文章编号:1007-2993(2004)06-0303-04

膨胀性软岩洞室支护效应三维有限元分析

陶西贵 张 耀
(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏南京 210007)

【摘 要】 基于湿度应力场理论,采用三维非线性有限元方法,有效地模拟了膨胀岩洞室开挖和支护过程中遇水膨胀现象。对多种支护方案进行分析比较表明,水的损伤软化作用和膨胀岩的本身膨胀性能对其洞室稳定性有重要的影响,并进一步了解了洞室发生膨胀的力学机制及其支护效应,对膨胀性围岩洞室的设计、施工具有实际指导意义。

【关键词】 膨胀岩;地下洞室;湿度应力场;有限元分析
【中图分类号】 TU 924

Three-dimensional Finite Element Numerical Analysis of Chamber Supporting in Swelling Soft Rock

Tao Xigui Zhang Yao
(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Jiangsu Nanjing 210007 China)

【Abstract】 Based on the theory of the humidity stress field, some swelling problem of the underground chamber under the action of water is simulated effectively by means of three-dimensional finite element numerical simulation. It shows thats the damage action of water and the self capability of swelling rock are important factors influencing the stability of underground chamber by analysis of some chamber supporting scheme. The mechanical effect of interaction between water and swelling rock and effect of support is deeply known. At present, the research can be provided as an efficient reference to the design and construction for some underground chamber projects.

【Key Words】 swelling rock; underground chamber; humidity stress field; finite element analysis

0 引 言

目前,已有 40 多个国家和地区发现存在膨胀岩,其中,我国是膨胀岩分布最广的国家之一。膨胀岩具有较强膨胀性能,当岩体受到扰动,特别是遇水时,性状常发生巨大变化,产生体积膨胀,对其中的构筑物产生巨大的膨胀压力,严重影响地下工程的稳定性。某些地下洞室工程由于战略位置的特殊需要,不得不建设在特定的地点。这样地下工程中膨胀岩性软岩问题是迫切需要解决的重大问题。

目前,分析和计算膨胀岩遇水作用问题的理论和方法[1~4]取得了一定的成果,但是,这些理论都建立在特定的膨胀岩实验模型基础上,因而都限于某种特定的环境因素。受温度应力场理论的启发,文献[4]提出了一种新的湿度应力场理论。基于湿度应力场理论,文献[5]建立了相应的数值模拟方法,有效地模拟了圆形洞室遇水作用应力场分布规律,取得了与圆形洞室遇水作用解析解相一致的结果。

本文采用三维非线性有限元方法,考虑水对膨胀岩的损伤软化作用,对各种支护方案进行分析比较,探讨了膨胀性软岩洞室遇水膨胀的力学机制及其支护效应,可为膨胀性软岩洞室工程设计、施工提供理论指导。

1 膨胀岩洞室发生膨胀条件

膨胀岩发生膨胀必须具备两个条件,水的来源是膨胀产生的充分条件,活化的膨胀岩在完全干燥的环境中仍然不具备膨胀性。同时水对膨胀岩具有损伤软化作用,大量的实验结果表明,对于洞室开挖中遇到的膨胀性岩石,其单轴抗压强度和弹性模量与含水率变化基本呈线性关系[6]。

卸载膨胀岩是膨胀产生的必要条件,未经卸荷作用而处于原始状态的膨胀岩,即使含有较多膨胀性黏土矿物,同时遇到水的作用,也不具备膨胀性,因此膨胀岩的膨胀性从洞室工程的周边一定范围内,产生膨胀变形破坏区,膨胀变形逐渐减小。

作者简介:陶西贵,1977 年生,男,汉族,江苏人,解放军理工大学在读硕士研究生,研究方向——岩土工程。
E-mail:myingii@sohu.com

万方数据

对于膨胀性岩层,在进行空间开挖之前,岩体没有受到扰动并处于三向受力状态,保持着空间平衡。由于工程的开挖对膨胀岩体产生扰动,破坏了原有平衡,造成了膨胀岩内部应力及其强度的变化。同时,由于工程施工中不可避免地产生水与膨胀岩的接触,引起了膨胀岩化学状态的改变,使得其应力集中和强度降低现象进一步加剧,使围岩产生变形破坏,导致工程失稳。显然,在膨胀性岩体工程施工过程中,膨胀岩产生膨胀的条件都不可避免地得到了不同程度的满足。

2 湿度应力场的数值分析方法[5]

在一定的水源作用下,围岩中各点的含水率将随时间和其位置而发生变化,称之为湿度场的变化,而由于湿度场的变化而引起的应力场变化,就称为湿度应力场。

根据湿度应力场理论与温度应力场理论控制微分方程系统中存在的相似性,温度变化产生的应变可表示为

$$\varepsilon_{ij} = \beta \delta_{ij} T \tag{1}$$

式中:β 为温度线膨胀系数;T 为温度变化量;δ_{ij} 为 Kronecker 记号。而湿度变化产生的应变 ε 可表示为

$$\varepsilon_{ij}^{w} = \alpha \delta_{ij} w \tag{2}$$

式中:α 为湿度线膨胀系数;w 为湿度变化量。联立式(2)式(3)可得

$$\beta = \frac{\alpha w}{T} \tag{3}$$

这样,β,T 即可转化为湿度场参数对应的温度场参数。

在本文的数值分析中,设 $w=0$ 表示原始含水状态,对应温度变化 $T=0$ ℃;设 $w=1$ 表示饱和含水状态,对应温度变化 $T=100$ ℃。中间范围的计算参数线性插值得到,湿度变化也可以根据实际测的数据进行计算。

3 基本参数和分析方案

数值分析模型与文献[3]实验模拟相同。几何模型尺寸相似比为 100,由于模型的轴对称性计算范围取一半计算,即 130 mm×260 mm×50 mm,洞室形状为半圆拱形,墙高 22 mm,拱半径为 18 mm。单元网格划分、约束边界条件见图 1。均布荷载为 0.26 MPa,不考虑单元的自重,侧压力系数为 1。在遇水作用膨胀和软化阶段,湿度场变化区域,饱和时最大线膨胀系数为 $\alpha=0.05$,线膨胀系数受开挖卸荷扰动程度的影响,从洞室周边向围岩深处逐渐变弱,三倍洞室范围外近似为 0。最大损伤软化系数为 0.5,弹性模量随含水率变化呈线性关系递减。混凝土喷层厚度 1 mm,锚杆类型为非预应力锚杆。计算参数见表 1。

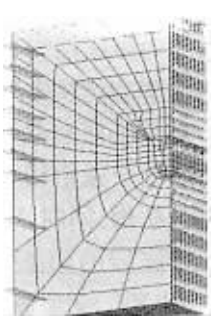


图 1 计算模型的单元网格划分

表 1 数值分析模型计算参数

计算参数	岩体	砼喷层	锚杆
弹性模量 E/MPa	108.5	1.5×10^4	2.0×10^5
泊松比 μ	0.3	0.18	0.3
粘聚力 c/MPa	0.044	3	
内摩擦角 φ/(°)	28.5	37	
线膨胀系数 α	0.05		

计算软件采用 ANSYS 三维大型有限元软件。岩体采用 20 节点三维实体单元,本构模型选用 DP 理想弹塑性模型,混凝土喷层采用 8 节点壳单元,锚杆为空间杆单元,都假设为线弹性材料。为真实地模拟支护结构和岩体之间的共同作用及不同施工方案对支护结构的影响,使用了 ANSYS 的单元“生死”功能来模拟开挖和支护施工。所谓“杀死”单元,就是将该单元的刚度和质量都乘以一个很小的数,相当于该单元不再能发挥作用。而“激活”单元,就是让已经“杀死”的单元恢复到它原先的刚度和质量[7]。例如,本模型中,洞室内单元是附着在岩体单元上的,在岩体受力固结后,洞室内单元被“杀死”来模拟开挖,即遵循“先加载,后开洞”的原则,这与工程中的实际情况是较为相符的。

具体实现步骤是:①建立整个计算区岩体及支护结构模型;②“杀死”所有支护结构单元,并施加约束、均布荷载,模拟岩体在荷载作用下自由固结;③“杀死”所有洞室内单元,模拟岩体内洞室全断面一次开挖;④“激活”支护单元,施加湿度膨胀荷载(即施加温度荷载),模拟膨胀岩洞室开挖全过程。

为了解膨胀性围岩膨胀的力学机制及支护效应,在模拟膨胀岩洞室开挖全过程时,进行了以下方案的数值模拟分析:

1)无支护围岩模拟分析;

2)直墙和拱部施加锚喷支护膨胀性围岩模拟分析;

3)直墙和拱部施加锚喷支护,底板施加锚杆支护膨胀性围岩的模拟分析。

万方数据

4 模拟结果分析

围岩无支护且没受水作用的弹塑性模拟的塑性区分布见图 2(a)。塑性区分布基本均匀,在直墙下部较大。无支护条件下考虑受水的损伤软化作用的膨胀性围岩有限元模拟的变形和塑性区分布见图 2(b),可看出塑性区比弹塑性围岩模拟结果明显增多,范围进一步扩大。由于拐角部位的单元一般是处于三向受压状态,虽然在拐角部位是应力集中的,但单元所受主应力的差值小,相应进入塑性状态单元也较少。

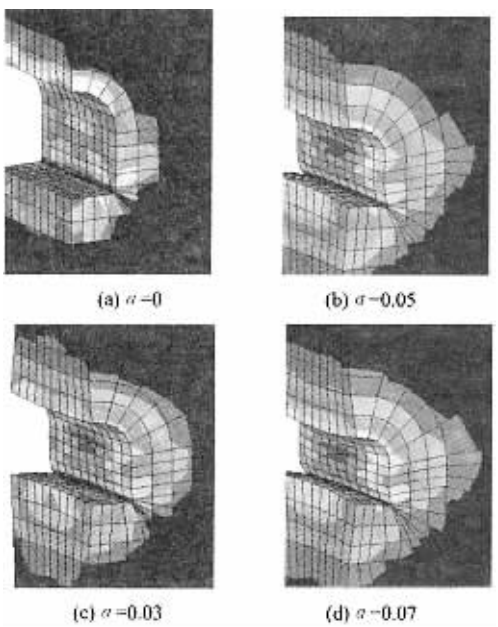


图 2 无支护下围岩变形和塑性区分布

无支护条件下不同膨胀性围岩有限元模拟的变形和塑性区分布见图 2(c)、(d),与图 2(b)三者相比,随着膨胀能力的增加,发生塑性破坏的范围也逐渐增大,一定程度后计算不收敛,即整体失稳破坏。

由于膨胀岩内的膨胀物质组成、胶结状况、小颗粒含量等特有性质决定其遇水膨胀特性,地下洞室工程设计、施工前必须严格进行膨胀物质分类、测量和实验,认真准确的评价膨胀岩的膨胀性。

在直墙和拱部施作锚喷支护(方案 2)有限元模拟的断面塑性区分布见图 3(a)。进入塑性状单元的总数目减少,底板进入塑性状态的单元稍有所增加。上部塑性单元减少的原因是由于喷层能与围岩密贴和粘结,从而使围岩处于三向受力的有利状态,另外由于喷层属柔性支护,能使围岩在不出现较大变形的前提下,进入一定程度的塑性,从而使围岩“卸载”。所以锚喷初期选择低弹模混凝土,有利于洞室围岩应力均匀分布及满足初期变形较大的要求。

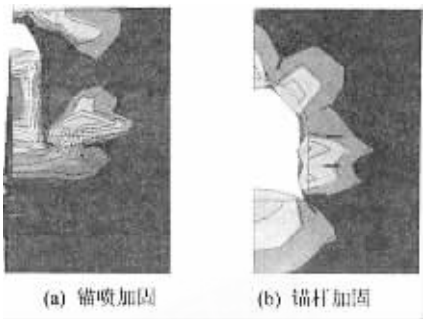


图 3 围岩断面变形和塑性区分布图

洞室底板部位进入塑性状态的单元明显增多,这是由于上部的锚喷支护在一定程度上限制了底板发生底鼓位移的结果。塑性区的分布出现不连续现象。由于在锚杆的端头有应力集中现象,而在锚杆中部的单元是处于锚杆的保护作用下,中间一层单元形成了挤压带,即‘加固带”,见图 3(b)仅锚杆加固时断面。另外由于锚杆和喷层的共同作用,锚杆将一部分围岩内部的应力传递给了喷层,使支护结构均匀分担围岩的膨胀压力。若进行刚性支护围岩易产生较强的膨胀力,对支护结构产生巨大的破坏作用。开挖后立即进行支护,若遇水作用将会在锚杆两端部周围产生严重的应力集中,喷层受力会产生裂缝。膨胀岩通过裂缝吸水后,由于受支护约束变形将会产生较大的膨胀力致使支护结构破坏。所以应立即喷射混凝土封闭围岩,同时允许围岩有一定的变形,采用先柔性支护,再进行二次支护的形式,有利于洞室的稳定。

不同长度(L)锚杆支护的变形和塑性区分布见图 4。研究不同长度锚杆对支护效应的影响可发现,采取变更锚杆长度措施,一定长度范围内应力受影响的范围变化显著,但继续调整锚杆长度进行计算,锚杆长度到一定程度时,作用就不明显,所以应根据具体膨胀岩膨胀性的强弱和洞室宽度、形状等通过数值计算选择一个最佳长度。满足安全的同时

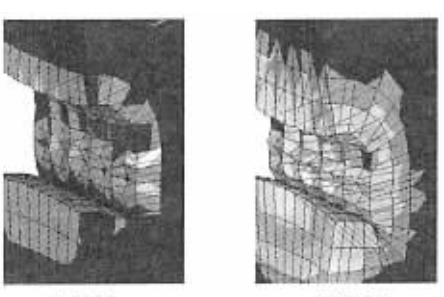


图 4 锚杆加固下围岩变形和塑性区分布图

万方数据

兼顾经济。

当锚杆间距、布置合理时,各个单锚锚头部分产生的压力集中区会连成一片,产生一种‘新围压’效应,从而起到稳定作用。

在洞室上部采用喷锚支护,在底板施加锚杆的断面塑性区分布见图 5。由于底板锚杆在很大程度上限制了底鼓位移的产生,造成在底板部位产生膨胀压力集中的现象。另外还造成了上部塑性区下移,即拱部进入塑性状态的单元较少,而直墙下部进入塑性状态的单元增多。这是由于整个洞室支护系统共同作用的结果,同时也说明膨胀性围岩洞室问题突出表现在洞室的底板。

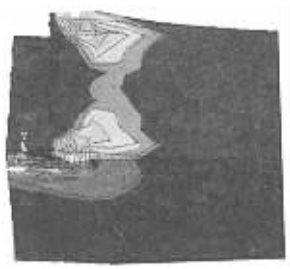


图 5 底板施加锚杆断面变形和塑性区分布图

对洞室围岩某一部位施加支护,不仅仅改善了该部位的受力状态,而且也在一定程度上改善了洞室周边围岩其它部位的受力状况。特别是当对洞室底板进行锚固时,将大大改善洞室直墙和拱部围岩的受力状态。在膨胀性围岩中开挖洞室,对底板的锚固,即对底鼓的治理是十分重要的,直接影响着整个洞室支护系统的稳定性。

洞室底板中心线上各点的位移情况(Di 代表第 i 种方案,其中第一种方案是膨胀围岩遇水作用情况)见图 6。可看出,当采用锚喷联合支护时,可以影响到底板深部的位移,抑制底板发生底鼓的作用也较大。打底板锚杆的情况,大大地限制了底板向上鼓起,由此说明底板锚杆对控制底鼓的作用是较为有效的。

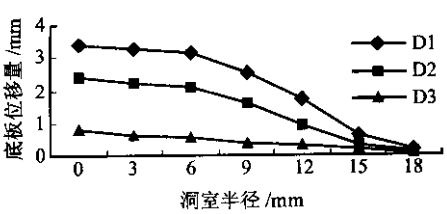


图 6 洞室底板中心线上各点位移

5 结 论

1)通过三维有限元分析,膨胀岩遇水产生的膨胀和损伤软化对膨胀岩洞室影响是显著的。膨胀岩地下洞室工程设计、施工前必须严格进行膨胀物质分类、测量和实验,认真准确地评价膨胀岩的膨胀性。

(2)锚喷属柔性支护,能使围岩在不出现较大变形的前提下,进入一定程度的塑性,有利于洞室围岩应力均匀分布及满足初期变形较大的要求。刚性支护易使围岩产生较强的膨胀力,对支护结构产生巨大的破坏作用,受支护约束变形将会产生较大的膨胀力致使支护结构破坏。

(3)洞室锚杆长度应与洞室宽度和围岩膨胀性相适应,采取变更锚杆长度措施,一定长度范围内应力受影响的范围变化显著,但当增加到一定程度时,作用就不明显。锚杆长度、间距、合理布置时,可有效地加强围岩的稳定作用。

(4)加强洞室底板支护可以有效控制两帮及顶板位移,大大改善洞室直墙和拱部围岩的受力状态。因此在膨胀性围岩中开挖洞室,对底鼓治理的好坏直接影响着整个洞室支护系统的稳定性。

(5)三维有限元分析可以提供膨胀性软岩洞室支护的基本对策理论指导,直接反馈于设计、施工。

参 考 文 献

1 Wlttke W. Foundation for the design and construction of tunnel in swelling Rock. Proc. 4th Int. congon Rock Mech, Montreux ,1979. 219~229

2 孙 钧,凌建明. 渗水膨胀粘弹塑性围岩压力隧洞的耦合蠕变效应. 同济大学学报, 1984(2):81~87

3 杨 庆. 膨胀岩与巷道稳定. 北京:冶金工业出版社,1995

4 缪协兴,等. 软岩力学. 中国矿业大学出版社,1995. 115~124

5 卢爱红,茅献彪. 湿度应力场的数值模拟. 岩石力学与工程学报,2002,21:2470~2473

6 康红普. 水对岩石的损伤. 水文地质工程地质,1994(3):39~40

7 刘 涛,等. 精通 ANSYS. 清华大学出版社,2002. 507~514

收稿日期 2004-09-21

万方数据