

文章编号:1671-8879(2005)03-0057-05

低地应力区地下洞室开挖后围岩应力数值模拟

胡夏嵩^{1,2}, 白国伟³, 赵法锁⁴

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084; 2. 青海大学 水电系, 青海 西宁 810016; 3. 陕西长武
亭南煤业有限责任公司, 陕西 咸阳 713600; 4. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:以西北地区某水利工程地下洞室工程为例,采用弹塑性二维有限元法对低地应力区地下洞室围岩开挖后围岩应力进行了数值模拟研究,模拟出了低地应力区地下洞室围岩开挖后围岩应力值及其分布规律。结果表明,低地应力区地下洞室开挖后洞室围岩形成应力集中现象,侧壁位置处产生的压应力值大于洞顶位置压应力值,且洞顶产生拉应力。该研究成果将有助于进一步研究低地应力区地下洞室围岩变形破坏机理及其稳定性,对保障地下洞室工程的圆满进行具有重要的理论价值和现实意义。

关键词:岩土工程;低地应力区;地下洞室;围岩应力;弹塑性二维有限元法;数值模拟

中图分类号:TU45

文献标识码:A

Numerical stress simulation on surrounding rockmass of underground excavation in low ground stress regions

HU Xia-song^{1,2}, BAI Guo-wei³, ZHAO Fa-suo⁴

(1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Water Power, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. Changwu Tingnan Coal Mining Company, Xianyang 713600, China; 4. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: By taking one hydraulic underground excavation engineering project in the Northwest of China as an example, the surrounding rockmass stress field of underground excavation in the low ground stress regions is simulated with two-dimension elasto-plastic Finite Element Method (FEM). The simulating results indicate: the stress concentration is formed in surrounding rockmass; the compress stress at the roof of underground excavation is especially smaller than those at both sides, and the tension stress is formed at the roof. Those results have great significance for studying the deformation and failure mechanism of surrounding rockmass, meanwhile, they will also play a very important role in ensuring the progress in underground excavation engineering projects. 1 tab, 7 figs, 11 refs.

Key words: geotechnical engineering; low ground stress region; underground excavation; surrounding rockmass stress field; 2D elasto-plastic Finite Element Method; numerical simulation

收稿日期:2004-03-20

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2003 034 123)

作者简介:胡夏嵩(1965-),男,河南开封人,青海大学教授,清华大学在站博士后。

0 引言

地应力状态对工程稳定性具有重要的影响作用,尤其对地下工程稳定性的影响更是如此。多年来,国内外对高地应力及其对地下工程稳定性影响方面的研究,已取得了大量的研究成果,也积累了丰富的工程经验^[1~6]。低地应力现象也是目前许多工程场区经常遇到的一种情况,它同样对地下洞室围岩或边坡岩体的稳定性具有重要的影响^[1,3]。因此,尽快开展对低地应力及其对地下工程围岩稳定性影响的研究,具有重要的实际意义和理论价值。当前国内外在这一领域的研究,正处于起步阶段,需做大量的研究工作。

本文采用二维弹塑性有限元的方法,较为系统地模拟研究了低地应力区洞室开挖后围岩应力及其变化特征,这不仅有利于进一步研究围岩的稳定性,而且还有利于指导工程稳定性措施及时实施,这将对保障地下工程的顺利进行,起到积极的作用。

1 工程地质条件与低地应力状态

1.1 工程地质条件概述

研究区地处秦岭造山带北缘,自燕山晚期以来,构造应力场发生了转化,受到 NW-SE 向拉张应力的作用,其结果使断层破碎带和层间挤压带呈疏松状,同时,也大量形成了一系列的张性裂隙。区内岩层近东西走向,倾向上游,走向 $85^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 之间,倾向多呈 SW,倾向 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。据统计,坝址区断层共计 80 余条,其中大多数为东西向构造。断层主要以层间错动所形成的逆断层为主,断层破碎带宽度一般介于 $0.2\sim 3.0$ m,宽者可达 10.0 m 以上。断层破碎带由松散泥质角砾及碎裂岩组成,其中,对引水洞等地下洞室影响较大的断层主要有 F_4 、 F_{53} 、 F_5 、 F_2 、 F_3 、 F_{17} 、 F_{18} 、 F_{61} 等。另据统计,坝址区节理裂隙主要发育有 8 组,并以北西-南东向最为发育。区内出露地层主要为前震旦系宽坪群大镇沟组第一岩性段和第二岩性段。主要岩石类型有云母石英片岩、绿泥片岩、钙质石英岩以及一些岩脉等^[7]。据地应力实测资料^[8],在距地表 170.8 m 处的引水洞中,最大主应力为铅直方向,其值为 4.27 MPa,而水平方向的最小主应力值仅 0.5 MPa,远低于重力场规律值,按照低地应力判别标准,研究区应为较典型的低地应力区。

1.2 低地应力含义及其状态

低地应力是指在一定边界条件下最小应力值低

于自重应力最小值的现象^[1,3]。低地应力现象可分为两种情况^[1,3]:一种是水平方向地应力均低于自重应力值,且其中有一个水平方向的应力值低于自重应力场下的水平应力值;一种是仅一个方向的水平地应力值低于自重应力值。从工程角度来讲,通常将地应力又称为岩体初始应力,就是指天然岩体在工程建设开挖之前所具有的自然应力状态^[2]。一般说来,根据实际观测到的地应力值的大小可将它分为高、中、低地应力等 3 种状态,另外,也有人将它划为高、低地应力等 2 种状态。

2 计算模型的建立与计算参数选取

2.1 计算模型的建立

2.1.1 几何模型

计算几何模型的建立是在地质模型的基础上建立的,而地质模型则是在地质剖面的基础上建立起来的^[9]。因此,本文根据需要,并结合洞室所在位置处的围岩类型,建立了低地应力区 III 类围岩的计算几何模型,如图 1 所示。在所建立的几何模型中,地层单元体的主要岩性为云母石英片岩、绿泥片岩及钙质石英岩,作为单元体的结构面其种类也较多,按结构面的级序可划分出 III、IV、V 级等 4 种类型。在本项研究所建立的几何模型中,断层作为单元层对待,对一些大型节理则作为模型中不同单元层之间的界面来处理。采用北京软脑软件有限公司的 2D-σ 有限元软件进行模拟计算。计算模型网格剖分如图 2 所示。

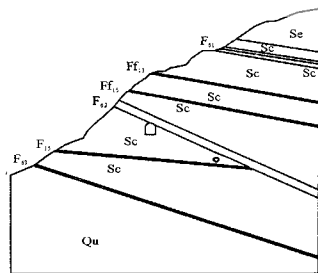


图 1 0+310 断面几何模型

2.1.2 边界条件

本文所建立的某市水利工程溢洪洞 0+310 位置处断面计算模型,导流洞位于研究区河流左岸,以洞轴线为中心,向北西方向延伸 128 m,向东南方向为 122 m,自洞顶至地表延伸为 88 m,向下 83 m;在该模型左边即 $X=0$ 、右边 $X=250$ m 及底部等 3 处

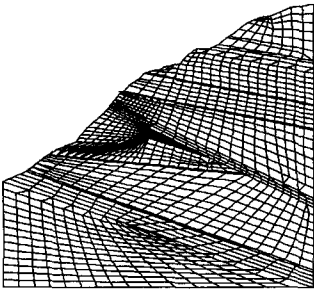


图2 计算模型有限元网格划分
均为位移约束边界,上部边界为地表^[10]。

2.1.3 荷载量级

在低地应力区进行模拟计算时,外部荷载主要考虑自重重力作用,即模型所受荷载主要是来自于岩体的自重应力,垂直方向上的应力大小为上覆岩体的密度与深度的乘积,而水平应力则为侧压力系数与垂直方向应力之乘积。

2.2 计算参数的选取

组成该模型的主要地层单元为云母石英片岩、绿泥石片岩、钙质石英岩,另外,几个较为重要的结构面单元层分别为F₆₁断层、F₆₂断层、F₆₃断层、F₁₅断层、f₁₅断层以及f₁₃断层等类型。计算过程中所采用的物理力学参数如表1所示。

表1 0+310断面计算模型物理力学参数

单元体类型	密度/ (MN·m ⁻³)	泊松 比μ	变形模量 E/MPa	内聚力 c/MPa	内摩擦 角φ/(°)	风化 度
云母石英片岩	0.024 9	0.35	400	0.45	30	强
F ₆₁ 断层(影响带)	0.023 0	0.38	600	0.5	30	强
绿泥石片岩	0.025 8	0.32	400	0.5	30	强
绿泥石片岩	0.026 0	0.31	1 000	0.9	39	弱-微
F ₆₂ 断层	0.024 1	0.38	100	0.1	22	强
云母石英片岩	0.025 1	0.33	800	0.8	32	弱-微
钙质石英岩	0.028 0	0.23	1500	2.0	42	微-弱
F ₆₃ 断层	0.023 5	0.38	600	0.1	25	强
F ₁₅ 断层	0.024 1	0.39	550	0.1	20	强
f ₁₅ 断层	0.024 0	0.39	500	0.1	23	强
f ₁₃ 断层	0.022 6	0.40	600	0.1	23	强

3 围岩应力有限元模拟结果及分析

本文在实际研究中,对洞室开挖后围岩应力大

小及其变化特征的模拟,曾选取洞室内不同桩号位置断面进行了大量的模拟工作。现综合这些模拟结果,同时以上述位置处的模拟断面为例,将低地应力区洞室围岩开挖后,围岩最大主应力、最小主应力和剪应力变化及其规律性做如下研究与分析。根据二维有限元模拟结果,区内洞室断面开挖后围岩应力大小及强度等具有以下的变化规律。

0+310断面模拟范围内所计算出的最大主应力介于-7.79~-0.02 MPa之间,开挖断面处介于-7.79~-1.32 MPa之间;模拟范围内的最小主应力介于-3.21~-0.01 MPa之间,开挖断面处介于-1.29~-0.01 MPa之间;模拟范围内剪应力介于0.16~-0.55 MPa之间,开挖断面处介于-0.91~-0.20 MPa之间。洞顶出现较为规则的拉应力区,其值介于0.15~0.627 MPa之间,如图3~图5所示。

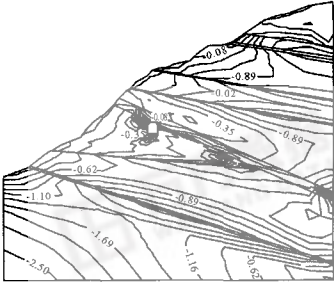


图3 0+310断面开挖后应力场最小主应力等值线

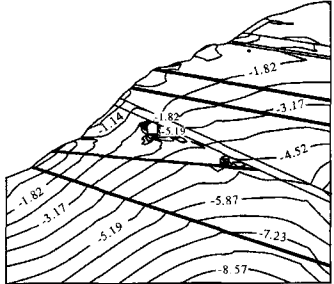


图4 0+310断面开挖后应力场最大主应力等值线

图6是反映洞室开挖以后,在距洞轴线不同位置处的水平方向上最大主应力值变化关系曲线图。由图6可知,水平方向上最大主应力值的变化有如下规律:在位于洞室左、右两侧壁处,最大主应力值增加幅度明显增大,接近洞壁位置时最大主应力增

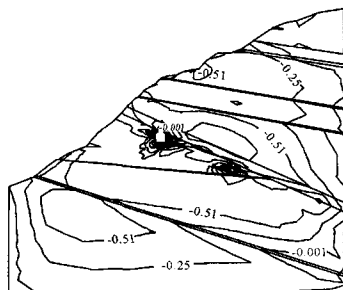


图5 0+310断面开挖后应力场最大剪应力等值线

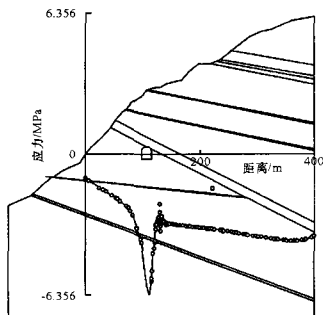


图6 0+310断面555m高程开挖后洞侧壁水平方向最大主应力变化曲线

至最大值,随着远离洞壁位置,最大主应力值变化的幅度较小,最大主应力曲线呈平稳状变化,其最大主应力值的增、减则与上覆地层的厚度以及地表地形的变化等均有一定的关系。在最大主应力曲线中应力增值幅度明显增加的区段至洞侧壁位置处,这一区域为洞室开挖后所形成的一应力集中区。经统计,0+310断面所形成的应力集中区的范围为11.5~49.5 m,相应地,在洞室开挖后,洞侧壁位置处所形成的最大主应力值则为-3.70~-3.75 MPa。

相应地,图7则是反映洞室开挖后,垂直方向(主要是洞顶至上部地表)在距洞顶不同高度位置处的最大主应力变化曲线。从图7中可看出,从距洞顶较远位置开始,在逐渐地靠近洞顶时,最大主应力曲线基本上呈平稳状增值状态,但在距洞顶较近位置时,主应力值则急剧降低,直至洞顶位置。这样,在主应力曲线图上便形成了一主应力值降低的转折点,该点以前应力曲线的变化较为稳定,其应力值的增、减与上覆地层厚度以及地表地形的变化均具有密切的关系;该转折点以后至洞顶位置,应力曲线中

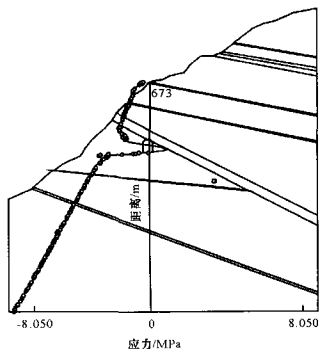


图7 0+310断面555m高程开挖后洞顶垂直方向最大主应力变化曲线

的应力聚减区段则属于应力降低区或形成应力释放区,这说明了在开挖洞室以后,洞顶位置处可形成一定规模的卸荷带。经统计,0+310断面洞室顶部所形成的应力降低区为7.62 m,洞室开挖后,在洞顶位置处所形成的最大主应力为-1.8 MPa。

通过模拟反映出了两方面内容,即低地应力区洞室开挖后洞周围岩应力数量大小,以及围岩应力的变化规律。李宁等^[1]对本研究区导流洞出口段洞室的开挖施工过程中围岩应力场及其应力变化规律进行了数值仿真模拟,其模拟结果表明:由模拟得出的第一方案主应力矢量图可知,洞室开挖后在洞周形成应力集中现象,其中侧壁压应力值要明显大于洞顶位置处的压应力值,其应力值的这种变化规律,与本文模拟得到的围岩应力值的变化规律一致;其次,根据其第一方案主应力矢量图,洞室开挖后围岩最大主应力和最小主应力值数量较为吻合。通过以上对比与验证,说明了本文模拟得出的低地应力区洞室开挖后围岩应力大小及其变化规律基本符合实际情况,且具有重要的使用价值。

4 结 语

(1)根据低地应力区洞室开挖后围岩应力等值线图,表明在洞室的侧壁和洞顶位置均形成压应力,其中侧壁处的压应力值介于-6.46~-3.28 MPa之间,洞顶位置处的压应力值介于-1.82~0.52 MPa之间。经统计表明,洞侧壁处的压应力值基本上是洞顶处压应力值的3.54~10.3倍。此外,在所模拟的断面中,开挖后洞室顶部均形成了一定范围,且较为规则的拉应力分布区,其中拉应力的大小变

化通常介于 0.119~1.915 MPa 之间。

(2)低地应力区洞室开挖后侧壁水平方向最大主应力,愈接近洞侧壁位置其值在不断地增加,最终在侧壁位置处形成最大值,说明了低地应力区洞室开挖应力后,在洞侧壁处形成具有一定规模的应力集中区。

(3)低地应力区洞室开挖后垂直方向最大主应力形成一主应力转折点,即该点以上、接近该点位置形成最大主应力,随着距离地表距离的不断接近,垂直方向主应力则逐渐减小,该转折点以下至洞顶位置,垂直方向的主应力迅速降低,形成一应力降低区,通过这一现象从一个侧面反映出了洞顶的不稳定,这将是低地应力区洞室围岩产生不稳定现象的主要位置。

(4)有限元模拟低地应力区洞室开挖后,分别在洞侧壁和洞顶 2 个位置处所形成的最大主应力值及其变化,基本上符合低地应力区椭圆形洞室(即宽、高比为 0.5)开挖以后应力值的变化规律。上述模拟研究结果的取得,对进一步研究低地应力区洞室围岩的稳定性及其变形破坏机理,同时对保障地下工程的顺利进行等方面,具有重要的理论价值和实际意义。

参考文献:

References:

- [1] 丁恩保. 低地应力及其工程地质意义[J]. 水文地质工程地质, 1993, (4): 1-4.
DING En-bao. Low rock stress and its engineering geological signification[J]. J Hydrogeology and Engineering Geology, 1993, (4): 1-4.
- [2] 陶振宇. 对岩体初始应力的初步认识[J]. 水文地质工程地质, 1980, (2): 12-17.
TAO Zheng-yu. Study of rockmass initial stress[J]. J Hydrogeology and Engineering Geology, 1980, (2): 12-17.
- [3] 韩文峰. 黄河黑山峡大柳树松动岩体工程地质研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993.
HAN Wen-feng. Study on loose rockmass engineering geology of Daliushu Heishanxia, Yellow river [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993.
- [4] 孙广忠. 工程地质与地质工程[M]. 北京: 地震出版社, 1993.

SUN Guang-zhong. Engineering geology and geological engineering[M]. Beijing: Seismic Press, 1993.

- [5] 彭建兵, 毛彦龙, 范文. 区域稳定动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
PENG Jian-bing, MAO Yan-long, FAN Wen. Dynamics of region stability [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [6] 徐林生, 王兰生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 74-76.
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng. Research on rockburst character and prevention measure of Erlang Mountain highway tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 74-76.
- [7] 范文, 常中华, 彭建兵, 等. 黑河水库单薄分水岭渗透稳定性分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(5): 68-72.
FAN Wen, CHANG Zhong-hua, PENG Jian-bing, et al. Thin mountain ridge seepage stability analysis in Heihe reservoir[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(5): 68-72.
- [8] 赵法锁. 坡体平面旋转机理及稳定性研究[M]. 西安: 西安地图出版社, 1999.
ZHAO Fa-suo. Study on mechanism of slope plane rotation and stability[M]. Xi'an: Xi'an Map Press, 1999.
- [9] 黄润秋, 许强, 陶连金. 地质灾害过程模拟和控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
HUANG Run-qiu, XU Qiang, TAO Lian-jin. Simulation and control study of geological hazard process [J]. Beijing: Science Press, 2002.
- [10] 蒋鑫, 魏永幸, 邱延峻. 斜坡软弱地基填方工程数值仿真[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3): 41-46.
JIANG Xin, WEI Yong-xing, QIU Yan-jun. Numerical simulation of subgrade embankment on sloped weak ground[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(3): 41-46.
- [11] 李宁, 李永刚, 张平. 碎裂块体围岩安全监测与仿真反演分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 170-173.
LI Ning, LI Yong-gang, ZHANG Ping. A simulation inversion method for an opening in discrete rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 170-173.