浅埋黄土隧洞施工过程数值模拟

金学洋,李宗利

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】针对浅埋黄土隧洞顶覆土薄,自稳能力差,特别是开挖初期变形增长较快,极易产生坍塌的 特征,利用有限元方法模拟隧洞不同施工工序的施工过程,通过比较得出较为合理的施工工序,以指导工程施工。 【方法】结合某工程输水隧洞具体施工问题,利用有限元分析计算软件 ADINA,建立该隧洞的施工过程数值模拟模型,对上行法和下行法2种开挖过程进行数值模拟,分析2种施工过程中硐室周围土体所产生的应力、应变、屈服区以 及位移等。【结果】通过对隧洞施工工序的模拟分析,得到上行法开挖时的拱脚压应力是下行法开挖时的1.5倍,对 于拱顶位移和塑性区范围,上行法开挖均大于下行法。【结论】虽然该黄土隧洞埋深较浅,断面较大,采用人工分层开 挖,下行法和上行法2种工序均是稳定的,但下行法优于上行法。

[关键词] 浅埋黄土隧洞;施工工序;数值分析;围岩稳定

[中图分类号] TV672⁺.1 [文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)05-0224-05

Numerical simulation of excavation of loess shallow-buried tunnel

JIN Xue-yang, LI Zong-li

(College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Loess shallow-buried tunnel is characterized with thin soil layer and poor stability, especially the fast developed deformation at the early excavation stage which is subject to collapse. The excavating process of tunnel under different construction working procedures with FEM was simulated, a more reasonable one was obtained by comparing the construction process to guide engineering construction. [Method] ADINA was adopted to analyze the construction working procedure with upwards and downwards excavating steps based on the geological conditions of a domestic tunnel project, and the stress, strain and yielding areas and displacement, etc. of surrounding rock were analyzed during two construction process. [Result] Analysis of the construction process showed that arch feet compress stress of upwards was 1.5 times of downwards excavating process, and for vault displacement and yield areas upwards was more than downwards. [Conclusion] The results show that although the depth of the loess tunnel is relatively shallow, the cross-section is relatively larger, it is stable when excavated with the two working procedures.

Key words: loess shallow-buried tunnel; construction working procedure; numerical simulation; stability of surrounding rock

浅埋黄土隧洞的特征是顶覆土薄、自稳能力差, 特别是开挖初期变形增长快,极易出现坍塌或过大 的下沉^[1-4]。对于浅埋黄土硐室而言,其开挖方式一 般采用分层开挖、分块施工的作业方式。从围岩应 力状态变化角度考察,不同的开挖程序就意味着不 同的应力路径或应力历时,不仅影响施工期内围岩

E-mail:zongli01@tom.com

^{* [}收稿日期] 2008-07-22

[[]作者简介] 金学洋(1982-),男,甘肃靖远人,在读硕士,主要从事水工结构研究。E-mail:jinxy126@126.com

[[]通信作者] 李宗利(1967-),男,陕西凤翔人,副教授,博士,主要从事水工结构与岩土工程稳定理论研究。

225

的应力、破损区、洞周位移,而且影响硐室最终成形 后围岩的应力分布、破损区大小以及洞周位移状 况^[5]。因此,优选开挖工序是浅埋黄土硐室施工的 关键技术问题。

位于黄土地层内的硐室,具有与其他岩性内硐 室不同的特点。黄土质地总体较软,较其他岩性的 强度小很多,但当硐室断面较大时,尤其是埋深较浅 时,其稳定性变得较差^[6]。由于黄土质地较软,开挖 施工方便,往往采用人工开挖方式^[2,7]。对于水工隧 洞一般要进行衬砌支护,但支护时间远滞后于土体 的变形过程,所以该类隧洞施工期洞周土体主要依 靠自身来稳定。但其稳定性又与开挖的洞体形状、 大小、施工速度和施工工序等因素直接相关[8-12]。 李宗利等[2]研究了开挖水窖时窖体周围黄土的特 性,但水窖相对于水工隧洞而言,开挖断面较小;赵 长海等^[7]、Galli等^[8]和李宁等^[9]研究了软岩中隧洞 的受力特性,但不同的隧洞施工工序,将造成硐室周 围土体的应力、应变以及屈服区和土体的稳定状况 等有较大差别;郑颖人等[13]、凌荣华等[14]、何满潮 等[15] 对黄土中隧洞的稳定性进行了分析,提出了相 应的施工、支护设计方案,但由于不同工程的地质状 况及建筑目的要求有较大差异,因此应对具体工程 有针对性地进行分析和研究。

本研究结合国内某工程输水隧洞区域的地质状况,采用有限元分析计算软件 ADINA,建立了地下 洞室的有限元计算模型,对硐室周围土体在开挖过 程中土体的应力、应变以及屈服区和土体的稳定状 况进行了数值模拟分析,对不同施工工序的施工安 全性进行评价,并提出了较为合理的施工工序,以期 为该类隧洞施工方案的合理选择提供理论依据。

1 基本资料

某工程泄洪涵(隧)洞,其断面形式为城门洞型, 底板设置反拱。毛洞断面尺寸为 6.20 m×6.84 m (宽×高),全长 1 605 m。泄洪涵(隧)洞沿线主要穿 越河床漫滩、洪积台地、一级阶地及黄土梁(黄河三 级阶地)。本研究的对象为 0+726~1+061 段黄土 状壤土及古壤土段的隧洞,最大埋深约 30 m。硐室 围岩为黄土状壤土,湿密度 $\rho=1.75$ g/cm³,含水量 W = 14.9%,孔隙比 e = 0.782,压缩系数 $\alpha_{1-2}=0.51$ MPa,压缩模量 $E_s=3.42$ MPa,属于高 压缩性土,承载力标准值 $f_k=150$ kPa,地下水位低 于洞底,围岩属于极不稳定的 V 类围岩,坚固系数 $f_0=0.6\sim0.8$ 。 根据水工隧洞规范(SL279-2002)^[16]条文的说明,目前工程界多采用荷载等效高度作为判断隧洞 深浅埋的界限,若隧洞埋深大于荷载等效高度则为 深埋型隧洞,反之则为浅埋隧洞。经计算,该隧洞的 荷载等效高度为 47~59 m,大于隧洞的最大埋深 30 m,因此该隧洞属于浅埋隧洞。

2 计算模型及模拟方案

2.1 计算模型

由于硐体长度远大于其横断面的高度和宽度, 故采用平面应变模型来分析。取洞侧、洞底各 60 m,洞顶到地面取平均埋深 27 m进行分析计算。开 挖分 8 步进行,荷载主要是土体的自重荷载。数值 模拟采用非线性弹塑性有限元方法进行,选用 Mohr-Coulomb 准则作为土体的屈服准则建立有限元 模型,网格划分采用 8 节点四边形单元。同时,考虑 隧洞开挖前土体内的初始地应力。由于该段隧洞所 在地域地下水埋深较大,故不考虑地下水的影响。

2.2 评判准则

土体的有限元稳定性分析属于有限变形分析法 之一。当采用有限变形法分析岩土的稳定性时,其 稳定性通常是根据迭代计算的收敛性、塑性区的连 同情况、位移的突变性以及应力场规律等力学特征 来判断^[2,13]。影响迭代收敛性的因素较多,不完全 是由于塑性区太大造成的,也可能是因为所选取的 分析参数影响所致,因此本研究选择塑性区连通情 况及关键点的位移突变,作为土体失稳的基本评判 方法。同时,考虑到土体是一种抗拉能力极小的材 料,某些局部的拉裂可能导致整体破坏,而且隧洞是 依靠自身维持平衡的,不管在开挖还是正常使用时, 其关键部位(如拱圈)不宜出现拉应力。对非关键部 位(如侧墙)则允许存在较小的拉应力,但范围应足 够小。因此,以关键部位是否出现主拉应力,以及非 重要区域拉应力区的范围作为补充评判方法。

在开挖过程中,若洞体关键点的位移趋于稳定 或减小,则表明开挖过程中土体不会坍塌,否则会引 起坍塌事故。关键点有洞顶、拱脚、地面等位置,其 中拱顶和地面位移以向下沉为正,拱脚则以向洞外 水平位移为正。

首先对未设置开挖单元的模型进行求解,在结 果文件中提取模型中每个节点的应力,然后导入到 原模型中,即在计算模型中施加了初始地应力场,以 消除因土体自重荷载引起的变形。通过对洞体卸载 过程数值的模拟,对比洞体在不同卸载顺序时所产 生的应力分布结果、洞体塑性区范围以及洞体关键 点围岩位移的变化,选择最佳的施工方法,以确保大 断面黄土硐室在施工期和运营期的安全和稳 定^[15-16]。

2.3 模拟方案

地下硐室开挖一般分为下行法和上行法 2 种^[1]。本文应用有限元软件的生死单元功能,分别 采用下行法和上行法来研究隧洞开挖过程中的变 形、塑性区及拉应力等特征,以判断洞体在不同卸载

顺序时所产生的应力分布结果、洞体塑性区范围以 及洞体围岩位移变形情况,保证大断面黄土硐室在 施工期和运营期的安全和稳定。洞体开挖采用分层 导洞法施工,将硐室自上而下分为4层(图1),每层 分为4个开挖单元。由于分块的面积(体积)较小, 故假定每个分块的面积是在很短时间内被挖去的。 整个硐室断面分8步开挖,下行法和上行法的开挖 顺序如图1a、图1b所示。







采用生死单元模拟开挖的具体的步骤为:(1)针 对施工过程中的模拟区域来划分网格,初始状态下 土体单元均设置为"生"状态,每步计算中仅考虑处 于"生"状态的单元;(2)计算土的初始应力,通过土 体应力场求得;(3)将求得的初始应力导入模型中, 施加初始地应力场;(4)按照施工顺序,设置拟开挖 步土体单元的"杀死"时间。

3 结果与分析

3.1 位移变化

下行法与上行法开挖时,拱顶与地面的竖向位 移及拱脚的水平位移如图2所示。



- ◆ -. 地面坚向位移; - ■ -. 拱顶竖向位移; - ▲ -. 拱脚水平位移

Fig. 2 Displacement variation of key points under downward excavating steps (A) and upward excavating steps (B)

-♦-. Vertical grornd displacement; -■-. Vertical vault displacement; -▲-. Arch feet horlzontal displacement

由图 2 可知,采用下行法和上行法 2 种施工方 法时,各处的位移均较小,说明洞周土体虽经施工扰 动,但仍处于稳定状态,不会发生坍塌。对于地面竖向位移而言,虽然2种方法地面位移曲线的变化趋

势基本一致,但下行法总体小于上行法;下行法在第 3步时位移达到最大值,为0.803 mm;上行法在第7 步时位移达到最大值,为0.929 mm。对于拱顶竖 向位移而言,下行法在第3步开挖时达到最大值 3.776 mm,上行法仍在第7步达到最大值 3.892 mm,均出现在压力拱形成时。第3步以后,下行法 的地面位移和拱顶位移变化趋势基本一致,说明土 体已趋于稳定;而上行法拱顶位移变化较大,说明上 行法开挖时对覆盖层扰动较大。对于拱脚水平位移 而言,下行法在第3、4步出现负值,这是因为在第3 步开挖后,压力拱已经形成,第3、4步的开挖导致侧 墙约束减弱,发生了向洞内的位移所致,而第4步的 拱顶位移减小也说明了这个问题。

下行法施工时,开挖是自硐室顶部开始,逐层向 下施工形成了正台阶工作面,因此在硐室顶部产生 了较大的位移。采用上行法开挖时,由于首先沿硐 室的底板从两侧掘进超前导洞,形成倒台阶工作面, 随着洞内下部土体的不断移去,洞侧土体的侧向约 束减弱,向洞内的水平位移增大,推动拱脚向洞内移 动,而在硐室顶板附近不再产生大的位移。

3.2 塑性区范围

对于施工过程中围岩的塑性区范围,下行法和

上行法 2 种施工工序的围岩塑性区范围基本相同。 采用下行法开挖时,开挖第 3 步时在拱脚出现塑性 区,但塑性区的范围很小。随着开挖的进行,塑性区 范围逐渐顺着侧墙向下发展,最后在侧墙的底角处 出现塑性。最大塑性区发生在拱脚处,最大塑性应 变为 3.969×10⁻⁴,在侧墙外侧 0.6 m 范围内出现 塑性。这是因为硐室土体开挖以后,打破了原有的 应力平衡状态,土体中的应力进行重新分布,在临空 的洞壁附近发生切应力集中现象,导致该区域的土 体首先进入塑性状态,随着开挖过程的不断进行,不 断转移到临空洞壁上的应力,使围岩塑性区域不断 向围岩深部扩展。

上行法开挖时塑性区范围变化与下行法相似, 在整个开挖过程中,拱脚以下、侧墙及侧墙角均出现 了塑性区。虽然塑性区深度并不是很大,在侧墙外 侧 0.9 m 以内,但还是明显大于下行法,尤其在未开 挖硐室断面处产生较大塑性。最大塑性应变为 3.445×10⁻⁴,发生在侧墙角处,这是由于上行法与 下行法的卸荷顺序不同所致。

3.3 应力场分布规律

下行法与上行法开挖时,拱顶与拱脚的 Y 向应 力及侧墙中部的 Z 向应力的变化如图 3 所示。



图 3 下行法(A)和上行法(B)开挖时拱顶拱脚 Y 向位应力及侧墙 Z 向应力的变化 - ← - . 拱顶 Y 向应力; - ■ - . 拱脚步 Y 向应力; - ▲ - . 侧墙 Z 向应力

Fig. 3 Stress variation of key points under downward excavating steps (A) and upward excavating steps (B) $-\phi-$. Vertical varlt stess $Y; -\blacksquare-$. Arch feet stree $Y; -\blacktriangle-$. Side wall stess Z

由图 3 可知,对于下行法,在第 3 步开挖拱顶完 全形成时,约在整个拱顶表面范围内的土体内出现 了拉应力,最大拉应力出现在拱顶,其值为 0.146 kPa,远小于黄土的抗拉强度 15.1 kPa^[17]。同时拱 脚出现最大压应力,其值为 1.479 kPa。随着向下 开挖的进行,拱顶以上的拉应力逐渐减小,拉应力区 逐渐下移,说明压力拱已经形成。

由图 3 还可知,上行法开挖时,整个开挖过程中 临空面均有拉应力出现,但拱圈内的土体始终未出 现拉应力,最大拉应力出现在第7步开挖后,其值为 2.228 kPa,位于临空的硐室断面靠近拱脚处。与下 行法相比,上行法在开挖过程中对应的拱脚压应力 是下行法的1.5倍,侧墙的压应力也较大。

4 结 论

本研究应用 ADINA 软件建立了非线性数值分 析模型,对不同开挖方法,分别从关键点的位移、塑 性区范围、应力场分布规律等3个方面,分析了不同 开挖工序对硐体稳定性的影响。对于不同的开挖工 序,硐室周围土体产生变形的部位及大小、产生塑性 区的范围及其塑性应变的大小、产生应力集中的程 度及其性质等,存在着不同程度的差异,说明当硐室 围岩进入到塑性阶段后,在整个力学过程中已不再 是各种载荷的叠加,而且力学平衡关系与各种荷载 特性、御载过程密切相关^[3,12]。本研究结果表明,虽 然该黄土隧洞埋深较浅,断面较大,采用人工分层开 挖,上行法和下行法2种工序都是稳定的,但相对于 拱脚和侧墙的压应力、拱顶位移及塑性区的大小而 言,下行法开挖要优于上行法,这与[2]和文献[15] 所得出的结论一致,本研究可为相类似工程的施工 组织设计提供参考。

[参考文献]

[1] 罗文豹.中国的黄土地层与窑洞结构 [J].地下工程,1982,3 (3):45-51.

Luo W B. The loess stratum and structure of cave dwelling in China [J]. Under Ground Space, 1982, 3(3): 45-51. (in Chinese)

[2] 李宗利,王亚红.旱地水窖开挖数值模拟与结构形状参数验证 [J].农业工程学报,2007,23(6):66-70.

Li Z L, Wang Y H. Numerical simulation of water kiln excavation and verification of its shape parameters [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6):66-70. (in Chinese)

[3] 田 文,夏正中.浅埋隧道稳定性的粘弹塑性有限元分析 [J].地下空间,1992,12(2):97-104.

Tian W,Xia Z Z. Viscoelasto-plastic finite element analysis of stability of shallow-buried tunnel [J]. Under Ground Space, 1992,12(2):97-104. (in Chinese)

- [4] 王显春,庄纪栋,张宏博.软岩浅埋隧道施工对地表及围岩变形的影响分析 [J]. 隧道建设,2006,26(1):21-24.
 Wang X C,Zhuang J D,Zhang H B. Analysis on impact of construction of shallow-buried soft ground tunnels on deformation of ground surface and surrounding rock mass [J]. Tunnel Construction,2006,26(1):21-24. (in Chinese)
- [5] 王亚红,李宗利,于志秋.隧洞衬砌静力分析力学模型的研究
 [J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(10):127-130.

Wang Y H,Li Z L,Yu Z Q. Study on the structural mechanical model for tunnel lining [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat Sci Ed,2004,32(10):127-130. (in Chinese)

[6] 邢义川.黄土力学性质研究的发展和展望[J].水力发电学报, 2000,19(4):54-65.

Xing Y C. Development and looking ahead of loess mechanics [J]. Journal of Hydro-electric Engineering, 2000, 19(4): 54-65. (in Chinese)

[7] 赵长海,周小兵,贺建国,等.极软岩隧洞的设计与施工[J].岩 石力学与工程学报,2006,25(1):3034-3039. Zhao C H,Zhou X B,He J G,et al. Design and construction of tunnel in extremely soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 3034-3039. (in Chinese)

- [8] Galli G, Grimaldi A, Leonardi A. Three-dimensional modeling of tunnel excavation and lining [J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(3):171-183.
- [9] 李 宁,朱运明,谢定义,等.大断面饱和黄土隧洞成洞条件研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(6):639-642.
 Li N,Zhu Y M,Xie D Y, et al. Research on the tunneling methods in saturated loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2000,22(6):639-642. (in Chinese)
- [10] Lee Y Z, Schubert W. Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(3):221-231.
- [11] Wang X Q, Wang Z, Huang J. Finite element analyses of Wanjiazhai water transmission tunnel excavation and service
 [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2003, 19(4):387-391.
- [12] 冯 旭,张升堂.双洞交叉段三维有限元稳定性分析 [J].西 北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(4):199-205.
 Feng X,Zhang S T. 3D finite element analysis and de sign of the intersection part of two tunnels [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed,2008,36(4):199-205. (in Chinese)
- [13] 郑颖人,赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报,2005,38(1):91-98.
 Zheng Y G, Zhao S Y. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications [J]. China Civil Engineering Journal,2005,38(1):91-98. (in Chinese)
- [14] 凌荣华,韩贝传,曲永新.大跨度深埋黄土隧洞的开挖效应研究[J].工程地质学报,1996,4(3):65-70.
 Ling R H, Han B C, Qu Y X. Excavation effect of large-span deep buried loss tunnel [J]. Journal of Engineering Geology, 1996,4(3):65-70. (in Chinese)
- [15] 何满潮,李春华,王树仁.大断面软岩硐室开挖非线性力学特 性数值模拟研究 [J].岩土工程学报,2002,24(4):483-486.
 He M C,Li C H, Wang S R. Research on the non-linear mechanics characters of large section cavern excavating within soft rock by numerical simulation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,4(4):483-486. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国水利部.SL279-2002 水工隧洞规范[S].北 京:中国水利水电出版社,2002.
 The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China.SL279-2002 Standard for hydraulic tunnel [S].Beijing:China Water Power Press,2002. (in Chinese)
- [17] 党进谦,郝月清,李 靖.非饱和黄土抗拉强度的研究 [J].河 海大学学报,2001,29(6):106-108.
 Dang J Q, Hao Y Q, Li J. Study on tensile strength of unsaturated loess [J]. Journal of Hohai University, 2001, 29(6): 106-108. (in Chinese)