

文章编号:1005-0523(2017)01-0021-07

不同开挖方案下隧道围岩稳定性及变性特征分析

刁心宏,朱 陈,于 洋

(华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要:不同的开挖进尺会引起隧道相应的围岩位移变化,围岩位移超过容许值将会影响隧道的安全性。以长茂山双车道浅埋隧道为例,采用有限元软件 ABAQUS 对台阶法不同开挖进尺条件下的隧道施工进行三维数值模拟,从位移及应力两方面来分析台阶法不同开挖进尺的围岩变化规律。研究表明:围岩位移变化主要在拱顶及拱顶附近且侧拱两侧位移曲线呈对称分布;围岩的最大位移变形量随开挖循环进尺增大而相应增大,当开挖进尺增大到 6 m 后,围岩发生最大位移增长滞缓;围岩竖向位移和拱顶应力随开挖进尺变化的规律可以采用 Logistic 增长函数进行拟合;提出了循环开挖进尺为 4 m 的合理施工方法。

关键词:开挖进尺;浅埋隧道;变形量;数值分析

中图分类号:U25

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.004

隧道以直线代替曲折的道路来缩短行车里程,减少事故的发生广泛在山区公路、铁路建设之中应用。无论是在公路建设还是在铁路建设中,隧道的安全性都是工程师关注的重点。与其他工程相比,例如由简小材料等构成的构件在荷载作用下的力学行为可以得到解析解不同,隧道问题的解决方法在某种程度上还依赖于经验方法^[1]。

隧道开始施工时,通常由现场工程师根据工程经验来确定开挖进尺^[2]。不同的开挖进尺会引起隧道相应的围岩位移变化,围岩变形超过容许值将会影响隧道的安全性。同时,隧道开挖采用小进尺会使建设成本和施工时间增加,进尺过大则会降低隧道的安全性。目前,在隧道开挖过程中,对循环进尺的研究并不多见,因此,既能保证施工进度又具有稳定性的开挖进尺,是较为重要的研究课题。

现场监测是隧道围岩位移规律最直接简单的研究方式,但它需在隧道开挖后得到相应数据才能进行,不能在隧道开挖前反映围岩位移规律^[3-4]。现有数值分析研究大多以二维平面应变为主^[5-6],不能模拟隧道施工过程的空间效应,而这对隧道开挖过程的稳定性影响至关重要^[7]。采用三维数值分析可以弥补二维平面应变数值分析的不足^[8]。其中,Young-Zoo Lee^[9]根据 PFC3D 数值分析软件推出了确定软岩隧道开挖进尺的方法。梅洪斌^[10]采用三维有限方法,对隧道圆形衬砌采用管棚法加固后的各施工阶段进行了分析研究,寻求合理的开挖进尺。本文以长茂山隧道工程为例,利用 ABAQUS 软件对台阶法隧道施工掘进过程进行有限元模拟,从位移及应力两方面来分析台阶法不同开挖进尺的围岩变化规律。在隧道开挖前无法利用现场监测收集围岩变形量,利用数值分析得到台阶法不同开挖进尺的围岩位移值,与容许极限位移值相较,提出隧道最佳开挖进尺。

1 工程概况

长茂山隧道位于黔张常铁路站前工程 QZCZQ-7 标段,为双车道高速铁路隧道,III级围岩约占全隧道的

收稿日期:2016-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51509092);江西省自然科学基金项目(20161BAB216141);江西省教育厅科研项目(150518);岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目(Z015004)

作者简介:刁心宏(1961—),男,教授,博士,研究方向为岩土工程、道路与铁道工程。

83.4%,近 3 905 m,开挖最大跨度 12.7 m,隧道高度为 8 m,横断面面积 111.53 m²,隧道埋深为 10~18 m。隧道沿线主要出露岩性为页岩,工点范围内无断层构造,隧址区内地下水丰富,DK188+820~DK193+504 段正常涌水量 3 852 m³/d,最大涌水量 11 556 m³/d。按新奥法原理组织施工,根据围岩情况,开挖 II 级围岩段采用全断面法施工,III、IV 级围岩段采用台阶法施工,V 级围岩硬岩地段采用三台阶临时横撑法施工。

2 数值分析计算模型

2.1 计算模型与参数

根据隧道设计资料,隧道断面跨度 B 为 12.7 m,高度 H 为 8 m。一般来说,隧道开挖对围岩位移影响范围为距隧道中心 3 到 5 倍开挖宽度^[1]。计算模型横截面方向 120 m,竖直向上取至地表以下 25 m,竖直向下取 25 m。模型左右两侧为水平约束,底部为固定约束,顶部为自由。隧道浅埋,岩体初始应力场仅考虑自重应力。有限元网格细化图见图 1。

为使计算模型简化,以均质地层来建模分析。隧道地质条件为各向同性地层,采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型来模拟分析围岩的塑性变形。为保证计算精度与计算时间,将模型中隧道及附近区域土体网格划分较细,单元边长为 0.5 m,较远处划分稍微增大至 2 m。计算模型共划分 97 876 个单元。由于隧道下部地下水丰富,编辑围岩材料时,考虑渗透性,设定初始孔隙比 e 为 0.18。围岩物理力学参数由室内试验获取,考虑到所取岩层的尺寸效应,对室内试验取得的数值进行了适当折减。数值分析中采用的围岩物理力学参数见表 1,隧道衬砌为复合衬砌,相关参数见表 2。

表 1 岩层物理力学参数
Tab.1 Mechanical parameters of rock

密度 $\rho/$ (kg/m ³)	杨氏 模量 E/GPa	泊松比 μ	粘聚力 c/MPa	内摩擦 角 $f/(\circ)$	孔隙比 e
2.3	13	0.3	1.5	20	0.18

表 2 隧道支护系统参数
Tab.2 Tunnel support system

支护类别	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	支护参数
锚杆	300	0.25	直径 $\phi 2.0 @ 1.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 长度 4 m
喷混凝土	25	0.35	厚度 25 cm
二衬	30	0.35	厚度 40 cm

2.2 计算工况

隧道 III 级围岩约占全隧道的 83.4%,故模拟 III 级围岩开挖方案,采用台阶法并考虑了开挖进尺为 1,2,4,6,8,10,12,14 m 共 8 种工况,研究的目标横断面位于模型正中央。施工过程如下:①上半断面开挖→②上半断面进行支护→③下半断面开挖→④下半断面进行支护→⑤二衬。重复开挖过程,直至开挖结束,开挖过程见图 2。

2.3 结果分析

台阶法开挖过程中,目标横断面上的围岩竖向位移云图如图 3 所示。

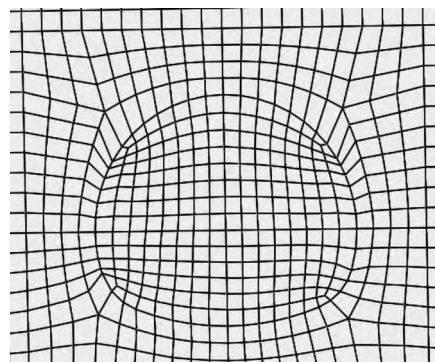


图 1 有限元网格细化图
Fig.1 Finite element mesh refinement

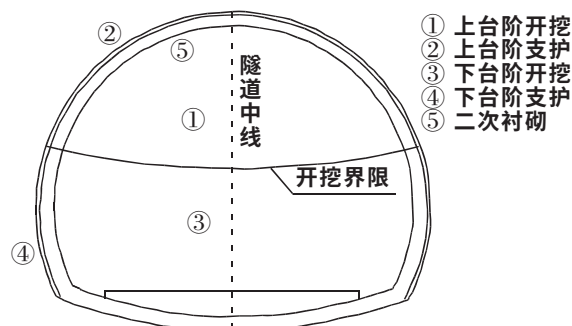


图 2 台阶法施工工艺流程
Fig.2 Construction process of the step method

从数值模拟结果初步可以看出:围岩竖向变形主要分布在拱顶及拱底附近。从位移量大小来看,在台阶法施工过程中,随着开挖循环进尺在一定范围内的增大,围岩位移响应相应增大。

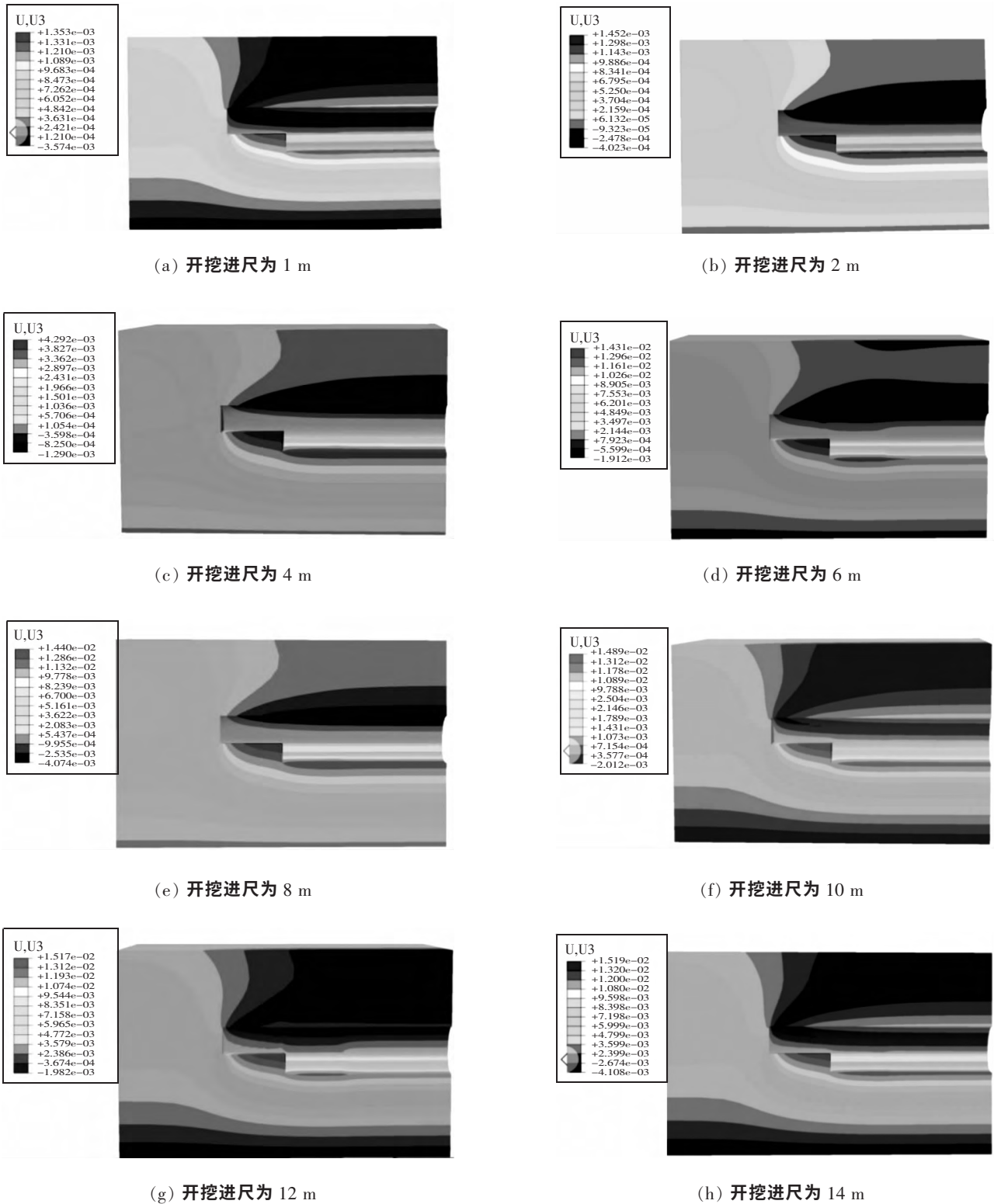


图 3 不同开挖进尺的围岩竖向位移特征

Fig.3 Characteristics of the vertical displacement of surrounding rock at different excavation footage

2.4 重点部位分析

软弱围岩位移监测一般以拱顶沉降和边墙水平变形作为主要控制参数^[8],下面对二者展开讨论。重点分析各工况开挖过程中的隧道拱顶、侧拱腰、拱脚及拱底处竖向位移,分析点位置布置见图 4。

由图 5 曲线形状可以看出:隧道周边位移特征曲线在任一开挖进尺工况下,围岩位移数值曲线与著名的 Peck 曲线是一致的。台阶法施工开挖进尺为 1,2 m 和 4 m 时,隧道周边位移曲线近似于水平线,隧道位移变化整体趋势较小;开挖进尺为 6,8,10,12 m 和 14 m 工况时,隧道位移响应变化较大,周边位移曲线为深 V 型,有明显的波峰和波谷。分析点 1 拱顶为波峰,分析点 5 拱底为波谷,侧拱周边位移在波峰及波谷之间分布。

由图 6 可以看出:隧道侧拱两侧在不同开挖方案工况下位移数值呈对称分布,且隧道侧拱右侧的发生竖向位移的数值较左侧的大,故图 6 对称轴略微向右倾斜。长茂山隧道在修建时,围岩处在复杂的受力状态,隧道的开挖过程扰动了围岩应力平衡使得围岩发生应力重分布,导致了隧道位移变化。隧道在开挖过程中发生偏压,同时侧拱右侧竖向位移的数值较左侧的大,故应针对对隧道右侧的围岩进行及时有效支护。

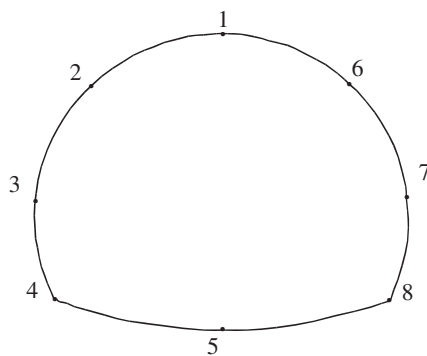


图 4 隧道测点布置

Fig.4 Layout of the tunnel measuring point

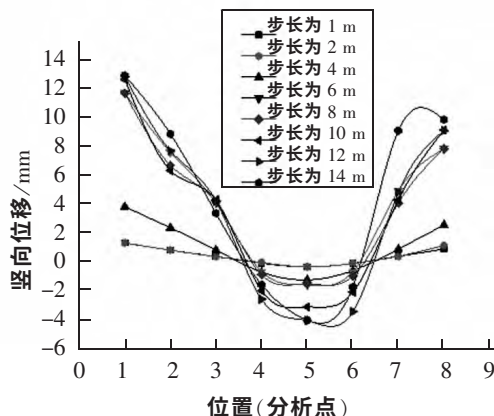


图 5 不同开挖进尺隧道周边位移特征

Fig.5 Tunnel periphery displacement characteristics at different excavation footage

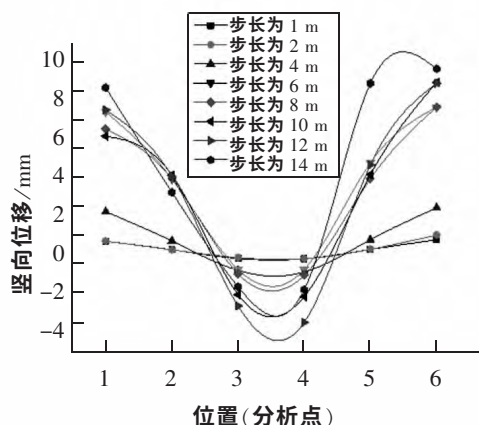


图 6 不同开挖进尺隧道侧拱位移特征

Fig.6 Tunnel arch deformation characteristics at different excavation footage

3 对围岩容许极限位移量的几点探讨

容许极限位移量是指自隧道开挖到其沉降数值趋于稳定时,为使隧道不发生大的松动和地表不发生有害沉降量,拱顶处发生的最大容许沉降值。在水平方向,也可以用在隧道起拱线位置处壁面间的最大容许位移值来表示容许极限位移量^[12-13]。

以围岩发生的位移作为隧道失稳的判据,难点在于其容许位移值的确定。目前,对于隧道容许极限位移值,国内外提出了很多的标准。法国 M.Louis 提出围岩容许位移随隧道的埋深而变化,位移值约为隧道埋深的 1‰;日本在“新奥法设计施工技术指南草案”中提出隧道的允许净空收敛值应按围岩类别来划分;在奥地利,阿尔贝格隧道的驻地工程师提出净空变化的允许值为隧道半径的 10%,但最大不超过 30 mm^[14]。

在铁路隧道设计规范中提出,隧道开挖变形量与多种因素有关,应根据所接触围岩类别、支护情况、隧

道的埋置深度、施工方法等采用工程类比方法来
确定容许极限位移量。当工程复杂无法类比既有
隧道时,容许位移值可按表 3 来确定^[15]。由表 3 可
以看出:隧道的“合理”容许位移量是一个动态的
范围值。基于隧道开挖安全和经济等因素下,“合
理”容许位移量在综合考虑多种施工条件和所处
工程地质环境下的动态范围值。

本次隧道开挖过程中,不同开挖进尺条件
下,围岩最大竖向位移值如表 4 所示,可见开挖
进尺越大,围岩位移及应力值也相应随之增大。

表 3 预留变形量
Tab.3 Reserved deformation

围岩级别	单线隧道/mm	双向隧道/mm
II	—	1~3
III	1~3	3~5
IV	3~5	5~7
V	5~7	7~10
VI	7~10	特殊设计

表 4 围岩最大竖向变形与开挖进尺的关系
Tab.4 Relationship between maximum vertical deformation of surrounding rock and the excavated footage

开挖进尺/m	1	2	4	6	8	10	12	14
围岩最大竖向位移/mm	1.35	1.15	4.29	14.31	14.4	14.89	15.17	15.19

将表 4 数据用 Logistic 增长函数进行拟合, Logistic 增长函数所拟合的曲线是一条 S 形曲线,与围岩竖
向位移图发展的趋势相似,其表达式为: $S = S_{\max} / (1 + e^{-bx})$,式中: S 为围岩竖向位移; x 为变量; a 、 b 为待求参
数; $S_{\max}$ 为最大竖向位移。拱顶应力拟合过程同上。

由图 7 和图 8 可以看出:① 开挖进尺为 1 m 和 2 m 时,围岩位移及拱底处应力值增长较为缓慢,开挖
对地层的扰动影响相对较小,且最大位移量均小于 2 mm,拱顶应力均小于 45 kPa;② 开挖进尺为 4 m 时,
围岩最大竖向位移及拱顶应力增长速度大于开挖进尺为 1 m 和 2 m 的增长速度,开挖过程中位移量增大至
4.29 mm,小于规范对于单洞隧道中容许位移变化 5 mm。故在实际施工过程中宜采用此阶段的开挖进尺;
③ 开挖进尺为 6 m 时,此阶段曲线斜率为图 7~图 8 中的最大值,围岩竖向位移和拱底应力得到了极大的发
育,竖向最大位移由 4.29 mm 增大至 14.31 mm,增大了 233.57%,拱顶应力由 80 kPa 增大至 143 kPa,增大
了 78.75%,随着隧道开挖的进行,在隧道拱顶处形成应力集中;④ 开挖进尺为 8~14 m,其竖向位移及应力
增长滞缓,增长速度趋近于水平线,随着开挖进尺的变化,无论是位移还是应力数值变化都很小。

开挖进尺越大,释放位移也相对越大。因此,浅埋无断层且富含地下水隧道施工中,宜采用缩小开挖进
尺、同时对薄弱处进行及时有效支护等方式来减小围岩位移量。

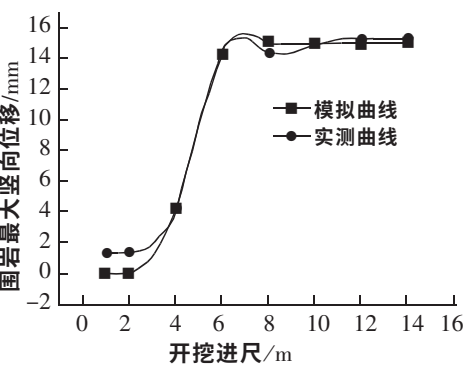


图 7 不同开挖进尺下围岩最大竖向位移
Fig.7 Maximum vertical displacement of surrounding rock at different excavation footage

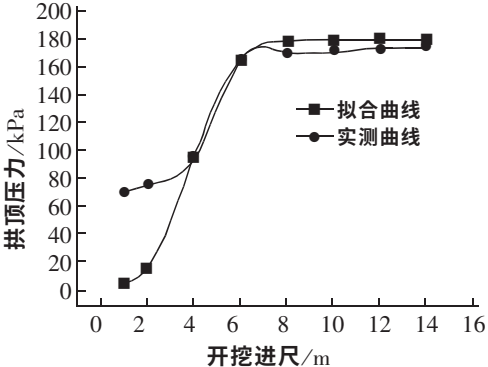


图 8 不同开挖进尺下拱顶应力
Fig.8 Vault stress at different excavation footage

4 结论

对台阶法不同开挖方案下隧道施工过程进行三维数值模拟分析,得出了以下结论:

- 1) 围岩位移变化主要在拱顶及拱底附近。侧拱两侧位移呈对称分布。
- 2) 围岩的最大变形量随开挖循环进尺增大相应增大,当开挖进尺增大到 6 m 后,围岩发生最大位移增长滞缓。
- 3) 围岩竖向位移和拱顶应力随开挖进尺变化的规律可以采用 Logistic 增长函数进行拟合。
- 4) 在长茂山隧道地质、支护条件下,仅从施工进度方面来说,循环开挖进尺以 4 m 为宜。

参考文献:

- [1] 乔兰,高稳,李远,等. 硬岩 CWFS 模型的改进及其在岩质高边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2593-2600.
- [2] 陈树汪,蒋树屏. 一个用于确定软岩隧道开挖进尺的解析模型[J]. 现代隧道技术,2010(S):259-264.
- [3] 蒋树屏,刘洪洲,鲜学福. 大跨度平坦隧道动态施工的相似模拟与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(5):567-572.
- [4] 马显红. 杉树坳隧道台阶法开挖初期支护变形规律分析[J]. 铁道建筑,2012(1):44-47.
- [5] 陈建平,蒋宗鑫,陈志超,等. 通省隧道变质软岩变形破坏机理及减避措施研究[J]. 铁道建筑,2012,12:47-50.
- [6] 任尚强. 大跨度隧道洞口浅埋段工法探讨及应用[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(5):943-948.
- [7] JIANG Y, YONEDA H, TANABASHI Y. Theoretical estimation of loosening pressure on tunnels in soft rocks [J]. Tunnelling and Underg-round Space Technology, 2001, 16(2):99-105.
- [8] 黄锋,朱合华. 开挖进尺对大断面隧道变形的影响[J]. 铁道建筑,2013(8):56-58.
- [9] LEE Y Z, SCHUBERT W. Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock[J]. Tunnelling and underground space technology, 2008, 23(3):221-231.
- [10] 梅洪斌. 管棚法加固软岩隧道合理开挖进尺研究[J]. 铁道建筑技术, 2013(S1):100-102.
- [11] 朱合华,黄锋,徐前卫. 变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(6):1113-1122.
- [12] 章坤. 浅覆土下穿铁路大跨度箱涵顶进施工工艺关键参数优化[D]. 华东交通大学,2016:52-61.
- [13] 李志清,丁春林,李双美,舒进. 浅埋大断面黄土隧道围岩变形时空效应分析[J]. 华东交通大学学报,2014,31(4):6-10.
- [14] 张世帆,夏述光,左昌群,等. 软岩隧道围岩变形量与变形速率临界值及警戒值探讨[C]//. 第三届全国公路科技创新高层论坛论文集. 北京:北京人民交通出版社,2006(4):653-657.
- [15] TB 10003-2005,铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2001.

Analysis on Stability and Variability of Surrounding Rock in Tunnel Based on Different Excavated Programs

Diao Xinhong, Zhu Chen, Yu Yang

(Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Engineering Infrastructure Security and Control,
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Different footage can cause the deformation of surrounding rock in tunnel excavation and exceeding the allowable deformation value would bring harm to surrounding rock stability in the tunnel. Taking the shallow-buried double-lane tunnel Changmaoshan Tunnel as an example, using the finite element software ABAQUS to conduct numerical simulation in different excavated cyclic footage conditions in the process of tunnel construction, this study analyzes the rules of the surrounding rock deformation with different footage in view of the displacement and stress by step method. It shows that displacement response is mainly distributed in the vicinity of the arch bottom and arch vault; Cyclic excavation footage is small while the influence of excavated disturbance on ground is relatively small and the maximum deformation of surrounding rock is smaller; The maximum deformation of the surrounding rock increases with the increase of excavated cyclic footage correspondingly; Growth rate is indeterminate, and the maximum displacement growth of the surrounding rock has stagnated when excavated footage increases to a certain number of meters. It proposes the appropriate circular excavation footage to 4m.

Key words: excavated footage; shallow tunnels; numerical simulation; deformation

(责任编辑 王建华)