

重叠隧道先挖扰动作用对后挖加固效用的影响^{*}徐前卫¹ 蒋承志¹ 叶颜伟² 余航飞¹ 袁枫杰² 覃 早² 张 骏³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 中铁二局第五工程有限公司, 610091, 成都; 3. 沪宁城际铁路股份有限公司, 210024, 南京)

摘 要 [目的]在超近距离上下重叠隧道工程中,先挖隧道会导致围岩发生难以预测的损伤,进而影响后挖隧道的顺利施工,增大工程建设难度。因而有必要研究重叠隧道施工过程中先挖隧道对后挖隧道的影响效应。[方法]依托重庆市某隧道工程,采取数值模拟的方法比较分析了先挖的下层隧道开挖引起的围岩的应力分布规律及变形特征,并根据上层隧道在不同工况下的受力特征和变形规律,分析了锚杆加固措施的变形控制效果与下层隧道开挖产生的围岩弱化效应之间的关系。[结果及结论]下层先挖隧道施工引起拱顶区域沉降,最大沉降量为 4.1 mm;拱底区域隆起,最大隆起量为 6.9 mm;根据围岩应力分布变化程度及等效塑性应变范围,下层隧道围岩的松动区域等效为圆形范围,且松动圈平均厚度为 2.5 m;上层隧道的开挖卸荷会引发下层隧道上浮;对下层隧道松动圈围岩采取锚杆加固措施后,对应围岩的强度折减系数为 0.70~0.75。

关键词 隧道工程; 围岩扰动; 变形加固; 数值模拟

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.041

Disturbance Action of First Excavation on Reinforcement Effect of Later Excavation in Layered Tunnels

XU Qianwei¹, JIANG Chengzhi¹, YE Yanwei², YU Hangfei¹, YUAN Fengjie², QIN Zao², ZHANG Jun³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. China Railway Erju No. 5 Engineering Co., Ltd., 610091, Chengdu, China; 3. Shanghai-Nanjing intercity railway Co., Ltd., 210024, Nanjing, China)

Abstract [Objective] In the ultra-close layered tunnel construction, the preceding excavated tunnel can cause unpredictable damage to the surrounding rock, which will affect the smooth construction of the following tunnel and increase the difficulties of engineering construction. Therefore, it is necessary to study the effect of the preceding tunnel on the following ones in the layered tunnel construction. [Method] Based on a

tunnel project in Chongqing, a numerical simulation method is used to compare and analyze the stress distribution patterns and deformation characteristics of the surrounding rock caused by the preceding excavation of the lower layer tunnel. According to the stress characteristics and the deformation law of the upper layer tunnel under different working conditions, the relationship between the deformation control effect of the anchor rod reinforcement measures and the weakening effect of the surrounding rock caused by the lower layer tunnel excavation is analyzed. [Result & Conclusion] The preceding excavation of the lower layer tunnel causes the vault area settlement with a maximum of 4.1 mm and the arch bottom area bulging with a maximum of 6.9 mm. According to the variation intensity of the stress distribution and the equivalent plastic strain range of the surrounding rock, the loosening area of the lower layer tunnel surrounding rock is equivalent to a circular range, and the average thickness of the loosening circle is 2.5 m. The excavation unloading of the upper layer tunnel will cause the lower layer tunnel upfloating. After the anchor rod reinforcement measures are taken for the surrounding rock in the lower layer tunnel loosening circle, the strength coefficient of the corresponding surrounding rock is reduced to 0.70~0.75.

Key words tunnel engineering; surrounding rock disturbance; deformation reinforcement; numerical simulation

0 引言

近年来,我国铁路建设向中西部延伸的过程中,涌现了大量的隧道工程。隧道的开挖会对周围岩体产生一定扰动和损伤,使得周边围岩整体稳定性降低。这种扰动效应在遇到超近接上下交叠隧道先后开挖的复杂工况时,表现得尤为显著。因此,有必要深入分析先挖隧道对地层的扰动效应对后挖隧道的影响,并在此基础上研究和评估不同支护加固措施及其加固控制效果。

^{*} 国家自然科学基金重点项目资助项目(41130751)

针对隧道开挖引起的围岩损伤扰动及其对周边的环境影响,国内外学者已开展了大量研究工作。文献[1]通过理论分析和电镜扫描实测,研究了软弱地层隧道开挖松动圈变化情况,估测出该巷道松动圈直径约为2 m;文献[2]通过理论分析得到隧道围岩松动范围的解析解,提出随着软化模量的增大,隧道围岩松动区与塑性区半径也随之增大,并结合具体算例得出破裂区半径为4.74 m和4.62 m;文献[3]采用有限元方法,研究了围岩隧道开挖围岩破坏区分布及隧道围岩的折减参数对隧道设计的影响。

上述研究表明,隧道开挖会引起围岩损伤及岩体强度的改变,但大多集中在矿山工程领域。虽然关于新建隧道邻近既有隧道的扰动影响研究颇多,但主要以“荷载-结构”法为研究基础。文献[4]研究软土地基中新建隧道开挖卸荷对下卧既有隧道结构变形的影响,推导出了既有隧道结构纵向变形的黏弹性解答;文献[5]通过数值模拟的方法分析了双向四洞隧道过渡段的空间变形受力特性,得到了围岩和结构的变形规律,以及最不利区域。

然而,在实际工况中,上下重叠隧道非同步开挖的案例并不常见,且相关研究较少。对此,本文依托重庆某上下重叠隧道工程,采取数值模拟方法分析了先挖隧道施工对围岩的弱化影响以及围岩损伤程度和岩体加固效果之间的对应关系,通过分析后挖隧道的受力特性和变形特征,并比较不同围岩弱化程度下土体扰动与锚杆等效加固效果,从而定量得到隧道开挖扰动区围岩加固后相对于原始强度的弱化效应系数。

1 工程概况

1.1 工程简介

重庆铁路枢纽东环线(以下简称“东环线”)的芭蕉沟隧道及鸡公咀隧道为我国首例上下层超近接的重叠隧道,铁路隧道。隧区地层为单斜构造,地质构造复杂,不良地质发育。全隧道围岩等级均为Ⅳ级和Ⅴ级。其中,Ⅳ级围岩属于软弱围岩,其长度为75.63 m,占上下层隧道全长(852.72 m)的8.87%隧道平面关系如图1所示。芭蕉沟隧道及鸡公咀隧道上下重叠隧道分别位于明月峡长江特大桥两端,本文主要以芭蕉沟隧道为例开展相关研究。

芭蕉沟上下重叠隧道的下层为东环线正线隧道,上层为预留高铁隧道,拱顶最大埋深为149.12

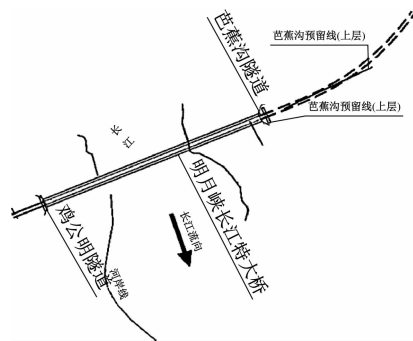
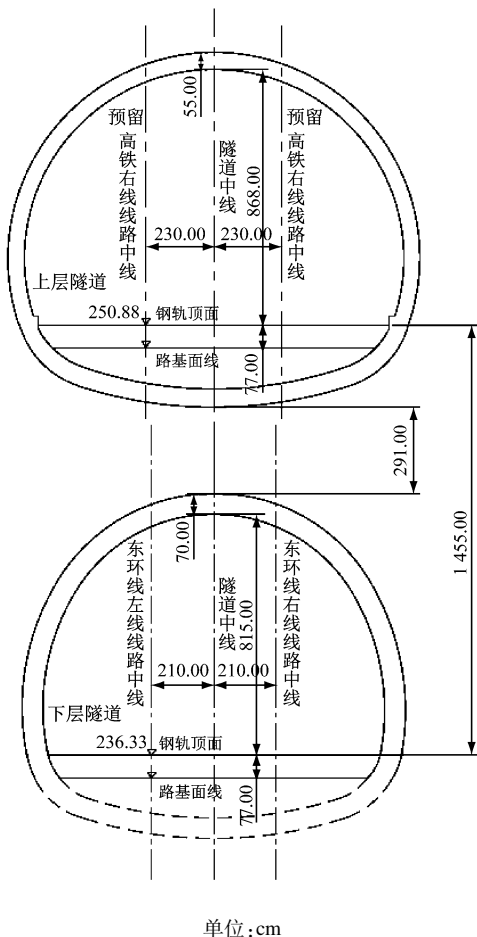


图1 上下重叠隧道平面示意图

Fig.1 Schematic plan of superimposed tunnels

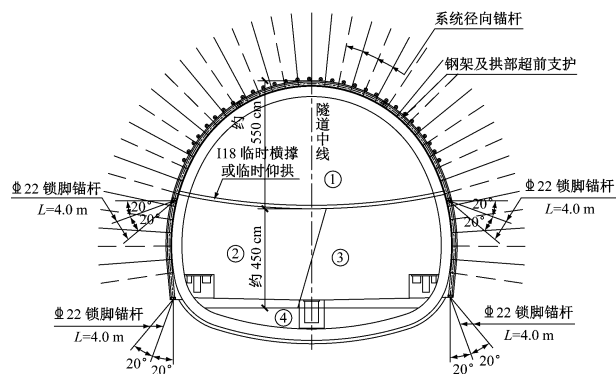
m,中心里程为DK66+046.75,全长2 042.42 m。本次施工段长448.00 m,里程为DK65+052—DK65+500,最大埋深为130.16 m。DK65+088里程附近的上下层隧道完全重叠,相对位置关系如图2所示。根据设计资料,上、下层隧道均采用台阶法加临时横撑开挖,图3为下层隧道的施工示意图。



单位:cm

图2 芭蕉沟隧道DK65+088处上下隧道相对位置关系图

Fig.2 Diagram of relative position relationship between upper and lower tunnels at DK65+088 of Bajiaogou Tunnel



注:锁脚锚杆长度均为 4.0 m;Φ22 表示直径为 22 mm 的三级钢筋;
①—④为开挖分部。

图 3 台阶法加临时横撑的隧道施工示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tunnel construction with step method and temporary transverse bracing

1.2 工程地质条件

隧区上覆第四系全新统人工填筑土(Q_4^{ml})、坡残积层(Q_4^{dl+el})粉质黏土<4-1>。下伏基岩为侏罗系下统珍珠冲组(J1z)泥岩夹砂岩<12-1>、三叠系上

统须家河组(T3xj)砂岩<13-1>及页岩<13-2>等,未见断裂构造,节理裂隙较发育,隧道地质剖面示意图如图 4 所示。隧道所在区域的主要土体物理力学参数如表 1 所示。

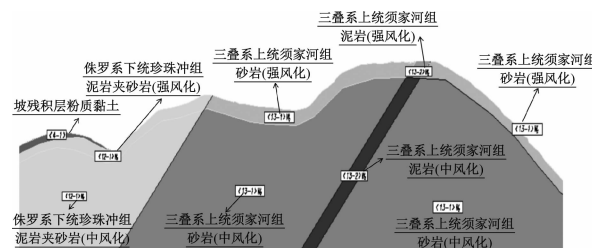


表2 围岩及结构单元计算参数表

Tab.2 Table of surrounding rock and structural unit calculation parameters

计算单元	材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg/m ³)
围岩	V级围岩	1.65	0.42	26.00
初期支护	C25 混凝土	28.00	0.20	25.00
二次衬砌	C35 混凝土	31.51	0.20	25.00
钢拱架及锚杆	钢材	200.00	0.25	78.50

表3 计算施工步骤表

Tab.3 Table of calculation and construction sequence

步骤	施工内容	说明
步骤1	初始应力场分析	应力分析,位移清零
步骤2	开挖上台阶土	开挖上台阶,并施作初期支护与横撑
步骤3	开挖中台阶左侧土	开挖中台阶土,并施作初期支护
步骤4	开挖中台阶右侧土	开挖中台阶土,并施作初期支护
步骤5	开挖下台阶土	开挖下台阶土,并施作初期支护
步骤6	施作二次衬砌	拆除横撑,施作二次衬砌

2.4 计算结果分析

2.4.1 隧道竖向位移

下层隧道施工完成后的隧道结构及围岩竖向位移云图如图6所示。

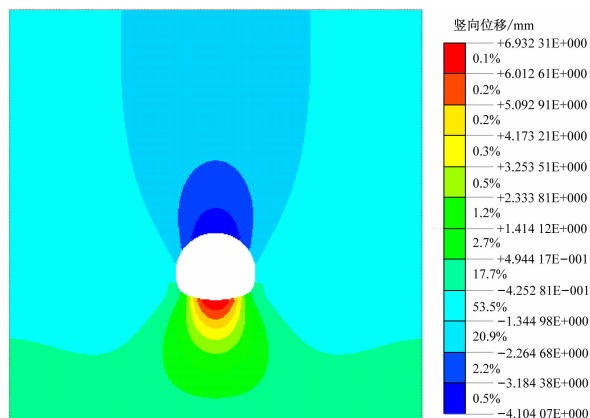


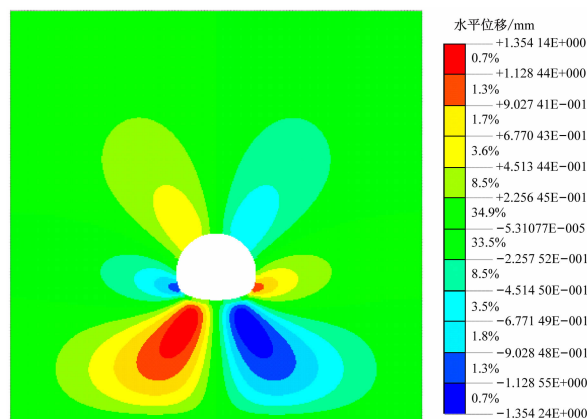
图6 下层隧道施工完成后的竖向位移云图

Fig.6 Vertical displacement cloud map after the completion of the lower tunnel construction

由图6可知:竖向位移主要发生在隧道拱顶与拱底;隧道拱顶上方存在呈竖向椭圆形的显著沉降区域,沉降区域高度约为 $0.2D$ (隧道洞径净高度 $D=14.3\text{ m}$),最大沉降量为 4.1 mm ;在隧道拱底下方存在显著上隆区域,该区域呈竖向椭圆形,隆起区域深度约为 $0.175D$,最大隆起量为 6.9 mm 。可见,沉降影响范围大于隆起影响范围。

2.4.2 隧道水平位移

下层隧道施工完成后的围岩及隧道结构的水平位移云图如图7所示。



注:水平位移以向右为正,向左为负;下同。

图7 下层隧道施工完成后水平位移云图

Fig.7 Horizontal displacement cloud map after the completion of the lower tunnel construction

由图7可知:隧道拱腰和拱底附近区域发生明显收敛变形;当下层隧道施工完成后,左右最大水平位移均为 1.35 mm ,呈左右对称分布。

2.4.3 围岩最大主应力

下层隧道施工完成后的围岩最大主应力如图8所示。由图8可知:隧道周围岩体均为受压,隧道拱脚附近出现应力集中现象,最大主应力为 1.38 MPa 。

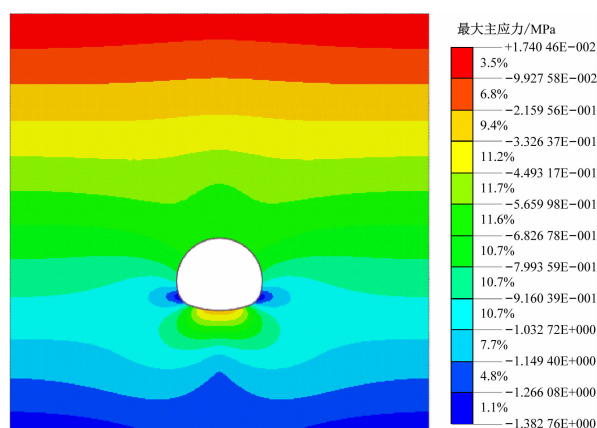


图8 施工完成后的围岩最大主应力云图

Fig.8 Maximum principal stress cloud map of the surrounding rock after the completion of construction

2.4.4 等效塑性应变分布

下层隧道开挖完成后的围岩等效塑性应变云图如图9所示。由图9可知,隧道左、右拱腰岩体受开挖扰动影响,在拱腰区域出现了小范围塑性变形。

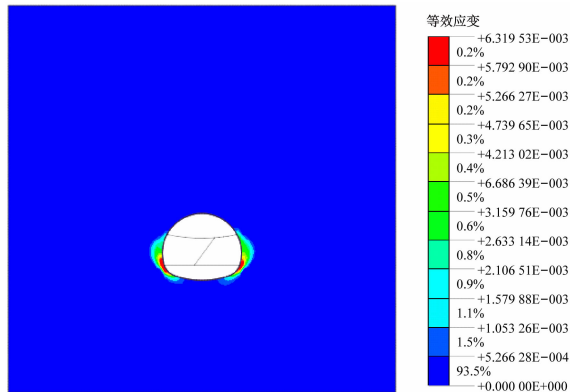


图9 下层隧道开挖完成后的围岩等效塑性应变云图

Fig. 9 Cloud map of surrounding rock equivalent plastic strain after the completion of the lower tunnel excavation

2.5 隧道围岩开挖扰动效应分析

围岩松动圈由隧道开挖扰动产生。一般而言,围岩应力变化能反映围岩扰动,可作为确定松动圈的重要依据;此外,隧道开挖导致围岩发生弹塑性变形所对应的等效塑性应变,也是反映围岩扰动区范围的重要指标。因此,确定松动圈的包络范围应尽可能考虑围岩应力变化、塑性应变增量、围岩位移变形等因素,并可将围岩松动区域等效为圆形。根据 Kastner 公式^[6-7],可以近似认为松动区范围内土体处于塑性状态,而根据摩尔-库伦屈服准则,应力圆与库伦准则斜线相切时,岩体处于极限平衡状态,一旦受力超过这一强度则岩体发生破坏,进入塑性状态。由此,根据计算得到的等效塑性应变范围,并结合网格尺寸,可得到中下层先挖隧道松动圈平均厚度为 2.5 m。该松动圈厚度可以很好地将上述指标变化范围包络在内,能在最大程度上反映围岩松动区域,而且不至于过于夸大松动程度。考虑包络范围内存在一部分区域的扰动不显著情况,故范围选取偏于保守,相应的计算偏于安全,可以更好地保障实际施工安全。

下层隧道开挖扰动下,按围岩主应力及等效塑性应变的松动圈分别如图 10 和图 11 所示。

3 上层隧道的后挖扰动与加固效应

3.1 计算工况

下层隧道施工对周围岩体产生较大扰动,受损伤的围岩会对上层隧道施工产生不利影响。因此,在模拟上层隧道施工前,需要对松动圈围岩的强度进行折减。关于下层隧道围岩松动圈范围的强度

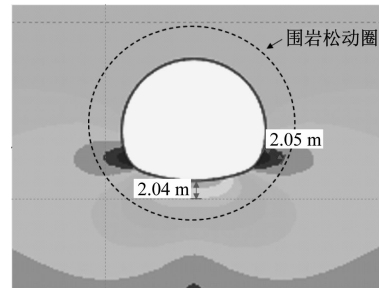


图 10 下层隧道开挖扰动下围岩主应力变化的松动圈

Fig. 10 Loose circle of the principal stress change in surrounding rock disturbed by lower tunnel excavation

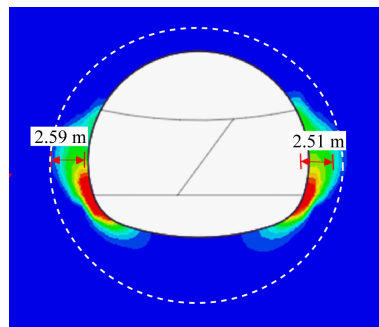


图 11 下层隧道开挖扰动下围岩等效塑性应变的松动圈

Fig. 11 Loose circle of the equivalent plastic strain in surrounding rock disturbed by lower tunnel excavation

折减系数可参考强度折减法通过反分析获取。在下挖隧道开挖支护完成后,对松散岩体的黏聚力和内摩擦角的正切值进行相同比例折减,通过对比围岩及结构的变形状态,得到一次开挖扰动并加固后的围岩强度指标。

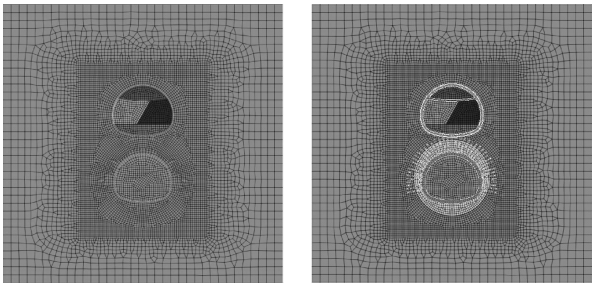
基于下层隧道松动圈,建立二维有限元计算模型,对各工况下的围岩变形及应力分布情况进行计算分析。有限元计算模型长 70 m,宽 70 m,上下重叠隧道最近距离仅为 4.56 m。具体计算工况见表 4。计算及分析过程为:首先,按工况 1 建立基准有限元计算模型(如图 12 a)所示,先开挖下层隧道且不采取加固措施(松动区参数不变),再进行上层隧道开挖,由此得到未采取加固措施(对照工况)下的上层隧道开挖引起的位移和应力分布规律;然后,根据 6 个含扰动围岩与加固处理分析工况(工况 2—工况 7),建立有限元计算模型(如图 12 b)所示,并按不同的强度折减系数 α 对洞周松动圈围岩进行弱化处理,同时考虑下层隧道按照实际施工进行锚杆支护;最后,通过比对“无加固措施、参数不弱化”和“有加固措施+参数弱化”情况下的隧道变形指标,探究下层隧道施工扰动后的围岩须采取

何种程度弱化。

表 4 有限元计算模型的计算工况

Tab. 4 Calculating conditions of finite element calculation model

工况	工况说明
工况 1	下层隧道无加固措施 + 上层隧道开挖 (对照工况)
工况 2	下层隧道采取锚杆加固 + α 为 0.95 + 上层隧道开挖
工况 3	下层隧道采取锚杆加固 + α 为 0.90 + 上层隧道开挖
工况 4	下层隧道采取锚杆加固 + α 为 0.85 + 上层隧道开挖
工况 5	下层隧道采取锚杆加固 + α 为 0.80 + 上层隧道开挖
工况 6	下层隧道采取锚杆加固 + α 为 0.75 + 上层隧道开挖
工况 7	下层隧道采取锚杆加固 + α 为 0.70 + 上层隧道开挖



a) 工况 1 b) 工况 2—工况 7

图 12 各工况的有限元计算模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the finite element calculation model in each case

3.2 围岩变形结果

3.2.1 工况 1 的围岩变形

图 13 为上下层隧道施工完成后工况 1 的围岩竖向位移云图。由图 13 可知:上层隧道拱顶围岩发生沉降,最大沉降量为 5.21 mm;上层隧道拱底围岩发生隆起,最大隆起量为 10.19 mm;下层隧道围岩主要变形为隆起,尤其是位于上下层隧道间的分隔

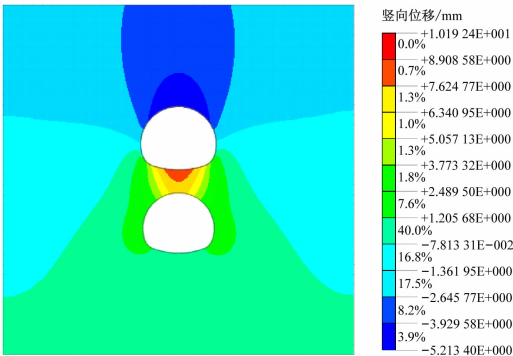


图 13 上下层隧道施工完成后工况 1 的围岩竖向位移云图
Fig. 13 Cloud map of surrounding rock vertical displacement after construction completion of the upper and lower tunnels in Case 1

岩体变形较大,这主要是由于上层隧道开挖卸荷所致。

上下层隧道施工完成后工况 1 的围岩水平位移云图如图 14 所示。上层隧道左拱腰处围岩向右位移为 5.05 mm,右拱腰处围岩向左位移为 4.70 mm。可见,与隧道左侧相比,隧道右侧的围岩水平变形量和收敛范围更大,这主要是由台阶法施工导致的。

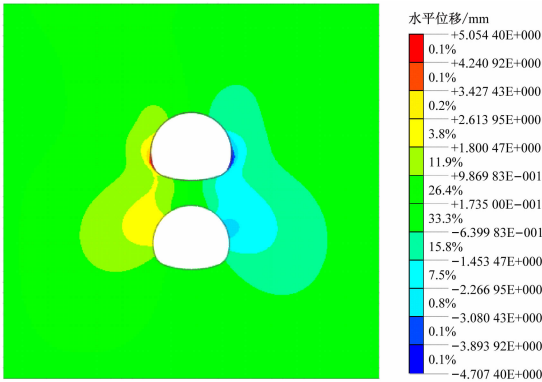


图 14 上下层隧道施工完成后工况 1 的围岩水平位移云图
Fig. 14 Cloud map of surrounding rock horizontal displacement after construction completion of the upper and lower tunnels in Case 1

3.2.2 围岩损伤和加固效果对应关系分析

因隧道结构与围岩紧贴,故隧道结构沉降反映了围岩的损伤情况。图 15 为上下层隧道施工过程中各工况的上层隧道结构拱顶沉降变化曲线。由图 15 可以看出:各工况的拱顶沉降均随着施工进度

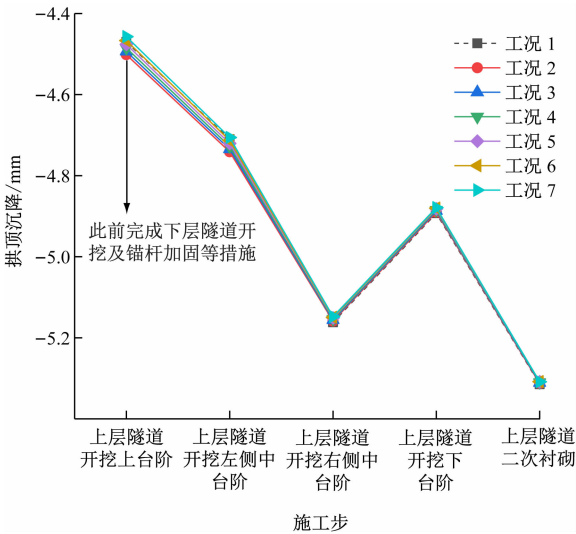


图 15 上下层隧道施工时各工况的上层隧道拱顶沉降变化曲线
Fig. 15 Curves of the upper tunnel arch top subsidence change in each case during construction of the upper and lower tunnels

缓慢增加,并趋于稳定,最终沉降为 5 mm 左右;各工况下的拱顶沉降曲线基本相近,说明松动圈对拱顶沉降影响较小。

图 16 为上下层隧道施工过程中各工况的上层隧道仰拱隆起变形变化曲线。各工况中仰拱隆起量均随着施工进度逐渐增大,直至上层隧道二次衬砌施作时才趋于稳定。由于工况 2 至工况 7 的松动圈弱化程度依次增加,故上层隧道仰拱隆起量逐渐增大,说明松动圈对上部隧道仰拱隆起变形影响较大。

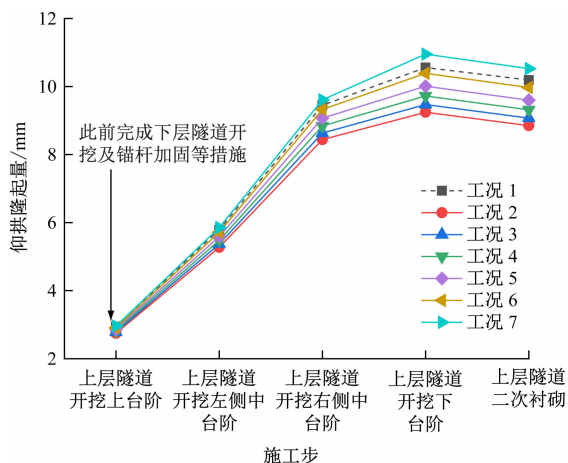


图 16 上下层隧道施工时各工况的上层隧道仰拱隆起变化曲线

Fig. 16 Curves of the upper tunnel invert uplift change in each case during construction of the upper and lower tunnels

上下层隧道施工过程中各工况的上层隧道水平收敛曲线如图 17 所示。从图 17 可以看出:水平收敛量均随着施工的进行而逐渐增大,但在上层隧道开挖下台阶后趋于稳定;各工况的水平收敛量曲线在施工后段基本相近,说明松动圈对拱顶沉降影响较小。

对于上层隧道仰拱隆起量 d , 在施工结束后, 工况 1 下 $d=10.19$ mm, 工况 6 下 $d=9.97$ mm, 工况 7 下 $d=10.53$ mm。根据不同工况下 d 的计算结果, 可认为围岩松动圈的弱化效果介于工况 6 和工况 7 之间, 即围岩松动圈的 α 为 0.70 ~ 0.75。由此可知, 在对隧道进行安全评估或设计计算时, 损伤区岩体 α 取 0.70 ~ 0.75, 可得到更为精确的结果。在有支护结构存在的情况, 对于 V 级围岩且埋深小于 50 m 的隧道, 边墙的允许变形量为 6.23 mm^[8], 相对收敛变形允许值为 12.46 mm, 结合本文中隧道收敛曲线可知, 收敛变形未超过限值。

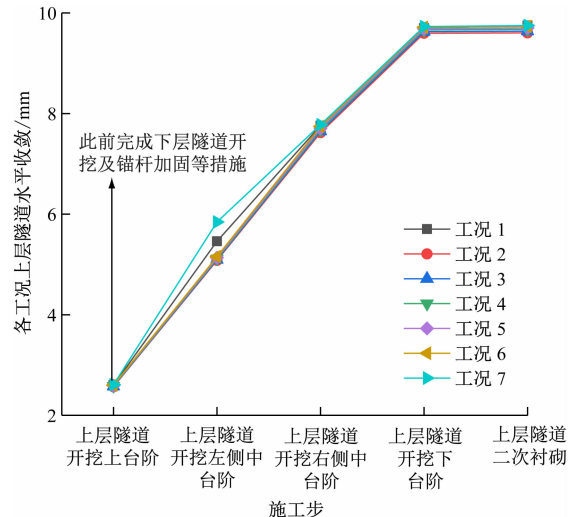


图 17 上下层隧道施工时各工况的上层隧道水平收敛曲线
Fig. 17 Curves of the upper tunnel horizontal convergence in each case during construction of the upper and lower tunnels

3.3 应力结果分析

3.3.1 围岩最大主应力

图 18 及图 19 分别为工况 1 和工况 7 的围岩最大主应力云图。由图 18 及图 19 可以看出: 两种工况下围岩主应力的分布和大小相近; 上层隧道拱脚和仰拱处围岩小范围受拉, 下层隧道拱脚处围岩为受压。

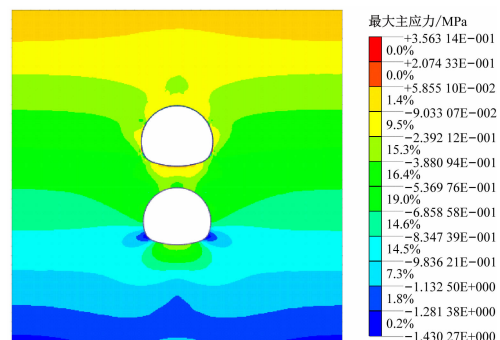


图 18 工况 1 下围岩最大主应力云图

Fig. 18 Cloud map of the surrounding rock maximum principal stress in Case 1

3.3.2 围岩最大剪应力

图 20 及图 21 分别为工况 1 和工况 7 下围岩最大剪应力分布图。由图 20 及图 21 可以看出: 两种工况下的围岩主应力的分布和大小相近; 上层隧道围岩主应力分布在隧道拱肩、拱腰和拱脚附近; 下层隧道围岩主应力分布在隧道拱腰和拱顶附近, 且存在相对明显的应力集中现象。

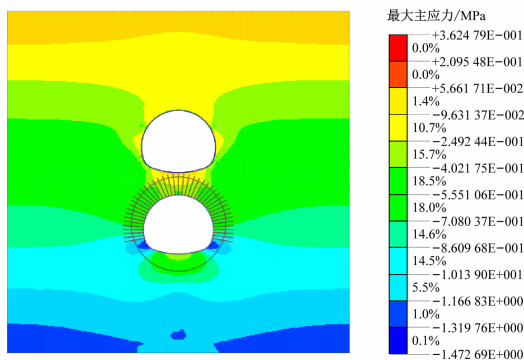


图19 工况7下围岩最大主应力云图

Fig. 19 Cloud map of the surrounding rock maximum principal stress in Case 7

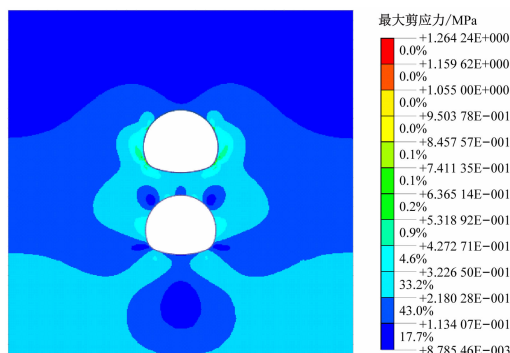


图20 工况1下围岩最大剪应力云图

Fig. 20 Cloud map of the surrounding rock maximum shear stress in Case 1

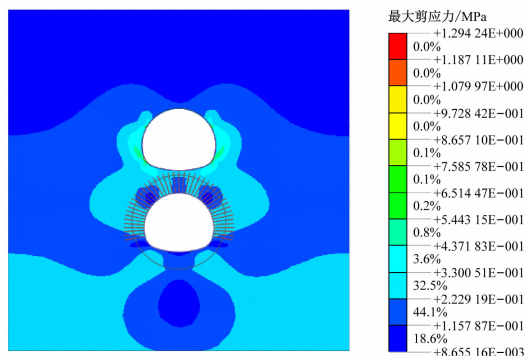


图21 工况7下围岩最大剪应力云图

Fig. 21 Cloud map of the surrounding rock maximum shear stress in Case 7

4 结语

本文依托东环线上下重叠隧道工程实例,建立有限元计算模型,采用数值模拟方法分析了下层先挖隧道施工对围岩弱化影响,并通过比较不同计算工况分析围岩损伤程度和加固措施的岩体控制效应之间的对应关系,得到了以下结论:

1) 下层开挖引起竖向位移主要位于隧道拱顶与拱底,拱顶上方约 $0.200D$ 范围内的围岩竖向位移扰动明显。拱底下方约 $0.175D$ 的范围内围岩竖向位移扰动明显。

2) 根据下层隧道周边围岩应力分布的变化程度以及等效塑性应变范围,并出于安全的考虑,围岩松动区域等效为圆形范围,松动圈平均厚度为 2.5 m 。

3) 上层隧道开挖卸荷使得位于上下层隧道间的中隔岩体产生较大的隆起变形,并带动下层隧道产生整体上浮趋势,宜对中隔岩体进行必要的加固支护。

4) 本案例中下层隧道锚杆加固措施对应围岩松动区的 α 应为 $0.70 \sim 0.75$ 。

参考文献

- [1] 杨晓杰,赵东东,耿强,等. 软岩巷道松动圈现场测试及理论计算研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(8): 1.
YANG Xiaojie, ZHAO Dongdong, GENG Qiang, et al. Study on field test and theoretical calculation of loose circle in soft rock roadway[J]. Coal Technology, 2018, 37(8): 1.
- [2] 余敏,林从谋,殷榕鹏. 基于改进双剪统一强度理论的围岩松动圈分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(2): 379.
YU Min, LIN Congmou, YIN Rongpeng. Analysis on loosen zone of surrounding rock based on improved double-shear unified strength criterion[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2): 379.
- [3] KIMKWON S J S. Sensitivity analysis of tunnel stability with a consideration of an excavation damaged zone[J]. Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Associa, 2014, 16(1): 91.
- [4] 陈华东,申文明,张文杰. 上穿隧道引起既有隧道变形的黏弹性分析[J]. 力学季刊, 2022, 43(4): 958.
CHEN Huadong, SHEN Wenming, ZHANG Wenjie. Viscoelastic analysis of deformation of the existing tunnel due to the above-crossing tunneling[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2022, 43(4): 958.
- [5] 安永林,李佳豪,雷明锋,等. 左右线分岔四洞隧道施工力学特性三维分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2348.
AN Yonglin, LI Jiahao, LEI Mingfeng, et al. Three dimensional analysis of construction mechanical characteristics of left and right line bifurcated four tunnels[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(8): 2348.
- [6] 夏舞阳,代聪,李世琦. 炭质千枚岩隧道围岩松动圈现场测试[J]. 公路交通科技, 2018, 35(3): 72.

(下转第 244 页)

- [6] 尚彦军, 庞文利, 王开洋, 等. 太古代片麻状花岗岩浅埋隧道变形破坏及地面塌陷分析: 以集宁隧道为例[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1574.

SHANG Yanjun, PANG Wenli, WANG Kaiyang, et al. Deformation damage of shallow tunnels and caveinduced ground collapse in Archeozoic gneissic granites—the Jining tunnel as case example [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1574.

- [7] 宋建学, 张瑞鑫, 孙宇赫. 机械顶管施工中超挖和地面超载引起的地表沉降规律研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(11): 134.

SONG Jianxue, ZHANG Ruixin, SUN Yuhe. Research on surface settlement regularity caused by over excavation and ground overloading in mechanical pipe jacking[J]. Building Science, 2018, 34(11): 134.

- [8] 王建秀, 邹宝平, 胡力绳. 隧道及地下工程光面爆破技术研究现状与展望[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 800.

WANG Jianxiu, ZOU Baoping, HU Lisheng. Advance and trend

in smooth blasting technology for tunnel and underground engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 800.

- [9] 方昱, 刘开云. 山岭隧道钻爆法施工参数控制的优化[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(1): 14.

FANG Yu, LIU Kaiyun. Control optimization of drilling and blasting parameters during mountain tunnel construction period [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(1): 14.

· 收稿日期:2022-01-01 修回日期:2024-01-26 出版日期:2024-06-10

Received:2022-01-01 Revised:2024-01-26 Published:2024-06-10

· 第一作者:袁枫杰,工程师,397708055@qq.com

通信作者:徐前卫,副教授,xuqianwei@tongji.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 233 页)

XIA Wuyang, DAI Cong, LI Shiqi. In-situ test on loose circle of surrounding rocks on carbonaceous phyllite tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(3): 72.

- [7] 朱俊福. 深部层状岩体巷道围岩松动圈形成机理及其工程应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.

ZHU Junfu. Study on the formation mechanism and its engineering application of broken rock zone in deep bedded rock mass [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

- [8] 李宁, 刘乃飞, 李国峰. 软岩及土质隧洞围岩稳定性评价新

方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1812.

LI Ning, LIU Naifei, LI Guofeng. New method for stability evaluation of soil and soft rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1812.

· 收稿日期:2022-12-12 修回日期:2023-11-13 出版日期:2024-06-10

Received:2022-12-12 Revised:2023-11-13 Published:2024-06-10

· 通信作者:徐前卫,副教授,xuqianwei@tongji.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 237 页)

WANG Xiaoming. Construction technology application of shield machine crossing anchor pipe clearance area in water-rich sand [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(12): 135.

- [6] 李小斌, 吴肖玉. 桩基及围护施工中遇地下障碍物的处理技术[J]. 科技创新导报, 2012, 9(1): 46.

LI Xiaobin, WU Xiaoyu. Treatment technology of underground obstacles in pile foundation and enclosure construction [J]. Science

and Technology Innovation Herald, 2012, 9(1): 46.

· 收稿日期:2021-12-02 修回日期:2022-01-05 出版日期:2024-06-10

Received:2021-12-02 Revised:2022-01-05 Published:2024-06-10

· 第一作者:史力,高级工程师,103632031@qq.com

通信作者:汪杰,工程师,2432185329@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license