

建筑科学

平面裂隙中膨润土挤出过程的数值模拟

陈 涛 徐永福

(上海交通大学土木工程系,上海 200240)

**摘 要** 膨润土因其膨胀性、低渗透性等特性常被用作高放核废料处置库的缓冲和回填材料。与地下水接触时,膨润土会发生膨胀,挤入周围岩体的裂隙中。如果进入裂隙中的膨润土的质量超过一定程度的话,会使得缓冲层中的膨润土密度下降,可能会导致处置库性能的降低甚至丧失。为了系统地了解这一过程,建立了膨润土在平面裂隙中的挤出模型,研究了地下水中电解质的浓度和缓冲层内膨润土的干密度的影响。计算结果表明膨润土的挤出距离和时间的平方根成正比关系,比例系数随着电解质浓度的减小而增加,随着膨润土干密度增加而增大。

**关键词** 缓冲层 膨润土挤出 电解质浓度 干密度

**中图法分类号** TU443; **文献标志码** A

随着核能源的开发利用,不可避免地产生了大量高放射性核废料,核废料的处理成为亟待解决的问题。中国、法国、瑞典等国家采用的是深层地质处置法,将核废料封存于地表以下 500 ~ 1 000 m 深的地下处置库中,废物罐和缓冲材料组成的人工屏障与合适的周围岩体形成的天然屏障都会阻止核素的迁移和泄漏,达到隔绝核废料的目的<sup>[1]</sup>。

膨润土因其优良的高膨胀性、低渗透性和对核素的强吸附性常被用作缓冲和回填材料,填充在废物罐和周围岩体之间。当地下流体渗入压实膨润土中,膨润土吸水膨胀,封闭自身的孔隙并填充周围岩体的裂隙,形成低渗透区,最小化地下水的侵入,抑制核素向周围环境的迁移<sup>[2]</sup>。但是,挤入周围岩体裂隙中的膨润土继续膨胀,并在地下水的作用下形成胶体,甚至向水体中释放出胶粒,随着渗流运移<sup>[3]</sup>。如果进入裂隙中的膨润土和其前端被地下水侵蚀的膨润土的质量超过一定程度的话,会使得缓冲层中的膨润土密度下降,可能会导致处置库性能的降低甚至丧失<sup>[4]</sup>。因此,定量地了解膨润土缓冲层在周围岩体裂隙中的膨胀和侵蚀情况,对保证处置库的长期性能具有重要的意义。

Borrelli 和 Ahn<sup>[5]</sup>研究了在饱和平面裂隙中,膨润土的侵入和放射性核素的迁移,建立了裂隙中核素质量守恒和膨润土挤出的耦合模型,并给出了数值解。Moreno 等<sup>[6]</sup>研究了载渗流和胶体扩散的共同作用下,膨润土在裂隙中的侵蚀模型,模拟结果显

示侵蚀速率受到渗流流速和离子浓度的影响。本文模拟了在岩体裂隙中膨润土的挤出距离随时间的变化情况,并考虑了裂隙开度、电解质浓度和膨润土干密度等因素的影响。

1 膨润土挤出模型

1.1 建立模型

周围岩体中一条水平裂隙横穿地下处置库,缓冲层中的膨润土与裂隙中的地下水接触,吸水膨胀,将会挤入裂隙中。沿裂隙面的水平剖面示意图如图 1 所示,假定缓冲层内膨润土的分布和性质的各项同性,则膨润土向裂隙中的挤出行为是一个轴对称问题。膨润土向裂隙中挤出的基本机理可以被认为是膨润土的自由膨胀<sup>[4]</sup>。Liu 等<sup>[7]</sup>根据动力平衡推导建立了膨润土的一维自由膨胀模型,描述了在自由膨胀过程中蒙脱石的质量守恒,适用于钠基膨润土在去离子水或者 1:1 型电解质溶液中的自由膨胀过程。在不考虑渗流的条件下,将其扩展至二维平面中,可得图 1 示图。

∂φ/∂t = F\_s · ∇(φ/f) + ∇ · (ζ/f ∇φ) (1)

式(1)中  $F_s$  表示重力和浮力的合力,  $\varphi$  是在裂隙中的蒙脱石在裂隙中的体积分数,  $\zeta$  表示蒙脱石颗粒所含能量的总合,包括热运动的能量和由范德华力和静电力(双电层斥力)产生的能量。  $\zeta$  和  $f$  的比可以认为是一种扩散系数。其中  $f$  是蒙脱石颗粒和水之间的摩擦系数,如式(2)

f = 6π η r\_eq + V\_m k\_0 τ^2 a\_m^2 η / (1 - φ)^2 (2)

式(2)中  $r_{eq}$  是颗粒的等效半径,  $\eta$  是电解质溶液的

2015 年 9 月 14 日收到 国家自然科学基金(41272318)资助  
第一作者简介:陈涛(1991—),男,安徽滁州人,硕士研究生。研究方向:岩土工程、膨润土工程性质。E-mail:tete516@sjtu.edu.cn。

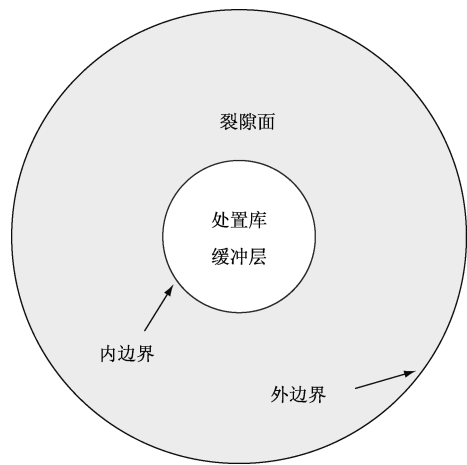


图 1 横穿处置库裂隙示意图

Fig. 1 Diagram of fracture that intersects the repository

黏度,  $k_0$  是孔隙形状因子,  $\tau$  是孔隙通道的迂曲度, 乘积  $k_0\tau^2$  也被称作 Kozeny 常数,  $a_m$  是单位体积蒙脱石颗粒的表面积。函数  $\zeta$  的表达式如式(3)。

$$\zeta = k_B T + (h + d)^2 \left( \frac{\partial F_A}{\partial h} - \frac{\partial F_R}{\partial h} \right) \tag{3}$$

式(3)中  $k_B$  是波尔兹曼常数,  $T$  是绝对温度,  $h$  是蒙脱石颗粒的晶层间距,  $d$  是蒙脱石晶层厚度,  $F_A$  和  $F_R$  分别表示范德华引力和双电层斥力, 采用 DLVO 模型的表达式<sup>[8]</sup>。

由 Liu 等<sup>[7]</sup>的计算结果可知重力的影响效果非常小, 忽略重力的作用, 而且由于问题的轴对称性, 以对称轴为极点, 将公式(1)转化为极坐标形式, 可得式(4)。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\zeta}{f} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \tag{4}$$

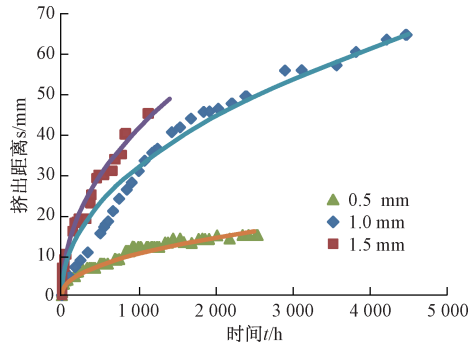


图 2 挤出距离模拟结果(实线)与试验结果(标计点)对照图

Fig. 2 Comparison between the extrusion distance results of the model (solid) and the experience (markers)

膨润土向裂隙中挤出导致的质量损失在短时间并不会造成缓冲层内膨润土干密度的明显改变, 所以模型内边界的蒙脱石体积分数  $\varphi_0$  设为定值, 而外边界为无通量边界。对于不同的膨润土初始干密

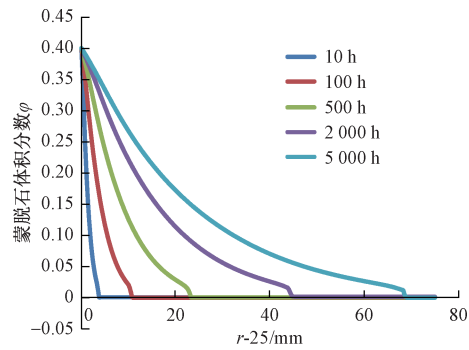


图 3 不同时刻的蒙脱石体积分分布图

Fig. 3 The volume fraction profile of montmorillonite at different time

度和电解质浓度采用不同的裂隙深度, 达到节约计算时间的目的。在较大的初始干密度和较低的电解质浓度下, 预计膨润土的挤出距离较远, 故采用更大的裂隙深度。

联合控制方程式(4)和边界条件就可以模拟在无渗流条件下膨润土向裂隙中的挤出问题。

1.2 与试验对比

Tanai 和 Matsumoto<sup>[4]</sup>利用两块透明中空的丙烯酸塑料块合在一起形成人工裂隙, 塑料块内填充直径和高度都为 50 mm, 干密度 1.8 g/cm<sup>3</sup> 的圆柱形岩石 Kunigel-V1 膨润土模拟地下处置库, 使裂隙内充满去离子水, 记录了无渗流条件下膨润土的挤出距离随时间的变化情况。Kunigel-V1 膨润土是一种钠基膨润土, 由 47% 的蒙脱石、37% 的玉髓、4% 的斜长石、3% 的方沸石和 2% 的方解石等矿物组成<sup>[9]</sup>。利用上面建立的膨润土挤出模型, 在 Comsol Multiphysics 软件模拟该试验过程, 内边界的蒙脱石体积分数:

$$\varphi_0 = \frac{C\rho_d}{\rho_m} \tag{5}$$

式(5)中  $C$  是膨润土中蒙脱石的含量,  $\rho_d$  是缓冲层内膨润土的干密度,  $\rho_m$  是蒙脱石的颗粒密度。将计算结果和试验结果进行对比, 如图 2 所示的挤出距离随时间的变化情况, 标记点表示试验的结果, 实线是数值计算结果。图 3 表示了数值模拟中不同时间下的蒙脱石体积分数在岩体裂隙中的分布情况。

试验包含 0.5 mm、1.0 mm 和 1.5 mm 三种不同的裂隙, 对于不同的裂隙开度, 主要是膨润土所受的摩擦力不同, 模型选取不同的 Kozeny 常数, 除此之外的所有参数完全相同。从图 2 中可以看出模型模拟结果和试验结果吻合得相当好, 说明该模型可以很好的描述和预测缓冲层中膨润土向裂隙中的挤出情况。

2 影响因素

沿用上面裂隙开度为 1.0 mm 的膨润土挤出模型,改变地下水中电解质的浓度(这里只考虑 NaCl)和缓冲层内膨润土的干密度,研究膨润土干密度  $\rho_d$  和电解质溶液浓度  $c$  对膨润土向裂隙中挤出行为的影响。计算选取的膨润土干密度从 0.5 g/cm<sup>3</sup> 到 2.3 g/cm<sup>3</sup> 不等,电解质浓度的变化范围从 1 mmol 到 50 mmol。

图 4 描绘了干密度为 1.0 g/cm<sup>3</sup> 和 2.3 g/cm<sup>3</sup> 的膨润土在 1 mmol 和 50 mmol 电解质溶液中,挤出距离随时间的变化关系。从图 4 中可以明显看出膨润土的挤出距离  $s$  和时间  $t$  的平方根成正比例关系,用公式表示为:

$$s = \alpha \sqrt{t} \tag{6}$$

式(6)中比例系数  $\alpha$  同电解质溶液的浓度和膨润土的干密度相关,电解质溶液的浓度越小,膨润土的干密度越大,比例系数则越大,挤出速度越快,反之亦然,和 Kanno 等<sup>[10]</sup>的结论一致。表 1 列出了不同膨润土干密度和电解质浓度下的比例系数  $\alpha$  的数值。

表 1 不同电解质浓度和干密度下的比例系数的值/(mm·h<sup>-1/2</sup>)

Table 1 proportion coefficient under different electrolyte concentrations and dry densities/(mm·h<sup>-1/2</sup>)

| 浓度/mmol                   | 1     | 10    | 30    | 50    |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) |       |       |       |       |
| 0.5                       | 0.705 | 0.357 | 0.154 | 0.077 |
| 1.0                       | 0.868 | 0.570 | 0.400 | 0.310 |
| 1.4                       | 0.938 | 0.654 | 0.496 | 0.418 |
| 1.8                       | 0.989 | 0.709 | 0.561 | 0.483 |
| 2.3                       | 1.033 | 0.766 | 0.626 | 0.555 |

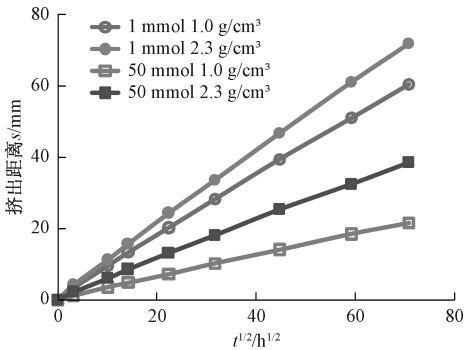


图 4 膨润土挤出距离随时间的变化情况

Fig. 4 Change of bentonite extrusion distance with time

2.1 电解质浓度的影响

为了更直观地展示地下水中电解质浓度对挤出

速度的影响,将不同膨润土干密度下,比例系数  $\alpha$  随电解质溶液浓度的变化关系绘制如图 5 所示。从图 5 中可以看出,比例系数随着电解质浓度的增大而逐渐减小。当电解质浓度较小时,电解质浓度的增大会导致比例系数的迅速减小;随着电解质浓度的上升,比例系数的衰减速率也逐渐放缓,也就是说随着地下水中电解质浓度的上升,缓冲层内膨润土向裂隙中的挤出速度将会下降,但下降的速率会减慢。

对比例系数  $\alpha$  随电解质溶液浓度的变化关系进行回归分析,发现两者很好地符合了对数型关系,拟合线如图 5 中所示。不同膨润土干密度下,比例系数  $\alpha$  随电解质浓度  $c$  的变化关系可表示为:

①膨润土干密度为 0.5 g/cm<sup>3</sup> 时:  
$$\alpha = -0.16 \ln c + 0.711 \tag{7a}$$

②膨润土干密度为 1.4 g/cm<sup>3</sup> 时:  
$$\alpha = -0.13 \ln c + 0.944 \tag{7b}$$

③膨润土干密度为 2.3 g/cm<sup>3</sup> 时:  
$$\alpha = -0.12 \ln c + 1.037 \tag{7c}$$

可以看出,当膨润土干密度较小时,比例系数随着电解质浓度的上升下降更快,换句话说,也就是高浓度电解质溶液,对于干密度较小的膨润土的膨胀性影响更大。

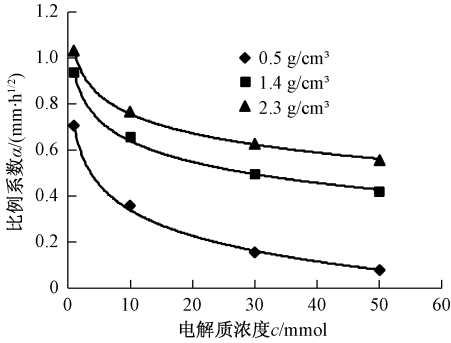


图 5 比例系数和电解质浓度之间的关系

Fig. 5 Relationship between proportion coefficient and electrolyte concentration

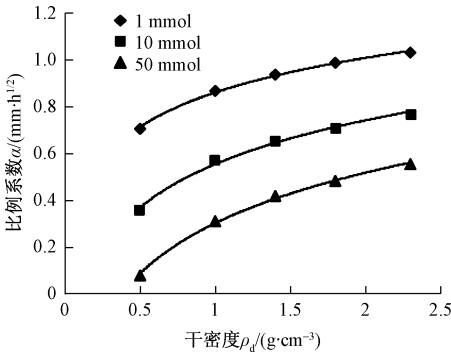


图 6 比例系数和干密度之间的关系

Fig. 6 Relationship between proportion coefficient and dry density

## 2.2 膨润土干密度的影响

对不同电解质浓度下,比例系数  $\alpha$  随膨润土干密度的变化关系进行同样的处理,如图 6 所示。可以看出,比例系数随着膨润土干密度的增大而逐渐增大。当膨润土干密度较小时,膨润土干密度的增大会导致比例系数的快速增加;当膨润土干密度超过大概  $1.0 \text{ g/cm}^3$  后,比例系数大致随着膨润土干密度线性增加,也就是说随着缓冲层内膨润土干密度的增大,膨润土向裂隙中的挤出速度将会逐渐上升。

同样对比例系数  $\alpha$  随膨润土干密度的变化关系进行回归分析,发现两者也很好符合了对数型关系,拟合线如图 6 中所示。不同电解质溶液浓度下,比例系数  $\alpha$  随膨润土干密度  $\rho_d$  的变化关系可表示为:

$$\text{①电解质浓度为 } 1 \text{ mmol 时:} \\ \alpha = 0.216 \ln \rho_d + 0.861 \quad (8a)$$

$$\text{②电解质浓度为 } 10 \text{ mmol 时:} \\ \alpha = 0.268 \ln \rho_d + 0.554 \quad (8b)$$

$$\text{③电解质浓度为 } 50 \text{ mmol 时:} \\ \alpha = 0.315 \ln \rho_d + 0.301 \quad (8c)$$

可以看出,当电解质浓度较大时,比例系数随着膨润土干密度增加而更快地增大。

## 3 结论

地质处置库缓冲层中的压实膨润土,与地下水接触后,吸水膨胀,封闭自身的孔隙并填充周围岩体的裂隙,挤入裂隙中的膨润土也会继续膨胀。本文建立了在无渗流条件下,缓冲层中膨润土在水平岩体裂隙中的挤出模型,模拟了在不同电解质浓度和膨润土干密度下的膨润土的挤出情况,并和前人的试验结果进行了对比。

模拟结果显示膨润土的挤出距离和时间的平方根成正比比例关系,而比例系数和地下水中电解质浓度以及缓冲层内膨润土干密度相关。电解质溶液的浓度越小,膨润土的干密度越大,比例系数

则越大,反之亦然。比例系数和电解质溶液的浓度以及膨润土的干密度的关系都可以对数型关系来拟合。

需要注意的是膨润土中除蒙脱石之外的非膨胀矿物,在膨胀过程中可能起到类似于过滤器的作用,这会减慢膨润土的膨胀速率,进而减慢膨润土的挤出速度,而模型中并没有考虑这一点,因此模拟的结果偏于悲观。

## 参 考 文 献

- 1 Komine H, Ogata N. Predicting swelling characteristics of bentonites. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004; 130(8): 818—829
- 2 Alawaji H A. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids. *Applied Clay Science*, 1999, 15(3): 411—430
- 3 Moreno L, Neretnieks I, Liu L. Modelling of erosion of bentonite gel by gel/sol flow. *Chemical Engineering and Technology*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2010
- 4 Tanai K, Matsumoto K. A study of extrusion behavior of buffer material into fractures. *Science & Technology Series*, 2008;334: 57—64
- 5 Borrelli R A, Ahn J. Numerical modeling of bentonite extrusion and radionuclide migration in a saturated planar fracture. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2008, 33: S131—S141
- 6 Moreno L, Liu L, Neretnieks I. Erosion of sodium bentonite by flow and colloid diffusion. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011;36(17): 1600—1606
- 7 Liu L, Moreno L, Neretnieks I. A dynamic force balance model for colloidal expansion and its DLVO-based application. *Langmuir*, 2008;25(2): 679—687
- 8 Liu L. Prediction of swelling pressures of different types of bentonite in dilute solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013;434: 303—318
- 9 Nakashima Y. Nuclear magnetic resonance properties of water-rich gels of Kunigel-V1 bentonite. *Journal of nuclear science and technology*, 2004;41(10): 981—992
- 10 Kanno T, Matsumoto K, Sugino H. Evaluation of extrusion and erosion of bentonite buffer. *Proc 7th Int Conf on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM'99)*, 1999

(下转第 140 页)

Zhang Jianlin, Zhang Xun'an. A simple way of estimating load-carrying capacity of airport pavement. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004;22(1):64—67

5 张建霖,郑小平. 机场道面的地基反应模量及承载力分析. 土木工程学报, 2005;38(5):74—76

Zhang Jianlin, Zheng Xiaoping. Analysis of response modulus and load-bearing capacity of the foundation for airport pavement. China Civil Engineering Journal, 2005;38(5):74—76

6 翁兴中,蔡良才. 机场道面设计. 北京:人民交通出版社, 2006

Weng Xingzhong, Cai Liangcai. Airport pavement design. Beijing: China Communications Press,2006

7 张振东,张磊,钱磊磊. 路面结构动力学. 南京:东南大学出版社,2010

Zhang Zhendong,Zhang Lei,Qian Leilei. Dynamics of pavement structures. Nanjing:Southeast University Press,2010

Analysis on Bearing Capacity of Highway Runway Cement Concrete Pavement under Static Load

SHI Bao-hua, CAO Bing, XU Wei, XU Gui, QIN Xiang-hui

(Aerospace Engineering College, Airforce Engineering University, Xi'an 710038, P. R. China)

[Abstract] Based on the theory of elastic half-space foundation, the Young's modulus of foundation of highway runway concrete pavement was back calculate, and give a comparative analysis between the measured deflections and theoretical calculated deflections which based on the theory of elastic half-space foundation and Winkler foundation under the static load. Then the bearing capacity of the pavement by PCN method was evaluated. An example of highway runway shows that this method is convenience and accurate enough, and can be applied to engineering practice.

[Key words] highway runway cement concrete pavement bearing capacity elastic half-space



(上接第 129 页)

Numerical Simulation of Bentonite Extrusion in a Planar Fracture

CHEN Tao, XU Yong-fu

(School of Civil Engineering and Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P. R. China)

[Abstract] Bentonite is often used as a buffer and backfill material of high-level nuclear waste repository as a result of its swelling potential, low permeability and other characteristics. When contacted with groundwater, the bentonite will swell, and extrude into fractures in the surrounding rock. If the quality of bentonite extrusion exceeds a certain degree, it will in turn degrade the bentonite density in the buffer, and may lead to decline and even loss of the repository performance. To understand this process systematically, a model that describes the bentonite extrusion in the planar fracture is established, investigating the influence of the electrolyte concentration in groundwater and the bentonite dry density in the buffer. Calculation results show that the bentonite extrusion distance is proportional to the square root of time, and the proportion coefficient raises with decreasing electrolyte concentration and with increasing bentonite dry density.

[Key words] buffer bentonite extrusion electrolyte concentration dry density