

台阶法施工时台阶长度对富水隧道稳定性影响研究^①

鲁军纪¹, 程鑫², 闫小兵¹, 赵培东²

(1.湖南涟邵建设工程(集团)有限责任公司,湖南长沙410001; 2.中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙410083)

摘要:为提高富水隧道条件下台阶法施工效率,以小麻柳尾矿库主隧道工程为例,根据工程实际情况构建三维数字模型,进行流固耦合分析,分别模拟长台阶法、短台阶法以及微台阶法隧道施工过程。在此基础上,根据施工后隧道渗流场、位移场、应力场及塑性区分布情况分析不同台阶法施工效果,以CRITIC算法对其进行综合评价。结果表明,微台阶法更适于富水条件下隧道工程施工,其次为长台阶法,短台阶法施工效果较差。

关键词:开挖方法;台阶法;富水隧道;隧道施工;流固耦合;位移场;应力场;塑性区;CRITIC算法

中图分类号:U457.2

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.007

文章编号:0253-6099(2023)06-0029-05

Influence of Bench Length in Benching Excavation on Stability of Tunnels in Water-Rich Ground

LU Junji¹, CHENG Xin², YAN Xiaobing¹, ZHAO Peidong²

(1. Hunan Lianshao Construction Engineering (Group) Co Ltd, Changsha 410001, Hunan, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to improve the construction efficiency in benching excavation for tunnels in water-rich ground, a main tunnel of Xiaomaliu tailings pond was taken as an example in the study. A three-dimensional digital model was constructed according to the actual situation of the project, and the fluid-structure interaction analysis was conducted by simulating benching excavation with three types of bench length. Then, the effect of benching construction with different bench length was analyzed in terms of seepage field, displacement field, stress field and plastic zone distribution of tunnel after construction, and a comprehensive evaluation was presented by using CRITIC algorithm. Results show that excavation with micro bench can bring the best construction effect for the tunnel in water-rich ground, followed by excavation with long bench, and excavation with short bench presents poor effect.

Key words: excavation method; benching tunnelling method; tunnel in water-rich ground; tunnel excavation; fluid-structure interaction; displacement field; stress field; plastic zone; CRITIC algorithm

作为地下重要构筑物,隧道在保护自然环境、提高运输能力以及加大空间利用率方面发挥着重要作用^[1-5]。随着时代不断发展,隧道工程项目增加,施工条件也日渐复杂,尤其当隧道穿过富水土体时,人为破坏原有地下水渗流,会造成地下水以滴流、股流以及大范围突水等形式向外排出,不仅会增加隧道施工难度,还会影响隧道结构稳定。因此,研究富水条件下隧道稳定性对提高施工效率和保障隧道安全具有重要作用。

目前,诸多学者分别从地质结构、降水强度、支护方式等角度研究了富水隧道稳定性影响因素^[5-12],并据此提出了相应的隧道涌水治理措施。但已有研究较少从开挖方式角度对富水隧道稳定性进行分析。台阶法作为隧道施工的常用方法,在多种工况条件下应用广泛,台阶步距的选择是影响施工效率和安全的重要环节。本文以四川小麻柳尾矿库主隧道工程为例,构建三维数字模型模拟施工过程,综合渗流场、位移场、应力场以及塑性区等计算结果分析不同步距条件下台

① 收稿日期:2023-06-23

基金项目:中南大学研究生创新项目(2022XQLH080)

作者简介:鲁军纪(1978—),男,安徽郎溪人,硕士,高级工程师,主要研究方向为地下矿山超深竖井建设、深部采矿技术。

阶段开挖对富水隧道稳定性的影响, 以为类似工程项目施工设计提供参考依据。

1 工程概况

小麻柳尾矿库地处四川省西昌市太和镇安宁河西岸小麻柳冲沟, 初期坝坝址距安宁河西岸约 1 800 m。尾矿库原始形态西、北、南三面环山, 总体地势由西向东倾斜, 库区上游谷地区域由东西向及北东向两条支沟组成, 初期坝位于两沟东侧交汇处, 库区内地表分水岭北面标高 1 650~1 850 m、南面标高 1 660~1 840 m、沟底标高 1 559~1 563 m, 地表地形最大高差超过 300 m。

尾矿库截排洪主隧道全长 2 377 m, 其中压坡段、加高段及渐变段长 80 m, 暗挖隧道洞身段长 2 295 m, 隧道上游标高 1 661.333 m、下游出水口标高 1 596.5 m, 库区内隧道总长度为 628.812 m, 洞身段采用圆拱直墙式断面。根据围岩条件进行分类, 选取主隧道段 K2 +234.00~+139.00 m 进行研究, 该段为 IV 级围岩条件, 隧道埋深 94.903~113.380 m, 上覆围岩主要为第四系下更新二期冰碛层为主的地质结构。由地层勘探结果可知, 隧道上覆岩层自上而下可分为: ① 砾砂土层, 厚度约 10 m; ② 中、强风化玄武岩, 土层厚 40 m 左右; ③ 地表埋深 50 m 以下围岩以冰碛层为主, 其内部以冰川融水为主要应力, 旁侧含透水岩层。主隧道 K2 +234.00~+139.00 m 段围岩节理裂隙发育较好, 岩体整体较为破碎, 沿断裂带形成构造裂隙透水通道, 汇集较丰富的地下水, 成为富水性良好的含水层。主隧道 K2 +234.00~+139.00 m 段地层结构如图 1 所示。



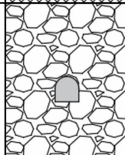
土层名称	厚度/m	示意图
砾砂土层	10	
中、强风化玄武岩	40	
冰碛层	80	

图 1 地层结构示意图

2 数值模拟分析

台阶法按步距不同可划分为长台阶法、短台阶法以及微台阶法。为研究不同开挖方式对隧道稳定性的影响, 分别模拟不同台阶长度条件下隧道开挖过程, 根据施工后渗流场、应力场、位移场以及塑性区状况评估施工效果。

2.1 三维数字模型

根据小麻柳尾矿库主隧道 K2 +234.00~+139.00 m 段地形情况及图 1 构建三维数字模型, 为降低边界效应对模拟结果的影响, 考虑圣维南原理, 模型左右侧及底部均取 5 倍开挖尺寸, 开挖长度约 95 m, 整个模型尺寸为 66 m×95 m×130 m, 模型单元和节点数分别为 482 605 和 265 493。模型示意图见图 2。

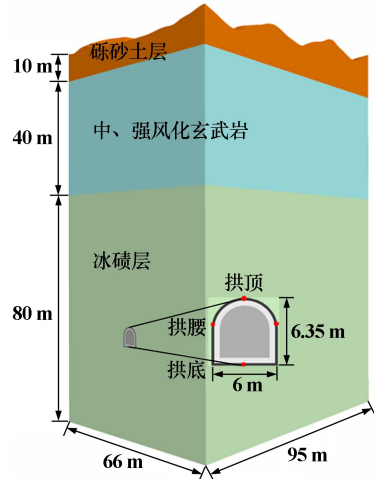


图 2 模型示意图

2.2 边界条件及材料参数

根据工程实际情况, 对各土层参数赋予摩尔-库伦本构模型, 忽略土体断层影响, 隧道开挖后以锚网喷砼+锚杆进行初期支护, 分别以弹性本构模型及锚结构单元进行模拟, 二次衬砌支护以弹性本构模型进行模拟。各土层结构中, 中、强风化玄武岩及冰碛层为导水土层, 其中冰碛层内汇聚较丰富地下水, 以各向同性流体材料进行模拟。静力学边界条件为四周法相位移约束、底部位移全约束、顶部为自由面; 渗流场边界条件为四周及底部边界均为不透水边界, 顶面无水, 初期支护及二次衬砌支护均为不透水材料, 开挖面处自然排水。

为合理确定围岩力学参数, 提高数值模拟结果准确性, 从施工现场进行取样, 将其加工打磨成标准试样进行三轴及直剪等试验, 测定围岩及支护材料力学参数, 结果见表 1。

2.3 模拟施工步骤

模型开挖方式为上下台阶法, 开挖循环为 5 m, 单次施工前需进行排水处理, 进行自然渗流, 渗流时间为 12 h; 排水完毕后进行施工, 开挖后即刻进行锚网喷砼+锚杆初期支护, 喷砼厚度 0.25 m, 锚杆长度 3 m, 直墙隧道上部锚杆间距 0.85 m、下部锚杆间距 1.0 m; 待初期开挖支护应力平衡后, 再进行下一循环施工作业, 二次衬砌支护滞后 4 个开挖循环, 二次衬砌支护厚度 0.5 m。

表 1 围岩及支护结构材料参数

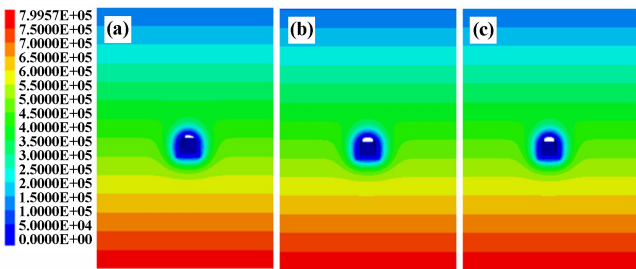
材料名称	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ [$\text{m}^2 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$]
砾砂土层	27.96	0.3	1 910	2	34	7.6×10^{-9}
中、强风化玄武岩	80	0.2	2 500	120	45	4×10^{-7}
冰碛层	100	0.1	2 350	15	30	1.0×10^{-10}
初期支护	25×10^3	0.2	2 300	—	—	—
二次支护	28×10^3	0.2	2 500	—	—	—
锚杆	28×10^4	0.25	7 500	—	—	—

根据台阶法划分标准,结合隧道面开挖尺寸,分别模拟不同台阶条件下施工过程,其中长台阶法台阶长度为 5 倍开挖尺寸(即 30 m),短台阶法台阶长度为 1.67 倍开挖尺寸(即 10 m),微台阶法台阶长度为 0.83 倍开挖尺寸(即 5 m)。

3 模拟结果分析

3.1 渗流场分析

图 3 为不同台阶长度施工后冰碛层渗流场分布情况。



(a) 长台阶法; (b) 短台阶法; (c) 微台阶法

图 3 渗流场分布示意图

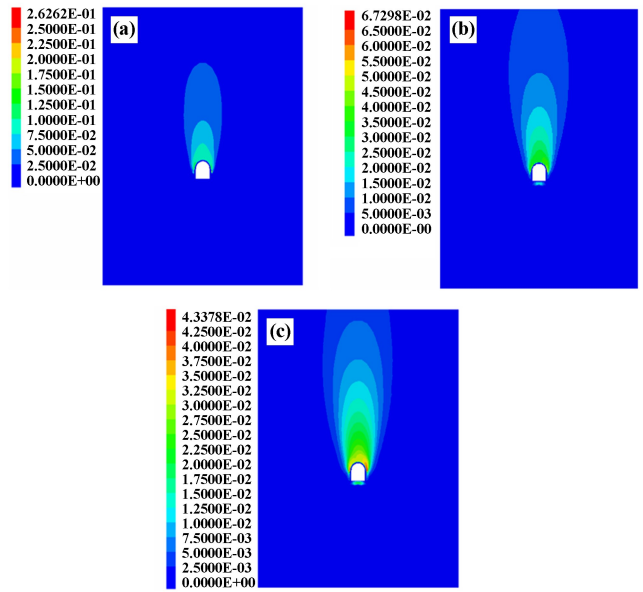
长台阶法、短台阶法以及微台阶法仅开挖步距不同,开挖循环次数一致,且在每次开挖前都先进行排水处理,排水时间均为 12 h,故三类施工方法渗流场分布形式类似,与图 3 结果一致。从图 3 可知,富水隧道开挖区域孔隙水压力有所降低,孔隙水压力等值线成漏斗形状。因此,在施工前对开挖区域提前进行排水处理,能够一定程度降低孔隙潜水对施工作业的影响,提高施工作业效率及安全性。

3.2 位移场分析

图 4 为三类施工方法隧道附近围岩合位移云图。

由图 4 可知,富水隧道开挖后拱底位移较小,围岩变形主要集中在拱顶及拱腰处。由掌子面附近位移分布情况可知,添加二次衬砌后,二次衬砌区域合位移明显降低,位移数值均小于 0.05 m。对比三类施工方式合位移数值大小可知,长台阶法施工在初期支护拱腰处合位移最大,达到 0.263 m,短台阶法合位移最大处

同样位于初期支护拱腰处,数值为 0.067 3 m,微台阶法施工合位移最大值为 0.043 4 m。



(a) 长台阶法; (b) 短台阶法; (c) 微台阶法

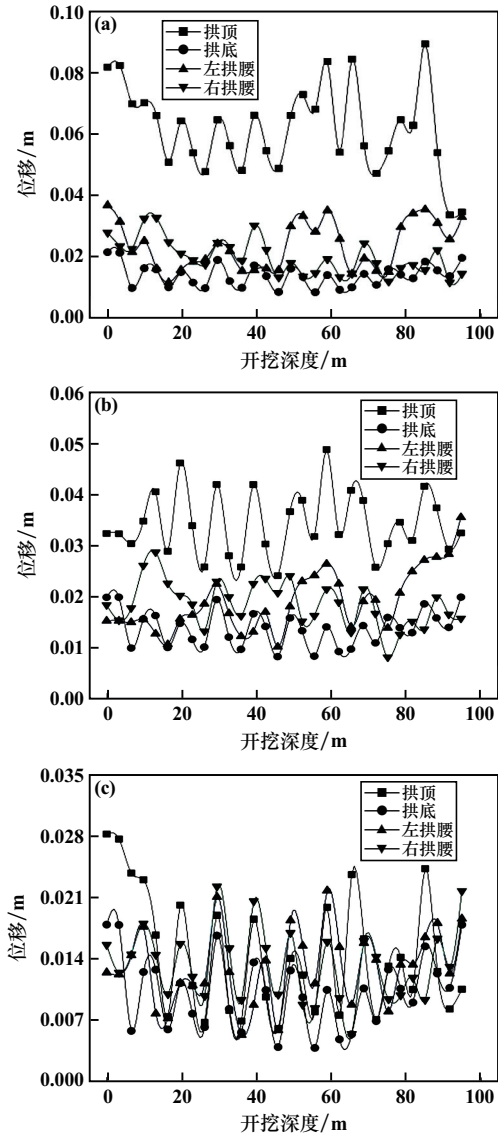
图 4 围岩合位移云图

为细化分析隧道竖向位移及侧向位移分布情况,监测沿开挖方向拱顶、拱底竖向位移及拱腰两侧侧向位移,图 5 为监测数据图(其中拱顶及右拱腰数据取绝对值)。

从图 5 可知,三类方法施工隧道拱顶处位移数值较大,其次为拱腰处,拱底位移最小,与图 4 结果一致。同时,分析各类施工方法位移数据变化趋势可知,位移大体呈周期变化规律,结合施工模拟过程可得,位移变化周期与锚杆间隔大体一致,由此可知锚杆对围岩加固作用明显,施工后及时进行锚杆支护可有效降低施工作业区域围岩变形。此外,分析施工位移数据可得,隧道左右拱腰处监测点位移变化趋势有所差异,主要原因在于隧道左右拱腰处监测点距地表土层深度存在差异,且由于长台阶法及短台阶法施工时上下台阶施工间隔较长,拱腰处应力释放较为充分,左右拱腰处位移监测曲线差异较大,微台阶法上下台阶施工循环间隔较小,应力释放较为缓慢,左右拱腰处位移监测数据相差较小。

由图 5 可知,三类施工方法中,长台阶法拱顶位移明显高于拱腰及拱底,主要原因在于长台阶法施工过程中,台阶步距较长,上台阶开挖后应力释放充分,所产生拱顶位移较大,最大位移值为 0.09 m。分析长台阶法位移总体变化趋势可得,沿开挖深度方向大于上台阶开挖步距 30 m 时,隧道底部下台阶开始施工,施工作业区域增大,隧道拱顶处位移也逐渐开始增加。短

台阶法施工台阶步距较短,隧道拱顶位移与拱腰及拱底位移差异较小,沿开挖深度方向超过开挖步距 10 m 时,开挖面增大,隧道周边围岩变形随之增加,拱顶最大沉降为 0.05 m。微台阶法由于超前步距最小,施工作业对围岩影响最小,拱顶位移与拱腰、拱底位移数据相近,拱顶沉降最大值位于洞口处,最大值为 0.028 2 m。



(a) 长台阶法; (b) 短台阶法; (c) 微台阶法

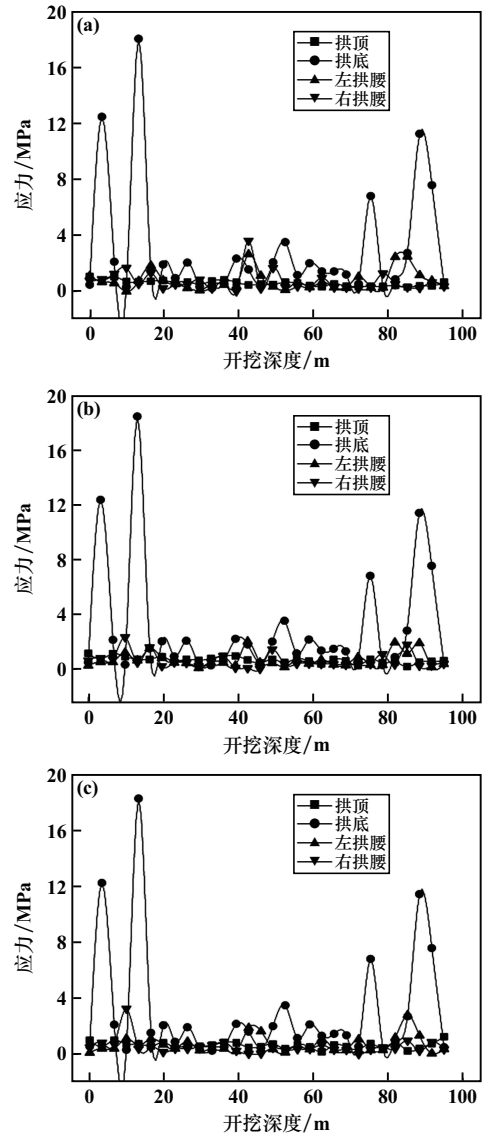
图5 施工位移监测数据

3.3 应力场分析

图6为施工后监测点应力数据图(拱顶数据取绝对值)。

从图6可知,三类台阶法施工应力分布形式类似,拱顶及拱腰应力监测数据较小,不超过 4 MPa,拱底应力较大,应力最大值超过 18 MPa,且在隧道洞口段及出口段应力值较大,隧道中间部分应力值较小。由工程实际情况可知,隧道埋深约 100 m,埋深较浅,施工

作业区域竖向应力较大、侧向应力较小,拱腰处应力数据较小。采用台阶法开挖,由于上台阶隧道超前作业,应力释放较为充分,拱顶处监测应力数据较小,下台阶滞后开挖应力较为集中,拱底处应力值较大。受边界条件影响,隧道在洞口段及出口段应力较为集中,施工至隧道出口段时部分应力已释放,隧道出口段拱底应力监测值小于隧道洞口段应力值。



(a) 长台阶法; (b) 短台阶法; (c) 微台阶法

图6 施工应力监测数据

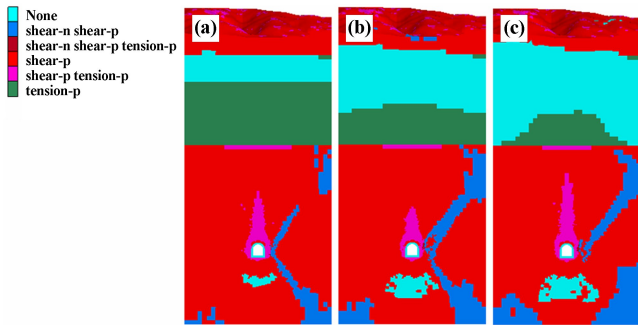
3.4 塑性区分析

图7为三类台阶法施工作业后塑性区分布情况。

由图7可得,三类施工方式塑性区分布状况类似,在隧道右侧区域均产生了剪切破坏区域。分析可知,施工作业区域隧道左右侧围岩埋深存在差异,结合图5,隧道右拱腰处位移变形量较大,在隧道右侧围岩区域会形成剪切破坏区域。相较于长台阶法,短台阶法以

及微台阶法上下台阶循环间隔较小, 应力释放不够充分, 故会形成更多的剪切破坏区。

所产生塑性区较小; 短台阶法施工效果较差, 施工后竖向应力较大, 且施工后塑性区体积较大。



(a) 长台阶法; (b) 短台阶法; (c) 微台阶法

图 7 塑性区分布示意图

注: shear 表示剪切破坏; tension 表示拉伸破坏; n 表示当前处于极限平衡; p 表示在计算中发生破坏。

4 台阶法施工效果综合分析

综合各台阶法施工作业后位移场、应力场及塑性区等因素影响, 以竖向位移、侧向位移、竖向应力、侧向应力、剪切破坏区以及拉伸破坏区体积等因素作为评价指标, 以 CRITIC 算法计算上述各因素指标权重。表 2 为各施工方案初始数据。

表 2 各施工方案初始评价数据

施工方式	位移/m		应力/MPa		塑性区体积/m ³	
	竖向	侧向	竖向	侧向	拉伸	剪切
长台阶	0.089 2	0.036 8	18.0	3.63	0	32 193.8
短台阶	0.048 7	0.035 5	18.4	2.33	0.002 9	62 866.3
微台阶	0.029 2	0.024 1	18.1	3.26	0.029 2	70 054.5

分析可知, 三类台阶法施工后渗流场及应力场分析形式相似, 其中微台阶法施工后隧道附近围岩变形较小, 但隧道右侧产生了较大的剪切破坏区。

由于各评价指标因素量纲存在差异, 为消除量纲影响, 需对数据进行归一化处理。表 3 为表 2 数据归一化处理后的各评价指标数据。根据归一化数据, 采用 CRITIC 算法对其进行分析, 计算各因素评价指标权重, 结果见表 4。

由表 3 及表 4 可分别计算三类台阶法施工方案综合得分。上述评价指标均为逆向指标, 综合评分越低, 表明该类施工方案适用性越高。根据各指标权重数据, 计算各方案指标数据与权重乘积, 并加以求和, 长台阶法、短台阶法以及微台阶法综合得分分别为: 0.511 4, 0.518 9, 0.490 8。在上述三类施工方案中, 微台阶法最适于此条件下隧道施工; 其次为长台阶法, 长台阶法施工隧道能够使围岩应力得到较为充分释放,

表 3 评价指标归一化数据

施工方式	位移		应力		塑性区体积	
	竖向	侧向	竖向	侧向	拉伸	剪切
长台阶	1	1	0	1	0	0
短台阶	0.325 0	0.897 6	1	0	0.099 8	0.810 1
微台阶	0	0	0.25	0.715 4	1	1

表 4 评价指标权重计算结果

评价指标		指标变异性	指标冲突性	信息量	权重
位移	竖向	0.51	6.19	3.16	16.68%
	侧向	0.55	6.15	3.38	17.88%
应力	竖向	0.50	5.87	2.94	15.51%
	侧向	0.52	6.09	3.14	16.58%
塑性区体积	拉伸	0.55	5.85	3.22	17.03%
	剪切	0.53	5.81	3.09	16.31%

按上述分析结果指导实际施工过程, 实际施工过程中采用微台阶法施工隧道, 支护方式采用锚网喷砼+锚杆进行初期支护, 衬砌进行二次支护。隧道施工后监测隧道顶部及底部围岩变形, 拱顶沉降和拱底隆起值分别约 3 cm 和 2 cm, 与上述模拟结果大致相同, 满足施工要求。

5 结 论

以小麻柳尾矿库主隧道工程为例, 选取主隧道 K2 +234.00~+139.00 m 段为研究对象, 结合工程实测数据资料, 采用 FLAC^{3D} 分别模拟了富水条件下不同台阶步距开挖过程, 分析了隧道施工作业后渗流场、位移场、应力场及塑性区分布情况, 在此基础上进行综合分析评价, 得到适于富水隧道施工方法, 具体结论为:

1) 支护作业能有效降低围岩变形。由隧道监测点位移数据可知, 锚杆支护对隧道周边围岩变形有较大影响, 其位移变化循环周期与锚杆间隔周期一致。由隧道位移云图可知, 二次衬砌支护区域变形量较小, 均小于 0.025 m。因此在实际施工过程中, 可通过提高锚杆数量、进行二次衬砌支护等方式降低隧道围岩变形。

2) 隧道开挖两侧地表高程变化显著时, 隧道开挖两侧应力存在差异, 采用对称式支护方式时, 在埋深较高一侧易产生应力集中, 造成较大区域剪切破坏区域, 故对偏压隧道进行施工时应采取对应措施减少对高应力侧围岩的扰动。

(下转第 40 页)

破坏时偏应力的影响较大,等压固结后的破坏偏应力略小于 k_0 固结。经过卸荷作用后再进行轴向剪切的土体破坏偏应力比常规三轴压缩试验的小。土体在卸荷剪切作用下表现出在较小的应变条件下即可产生较大的偏应力,且破坏偏应力小于通过轴向剪力测得的破坏偏应力。这表明,基坑开挖后,将导致基坑侧向土体抗剪强度的削弱。

3) 不同应力路径下的孔隙压力变化明显不同,通过卸荷剪切达到破坏条件的孔隙压力不断减小,为负值,表现为剪胀性;其他通过轴向加载达到破坏条件的孔隙压力在加载前期随着轴向应变增加逐渐增大,在轴向应变达到一定程度后开始不断降低,既表现出压缩性又表现出剪胀性。

4) k_0 固结后抗剪强度指标较高。土体若在剪切前进行了侧向卸荷,土体较未进行卸荷的黏聚力下降了21%,内摩擦角变化不大,有效黏聚力下降了13.6%,有效内摩擦角下降了19.1%;土体若在剪切前进行了轴侧双向卸荷,较未进行卸荷的黏聚力下降了31%,内摩擦角变化不大,有效黏聚力下降了30.6%,有效摩擦角下降了31%,这说明土体进行卸荷后,其抗剪强度将被削弱。土体经过卸荷测得的抗剪强度低于土体轴向加压测得的抗剪强度。

参考文献:

[1] Lambe T W. Stress path method[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div, 1967,93(118):1195-1217.

(上接第33页)

3) 富水条件下隧道施工过程中,长台阶法产生位移较大,但由于上台阶超前开挖循环较长,应力释放较为充分,拱顶及拱底应力值较小,拱腰侧应力值较大,产生塑性区体积较小;短台阶法施工位移较小,侧向应力也相对较小,但拱顶处应力较大,塑性区体积也较大;微台阶法施工隧道附近位移最小,但侧向应力较大,在侧向应力集中区域产生了较大剪切破坏区域。综合多方面因素分析,微台阶法最适于富水条件下隧道施工,其次为长台阶法,短台阶法施工效果较差。

参考文献:

[1] 马殿军. 高地应力富水区千枚岩隧道变形控制[J]. 中国铁路, 2022(6):36-42.
 [2] 贾方毅,彭小雨,张晓涛. 砂卵石地层联络通道冻结法施工扰动分析[J]. 交通节能与环保, 2022,18(3):152-160.
 [3] 万波. 大直径泥水盾构隧道施工现状及重难点思考与讨论[J]. 广东土木与建筑, 2022,29(6):92-99.
 [4] 辉龙贵,刘东坤,刘浩杰,等. 板岩隧道中不同地质体的地质雷达

[2] SHEN M, ZHOU Z, ZHANG S. Effect of stress path on mechanical behaviours of frozen subgrade soil[J]. Road Materials and Pavement Design, 2022,23(5):1061-1090.
 [3] ZHANG Y G, ZHANG K Y, LI W L, et al. Unloading triaxial experimental study on stress path of excavated soil slope[J]. Advanced Materials Research, 2011,243-249:2797-2801.
 [4] HUANG W, WEN K, LI D, et al. Experiment study of lateral unloading stress path and excess pore water pressure on creep behavior of soft soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2019:9898031.
 [5] Saberi M, Annan C D, Konrad J M. A unified constitutive model for simulating stress-path dependency of sandy and gravelly soil-structure interfaces[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2018, 102:1-13.
 [6] 曾国熙,潘秋元,胡一峰. 软粘土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1988(3):13-22.
 [7] 胡雪源. 考虑土体卸荷力学性状的悦佳大厦基坑变形特性分析[D]. 郑州:河南理工大学, 2018.
 [8] 盛志强,滕延京,李平. 基坑支护结构设计若干问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2021,43(1):94-101.
 [9] 何世秀,朱志政,杨雪强. 基坑土体侧向卸荷真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2005(6):869-872.
 [10] 何世秀,吴刚刚,朱志政,等. 深基坑支护设计影响因素的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(增刊2):5478-5484.
 [11] 陈勇超,何忠明,王利军,等. 复杂环境下超大深基坑开挖变形演化规律研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):33-36.
 [12] 李娜. 加卸载应力路径下加筋红黏土蠕变特性研究[D]. 长沙:湖南大学, 2021.

引用本文: 王利军,刘洋,何忠明,等. 不同应力路径下基坑周边粉质黏土力学性状试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):34-40.

图像特征[J]. 无损检测, 2022,44(6):32-35.
 [5] 刘德斌. 富水软土地区盾构施工对邻近建筑物的影响及控制措施[J]. 施工技术(中英文), 2022,51(11):127-130.
 [6] 张鹏,李振兴,骆伟,等. 岩溶台地高压富水特长隧道勘察的精细化探索[J]. 科学技术与工程, 2022,22(16):6408-6420.
 [7] 陈兆,王海林,蒋源. 浅埋连拱隧道施工动态响应特征研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):17-21.
 [8] 桂铭,沙策,刘霖. 基于数值分析的回填型岩溶隧道施工技术研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(3):20-25.
 [9] 齐延海,李术才,李召峰,等. 全风化花岗岩富水地层注浆治理研究与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019,50(3):694-703.
 [10] 王健华,李术才,李利平,等. 富水岩层隧道区域涌水量预测方法及工程应用[J]. 人民长江, 2016,47(14):40-45.
 [11] 贾克育. 隧道爆破开挖对洞口段边坡稳定性影响的数值分析[J]. 矿冶工程, 2017,37(1):25-28.
 [12] 王星华,汤国璋,江亦元,等. 多年冻土隧道开挖稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2006(3):12-14.

引用本文: 鲁军纪,程鑫,闫小兵,等. 台阶法施工时台阶长度对富水隧道稳定性影响研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):29-33.