隧道;开挖扰动;应力分布;变形规律

中图分类号:U455.91 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)05-0228-06

随着中国交通事业的持续发展,铁路、公路网络的进一步扩大与健全,在建设过程中穿越地下的隧道工程也越来越多,面临的施工问题也越来越复杂。尤其以近几年西部大开发,川藏铁路、秦岭隧道等世纪工程的开工建设,使西部地区复杂的地质构造问题为工程带来的不确定因素在工程界备受关注。苏玥等^[1]以上海市以轨道交通 14 号线桂桥路车站渡线段为工程依托,将上海软土精细化本构模型用于暗挖法施工数值模拟中,研究了基于上海软土模型的暗挖法隧道施工位移、应力、应变等力学特性。杨建华等^[2]采用薄板振动理论模型、离散元程序以及现场试验的方法,研究了爆破振动对喷射混凝土造成空洞的原因,分析了空洞处喷射砼的振动特性并评价了空洞与爆破振动对隧道的安全性。杨光华等^[3]对采用钢筋混凝土内衬与盾构组成复合衬砌的长距离输水盾构隧洞围岩与衬砌共同承受水压力的受力进行了简化分析,表明衬砌的弹性模量越高,衬砌具有更好的承载能力。包特门白乙拉等^[4]研究了不同形式下单侧壁扩建方式对在建隧道围岩受载特征的影响,分析了围岩结构的变形规律,提出了有针对性的支护方案与施工方案。张雨昊^[5]依托霞美村隧道下穿泉州绕城高速公路工程,分析了台阶法、三台阶法、中隔墙台阶法之间的共同点与差异性,从而结合成本、经济效益等方面选择了最优的开挖方式。关于断层对隧道活动的破坏,国内学者也展开了相应的研究。徐前卫等^[6]通

过室内试验的方式以山区隧洞常见的Ⅳ级围岩为参照对象,研究了断层隧洞在施工过程中围岩的渐进破坏。Cai 等^[7]采用室内模型试验研究了正断层环境下隧道的变形机理和不同断层位置的隧道对地表沉降的诱发机制。Kiani 等^[8]进行了一系列的室内物理模型试验研究,分析了断层作用下浅埋隧道的错断机制,并探讨了地表塌陷空洞的机理。

数值模拟方法在工程分析中应用越来越广泛。在岩土工程中常用的 FLAC^{3D} 数值分析软件备受学者的青睐。李望成等^[9]依据三峡库区水位升降的特点,针对典型区段消落带岩石开展室内干湿循环试验,得到消落带岩石的力学参数,利用 FLAC^{3D} 进行了三峡库区消落带边坡的稳定性分析。王小平等^[10]通过 FLAC^{3D} 模拟计算了桩基施工过程中联合国海洋平面观测站(验潮井)变形与内力变化。王永东等^[11]为研究连拱隧道无中导洞法施工活动对隧道先后行洞的影响程度,以陈家滩隧道为研究对象,通过数值模拟研究了不同间距下先后行洞的影响范围、先后行洞的影响程度以及中隔墙的倾覆趋势。汤雷等^[12]采用 FLAC^{3D} 对白山嘴隧洞的混凝土衬砌厚度对结构的安全稳定性进行了计算分析,结果表明不考虑回填灌浆的作用时所计算的结构比考虑回填灌浆作用及弱面的收缩作用结果偏保守。柳彦军等^[13]依托云南玉磨铁路曼勒一号隧道工程,通过建立力学模型分析与施工现场试验,提出开挖迂回导坑释放高地应力的控制措施,降低隧道围岩大变形风险。Ghadime 等^[14]采用

收稿日期:2022-10-17

作者简介:王智(1987—),男,四川渠县人,中机中联工程有限公司,高级工程师,硕士,研究方向为岩土工程勘察设计及其管理;黄承忠(1983—),男,重庆人,重庆中煤科工工程技术咨询有限公司,正高级工程师,硕士,研究方向为岩土工程勘察设计及审查;江立群(1984—),男,四川开江人,中机中联工程有限公司,高级工程师,硕士,研究方向为岩土工程勘察、设计、咨询及审查。

数值模拟方法研究了逆断层错动作用对隧洞的影响,基于有限元模型,研究了断层-隧洞交角、隧洞周围土体力学性质对穿越断层隧洞错断响应特性的影响。曹原等^[15]通过数值模拟软件模拟计算了统交叉中隔墙工法隧道开挖施工穿越地裂缝场地全过程,分析了开挖方向、隧道埋深、隧道洞径以及隧道穿越地裂缝的角度 4 个因素对暗挖隧道穿越地裂缝场地施工地表沉降的影响。

本文依托中国西南某高速公路工程,对隧道穿越含软弱夹层的某区间段采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对该区段隧道施工开挖扰动过程中,隧道结构不同部位的应力分布规律以及变形规律进行研究,分析软弱夹层对隧道稳定性的影响,以为隧道施工扰动动态分析提供新思路,同时也为支撑支护结构形式与支护时机的选择提供依据。

1 跨软弱夹层隧道工程概况及模型

1.1 工程概况

以贵州某高速公路线路为例,全线共有隧道 9 855 m(9 座),其中特长隧道 3 124 m(1 座),长隧道 4 782 m(3 座),短隧道 1 949 m(5 座),隧道占路线总长的 19.57%。因高速公路线路走向需要,隧道不可避免地在岩溶山区穿越断层破碎带(均为 V 级围岩),从岩体结构类型来考虑,断层破碎带围岩呈现碎裂结构岩体和散体结构岩体,是一种特殊的软岩。施工现场及纵断面如图 1 所示。

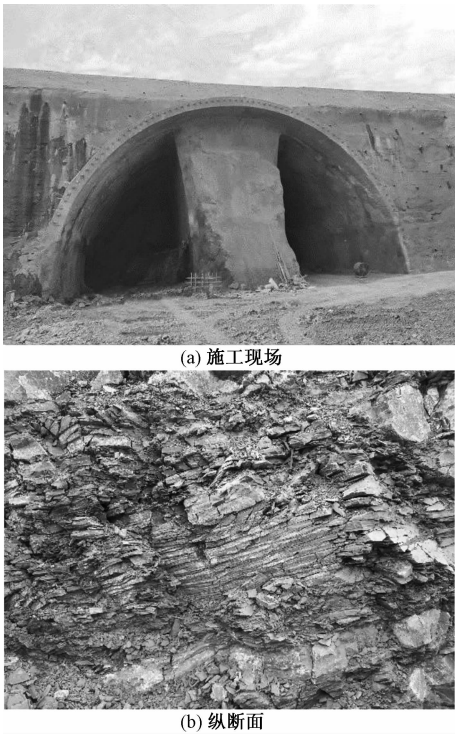


图 1 施工现场及纵断面

1.2 数值计算模型

根据上述工程概况,对隧道穿越断层段进行概化处理,划分研究区域如图 2 纵断面。采用 FLAC^{3D} 有限差分软件对研究区域进行三维数值模型的建立,如图 3 所示。隧道最宽处为 8.6 m,为了提高计算效率减小模型的边界效应,选取隧道周围长 60 m,宽 80 m,高 100 m 范围进行建模,模型单元体均采用 6 面体,共 172 710 个单元体,118 883 个节点,对模型的 4 个侧面和底面进行法向约束。

计算过程中,采用摩尔-库仑本构模型,计算所用基本力学参数根据地勘报告获得,取值见表 1。

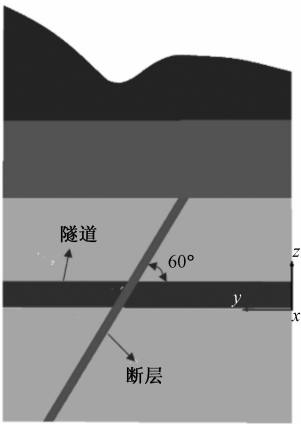


图 2 纵断面示意图

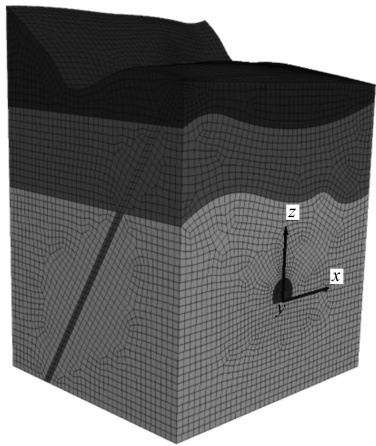


图 3 数值计算模型

表 1 地层基本力学参数

地层	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比
T_3z^{2-3} III ₁	1 950	8.22	1	23.10	0.28
T_3z^{2-4} IV	2 300	14.47	1.05	26.12	0.26
T_3z^{2-5} III ₂	2 600	22.42	0.7	31.86	0.23
断层 V	2 250	15.32	1.2	18.32	0.25

根据初步设计施工方案,隧道开挖采用环形开挖预留核心土的方式,初步设计第一次开挖进尺为 12 m,后续开挖每次进尺为 8 m,整个模型分 8 次开挖完成。在隧道开挖掌子面的拱顶、拱腰及底板设置监测点,分别监测其应力与变形,共设置了 8 个掌子面的监测点,前 5 个监测点之间的间距为 2 m,最后一个监测点距离前一个监测点距离为 4 m,开挖及监测示意图如图 4 所示。为了分析开挖过程围岩应力二次重分布及断层对开挖扰动的影响,为后续施作衬砌支护提供依据,在计算过程中模型未考虑衬砌支护工况。

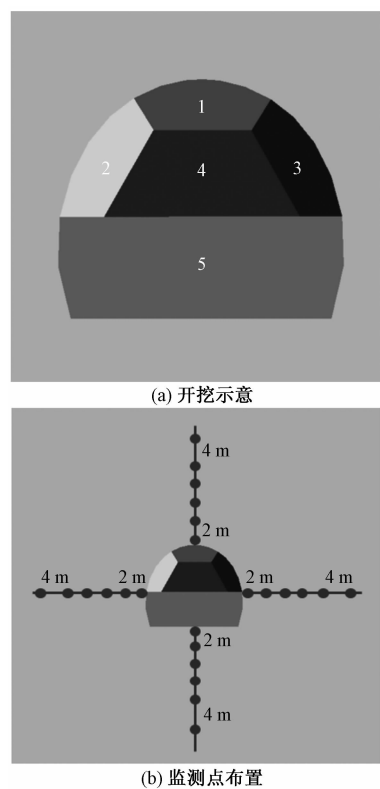


图 4 开挖及监测点布置示意图

2 隧道围岩二次应力场与变形分析

2.1 围岩应力分布

在隧道开挖过程中由于扰动改变了岩体的原岩应力,使得岩体中的应力进行了重新调整达到稳定平衡。显然,在设计隧道后期衬砌支护结构需要全面掌握隧道开挖掌子面的应力分布规律。为了研究掌子面推进过程中,未开挖与已开挖区域围岩的应力变化过程,以断层所在开挖进尺为标准面分析了掌子面推进过程中最大主应力与最小主应力的变化规律。

图 5、图 6 分别为各进尺开挖完成时断层所在掌子面最大主应力与最小主应力的变化曲线,由于

篇幅原因本文选取了 43.5 m 监测面的数据分析。由图 5 与图 6 可知,无论是最大主应力还是最小主应力在离开挖扰动区域越远的地方其应力值逐渐减小。在持续开挖过程中,围岩应力调整比较明显。一般在隧道刚开挖应力发生调整,但调整值不明显。在监测掌子面前一次开挖进尺掘进时应力有逐渐增大的趋势,在掌子面经过监测断面时调整最明显,经过监测掌子面一个开挖进尺后,基本调整完毕。刚开挖的较短时间内是围岩受力破坏的关键阶段,在这个阶段岩石原岩应力释放最大,应力二次重新分布最为明显。因此,开挖过程中,要短进尺开挖,及时做好支护措施。

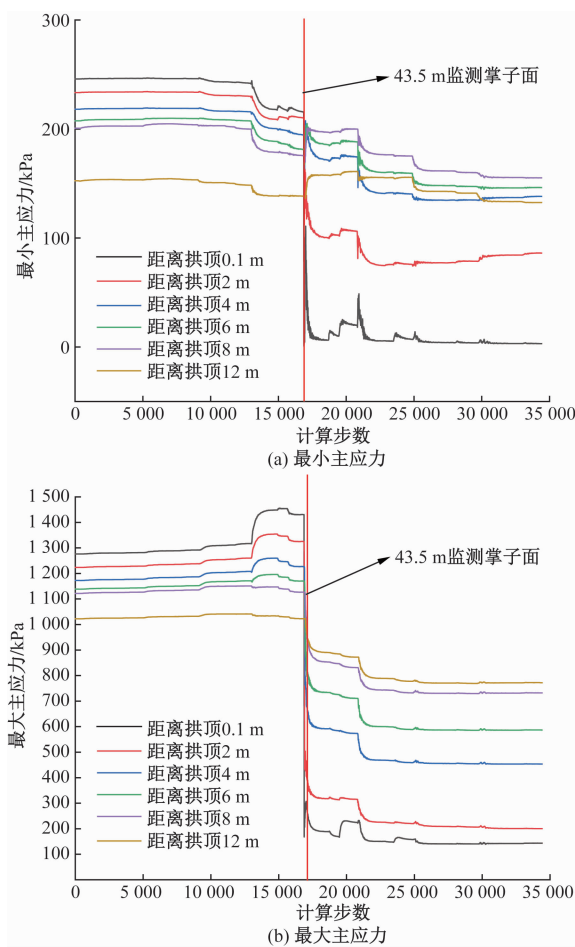


图 5 掌子面推进过程 43.5 m 监测断面拱顶应力变化

图 7 为 43.5 m 监测断面主应力云图。由图 7 可知,在隧道开挖过程中最大主应力主要集中在拱顶与仰拱的位置,同样,最小主应力主要分布在拱顶与仰拱位置,但拱肩也有应力集中现象。无论是最大主应力与最小主应力云图,在断层存在的位置均对应力产生了阻断作用,在断层处应力云图发生了突变,表明断层对隧道开挖存在潜在威胁,在施

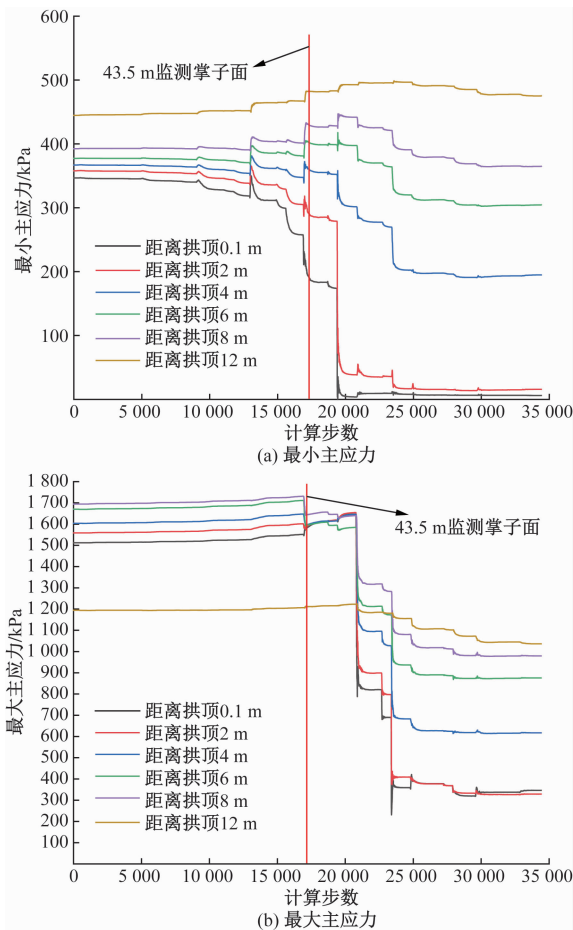


图 6 掌子面推进过程 43.5 m 监测断面仰拱应力变化

工开挖中应加强监测与支护。

2.2 位移分布规律

图 8 与图 9 分别为掌子面推进过程 25.5、43.5 m 监测断面 Z 向位移。

由图 8、图 9 可知,在开挖过程中隧道拱顶发生了向下沉降的变形,而仰拱位置主要以土体向上隆起为主。当开挖掌子面在监测面前面时一般在一个开挖进尺内对监测面造成了明显的变形;当开挖掌子面通过监测面时,监测面发生较大变形,顶拱与仰拱的增量分别约超过了 1.5 cm 与 1 cm;当开挖掌子面通过监测面之后,顶拱与仰拱的竖直向变形依然呈现增长趋势,在一个开挖进尺内增长趋势明显,但随着开挖掌子面离监测面越来越远,监测面的变形逐渐趋于稳定。

图 10 为隧道开挖完成后含断层进尺的 Z 向位移云图。由图 10 可知,断层所在进尺拱顶的位移比仰拱的位移大,两者的变形方向相反。顶拱处软弱夹层的位移达到 3.87 cm,仰拱处软弱夹层位移为 4.59 cm,相对于地层内隧道的变形要大。因此,在穿越软弱夹层开挖时,应减小开挖进尺,开挖完成

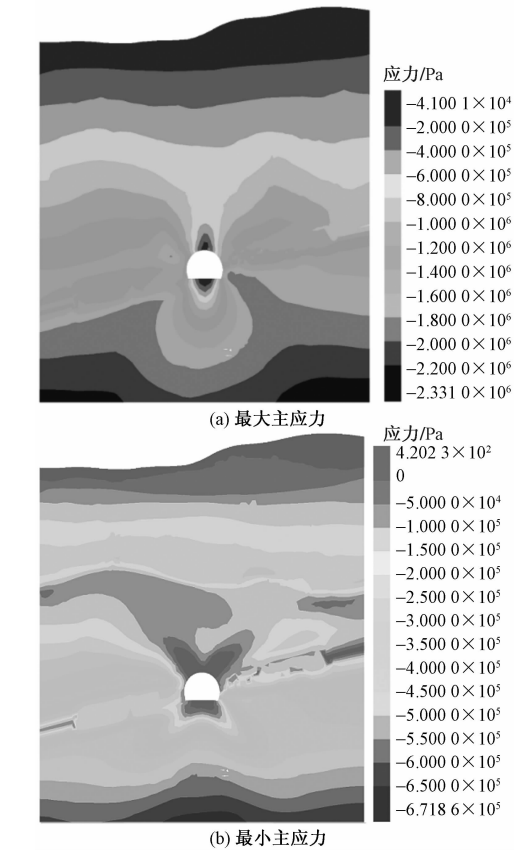


图 7 43.5 m 监测断面主应力云图

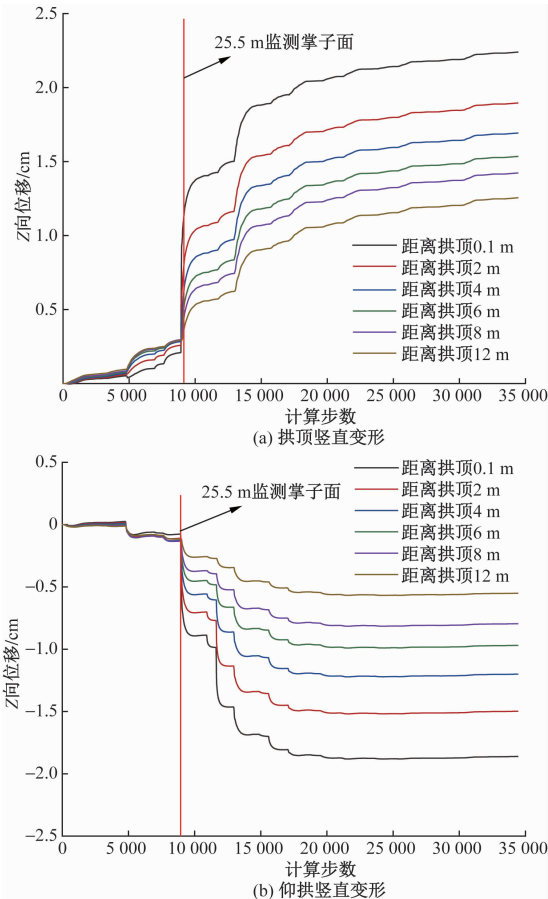


图 8 掌子面推进过程 25.5 m 监测断面 Z 向位移

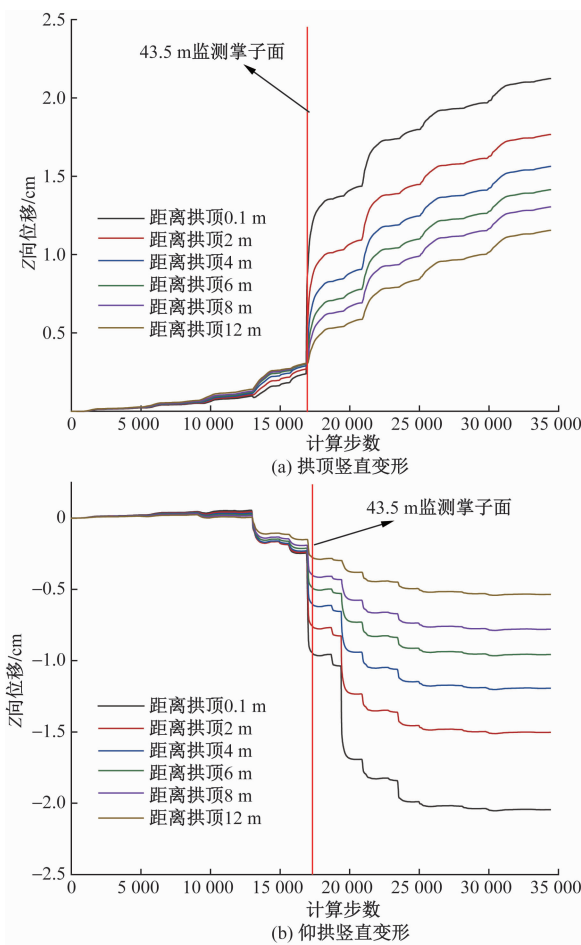


图 9 掌子面推进过程 43.5 m 监测断面 Z 向位移

后快速施作衬砌支护,控制软弱夹层变形,防止软弱夹层发生灾变。

3 结论

本文以隧道穿越软弱夹层的实际工程为背景,采用 FLAC^{3D}建立跨软弱夹层隧道开挖三维模型,模拟环形开挖预留核心土的开挖方式,分析了断层所在截面的应力分布规律与变形规律,主要得到以下结论:

- 1)隧道开挖过程中,离开挖扰动区越远的地方应力与变形受到的扰动作用越小,表明围岩破碎程度越小甚至未发生破坏。断层对应力有阻断作用,使应力产生突变且变形明显增大,表明有集中应力产生。
- 2)在洞室连续开挖过程中,随着开挖掌子面越靠近监测面,监测面上除拱顶最小主应力略有降低外,仰拱最大、最小主应力,拱顶最大主应力均变大。当开挖掌子面通过监测断面时,仰拱最大(最小)主应力、顶拱最大(最小)主应力均出现大幅度降低,表明在开挖掌子面附近岩体出现了应力集中现象。

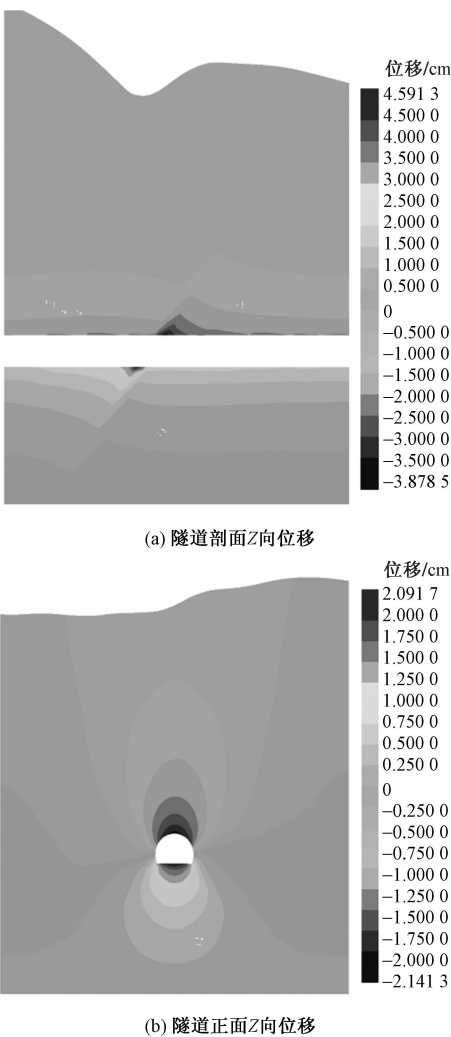


图 10 含断层进尺的 Z 向位移云图

3)在跨软弱夹层隧道开挖过程中,应减小每次开挖进尺,勤监测,待开挖完成后快速施作衬砌支护。

参考文献

[1] 苏玥,叶斌. 基于上海软土模型暗挖法隧道施工的力学特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 11137-11146.

[2] 杨建华,黄启欢,姚池,等. 空洞对隧道喷射混凝土爆破振动特性及安全评价的影响研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1401-1411.

[3] 杨光华,贾恺. 岩石围岩盾构钢筋混凝土内衬高内压输水隧洞受力简化分析方法[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(5): 1-10.

[4] 包特门白乙拉,杨伟光,傅鹤林,等. 不同形式单侧壁扩建下在建隧道受荷差异性研究[J]. 科技通报, 2022, 38(8): 103-109.

[5] 张雨昊. 复杂环境下大断面浅埋隧道下穿高速公路施工工法及工艺探讨[J]. 四川建筑, 2022, 42(4): 85-88.

[6] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等. 跨断层隧道围岩渐进性破坏

- 模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3):5-17.
- [7] CAI Q P, PENG J M, CHARLES W W N, et al. Centrifuge and numerical modelling of tunnel intersected by normal fault rupture in sand[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111:137-146.
- [8] KIANI M, AKHLAGHI T, GHALANDARZADEH A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51:108-119.
- [9] 李望成, 冉益铭. 利用 Flac3D 进行库区消落带边坡稳定性研究[J]. 科学技术创新, 2020(35):122-123.
- [10] 王小平, 李勇斐, 冉益铭. 桩基施工对验潮井变形与内力影响数值分析[J]. 科技和产业, 2021, 21(2):196-206.
- [11] 王永东, 柏文军, 陈媛媛, 等. 无中导洞连拱隧道掌子面纵向间距优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21):9355-9363.
- [12] 汤雷, 王宏. 白山嘴隧洞顶拱衬砌厚度不足对结构性态影响研究[J]. 水利学报, 2007(S1):106-110.
- [13] 柳彦军, 刘家奇, 徐继保, 等. 高地应力富水软岩铁路隧道变形机理及施工控制措施[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21):9364-9371.
- [14] GHADIMI C A, TAHHIGHI H. Numerical finite element analysis of underground tunnel crossing an active reverse fault: a case study on the Sabzkouh segmental tunnel[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2019, 3(14):1-12.
- [15] 曹原, 黄强兵, 康孝森, 等. 地裂缝场地隧道暗挖地表沉降影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6):2226-2236.

Stress Characteristics and Disturbance Analysis of Cross Weak Interlayer Zone Tunnel Excavation

WANG Zhi¹, HUANG Chengzhong², JIANG Liqun¹

(1. CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400039, China;
2. Chongqing CCTEG Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Chongqing 400042, China)

Abstract: With the construction of Super long tunnel, different structural strata as well as some weak interlayers and faults inevitably pass through. The soft interlayer itself is a kind of weak geological structure with loose structure, weak mechanical properties and strong variability between different layers. In the process of tunnel construction, excavation disturbance causes stress redistribution to the original rock, which makes the weak interlayer in unstable, which has potential threat to the safety of tunnel construction. Therefore, by using the method of three-dimensional numerical analysis, tunnel excavation disturbance across the weak intercalated structure stress distribution and deformation law of different parts are analyzed. Based on the characteristics of stress and displacement distribution, targeted support measures are put forward for the tunnel construction process, and provides a reference value for the study of the stability of tunnel excavation.

Keywords: weak interlayer zone; tunnel; excavation disturbance; stress distribution; deformation law