

斜井冻结凿井数值模拟方法

杨仁树, 王千星

中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083

摘要 为提高ANSYS软件对斜井冻结凿井模拟的准确度, 提出一种双模型法与改进重叠单元法相结合的数值模拟方法。以某矿主斜井表土冻结段施工为背景, 考虑冻土为弹塑性介质, 建立斜井冻结掘砌平面模型, 采用本方法对掘砌模型进行模拟分析, 并与传统方法进行比较。结果显示, 采用双模型法模拟掘砌模型的初始应力-位移环境, 得到的应力场、位移场与围岩未扰动状态下的理论值吻合; 改进重叠单元法模拟井帮完全卸载后支护井壁的掘砌过程, 得到不同模型顶面埋深下井壁内外缘的环向应力均小于 10^{-6} MPa, 井壁位移均小于 10^{-7} m, 与理论值接近, 且本方法的模拟结果均优于传统方法, 表明本方法具有较好的可行性和较高的模拟精度。

关键词 斜井; 冻结凿井; 初始应力场; 掘砌过程; 数值模拟

中图分类号 TD262

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.12.006

Method of numerical simulations for inclined shaft freezing sinking

YANG Renshu, WANG Qianxing

School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

Abstract In order to improve the simulation accuracy of the initial stress field and the digging process in inclined shaft sinking with ANSYS, a new method combining the double-model method and the advanced overlapping-element method is put forward. With a freezing inclined shaft construction in mind, taking the frozen soil as an elastic-plastic medium, a plane model of the freezing sinking of the inclined shaft is established, and the simulation is carried out. The simulation results show that the distribution characteristics of the model initial stress and displacement qualitatively agree with the theoretical results of the original ground stress obtained by adopting the double-model for the initial stress-displacement field. An advanced overlapping-element is adopted in simulating the excavation and support process under the total unloading, and the hoop stress of the inner shaft lining below 10^{-6} MPa, and the lining displacement of below 10^{-7} m under different model depths are obtained, which are close to the theoretical values. It is shown that the new method is superior to the traditional method, and is more accurate.

Keywords inclined shaft; freezing sinking; initial stress field; excavation and support process; numerical simulation

斜井冻结凿井过程模拟与立井相似, 主要包括初始应力场计算、温度场计算、温度场-应力场耦合和井筒开挖支护^[1,2]。其中, 初始应力场及井筒掘砌过程的准确模拟, 是凿井过程模拟与实际施工过程相吻合的关键基础问题^[3,4]。

在立井凿井及隧道、巷道掘进模拟中, 初始应力场模拟常用的方法为^[5-7], INISTATE(WRITE)命令生成初始应力文件, INISTATE(READ)读入初始应力文件。理论上, 计算后模型中的应力即为初始原岩应力, 位移场为零^[8-10]。经验证, 此

法在弹性模型或者顶面埋深较小的弹塑性模型中适用, 对于顶面埋深较大弹塑性模型则精度较差。

井筒掘砌过程模拟常用的方法为^[11,12], 先杀死待开挖土体, 后激活井壁区域土体单元, 再使用MPCHG命令将其材料属性转变为井壁材料。然而, 根据ANSYS说明, 单元被激活并利用MPCHG命令转变材料属性后, 单元受力、应变、温度等不能自动归零。实际施工过程中, 若不考虑围岩的流变特性, 开挖后井帮变形瞬间完成, 并达到最终状态; 此后再进行

收稿日期: 2014-11-28; 修回日期: 2015-04-27

作者简介: 杨仁树, 教授, 研究方向为矿山建设、岩土工程及工程爆破等, 电子信箱: yrs@cumb.edu.cn; 王千星(共同第一作者), 博士研究生, 研究方向为人工地层冻结、井筒设计与施工等, 电子信箱: qianxing0828@126.com

引用格式: 杨仁树, 王千星. 斜井冻结凿井数值模拟方法[J]. 科技导报, 2015, 33(12): 38-43.

井壁支护,井壁不受载荷作用,即此时支护结构无应力、无位移^[13,14]。因此,为了提高模拟精度,有必要改进传统的掘砌模拟方法。本研究提出一种双模型法与改进重叠单元法相结合的斜井冻结掘砌数值模拟方法。

1 新方法描述

1.1 初始应力模拟

鉴于在弹塑性模型中,加载上覆土自重导致模型土体进入塑性,无法形成准确的初始应力环境,本文采用双模型法模拟,即通过分别建立考虑冻土为弹性和弹塑性的两种模型,完成初始应力环境计算过程。

双模型法的工作原理:软件模拟时,初始应力场模拟施加的是一种载荷而非“应力历史”,模型读入事先生成的初始应力文件,相当于在模型中施加一个应力为0、位移反向的初始场,并同时施加原载荷和初始应力文件,即可抵消位移,而保持应力与原载荷产生的应力相同。计算步骤如下:

- 1) 建立模型1,整体模型材料均视为弹性介质,计算生成初始应力文件(文件1)。
- 2) 建立模型2,考虑冻土范围内土体为弹塑性(或黏弹塑性)介质,冻土范围外土体均设置为弹性介质,模型顶面不施加土重,仅靠模型范围内土体自重形成第一步初始应力场,并生成应力文件(文件2),此时靠模型内土体自重尚不至引起岩土进入塑性。
- 3) 进行稳态温度场计算,形成温度场文件。
- 4) 将温度场数据读入第一步初始应力场中。
- 5) 模型顶部施加土重,并读入弹性状态下生成的初始应力文件(文件1),形成最终的初始应力和位移环境。

1.2 掘砌过程模拟

鉴于采用材料转换法模拟掘砌过程,井壁激活后井壁应力无法自动归零,因此采用改进重叠单元法,将待开挖土体与井壁分开建模,两者仅空间上在井壁位置重合,无任何联系,待开挖井内土体和井壁与井帮均分别利用接触建立联

系。改进重叠单元法开挖模型如图1所示(待开挖部分由待开挖井内土体和待支护井壁组成),模型开始计算前,即将井内土体与井壁单元杀死,直至砌筑时激活井壁单元。

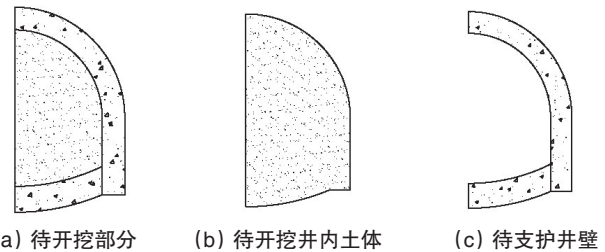


图1 改进重叠单元法开挖模型

Fig. 1 Simulation process of excavation in overlapping-element model

改进重叠单元法,在计算前井壁单元已被杀死,待进行支护时激活井壁单元,不必采用材料转换,此时井壁单元所受应力、应变等均从零开始计算。

双模型法和改进重叠单元法具有通用性,可以适用于各种不同的工程地质条件。为了验证新方法的可行性和准确性,建立斜井冻结掘砌平面模型时,将整个模型视为均质材料,通过改变地层物理力学参数,即可模拟不同地质条件施工过程;不考虑井壁支护后井帮的卸载作用,即井壁在井帮完全卸载后支护,此时若不考虑井壁蠕变特性,理论上井帮弹塑性变形完全形成,井壁不受外力作用,井壁内力和位移均为零。

2 数值计算模型

2.1 工程背景

以某矿主斜井冻结段施工为背景,该矿主斜井冻结段斜长为203 m,倾角14°;井筒需穿过第三、第四系地层215 m和侏罗系地层110 m,其中,第三系地层厚约200 m,存在3个以孔隙水为主的含水层。井筒穿过地层的主要岩性为泥岩和砂岩。井筒掘砌施工设计参数如表1所示。

表1 掘砌施工设计参数

Table 1 Parameters of shaft construction

参数	H/m	l_1/m	l_2/m	l_3/m	h_1/m	h_2/m	h_3/m	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$
取值	136.8	5.5	3.5	5	20.4	20.4	20.4	20
参数	λ	E/GPa	μ	R_0/m	l_4/m	R_d/m	h_4/m	h_5/m
取值	0.54	34	0.2	3.4	0.7	6	0.7	2.4

注: H 为模型顶面埋深; l_1 、 l_2 、 l_3 为冻结壁顶板、侧帮、底板的厚度; h_1 、 h_2 、 h_3 为井筒中心至模型顶、侧、底的距离; γ 为模型材料重度; λ 为侧压力系数; E 为井壁支护弹性模量; R_0 为井帮开挖拱顶半径; l_4 为井壁顶拱和侧墙的厚度; R_d 为井帮开挖底板半径; h_4 为井壁底板厚度,m; h_5 为井壁侧墙外高度。

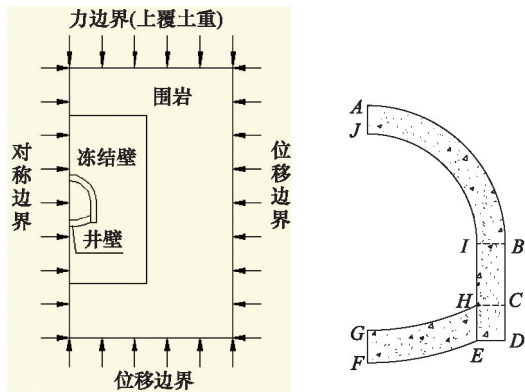
2.2 模型建立

依据井筒掘砌施工设计参数,采用ANSYS软件建立冻结凿井地层冻结-掘砌过程模拟的参数化轴对称平面有限元模型。模型井筒中心至边界尺寸取6倍开挖半径,计算模型如

图2所示,其中图2(b)为井壁局部放大模型。

该模型由围岩、冻结壁、开挖土体及井壁组成。采用材料转换法模拟掘砌时,开挖土体和井壁共同组成待开挖部分。该模型的特点是:可模拟多种冻结壁、井壁几何特征及

岩土层性;通过温度场、力场的顺序耦合,实现冻土参数的温度非线性模拟;可模拟不同开挖卸载率,等价实现不同工况连续开挖。



(a) 掘砌计算模型 (b) 井壁模型

图2 计算模型

Fig. 2 Simulation model

2.3 模型边界及初始条件

温度场:模型对称轴面设置为绝热边界,右侧面及上下固定为原始地温;冻结壁直接赋予平均温度,冻结锋面赋予土体结冰温度。

应力场:模型对称轴面施加对称约束,底面、右侧面施加法向位移约束,顶面施加土覆土载荷,并考虑模型自重(重力加速度 9.8 m/s^2)。

2.4 模型外载计算

模型所受载荷按照重液公式计算^[15,16],即

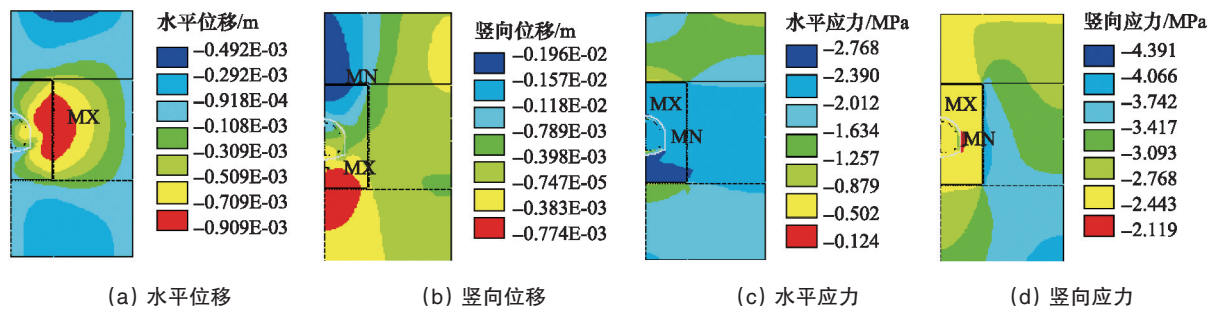
$$\begin{aligned} p_v &= \gamma H \\ p_h &= \lambda \gamma H \end{aligned} \quad (1)$$

式中, p_v 、 p_h 为竖向、水平向载荷,MPa; γ 为土的重度, kN/m^3 ;H为模型顶面埋深,m; λ 为侧压力系数, $\lambda = \mu / (1 - \mu)$ 。

3 模拟结果分析

3.1 初始应力场模拟

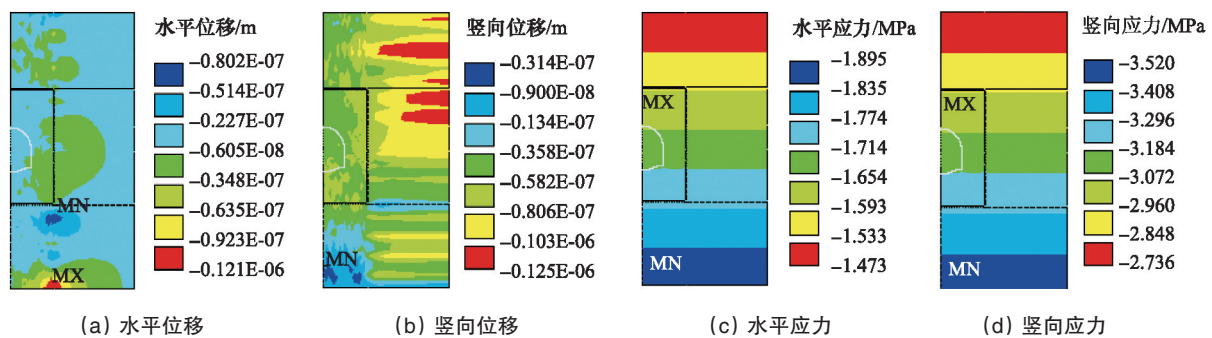
以表1参数建立模型,传统方法和双模型法下弹性模型的初始应力场结果分别如图3、图4所示。



(a) 水平位移 (b) 竖向位移 (c) 水平应力 (d) 竖向应力

图3 传统方法下模型初始应力场

Fig. 3 Results of initial stress field with ordinary method



(a) 水平位移 (b) 竖向位移 (c) 水平应力 (d) 竖向应力

图4 双模型法下模型初始应力场

Fig. 4 Results of initial stress field with double-model method

由图3可知,采用传统方法,初始应力场模拟结果与实际地层围岩应力和位移状态相差很大,位移场分布无离散性,且数值较大,部分区域已达到毫米级;应力场无分层性,且应力集中明显。由于软件在模拟过程中,初始应力场的施加为载荷,而不是施加一种“应力历史”,故在考虑冻土弹塑性时,

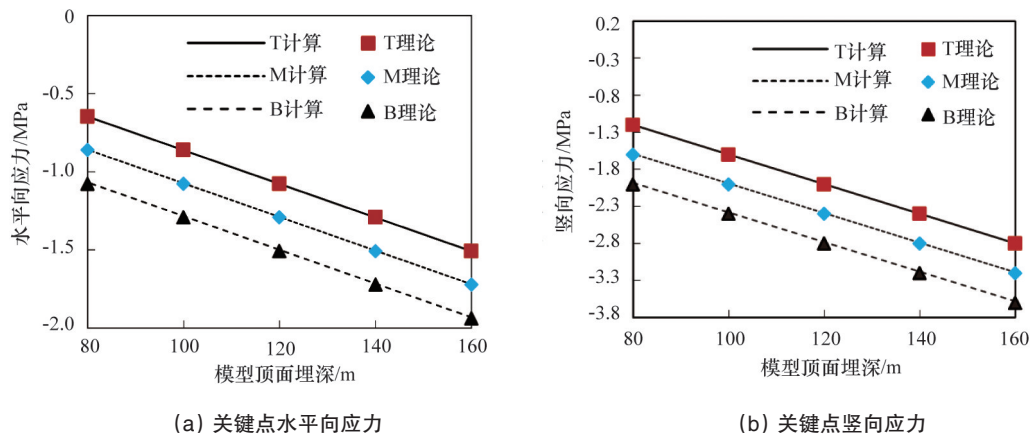
在上覆载荷的作用下,冻结区域土体(此时尚未冻结)提前进入塑性,与周围同层位弹性围岩变形不一致,因此,传统方法的模拟精度较低。

由图4可知,采用双模型法模拟得到的水平向及竖向位移均为 10^{-7} m 左右,可认为模型处于无位移状态,满足初始地

层位移要求;采用重液式(1),计算出模型底部竖向应力、水平应力理论值分别为3.5和1.9 MPa,对比图4(c)、(d),模拟结果与理论值一致,且竖向和水平向应力在高度方向呈线性变化,满足初始地层应力分布要求。图3(c)、(d)中,最大应力不是发生在模型底部,而是发生在冻结壁与围岩交界附近,竖向、水平向最大应力分别达到了4.4和2.8 MPa。因此,双模型法的模拟精度较高。

为了验证新方法的精确度,选取5水平模型顶面埋深,即80、100、120、140、160 m。

不同顶面埋深条件下的模型初始应力场模拟结果与理论值的对比如图5所示,可以看出双模型法模拟结果与理论值近似相等。因此,采用分别建立弹性模型和弹塑性模型联合计算的方法,对于考虑岩土材料为弹塑性介质的模型初始应力场计算具有较高的精度,满足工程要求。



T—模型轴对称面顶部;M—模型轴对称面中部(井筒中心);B—模型轴对称面底部

图5 不同顶面埋深下模型初始应力场模拟结果与理论值对比

Fig. 5 Comparison of initial stress field at different model depths

3.2 掘砌过程模拟

采用MPCHG材料转换法和改进重叠单元法分别进行掘

砌过程模拟,得到的井壁应力及井壁位移云图分别如图6、图7所示。

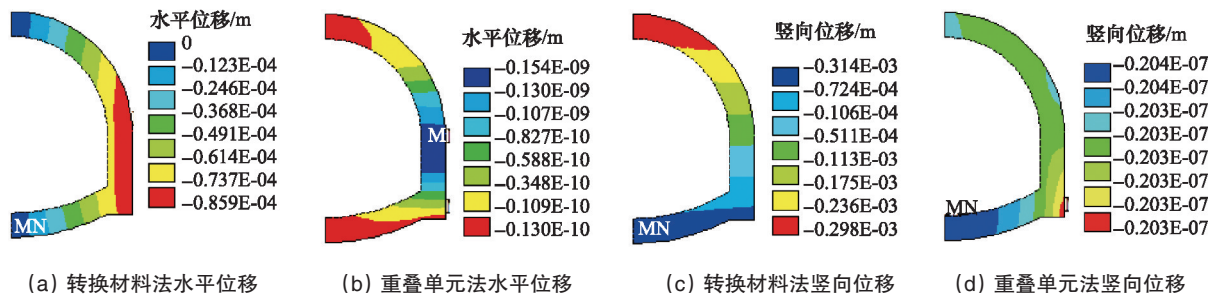


图6 材料转换法与重叠单元法下的井壁位移云图

Fig. 6 Nephograms of shaft lining displacements with material replacement method and overlapping-element method

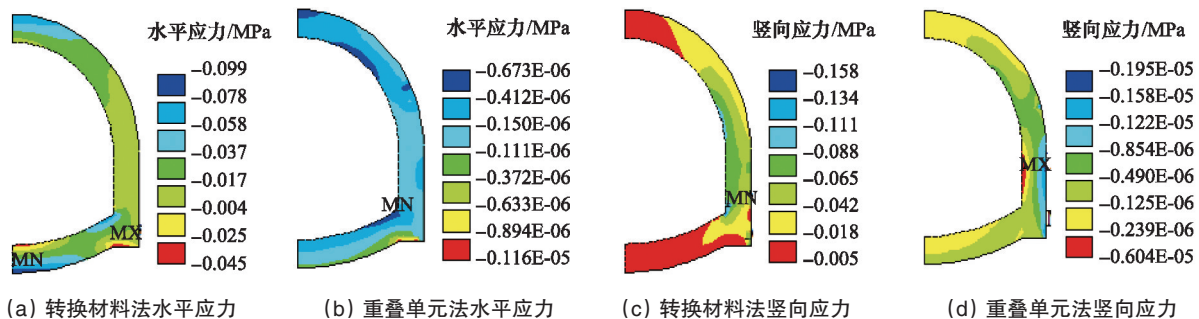


图7 材料转换法与重叠单元法下的井壁应力云图

Fig. 7 Nephograms of shaft lining stress with material replacement method and overlapping-element method

由图6(a)、(c)可知,采用材料转换法,井壁各点竖向或水平向位移结果均为 $10^{-3}\sim 10^{-4}$ m,局部位移已达到毫米级。井壁属于脆性材料,抗变形能力差,且与立井井壁受力特点不同,斜井井壁主要受拉应力控制,此结果将严重影响井壁的安全评估,因此,采用材料转换法模拟掘砌过程会大大降低模拟精度。

采用材料转换法模拟井壁内外侧面路径环向应力,结果如图8所示。图8(a)、(b)中的路径关键点标识见图2(b)。由图7(a)、(c)和图8可知,井壁大部分区域环向应力模拟结果为 $-0.02\sim -0.16$ MPa,直墙与底板交界处以及底板中部应力已达到0.16 MPa以上,可见材料转换法的模拟精度不理想。

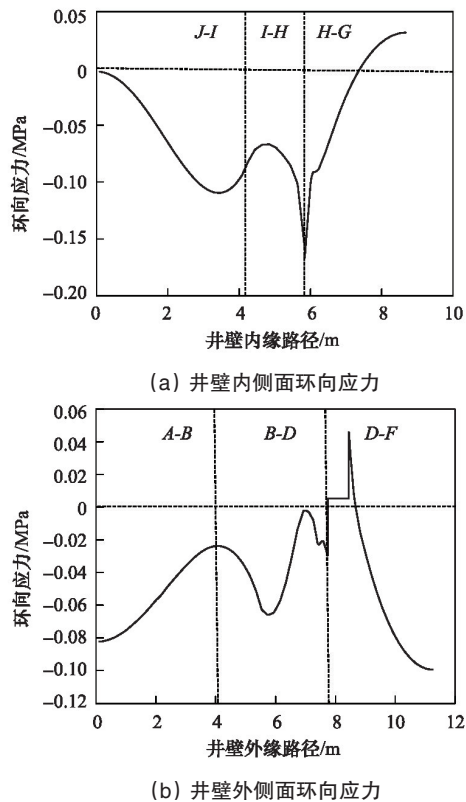


图8 材料转换法的井壁环向应力模拟结果
Fig. 8 Hoop stress of shaft lining with material replacement method

采用重叠单元法模拟开挖支护过程时,由图6(b)、(d)可以看出,井壁各点位移结果均在 10^{-7} m以下,由图7(b)、(d)可以看出,井壁各点环向应力结果均在 10^{-6} MPa左右。而实际上,未考虑冻土蠕变特性时,井壁在完全卸载情况下支护,不存在应力和位移,因此重叠单元法模拟开挖支护过程,其结果非常接近理论值。

不同模型顶面埋深下井壁支护后(井帮完全卸载后支护),采用重叠单元法模拟井壁内外缘路径环向应力,结果如图9所示,图中路径关键点标识见图2(b)。由图9可以看出,在井帮完全卸载后支护井壁,不同模型顶面埋深下井壁内外缘面的环向应力均小于1 Pa,可认为井壁不受外力作用,模拟结果与理论值完全吻合。

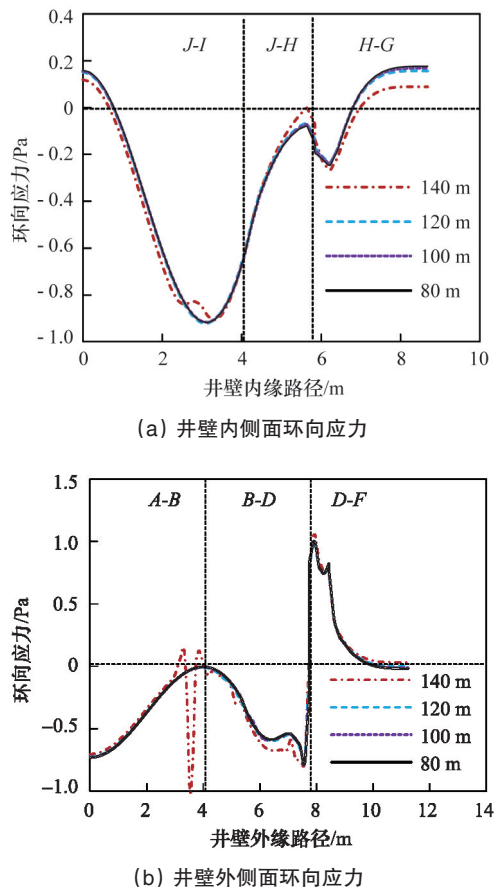


图9 改进重叠单元法的井壁环向应力模拟结果
Fig. 9 Hoop stress of shaft lining with overlapping-element method

4 结论

1) 在考虑冻土为弹塑性介质时,常规初始地应力平衡模拟方法具有较大的误差,采用双模型法能够更为准确地模拟初始应力-位移环境,经计算,此法得出的应力场和位移场与弹性状态下的结果以及理论值一致。

2) 采用MPCHG转换材料法进行井壁支护模拟,不能消除材料转换后的井壁单元内部的初始应力和位移;采用改进重叠单元法能够精确地模拟掘砌过程,井筒开挖完全卸载后支护井壁,井壁位移在 10^{-7} m以下,应力绝对值均在 10^{-6} MPa及以下,与理论值非常接近。

3) 双模型法与改进重叠单元法具有通用性,通过改变地层参数、土性以及顶面埋深即可实现不同地质条件的模拟。

参考文献(References)

- [1] 周晓敏. 斜井井筒的冻结法施工[J]. 建井技术, 1989(3): 20-22.
Zhou Xiaomin. Inclined shaft construction with freezing method[J]. Mining Construction Technology, 1989(3): 20-22.
- [2] El Sawwaf M, Nazir A K. The effect of deep excavation-induced lateral soil movements on the behavior of strip footing supported on reinforced sand[J]. Journal of Advanced Research, 2012(3): 337-344.

- [3] Yoo C, Lee D. Deep excavation-induced ground surface movement characteristics-A numerical investigation[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35(2): 231-252.
- [4] Akhaveissy A H. Analysis of tunnel and super structures for excavation[J]. Scientia Iranica A, 2011, 18(1): 1-8.
- [5] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. Wang Xinmin. The numerical simulation of engineering construction with ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [6] 周雪铭, 刘辉, 彭川, 等. 岩溶隧道开挖对溶洞处治结构影响的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 269-275. Zhou Xueming, Liu Hui, Peng Chuan, et al. Numerical simulation analysis of deformation effect on treatment structure of karst cave due to karst tunnel excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 269-275.
- [7] 肖明, 叶超, 傅志浩, 等. 地下隧道开挖和支护的三维数值分析计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2501-2505. Xiao Ming, Ye Chao, Fu Zhihao, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of excavation and support in underground tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2501-2505.
- [8] 王衍森, 文凯. 深厚表土中冻结壁与井壁相互作用的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1142-1146. Wang Yansen, Wen Kai. Numerical analysis on the interaction between freezing wall and shaft lining in deep alluvial[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1142-1146.
- [9] 吉小明, 张选兵, 白世伟. 浅埋暗挖地铁隧道开挖过程的模拟研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 828-830. Ji Xiaoming, Zhang Xuanbing, Bai Shiwei. Simulation study of excavation process of shallow embedded tunnel for metro[J]. Rock & Soil Mechanics, 2002, 23(6): 828-830.
- [10] 李仲奎, 戴荣, 姜逸明. FLAC3D分析中的初始应力场生成及在大型地下洞室群计算中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2387-2392. Li Zhongkui, Dai Rong, Jiang Yiming. Improvement of the generation of the initial stress field by using FLAC3D and application in a huge underground caven group[J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Suppl 2): 2387-2392.
- [11] 杨玉贵, 高峰, 李涛, 等. 基于ANSYS的特厚冲积层冻结壁位移场数值分析[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2007, 30(3): 53-55. Yang Yugui, Gao Feng, Li Tao, et al. Numerical calculation and simulation for displacement of special thick alluvium frozen wall[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 30(3): 53-55.
- [12] 李围. 隧道及地下工程ANSYS实例分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. Li Wei. The analysis of tunnel & underground construction application with ANSYS[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [13] 王衍森, 杨维好, 黄家会, 等. 龙固副井冻结凿井期外壁混凝土应变的实测研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 296-300. Wang Yansen, Yang Weihao, Huang Jiahui, et al. Study of freeze sinking period concrete strain of outer shaft wall of Longgu Coal Mine auxiliary shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(3): 296-300.
- [14] 王衍森, 张开顺, 李炳胜, 等. 深厚冲积层中冻结井外壁钢筋应力的实测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(3): 287-291. Wang Yansen, Zhang Kaishun, Li Bingsheng, et al. In-situ measurement on the stress of reinforcing steel bar of outer freezing shaft wall in deep alluvium[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(3): 287-291.
- [15] 王衍森. 特厚冲积层冻结井外壁强度增长及受力与变形规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2005. Wang Yansen. Study on the law of strength increasing, load and deformation of outer shaft lining during freezing sinking in deep alluvium [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2005.
- [16] 崔广心, 杨维好, 吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[J]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998. Cui Guangxin, Yang Weihao, Lü Henglin. Frozen wall and shaft lining in deep alluvium[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1998.

(责任编辑 韩星明)

· 学术动态 ·



《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》发布

2015年5月5日,财政部、国家自然科学基金委员会联合修订发布了《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》。

《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》适用于自然科学基金资助的青年项目、面上项目、重点项目、重大项目、重大研究计划等所有项目。

建立项目间接成本补偿机制是此次修订的主要内容之一。引入间接成本补偿机制,将项目资金按照直接费用、间接费用进行了划分。通过提取一定比例的间接费用,补偿依托单位的管理成本,有利于促进科研机构的良性发展。新修订的办法强调依托单位不得在核定的间接费用以外再以任何名义在项目资金中重复提取、列支相关费用。

新修订的办法扩大了劳务费的开支范围:一是在研究生、博士后等人员基础上,增加了没有工资性收入的临时聘用人员;二是将临时聘用人员的社会保险补助费用纳入劳务费开支范围。同时,取消了劳务费比例限制。

详见 <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab229/info48335.htm>。