

膨胀岩中油井套管力学响应分析

*鲁晓兵, 章根德

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 针对存在混凝土衬砌与否两种情况, 对油井套管 — 膨胀岩体系进行了三维轴对称有限元分析。结果表明, 在围岩产生的膨胀压力下, 存在混凝土衬砌时, 径向位移最大值发生于混凝土衬砌与膨胀岩交界处; 没有混凝土衬砌时, 径向位移最大值在油井套管与膨胀岩的交界处。故完好的混凝土衬砌能明显地减缓膨胀岩对油管套管的挤压作用。在围岩膨胀压力下, 油井套管容易发生颈缩现象。

关键词: 膨胀岩; 套管; 有限元; 衬砌; 混凝土

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF OIL CASING PIPES IN SWELLING OF ROCKS

*LU Xiao-bing, ZHANG Gen-de

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The finite element analysis of oil casing pipes in swelling rocks is performed. The effect of cement lining is studied. It is found that the maximum radial displacement is located at the interface of the cement lining and the swelling rocks when there exists a cement lining, while the maximum radial displacement is located at the interface of the pipes and the swelling rocks when there does not exist a cement lining. Thus, a cement lining obviously decreases the pressure of the pipes. The pipes are prone to necking under the expanding pressure.

Key words: swelling rock; casing pipe; FEM; lining; cement

吸水后体积增大是膨胀岩最重要的特征之一, 在油田开发中, 具有重要的理论与实践意义。由于膨胀岩吸水后产生的体积膨胀会对岩体中结构物产生巨大的膨胀压力, 严重影响工程结构物的稳定性, 而目前人们对膨胀岩吸水后膨胀机理的认识还很不完善。膨胀岩的膨胀机理及其中结构物的响应问题是工程界的一个重要而又复杂的课题, 需要进行深入的研究^[1]。

2 膨胀岩的膨胀机理和主要影响因素

膨胀岩的胀缩是在膨胀岩与水两相介质中发生的一种物理化学 — 力学过程。膨胀岩的胀缩特性是内外因共同作用的结果。膨胀岩的特殊物质成分和结构是本质因素, 水是重要诱发因素。其它环境条件, 如地质地理条件等是间接外因。

解释膨胀岩膨胀机理的主要有晶格扩张膨胀

收稿日期: 2003-07-29; 修改日期: 2003-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(10202024)资助项目

作者简介: *鲁晓兵(1968), 男, 湖北当阳人, 副研究员, 博士, 从事岩土力学研究(E-mail: xblu@imech.ac.cn);

章根德(1942), 男, 安徽省绩溪县人, 研究员, 学士, 从事岩土力学方面研究。

理论^[2~4]。该理论认为膨胀岩晶格构造中存在着膨胀晶格构造,水易渗入晶层之间,形成水膜夹层而引起晶格扩张,从而导致岩石体积膨胀。如蒙脱石膨胀的主要原因是交换性阳离子(包括极化有机分子)和晶层底面的水化能。当单位晶层间没有极性分子时,晶面间距大约只有 9.6Å,但是随着含水量增加,晶层间水膜加厚,晶胞距离则增大。如钙、镁蒙脱石被水饱和后,晶面间距可扩张到 19 Å。阳离子价数高,水化膜薄,膨胀倍数低;相反亦然。故膨胀岩石膨胀的主要因素是围岩的湿度和地下水渗入,特别是油井注水是否引起窜流。

影响岩石膨胀的主要因素有:

(1) 环境湿度的历史:岩石的膨胀应变与初始含水量近似呈线性关系,初始含水量越小,膨胀应变就越大。膨胀岩吸水膨胀包含两个相互联系的过程:水被膨胀岩的孔隙吸收,在岩石骨架中产生负有效应力,导致体胀,此时的膨胀过程同吸水过程同步;水被矿物集合体所吸收导致体胀,这是一物理化学过程,其膨胀进程滞后于吸水过程。

(2) 围岩的应力状态:许多学者通过膨胀实验得出了岩石轴向膨胀应变与轴向压力的对数之间呈线性关系(图 1)。

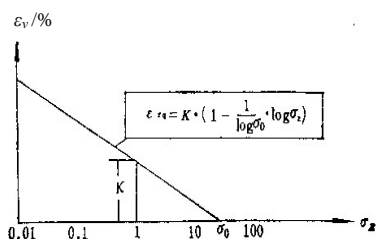


图 1 体变与应力的关系

Fig.1 The relation between the volume change and the stress

(3) 岩石的结构:无胶结的粘土岩风干后再吸水会发生膨胀崩解,体积可近十倍地增加。胶结情况对膨胀过程也有影响,如有钙质胶结的粘土砂岩,最大膨胀压力的稳定时间过程需要十天左右,而无钙质胶结的只需 3 天。陈宗基等得出了膨胀应变和比表面积参数及用于表征粘土矿物活性的参数间的关系^[5]。

(4) 岩石的干容重及孔隙率:岩石的初始干燥密度对其膨胀有很大的影响。在含水量一定的条件下,体积膨胀量随其干容重的增大而增加。

许多研究者的室内膨胀岩试样的吸水实验发

现,岩石在膨胀过程中吸水是很连续的。开始吸水速度较快;随着时间增长,吸水速度逐渐降低到稳定值。膨胀岩在一定的体积应力下,吸水量有一个饱和值,数值是体积应力的函数:

$$W = \alpha + \beta \ln \sigma_v \quad (1)$$

上式中 W 为膨胀岩吸水量, σ_v 为体积应力,而 α 和 β 是通过膨胀岩吸水实验所确定的常数。

2 膨胀岩的本构关系

最典型的本构关系是实验室内用常规固结仪、对膨胀性泥灰岩的膨胀性态进行研究得出的经验公式^[6~8]:

$$\varepsilon = K \left(1 - \frac{\log \sigma}{\log \sigma_0} \right) \quad (2)$$

式中 ε - 轴向膨胀应变; σ - 最大膨胀应力; σ_0 - 膨胀应力; K 是 $\sigma = 0.1 \text{ MPa}$ 时轴向膨胀应变。

Einstern^[9]在上述一维膨胀本构关系的基础上,提出了三维膨胀本构关系,其中假定膨胀应变是由于应力第一不变量的改变所引起的。

设侧向膨胀应力符合如下条件:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z \quad (3)$$

式中 ν 为泊松比;

则应力第一不变量为:

$$\sigma_v = \frac{1+\nu}{1-\nu} \sigma_z \quad (4)$$

从而

$$\sigma_z = \frac{1-\nu}{1+\nu} \sigma_v \quad (5)$$

又因试验是在侧向约束条件下进行的,即可以认为侧向膨胀应变为零,所以体积膨胀应变为:

$$\varepsilon_v = \varepsilon \quad (6)$$

将前面几式代入上式得:

$$\varepsilon_v = K \left(1 - \frac{\log \left(\sigma_v \frac{1-\nu}{1+\nu} \right)}{\log \left(\sigma_{v \max} \frac{1-\nu}{1+\nu} \right)} \right) \quad (7)$$

式中 $\sigma_{v \max}$ - 最大膨胀体积应力。该式即为 Einstern 的三维膨胀本构关系。

3 膨胀岩~油井套管相互作用的数值分析

在油田岩层中存在着膨胀夹层,遇水膨胀后会对油井套管形成巨大的膨胀压力,导致套管弹~塑

性变形。为了得到油水管在膨胀岩作用下受力变形的特性,考虑到问题的对称性,我们采用三维轴对称有限元进行数值分析,并且对有混凝土衬砌与无混凝土衬砌两种情况作了比较。

在有限元分析中采用了如下几个假设:

(1) 围岩是均匀,各向同性的,膨胀应变在各个方向上是相同的;(2) 膨胀岩的本构方程采用如式(7)所示的关系。

在 ABAQUS 软件上加入本文的本构后对三维轴对称情况进行了分析,采用的网格如图 2 所示。先计算自重作用下的应力作为初始应力。顶边界自由,其他面法向固定。围岩与套管都视为弹塑性体^[10],围岩、套管与衬砌间用接触对。

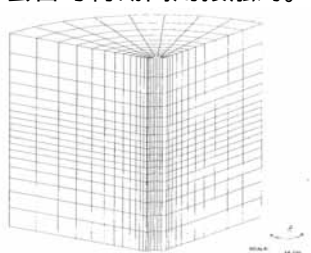


图 2 有限元网格划分

Fig.2 The mesh of FEM

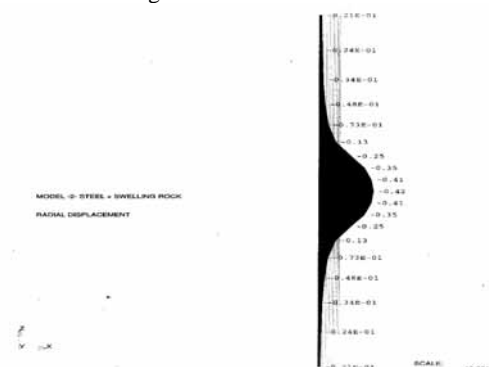


图 3 沿管轴向的径向位移(有衬砌)

Fig.3 The radial displacement along the axis of the pipes

(There is a cement lining)

图 3 和图 4 是油井套管一围岩体系在围岩膨胀时沿轴向的位移分布,可以看到,变形在中部最大,有衬砌时较无衬砌时变形大。从图 5 可知,存在混凝土衬砌时,径向位移最大值发生于混凝土衬砌与膨胀岩交界处。整个混凝土衬砌的径向位移几乎相等,向轴心方向略有减少。从图 6 可知,没有混凝土衬砌时,径向位移最大值在油井套管与膨胀岩的交界处。故完好的混凝土衬砌能明显地减缓膨胀岩对油管套管的挤压作用。图 7 给出了油水井套管发生颈缩现象的计算结果。

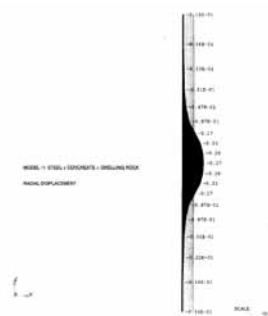


图 4 沿管轴向的径向位移(无衬砌)

Fig.4 The radial displacement along the axis of the pipes

(There is not a cement lining)

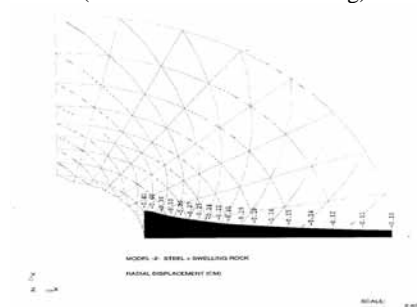


图 5 沿径向的位移分布(无衬砌)

Fig.5 Radial displacement along the radius of the pipes

(There is not a cement lining)

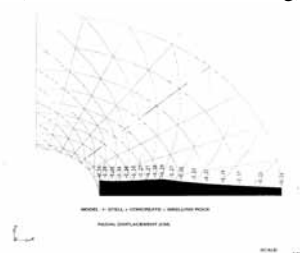


图 6 沿径向的位移分布(有衬砌)

Fig.6 The radial displacement along the radius of the pipes

(There is a cement lining)

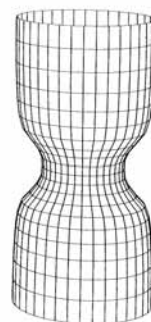


图 7 油水井套管的颈缩现象

Fig.7 The necking of the pipes

这个结果与 Erans 和 Harrima^[11]等在试验室的试验结果一致。他们的结果表明:套管外的水泥衬砌使套管的抗挤强度提高了 23%。

4 结语

本文对油井套管——膨胀围岩体系进行了三维轴对称有限元分析。结果表明,在围岩产生的膨胀压力下,存在混凝土衬砌时,径向位移最大值发生于混凝土衬砌与膨胀岩交界处,整个混凝土衬砌的径向位移几乎相等,向轴心方向略有减少;没有混凝土衬砌时,径向位移最大值在油井套管与膨胀岩的交界处。故完好的混凝土衬砌能明显地减缓膨胀岩对油管套管的挤压作用。在围岩压力下,油水井套管容易发生颈缩现象。

参考文献:

- [1] 杨庆, 吴训川. 膨胀岩土工程性能的研究现状[J]. 勘察科学技术, 1993, 2: 35~38.
Yang Qing, Wu Xunchuan. State of the art of the engineering behaviour of expansive rocks [J]. Reconnaissance of Science and Technology, 1993, 2: 35~38. (in Chinese)
- [2] Wolfqanq H K, Wong S W. Hydration swelling of water-absorbing rocks: a constitutive model [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, 20(6): 403~430.
- [3] Molenaar M M, Huyghe J M, Van Den Bogert P A J. Constitutive model for swelling shales [C]. SPE/International Society of Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference, 2, SPE/ISRM 47332, 1998, 127~132.
- [4] Samberek, Leo L Van, Ratigan, Joe L, Frank H D. Dilatancy of rock salt in laboratory tests [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 735~738.
- [5] 陈宗基, 闻萱梅. 膨胀岩与隧道稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, 2(1): 1~9.
Chen Zongji, Wen Xuanmei. Swelling rock and stability of tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mech. And Engineering, 1983, 2(1): 1~9. (in Chinese)
- [6] 杨庆, 焦建奎, 栾茂田. 膨胀岩土侧限膨胀试验新方法 with 膨胀本构关系[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 49~52.
Yang Qing, Jiao Jiankui, Luan Maotian. A new method of confined swelling tests and swelling constitutive relationship for swelling rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 49~52. (in Chinese)
- [7] 詹志雄, 文江泉, 吴光. 膨胀岩土体湿度本构模型的探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(2): 49~54.
Zhan Zhixiong, Wen Jiangquan, Wu Guang. Wet constitutive model of swelling rock and soil mass [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1998, 9(2): 49~54. (in Chinese)
- [8] 张品萃, 许国琳. 膨胀岩部分膨胀性指标测定方法初探[J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(4): 32~37.
Zhang Pincui, Xu Guolin. A primary study of testing method for rock swelling index [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1998, 9(4): 32~37. (in Chinese)
- [9] Einstein H H. Suggested method for laboratory testing of argillaceous swelling rock [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1989, 26(5): 415~426.
- [10] 大港石油地质开发管理局[R]. 港西开发区套管的变形和损伤分析报告, 1999.
The Petroleum Geology Exploitation of Dagang Petroleum Management Bureau [R]. The Deformation and Damage Analysis of the Casing Pipes in Gangxi Exploitation area. Report, 1999. (in Chinese)
- [11] Evans G W, Harriman D W. Laboratory tests on collapse resistance of cemented casing [C]. 47th Annual Meeting of the Society of Petroleum Engineers of Aime. San Antonio Texas, 1972.