

文章编号:1005-0523(2014)06-0013-04

## 大断面浅埋黄土隧道施工参数研究

窦世学<sup>1</sup>,王科元<sup>1</sup>,张伍星<sup>1</sup>,李志清<sup>2</sup>

(1.中铁二十五局集团第五工程有限公司,山东 青岛 266000;2.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:**针对大西客专某大断面浅埋黄土隧道,基于有限元Plaxis-3D分析软件,采用莫尔-库伦模型,对隧道三台阶七步开挖工法进行了施工参数数值模拟。研究了隧道开挖中不同开挖循环进尺、不同台阶长度、不同分块大小施工对隧道变形及稳定性影响。研究结果显示:开挖循环进尺为1 m时,开挖步最大累积变形为30 mm;台阶长度为5 m时,隧道相对收敛为74 mm;上台阶高度为3 m时,隧道相对收敛为76 mm。此开挖参数可以有效地控制隧道变形,保证隧道围岩稳定。

**关键词:**黄土隧道;大断面;浅埋;数值模拟;施工参数

**中图分类号:**U25

**文献标志码:**A

大断面隧道施工方法,国内外从20世纪80年代后主要采用台阶分步法、中壁法以及双侧壁法开挖,对于大断面黄土隧道施工,国内也有成功采用三台阶七步开挖法的先例。正在修建的大西铁路客运专线上的隧道中,黄土隧道大部分在浅埋段,隧道开挖面积达161.64 m<sup>2</sup>,全长3 083 m。隧道全部为黄土V级围岩,隧道处于低山丘陵区,黄土沟壑较发育,表覆新黄土,黄褐色,坚硬~硬塑,颗粒均匀,具大孔隙,含薄层细圆砾土和钙质结核层,夹多层浅棕红色古土壤层;下伏老黄土,浅棕红色,坚硬~硬塑,土体紧密,含钙质结核层和洪积碎石类土和砂土,覆土较薄。但是目前关于黄土的工程特性、黄土隧道的施工参数大多数是基于较小断面黄土隧道,由于大西客专黄土隧道埋深浅、断面大,加之其地质条件复杂、修建技术还不成熟等,大量的岩土工程问题呈现在我们的眼前,因此研究大断面黄土隧道的施工参数,从而为施工单位提供一种经济合理的施工参数迫在眉睫。因为不仅能为优化大西铁路客运专线大断面浅埋黄土隧道的施工提供参考,同时也为今后类似工程的实施和深入的理论研究提供参考和借鉴,因此具有十分重要的意义。

本文基于Plaxis-3D有限元模型,采用库伦-摩尔模型对隧道开挖中的三台阶七步开挖法进行了施工参数的研究,研究分析了隧道施工开挖循环进尺、台阶长大、分块大小对隧道受力变形的影响。

## 1 计算理论

源于1900年的摩尔(Mohr)准则,是基于最大剪应力为屈服决定性因素的假设。摩尔包络线如图1所示,其称为库伦(Coulomb)方程,其表达式为:

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中:  $c$  为粘聚力;  $\phi$  为内摩擦角。

由式(1),当  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  时,摩尔-库伦准则可写为:

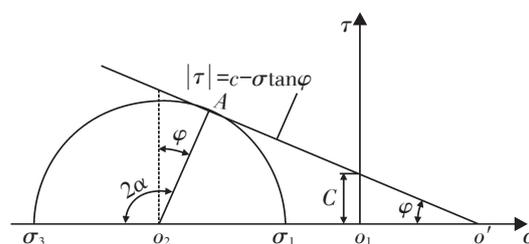


图1 摩尔-库伦准则

Fig.1 Mohr-Coulomb's criterion

收稿日期:2014-09-21

作者简介:窦世学(1972—),男,高级工程师,主要从事隧道施工和铁路管理等方面的研究。

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos\phi = c - \left[ \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin\phi \right] \tan\phi \quad (2)$$

式(2)未反应中主应力  $\sigma_2$  的影响。在三维主应力空间中,当  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  时,其破坏面可表示为:

$$f(I_1, J_2, \theta) = \frac{1}{3}I_1 \sin\phi + \sqrt{J_2} \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) + \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \sin\phi - c \cos\phi = 0 \quad (3)$$

式中:  $I_1$  和  $J_2$  为应力张量的第一、二不变量;  $\theta$  为洛德角,即主应力空间第一主应力和偏应力分量夹角。

## 2 有限元计算方法

### 2.1 计算模型与范围

为减小有限元模型中边界约束条件对计算结果产生的不利影响,计算模型的边界范围在各个方向上均大于二倍的洞跨。具体计算时,计算域在水平方向宽度取 80 m,在竖直方向上取 60 m,向上洞口浅埋地段取至地表,模型的左面、右面和底面均为固支约束,顶面为自由面。隧道埋深取 10 m,隧道为三心拱曲墙,宽取 1 520 mm,高 1 298 mm,锚杆长 3.5 m,间距 1.2 m,隧道采用三台阶七步开挖法施工。计算模型如图 2,开挖施工工序如图 3。

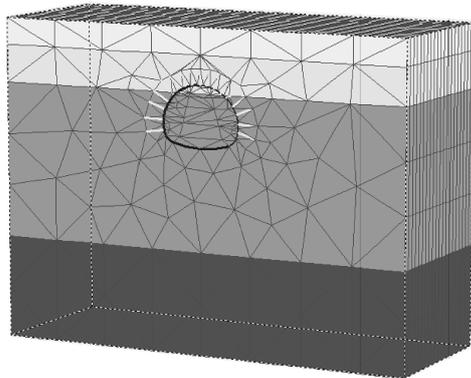


图2 三维有限元计算模型网格图

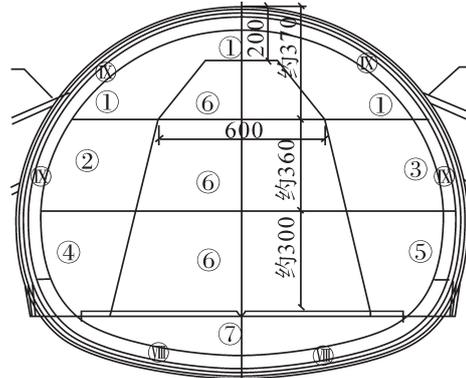


图3 三台阶七步开挖法施工工序横断面

Fig. 2 Mesh of three-dimensional finite element model

Fig. 3 Excavation process of three bench seven step method

### 2.2 计算参数

支护结构参数见表 1,计算时围岩和支护结构的各物理力学参数取值如表 2 所示。初支采用喷射混凝土加锚杆。喷射混凝土厚度为 28 cm,锚杆长度均采用 3 m,直径分别为 25 mm,模型中未单独考虑钢筋网和钢支架的作用,将钢支架和钢筋网的支护强度等效换算给初喷混凝土。

### 2.3 模拟步骤

有限元模拟过程分 7 个荷载步:①上台阶开挖;②左中台阶开挖;③右中台阶开挖;④左下台阶开挖;⑤右下台阶开挖;⑥核心土开挖;⑦仰拱封闭。模拟过程中冻结相应区域岩体单元模拟开挖,激活加固区域材料模拟锚杆加固,激活相应板单元模拟喷射混凝土和仰拱,杀死相应板单元模拟临时支撑的拆除。

表 1 支护结构参数表

Tab. 1 Parameters of supports

初期支护	锚杆/m			钢筋网 $\phi 8$		钢支架		二次衬砌/cm	
C25 混凝土 厚度/cm	拱部长度	边墙长度	间距/(m×m)	部位	间距/(m×m)	型号	间距/m	拱墙厚度	仰拱厚度
26	2.5	3.5	1×1	拱墙	25×25	I25a	1.0	45	50

表2 围岩物理指标参数表

Tab.2 Physico-mechanical parameters of surrounding rock mass

地层	天然含水率/%	天然密度/ g·cm <sup>-3</sup>	饱和度/%	塑性指数	液性指数	压缩系数/ MPa	弹性模量/ MPa	内摩擦角/ (°)	粘聚力/ kPa
全新世黄土	14	1.83	55	8.6	-0.3	0.10	150	23	65
马兰黄土 <sub>1</sub>	9.2	1.8	37	8	-0.86	0.12	200	26	78
马兰黄土 <sub>2</sub>	20	1.9	80	9.5	0.2	0.24	210	30	80
离石黄土	25	1.93	94	15	0.16	0.1	230	35	83

### 3 隧道开挖施工参数影响分析

#### 3.1 不同开挖循环进尺计算结果分析

针对三台阶七步开挖法,计算隧道埋深10 m,按1 m,1.5 m,2 m三种进尺长度进行三维分析,其余施工参数不变(中台阶高度4 m)。对各变形云图最大变形值进行整理,得到隧道埋深10 m开挖进尺为1 m,1.5 m,2 m的各开挖步的最大竖向变形值,如表3所示。

表3 不同开挖进尺围岩竖向变形

Tab.3 Deformation of tunnel surrounding rock of different excavation footages

进尺/m	1	2	3	4	5	6	7
1	15	18	22	24	26	28	30
1.5	25	28	30	34	36	38	42
2	40	45	48	52	56	58	60

表3显示的是各开挖步最终沉降量,也就是累计沉降量,所以每一开挖步计算得到的变形值都是比较大的,每一步最大变形增量值也是比较大的,其中在开挖第一步(拱顶部分环形开挖)最大变形增量最大,根据隧道开挖变形时间效应,认为隧道某一开挖步在开挖完毕的变形值最大可达到这一开挖步引起最终变形值的70%。根据大断面黄土隧道相关规范要求,认为在一次开挖步之后隧道最大变形增量超过30 mm,那部分土体就会因变形过大而破坏,换算成最终沉降量也就是接近43 mm就会破坏。为加快现场施工进度,一般隧道开挖进尺越大越好,根据计算结果,可以看到:开挖进尺为1 m时,开挖步最大累积变形为30 mm;开挖步进尺为1.5 m时,开挖步最大累积变形为42 mm;开挖进尺为2 m时,开挖步最大累积变形为60 mm。因此说开挖循环进尺小于1 m隧道变形满足规范,随着循环进尺的增加隧道变形增大,易导致破坏。

#### 3.2 不同台阶长度计算结果分析

黄土隧道的台阶长度不宜过长,否则封闭距离必然拉长,变形增大。同样以上述隧道断面为例,选择3,5,7 m等3种台阶长度进行三维分析,其余施工参数不变(循环开挖进尺1 m,封闭距离3.5 m),计算结果如表4所示。

表4 不同台阶长度位移及应力对比表

Tab.4 Deformation and stress of tunnel surrounding rock of different step length

台阶长度/m	沉降/mm		相对水平位移/mm			最大钢架应力/MPa	
	拱顶	拱脚	上台阶	中台阶	下台阶	拉	压
3	45	38	22	21	16	29	23
5	37	37	32	36	28	无	94
7	45	66	46	46	37	无	103

由计算结果可知:台阶长度由3 m增加至5 m,沉降减少1~8 mm,减幅21%以上;中台阶相对水平位移减少15 mm,下台阶相对水平位移减少12 mm,台阶长度由5 m增至7 m,沉降增加5~9 mm,增幅5.8%;相对

水平位移增加-20.4~4 mm,增幅小于10%。台阶长度为3 m时,相对水平位移上台阶最大,中台阶次之,下台阶最小;台阶长度为5 m时,相对水平位移中台阶最大,上台阶次之,下台阶最小;台阶长度为7 m时,相对水平位移中台阶最大,上台阶次之,下台阶最小。同一封闭距离下,台阶长度短则仰拱开挖距离变长。因此,建议浅埋大断面黄土隧道各台阶长度控制在5 m以内。

### 3.3 不同台阶高度计算结果分析

隧道埋深为10 m,按1 m进尺长度,上台阶高度分别为3 m和4 m两种工况进行三维分析,其余施工参数不变。不同台阶高度隧道位移计算结果对比如表5所示。

由表5可见,台阶高度由3 m增加到4 m竖向位移相对收敛又76 mm增加到了98 mm,增加了25%;相对水平位移由76 mm增加到了89 mm,增加了17.1%。由此可以推断,增大上台阶高度施工中,竖向及水平位移都增大,这是对施工不利的。

表5 不同台阶高度位移对比表

Tab.5 Surrounding rock convergence deformation of different gate heights

台阶高度/m	竖向位移/mm			相对水平位移/mm		
	拱顶下沉	拱底隆起	相对收敛	左拱腰	右拱腰	相对收敛
3	-38	38	76	39	-37	76
4	-48	50	98	40	-49	89

## 4 结论

本文通过Plaxis-3D有限元软件对大西客专某浅埋黄土隧道进行数值模拟分析,研究了浅埋大断面黄土隧道采用三台阶七步开挖法不同循环进尺、不同台阶长度、不同分块大小开挖对隧道受力变形的影响,可得到以下几点结论:

1) 浅埋大断面黄土隧道采用三台阶七步法施工,不同循环进尺隧道竖向变形规律一致,随着开挖的推进,隧道的竖向变形增大,最大竖向变形出现在隧道开挖的第7步。但是不同的循环进尺开挖,隧道的竖向变形不相等,即随着开挖循环进尺的增大,隧道的竖向变形增大,1 m循环进尺最大沉降量30 mm,1.5 m循环进尺增大到42 mm,2 m循环进尺则增大到60 mm,增幅较明显。

2) 浅埋大断面黄土隧道三台阶七步开挖工法,不同台阶长度隧道沉降规律一致,拱脚的沉降量大于拱顶的沉降量。上、中、下台阶水平位移规律存在差异;台阶长度最大钢架拉力消除,压力最大。

3) 浅埋大断面黄土隧道三台阶七步开挖工法,台阶高度由3 m增加到4 m竖向位移相对增加了25%;相对水平位移增加了17.1%。因此,建议上台阶高度采用3 m。

### 参考文献:

- [1] 丁春林. 支护与加固期间复线隧道围岩稳定性因素分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 62-66.
- [2] 张汉高. 三台阶七步法在黄土隧道开挖[J]. 民营科技, 2014(3): 156-159.
- [3] 扈世民, 张顶立, 王梦恕. 铁路大断面黄土隧道初期支护作用效果[J]. 北京交通大学学报, 2012(2): 19-23.
- [4] 李凤刚. 黄土连拱隧道施工过程的数值模拟和方案优化[J]. 安徽建筑, 2004(3): 87-89.
- [5] PLAXIS b. v. Plaxis Version 8: Material Models Manual [P]. Plaxis Manual, 2006.
- [6] 王江宏, 王春波, 卢广宁. PLAXIS在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用[J]. 山西建筑, 2007, 33(35): 94-95.
- [7] 刘长祥, 吕常新. 三车道大断面高速公路隧道稳定性数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2007(04): 688-693.
- [8] 龚成术. 浅谈大断面黄土隧道三台阶七步开挖法[J]. 铁道建筑技术, 2009(6): 71-74.
- [9] 刘伟. 大断面黄土隧道三台阶七步开挖法施工技术[J]. 中国铁路, 2010(5): 66-69.

(下转第28页)

## Test Study on Mechanical Properties of Thermit Welded Joint of $75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ Rail in Heavy Haul Railway

Cheng Jianping<sup>1</sup>, Tao Jiayuan<sup>2</sup>, Xu Yude<sup>2</sup>, Wang Tianyi<sup>2</sup>, Sun Hongfang<sup>1</sup>

(1. Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Suning 062350, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Thermit welding is applied in the heavy haul railway line to realize site welding of rails. In order to evaluate mechanical properties of the thermit welded joint, this study carried out a series of laboratory tests for the site samples. The test results show as follows: Some of the samples do not meet the requirements of load in bending test; The maximum deflection of each testing sample is lower than limit; The number of fatigue loading cycles of some samples are less than the limit of  $2 \times 10^6$ ; The impact absorbing energy of all samples do not meet the standard requirements. In general, mechanical properties of thermit welded joint of  $75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$  rail do not meet the current requirements. It is necessary to make improvements in welding flux, equipment and process to enhance the performance of thermit welded joint and to meet the requirements as well.

**Key words:** heavy haul railway; thermit welding; welded joint; mechanical properties; test

(上接第 16 页)

[10] 李剑军,柯以茂. 大断面黄土隧道弧形导坑三台阶七步开挖施工技术研究[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2013(11): 126-129.

[11] 丁维利. 大断面黄土隧道二台阶四步开挖施工技术[J]. 铁道标准设计, 2007(S1):109-112.

## Study on Construction Parameters of Shallow and Large-section Loess Tunnel

Dou Shixue<sup>1</sup>, Wang Keyuan<sup>1</sup>, Zhang Wuxing<sup>1</sup>, Li Zhiqing<sup>2</sup>

(1. The Fifth Engineering Co., Ltd., China Railway 25th Bureau Group, Qingdao 266000, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;)

**Abstract:** Aiming at a shallow and large-section loess tunnel of Datong-Xi'an railway and based on Plaxis-3D finite analysis software, this paper uses Mohr-Coulomb model to numerically simulate the three-bench seven-step excavation method. The influence of different excavation footage cycles, lengths of step and sizes of block on the deformation and stability are studied. The results show as follows: when the excavation footage cycle is 1 m, the maximum accumulated incremental deformation of excavation step is separately 30 mm; when the length of step is 5 m, the relative convergence of tunnel is 74mm; when the length of upper step is 3 m, the relative convergence of tunnel is 76 mm. It finds out that the construction parameters above during excavation may make the deformation small with good stability.

**Key words:** loess tunnel; large section; shallow buried; numerical simulation; construction parameters