

DOI: 10.11779/CJGE202204003

考虑侧壁摩阻的围岩裂隙中膨润土-砂混合物侵入过程及其模型

叶为民^{1,2}, 许利波¹, 王琼^{1,2}, 陈永贵^{1,2}, 陈宝^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 高放废物处置库建设与运营期间, 作为缓冲/回填材料的高压实膨润土-砂混合物侵入裂隙, 在降低围岩渗透性的同时, 会引起膨润土的流失与可能的核素外泄, 危及处置库的运营安全。针对膨润土-砂混合物侵入围岩裂隙问题, 开发试验装置, 开展不同裂隙宽度(0.1, 0.3, 0.5, 1.0 mm)情况下, 不同含砂率(0%, 15%和30%)的膨润土-砂混合试样(石英砂粒径为0.075~0.1 mm)的裂隙侵入试验; 利用预先设置的高精度数字相机, 定时拍摄膨润土混合物侵入过程, 再借助ImageJ图像处理软件, 获取侵入距离以及附属(石英、长石与方石英等)与非附属矿物(蒙脱石等)环宽度等参数; 基于侵入过程中膨胀力与裂隙侧壁摩阻力发展过程分析, 构建并验证考虑侧壁摩阻的围岩裂隙膨润土侵入模型。结果表明: 静水条件下, 裂隙中膨润土的侵入距离、非附属与附属矿物环宽度等均随裂隙大小的增大显著增大, 随含砂率增大明显减小; 侵入达到平衡(稳定)后, 挤出口处膨润土干密度随裂隙宽度的增大而减小, 但随试样含砂率的增大而增大; 附属矿物环区的摩擦系数明显大于非附属矿物环区的摩擦系数, 即附属矿物环对膨润土侵入过程具有更强的抑制作用; 考虑侧壁摩阻的膨润土侵入模型计算值能够较好地模拟实测值。侵入试验与模型研究可为实际处置库中膨润土的侵入行为预测提供依据。

关键词: 膨润土; 侵入; 围岩裂隙; 附属矿物环; 侧壁摩擦; 模型

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)04-0613-09

作者简介: 叶为民(1963—), 男, 安徽枞阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事环境地质、非饱和土力学研究与教学工作。E-mail: ye_tju@tongji.edu.cn

Intrusion process of bentonite-sand mixture and its model in rock fissures with consideration of lateral wall friction

YE Wei-min^{1,2}, XU Li-bo¹, WANG Qiong^{1,2}, CHEN Yong-gui^{1,2}, CHEN Bao^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and
Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: During the construction and long-term operation of a deep geological repository for disposal of high-level radioactive waste, compacted bentonite-sand mixture invades and fills into fissures in the surrounding rock formations. This intrusion reduces the permeability of the rock formations. Meanwhile, it also causes the loss of bentonite with possible leakage of nuclides, resulting in endangering the operation safety of the repository. Aiming at solving the problems related to bentonite intrusion into rock fissures, a test device is developed, and the intrusion tests are conducted on the bentonite-sand mixture specimens (quartz size: 0.075~0.1 mm) with different sand contents (0, 15% and 30%) into artificial fissures with different sizes (0.1, 0.3, 0.5 and 1.0 mm). The images are regularly captured by the high-precision digital camera during the intrusion process of bentonite mixture. Then, with an ImageJ image processing software, the parameters including the intrusion distance and width of the accessory-mineral (quartz, feldspar and cristobalite, etc.) and non-accessory mineral (montmorillonite, etc.) ring are obtained. According to the analyses on the development processes of swelling pressure and friction resistance along the inner side wall of the fissures during the invasion process, an intrusion model for the bentonite intrusion in the surrounding rock fissures considering the friction resistance of the inner wall is proposed and verified. The results show that the bentonite intrusion distance and the widths of non-accessory and accessory mineral rings in the fissures increase significantly with the increase of the fissure size, and decrease obviously with the increasing sand content. After the bentonite intrusion reaches its equilibrium (stability), the dry density at the extrusion

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509900); 国家自然科学基金项目(42030714, 41807237)
收稿日期: 2021-03-01

outlet decreases with the increase of the fissure width and increases with the increase of sand content. The friction coefficient of the accessory mineral ring area is obviously larger than that of the non-accessory one, indicating that the accessory mineral ring has a stronger inhibitory effect on the bentonite intrusion process. The measured results can be well simulated by the proposed model for the bentonite intrusion with consideration of the inner side wall friction of fissures. The researches on the intrusion tests and model can provide a basis for predicting the intrusion behaviors of bentonite in the actual disposal repository.

Key words: bentonite; intrusion; host-rock fissure; accessory mineral ring; lateral wall friction; model

0 引言

高压实膨润土-砂混合物因其具有足够低的渗透性、良好的膨胀性、合适的导热性和强劲的吸附性,被众多国家选做缓冲/回填材料,用以构筑多屏障处置库中、填充在废物罐与围岩之间的工程屏障层,以实现高放废物的永久封存^[1-4]。

处置库建成投入运营后,由于本身固有的影响,加上工程扰动影响,与工程屏障(膨润土)交界面处的围岩中可能存在大量的裂隙(图1)^[5],呈现较高的渗透性能。后者一方面加速库内膨润土的水化,同时导致侵入裂隙膨润土量的增加;更为重要的是,侵入到周围岩体裂隙中的膨润土还会继续膨胀^[6],且在外侧围岩中的地下水作用下,形成胶体(或吸附有核素)并随渗流向外围围岩中迁移扩散,产生侵蚀作用^[7]。因此,这一侵入/侵蚀过程一方面引起库内核素随膨润土胶体迁移泄露^[8],另一方面,导致膨润土质量损失,从而降低人工屏障层的缓冲性能,造成处置库运营安全的不确定性。开展围岩裂隙中膨润土-砂混合物的侵入过程及其机理研究,对于人工屏障系统设计与安全运营等均具有极其重要的工程实践价值。

研究表明,围岩裂隙中的膨润土侵入过程具有典型的流变特性,且沿侵入路径呈现膨润土固体/凝胶/溶胶/地下水等分区段特征^[8](图1)。为研究膨润土的侵入行为,Pusch^[9]曾设计了由两块圆环状花岗岩板构成的水平缝隙模拟围岩裂隙,开展了MX80膨润土侵入试验,发现侵入距离与时间的对数成正比。Kanno等^[10]借助两块有机玻璃板间的距离模拟围岩裂隙,发现Kunigel V1膨润土的侵入距离与时间的平方根成正比;随后,基于同一套仪器发现随着膨润土含量与裂隙宽度的增大,侵入速率随之增大^[11];并在此基础上,建立了固相颗粒流扩散模型,模拟膨润土的干密度在裂隙中的分布^[12]。黄依艺等^[13]则试验研究了GMZ01膨润土的侵入过程,发现侵入距离随膨润土干密度与裂隙宽度增大而增大。但值得注意的是,上述试验均未能考虑附属矿物环(膨润土内诸如石英、方解石等附属矿物所形成的环状物质)^[14]对侵入过程的影响,且为了简化问题,目前的模型均将裂隙侧壁设定为无滑移边界,导致膨润土侵入速率理论值偏大^[12]。

本文以高压实GMZ01膨润土为例,开展裂隙宽度与含砂率控制的侵入试验,分析摩擦力与附属矿物对膨润土混合物侵入过程的影响,构建并验证稳态条件下、考虑侧壁摩阻及附属矿物环影响的膨润土侵入模型。

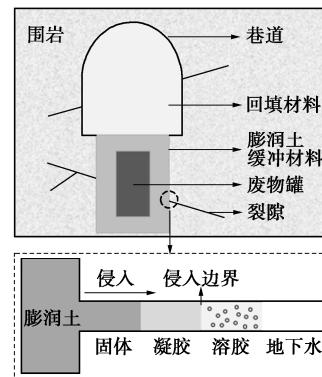


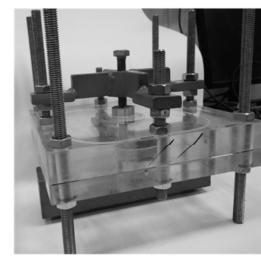
图1 膨润土侵入围岩裂隙示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bentonite intrusion into rock fissure

1 试验方法

1.1 试验设备

本次试验用设备如图2所示。采用两块透明亚克力板(230 mm×230 mm)平行叠置,并在两块板间插入不锈钢垫片构造人工缝(裂)隙,再通过改变垫片厚度,实现不同尺寸围岩裂隙的侵入试验;同时在亚克力板中央设置直径50 mm圆孔,用以放置高压实膨润土试样;再沿亚克力板四周的两板之间裂隙(当前垫片厚度)填塞可压缩海绵条带,形成两板之间封闭的储水空间;采用活塞与十字型反力架固定试样与整个试验装置,以减少试样膨胀引起的亚克力板的竖向膨胀变形;最后,将高精度数字相机固定在试验装置的正上方,以定时记录膨润土及其混合物的侵入过程。



(a) 实物图

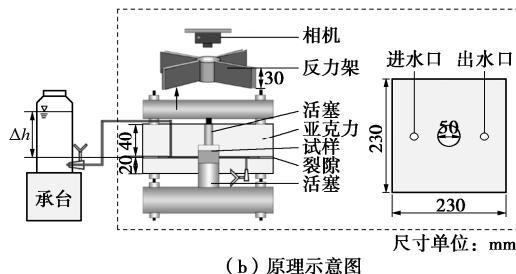


图2 侵入装置实物图与原理图

Fig. 2 Setup for conducting bentonite intrusion test

1.2 试样制备

(1) 试验材料

本次试验采用的主要材料为高庙子膨润土 GMZ01 与凤阳石英砂。

高庙子膨润土产自中国内蒙古高庙子地区, 被确定为中国高放废物深地质处置缓冲材料的首选材料^[3]。本次试验用的高庙子 GMZ01 膨润土, 是经混合大样破碎粉碎至 200 目的粉末, 呈白色颗粒状, 其基本参数见表 1。主要矿物为蒙脱石, 含量占 75.4%, 其次包括石英 (11.7%)、方英石 (7.3%) 及长石 (4.3%), 此外黏土矿物中含有高岭石、伊利石等^[4]。

表1 GMZ01 膨润土基本性质^[4]Table 1 Basic properties of GMZ01 bentonite^[4]

参数	数值
G_s	2.66
pH	8.68~9.86
液限/%	276
塑限/%	37
总比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	570
主要交换离子 ($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$)	Na^+ (0.4336), Ca^{2+} (0.2914), Mg^{2+} (0.1233), K^+ (0.0251)
主要矿物	蒙脱石(75.4%), 石英(11.7%), 长石(4.3%), 方石英(7.3%)

石英砂产自安徽凤阳。 SiO_2 含量为 99.20%, 粒径 100~200 目, 相对质量密度为 2.65, pH 值为 7.5, 莫氏硬度为 6.7。

(2) 试样制备

首先, 将石英砂筛分为粒径 0.075~0.1 mm 的砂粒, 并用蒸馏水洗净, 然后平铺于搪瓷盘上放入 105°C 烘箱内烘干至恒重备用。

其次, 为了探究附属矿物对膨润土侵入过程的影响, 称取 GMZ01 膨润土粉末和经烘干的石英砂, 配制成含砂率 α 为 0%, 15% 和 30% 的膨润土-砂混合物; 借助汽相法吸力控制技术对混合物粉末进行吸力平衡 (K_2CO_3 饱和盐溶液)。吸力平衡后, 用烘干法测定膨润土-砂混合物粉末含水率分别为 10.0%, 8.4% 与

6.8%。

最后, 根据目标初始干密度与试样尺寸, 称取相应的膨润土-砂混合物, 静压成密度为 1.70 g/cm^3 、直径 50 mm 与高 20 mm 的圆饼状试样^[15]。

考虑到工程实践中, 围岩裂隙宽度基本小于 1 mm^[5], 本文试验选定的裂隙宽度 a 为 0.1, 0.3, 0.5 及 1.0 mm。

1.3 试验步骤

将完成压制的试样放入亚克力板中央的圆孔 (图 2) 中, 并依次安装上、下两个不锈钢活塞与十字型反力架, 再旋紧不锈钢反力板上的高强螺栓, 使试样处于恒体积状态。利用储水容器通过注水口向裂隙中注满去离子水, 并关闭出水口, 使裂隙中的水处于静水状态, 开始静水环境下膨润土试样的水化与侵入围岩裂隙试验。同时, 利用固定在装置正上方的数码相机, 定时 (1 次/2 h) 拍照记录膨润土的侵入过程, 并基于非附属与附属矿物环区之间存在的色差^[14], 借助 ImageJ 图像处理软件, 选取本文试验的灰度值 30, 求取图 4 中 4 个对称位置的平均侵入距离 (l_1+l_2), 非附属矿物环宽度 (l_1) 及附属矿物环宽度 (l_2)。当膨润土侵入距离 (l_1+l_2) 增速低于 $0.1 \text{ mm}/24 \text{ h}$ 时, 即视为侵入过程达到稳定, 结束试验 (试验总时长约为 60 d), 并将腔室内试样推出, 取挤压出口 (图 10) 附近处的土样, 采用石蜡法测取干密度。

调整裂隙 (缝) 宽度 (大小) 并安装新的试样, 重复上述试验步骤, 直至所有裂隙条件下的试验完成后, 本文试验结束。

所有试验均是在室温 25 ± 0.1 条件下完成的。

2 试验结果

2.1 不同裂隙 (缝) 宽度下的侵入过程

不同裂隙宽度条件下, 实测侵入距离随时间变化关系, 如图 3 所示。图 3 中结果表明, 试验开始 25 d 内, 膨润土侵入裂隙的距离迅速增大, 随后侵入速率逐渐衰减, 并于 60 d 左右趋于稳定, 并达到侵入距离最大值。

同时, 相同条件下, 侵入距离与裂隙宽度成正相关关系。当裂隙宽度从 0.1 mm 增大到 1.0 mm 时, 膨润土的侵入距离显著增大, 对应的最大侵入距离分别为 5.3, 14.7, 22.2, 36.7 mm。

此外, 由图 4 可以看出, 膨润土侵入围岩裂隙后会在侵入前锋 (沿) 形成一圈、具有一定宽度 (l_2) 的层状物质。这主要是由于静水环境下, 膨润土在其侵入裂隙过程中, 随着侵入距离的增大, 其膨胀力不足以继续推动诸如石英、方解石等附属矿物继续前移,

导致所携带这些附属矿物被依次沉淀并逐渐堆积起来, 形成附属矿物环^[14]。

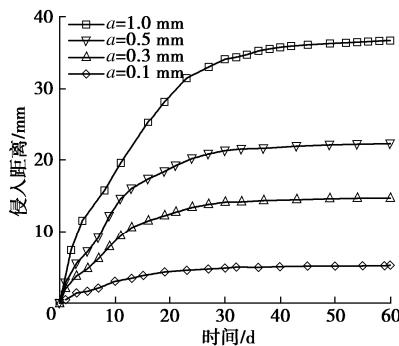


图 3 不同裂隙宽度下侵入距离时程曲线(含砂率 0%)

Fig. 3 Evolutions of intrusion distance with time for test on fissures with different sizes (sand content 0%)

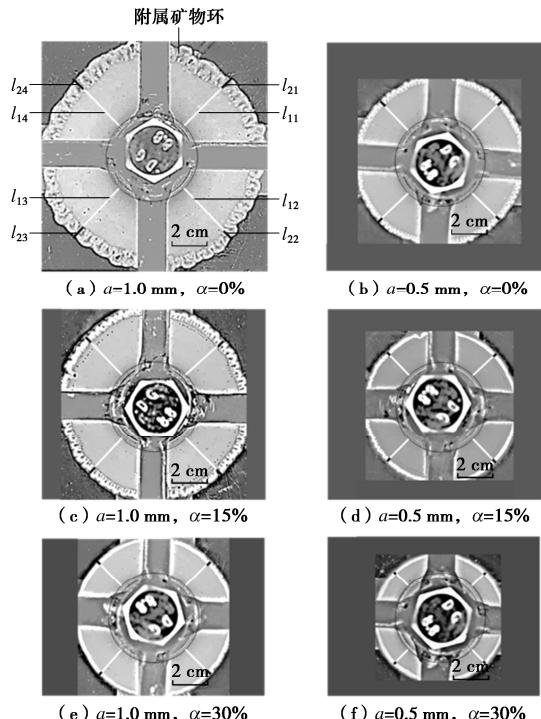


图 4 不同裂隙宽度与含砂率下的侵入状态 (60 d)

Fig. 4 Intrusion states with different fissure sizes and sand contents (60 d)

经 ImageJ 软件分析可得非附属矿物环与附属矿物环宽度随膨润土水化时间的变化曲线, 如图 5, 6 所示。图 5, 6 中结果表明: 与侵入距离的随水化时间变化规律类似, 非附属矿物环宽度 (l_1) 与附属矿物环宽度 (l_2) 在水化初期迅速增大, 但分别在 30 d 与 15 d 左右急剧衰减, 并逐渐趋于稳定; 非附属矿物环与附属矿物环的最大宽度同样与裂隙宽度成正比, 当裂隙宽度从 0.1 mm 增大到 1.0 mm 时, 非附属矿物环的最大宽度分别为 4.6, 12.3, 18.1, 28.5 mm, 附属矿物环的最大宽度分别为 0.7, 2.4, 4.1, 8.2 mm。

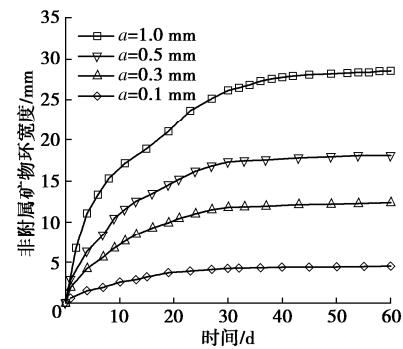


图 5 不同裂隙宽度下非附属矿物环宽度时程曲线(含砂率 0%)

Fig. 5 Evolution of non-accessory mineral ring width with time for tests on fissures with different sizes (sand content 0%)

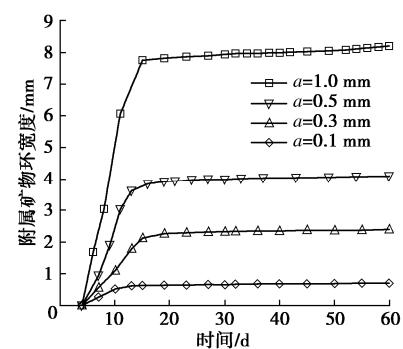


图 6 不同裂隙宽度下附属矿物环宽度时程曲线(含砂率 0%)

Fig. 6 Evolution of accessory mineral ring width with time for tests on fissures with different sizes (sand content 0%)

2.2 裂隙宽度与含砂率对侵入过程的影响

不同裂隙宽度条件下, 不同含砂率试样侵入距离随时间变化关系, 如图 7 所示。结果表明: 相同裂隙宽度下, 石英砂含量越高, 膨润土最大侵入距离越小; 相同含砂率情况下, 裂隙宽度越大, 入侵距离越远。两种裂隙宽度 (0.5, 1.0 mm) 条件下, 含砂率 15% 试样的最大侵入距离分别为 16.2, 28.7 mm, 而含砂率 30% 试样分别为 11.2, 19.5 mm。

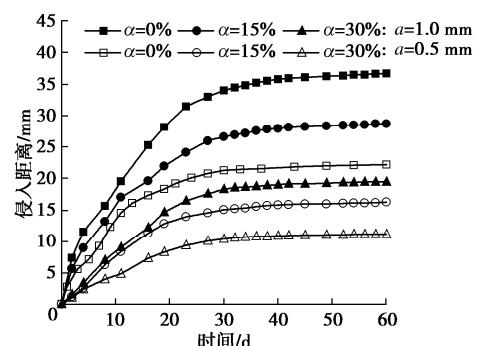


图 7 不同含砂率试样的侵入距离时程曲线

Fig. 7 Evolution of intrusion distance with time for specimens with different sand contents

不同裂隙宽度条件下, 不同含砂率试样的非附属矿物环宽度(l_1)随水化时间的变化关系, 如图8所示。结果表明: 相同裂隙宽度时, 非附属矿物环宽度(l_1)随含砂率增大而减小; 相同含砂率情况下, 非附属矿物环宽度(l_1)随裂隙宽度增大而增大。两种裂隙宽度(0.5与1.0 mm)条件下, 含砂率15%试样的最大非附属矿物环宽度, 分别为13.9, 24.3 mm; 含砂率30%试样的最大非附属矿物环宽度, 分别为9.8, 16.9 mm。

不同裂隙宽度条件下, 不同含砂率试样的附属矿物环宽度(l_2)随水化时间的演化关系, 如图9所示, 相同裂隙宽度时, 附属矿物环宽度(l_2)随含砂率增大而减小; 相同含砂率情况下, 附属矿物环宽度(l_2)随裂隙宽度增大而增大。两种裂隙宽度(0.5, 1.0 mm)情况下, 含砂率15%试样的最大附属矿物环宽度, 分别为2.3, 4.4 mm; 含砂率30%试样的最大附属矿物环宽度, 分别为1.4, 2.6 mm。

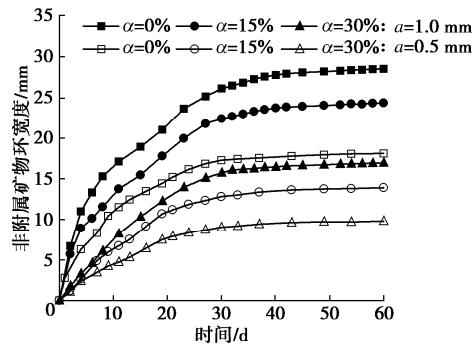


图8 不同含砂率试样的非附属矿物环宽度时程曲线

Fig. 8 Evolutions of non-accessory mineral ring width with time for specimens with different sand contents

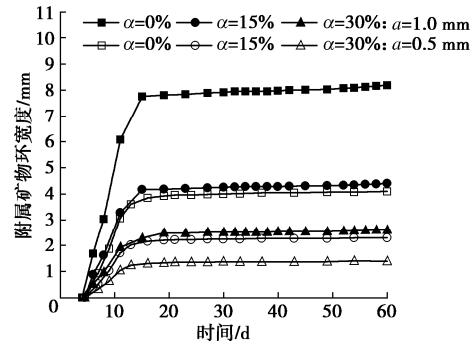


图9 不同含砂率试样的附属矿物环宽度时程曲线

Fig. 9 Evolution of accessory mineral ring width with time for specimens with different sand contents

2.3 试样干密度

为分析裂隙侵入过程对压实膨润土试样的影响, 试验结束后, 采取试样与裂隙交界面附近(图10)土体, 实测其干密度。侵入试验结束后, 不同裂隙宽度情况下, 不同含砂率试样的干密度实测结果如表2所示。

示。

表2中结果表明, 与裂隙交界面附近处的试样干密度随着裂隙宽度的增大而减小, 随着试样含砂率的增大而增大。

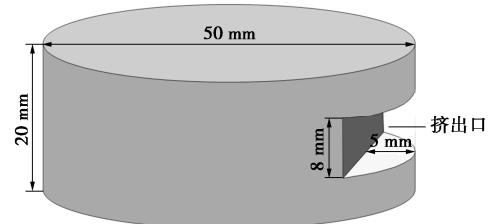


图10 采样位置

Fig. 10 Sampling position of the specimen

表2 实测挤出口附近试样干密度

Table 2 Measured dry density at extrusion mouth of specimens (g/cm³)

含砂率/%	裂隙宽度/mm			
	1.0	0.5	0.3	0.1
0	1.36	1.52	1.60	1.66
15	1.43	1.59	—	—
30	1.50	1.65	—	—

3 考虑侧阻的膨润土侵入模型

3.1 侵入模型构建

膨润土向围岩裂隙入侵过程中, 将不可避免地受到裂隙内壁侧摩阻力的作用, 且当围岩裂隙的侧壁摩阻力与膨润土的膨胀力趋于一致时, 膨润土的侵入距离达到最大值。

基于本文试验装置特点, 选取侵入区微单元开展应力分析(图11)^[16]。

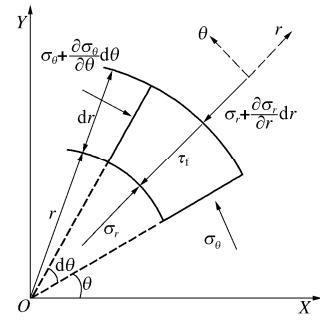


图11 侵入区单元水平应力^[16]

Fig. 11 Horizontal stresses of a cylindrical element in extrusion zone^[16]

显然, 膨润土侵入过程中, 入侵距离受膨润土膨胀力 F_s (N)及裂隙侧壁摩擦力 F_f (N)共同控制。当膨润土侵入裂隙至最终阶段时, 径向上应力达到平衡($F_s=F_f$), 推出^[16]:

$$(\sigma_\theta - \sigma_r) - \frac{\partial \sigma_r}{\partial \sigma_r} - 2 \frac{\tau_f}{a} r - \rho g r \tan \phi = 0 \quad , \quad (1)$$

式中, σ_r 与 σ_θ 分别为沿 r 方向及 θ 方向的膨胀力 (Pa), a 为裂隙宽度 (m), τ_f 为膨润土膨胀力下的摩擦应力 (Pa), ρ 为膨润土的饱和密度 (kg/m^3), g 为重力加速度 (N/kg), ϕ 为裂隙侧壁摩擦角。

假设单元体内, 膨胀力处于各向同性状态, 则有 $\sigma_\theta = \sigma_r$, 且 $\tau_f = \sigma_r \tan \phi$ 。

需要说明的是, 与膨胀力相比, 膨润土自身重力的影响可以忽略^[17], 因此式 (1) 可进一步简化得到膨润土侵入距离计算模型:

$$l = r_2 - r_1 = \frac{a}{2 \tan \phi} \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad , \quad (2)$$

式中, σ_1 和 σ_2 为沿 r 方向的 r_1 和 r_2 处的膨胀力 (Pa), a 为裂隙宽度, r_1 和 r_2 为距离膨润土试样的距离 (m)。

式 (2) 表明, 膨润土的侵入距离 (l) 与裂隙宽度 (a) 成正相关关系。由于摩擦角与接触物体的物质成分有关, 而侵入区存在两种截然不同的区域 (非附属矿物环区与附属矿物环区), 其对应的摩擦角分别设为 ϕ_1 与 ϕ_2 。

将挤出口、两区域交界处及侵入前锋处的膨胀力分别设为 σ_1 , σ_m 与 σ_n , 可得非附属矿物环区宽度 l_1 (m) 与附属矿物环区宽度 l_2 (m):

$$l_1 = \frac{a}{2 \tan \phi_1} \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_m} \quad , \quad (3)$$

$$l_2 = \frac{a}{2 \tan \phi_2} \ln \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \quad . \quad (4)$$

式 (2) ~ (4) 即为考虑侧壁摩阻的围岩裂隙中膨润土侵入模型。

3.2 模型验证

(1) 模型参数获取

将式 (3), (4) 稍作转换再相加得

$$\frac{2 \tan \phi_1}{a} l_1 + \frac{2 \tan \phi_2}{a} l_2 = \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_n} \quad , \quad (5)$$

式中, σ_1 , σ_n , ϕ_1 与 ϕ_2 为未知量。

首先, 基于 DLVO 理论^[18-20], 膨胀力 σ 与蒙脱石的干密度 ρ_m 之间关系, 可表示为

$$\sigma = A e^{B \rho_m} \quad , \quad (6)$$

式中, A , B 为常数。

将式 (6) 代入式 (5):

$$\frac{2 \tan \phi_1}{a} l_1 + \frac{2 \tan \phi_2}{a} l_2 = (\rho_{m-1} - \rho_{m-n}) B \quad , \quad (7)$$

式中, ρ_{m-1} 和 ρ_{m-n} 分别为挤出口处和侵入前锋处蒙脱石干密度 (kg/m^3)。

研究表明, 凝胶与溶胶分界处可被界定为侵入前锋, 且此处蒙脱石干密度恒定为 $36 \text{ kg}/\text{m}^3$ ^[12]。

同时, 挤出口处的蒙脱石干密度 ρ_{m-1} , 可由蒙脱石干密度 ρ_m 、膨润土与砂混合物干密度 ρ_d 之间关系求取, 表达式为

$$\rho_m = \frac{C_m}{\frac{1}{(1-\alpha)\rho_d} - \sum \frac{C_{nm}}{\rho_{nm}} - \frac{\alpha}{(1-\alpha)\rho_s}} \quad , \quad (8)$$

式中, C_m 为膨润土中蒙脱石含量, C_{nm} 为膨润土中石英、长石或方石英的含量, α 为含砂率, ρ_{nm} 为膨润土内非蒙脱石密度 (其中: 石英砂与长石密度为 $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$, 方石英密度为 $2320 \text{ kg}/\text{m}^3$), ρ_s 为石英砂密度, 取 $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

将表 2 中的挤出口干密度值代入式 (8), 可求取挤出口处膨润土中蒙脱石干密度, 如表 3 所示。

表 3 挤出口处蒙脱石干密度

Table 3 Dry densities of montmorillonite at extrusion mouth

含砂率/%	裂隙宽度/mm			
	1.0	0.5	0.3	0.1
0	1.17	1.34	1.42	1.48
15	1.14	1.29	—	—
30	1.08	1.23	—	—

随后, 根据图 5, 6 与表 3, 对于含砂率 $\alpha=0\%$ 的膨润土试样, 在两组裂隙宽度 (1.0, 0.1 mm) 情况下, 挤出口和侵入前锋处的蒙脱石干密度 ρ_{m-1} 与 ρ_{m-n} , 以及非附属矿物环宽度 l_1 与附属矿物环宽度 l_2 , 分别代入式 (7), 可得非附属矿物环区和附属矿物环区摩擦系数 $\tan \phi_1 = 0.0108B$ 和 $\tan \phi_2 = 0.0292B$; 同理, 将 0.5 和 0.1 mm 两组裂隙宽度下, 含砂率 $\alpha=0\%$ 膨润土试样的试验结果代入式 (7), 可得 $\tan \phi_1 = 0.0117B$, $\tan \phi_2 = 0.0285B$ 。因此, 对于含砂率 $\alpha=0\%$ 的膨润土试样, 分别在裂隙宽度 $a=1.0, 0.5 \text{ mm}$ 和 $a=0.5, 0.1 \text{ mm}$ 两种情况下获取的两区域摩擦系数结果相近, 说明当含砂率相同时, 两区域摩擦系数不随裂隙宽度的改变而发生变化。

取上述两组计算结果的平均值, 则在含砂率 $\alpha=0\%$ 条件下, 非附属矿物环区和附属矿物环区摩擦系数分别为: $\tan \phi_1 = 0.011B$ 和 $\tan \phi_2 = 0.029B$ 。

将两区域摩擦系数代入式 (7) 并化简有

$$0.022l_1 + 0.058l_2 = (\rho_{m-1} - 0.036)a \quad . \quad (9)$$

(2) 模型验证

研究发现附属矿物环宽度与侵入距离呈正相关关系^[14]。根据本文实测的非附属矿物环宽度 l_1 与附属矿物环宽度 l_2 的试验结果 (不包含含砂率 0% 且裂隙宽度 0.3 mm 条件下的数据), 得到两者之间的关系曲线, 如图 12 所示。拟合得 l_1 与 l_2 关系式:

$$l_2 = 0.076l_1^2 + 0.055l_1 \quad . \quad (10)$$

联立式 (9), (10), 整理得裂隙宽度为 a 情况下, 非附属矿物环宽度 l_1 与附属矿物环宽度 l_2 计算式为

$$l_1 = \sqrt{2272.7(\rho_{m-1} - 0.036)a + 819.4} - 29.9, \quad (11)$$

$$l_2 = 17.2(\rho_{m-1} - 0.036)a + 10.9 - \sqrt{327.0(\rho_{m-1} - 0.036)a + 117.9}. \quad (12)$$

将裂隙宽度 $a=0.3 \text{ mm}$, $\rho_{m-1}=1.42 \text{ g/cm}^3$ 代入式 (11), (12), 可得 $l_1=12.1 \text{ mm}$, $l_2=2.1 \text{ mm}$ 。

同时, 裂隙宽度 $a=0.3 \text{ mm}$ 情况下, 由侵入试验测得 $l_1=12.3 \text{ mm}$, $l_2=2.4 \text{ mm}$ 。

比较表明, 计算值与实测值基本吻合, 表明本文模型能够很好表征稳态条件下膨润土的侵入状态。

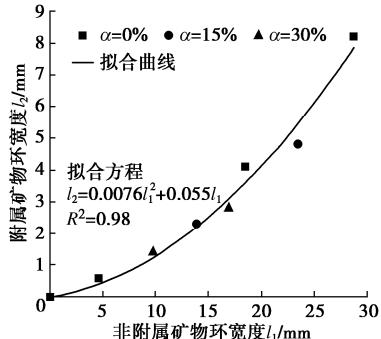


图 12 附属矿物环宽度与非附属矿物环宽度关系曲线

Fig. 12 Relationship between accessory mineral ring width and non-accessory mineral ring width

3.3 含砂率对侵入过程的影响

根据图 8, 9 与表 3 中的结果, 将两组裂隙宽度 (1.0, 0.5 mm) 情况下, 含砂率 15% 与 30% 试样的挤出口和侵入前锋处的蒙脱石干密度 ρ_{m-1} 与 ρ_{m-n} , 以及非附属矿物环宽度 l_1 与附属矿物环宽度 l_2 分别代入式 (7) 可得: 含砂率 15% 试样的非附属和附属矿物环区域的摩擦系数分别为 $0.017B$ 和 $0.032B$; 含砂率 30% 试样的非附属和附属矿物环区域的摩擦系数分别为 $0.025B$ 和 $0.035B$ 。

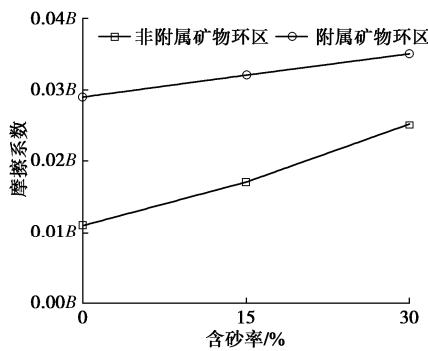


图 13 摩擦系数与含砂率之间关系曲线

Fig. 13 Relationship between friction coefficient and sand content

因此, 不同含砂率试样的附属矿物环区与非附属矿物环区的摩擦系数与含砂率之间的关系, 可表示为图 13 中的曲线。图 13 中的曲线表明, 随着含砂率的增大, 附属与非附属矿物环区的摩擦系数均显著增大, 即含砂率增加会抑制膨润土的侵入; 同时, 由图 13 还可以看出, 附属矿物环区的摩擦系数明显大于非附

属矿物环区, 说明附属矿物环对膨润土侵入围岩裂隙的抑制作用明显强于非附属矿物环区。

4 讨 论

4.1 不规则裂隙对膨润土侵入的影响

本文试验采用平整光滑的亚克力板构造的是一种“规则裂缝”, 但是实际处置库中存在大量的不规则裂隙^[5]。膨润土侵入的对比试验发现, 不规则裂隙有利于附属矿物的堆积, 促进附属矿物环的发育, 从而抑制膨润土的侵入^[21]。实际上, 裂隙中膨润土的侵入动力来自于其自身的膨胀力, 不规则裂隙中, 膨润土膨胀力的驱动作用将会受到折损 (图 14), 从而影响到膨润土的侵入过程。值得注意的是, 这种抑制作用不可避免地受到裂隙大小、曲折率等众多因素的影响, 呈现出高度的“不确定性”。这应该是本文后续研究的一个重点。但可以明确的是, 与基于平整裂隙的本文结论相比, 膨润土在不规则裂隙中的侵入过程会受到不同程度的抑制。

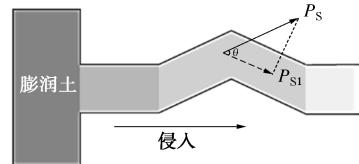


图 14 不规则裂隙下膨润土侵入示意图

Fig. 14 Diagram of bentonite intrusion with irregular fissures

4.2 两区域摩擦系数对侵入距离的影响

实际处置库中规则裂隙的花岗岩壁, 与亚克力板之间的不同在于, 两者与膨润土之间的摩擦系数的差异。

基于本文试验结果, 非附属与附属矿物环宽度 (l_1 与 l_2) 与两区域摩擦系数的关系可由式 (7) 来表征。同时, 由于式 (7) 是基于膨胀力与摩擦力平衡推导而得, 与裂隙壁的材质无关, 故该方程可用于描述膨润土在围岩裂隙中的侵入行为。

同时, 根据本文亚克力裂隙试验结果 (图 12), 不同摩擦系数下, 附属矿物环宽度 (l_2) 与非附属矿物环宽度 (l_1) 的关系由式 (10) 表征。显然, 该方程与摩擦系数无关, 故也可用于预测膨润土在花岗岩裂隙中的侵入行为。

联合式 (7), (10), 即可求取侵入距离, 即预测膨润土在围岩裂隙中的侵入行为。

为此, 假设花岗岩裂隙中两区域摩擦系数为 μ_1 和 μ_2 ; 同时, 考虑到处置库中膨润土储量较大, 假设挤出口膨润土的干密度恒定为 1.70 g/cm^3 , 并将其代入式 (8), 可求取挤出口处膨润土中蒙脱石干密度 $\rho_{m-1}=1.52 \text{ g/cm}^3$, 并将 ρ_{m-1} 代入式 (7), 得

$$\frac{2\mu_1}{a}l_1 + \frac{2\mu_2}{a}l_2 = 1.49B \quad . \quad (13)$$

联立式(10), (13), 可求取裂隙宽度为 1 mm 时, 膨润土在花岗岩裂隙中的侵入距离(l)与两区域摩擦系数(μ_1 和 μ_2)的关系公式:

$$l = \left(1 - \frac{\mu_1}{\mu_2}\right) \frac{\sqrt{(2\mu_1 + 0.11\mu_2)^2 + 0.09\mu_2 B} - (2\mu_1 + 0.11\mu_2)}{0.03\mu_2} + \frac{0.74B}{\mu_2} \quad . \quad (14)$$

由图 13 知 $\mu_1 > \mu_2$, 故附属矿物环膨润土的侵入距离随两区域摩擦系数之间关系, 可表示为如图(15)所示的曲面, 即随着两区域摩擦系数的增大, 膨润土的侵入距离显著降低。

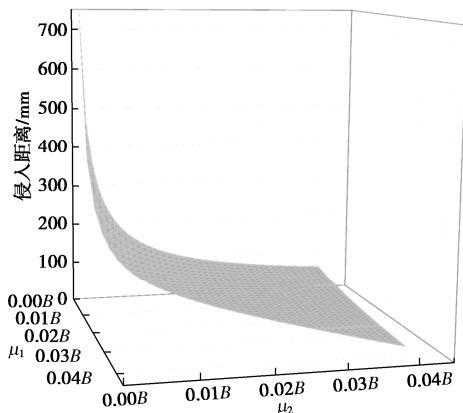


图 15 膨润土侵入距离与两区域摩擦系数之间关系

Fig. 15 Relationship between intrusion distance of bentonite and two-region friction coefficient

5 结 论

本文开展了不同裂隙(缝)宽度情况下, 不同含砂率膨润土-砂混合物试样侵入裂隙试验, 分析了裂隙宽度及含砂率对侵入距离与附属矿物环宽度随时间变化关系的影响。在此基础上, 建立并验证了考虑侧壁摩阻的膨润土侵入裂隙模型。获得的主要结论如下:

(1) 静水条件下, 膨润土侵入距离 l 、非附属矿物环宽度 l_1 与附属矿物环宽度 l_2 均随着裂隙宽度(大小)的增大显著增大, 随着膨润土试样含砂率的增大明显减小; 膨润土挤入达到平衡(稳定)后, 挤出口处膨润土干密度随着裂隙宽度的增大而减小, 随着含砂率的增大而增大。

(2) 建立了考虑侧壁摩阻的膨润土侵入模型。验证结果表明, 模型计算值能够较好地吻合实测值。模型结果表明, 随着含砂率增大, 附属与非附属矿物环区的摩擦系数 $\tan\phi_2$ 与 $\tan\phi_1$ 均显著增大, 即含砂率的增大将抑制膨润土侵入裂隙距离; 同时, 附属矿物环区的摩擦系数明显大于非附属矿物环区的摩擦系数,

说明对于膨润土侵入围岩裂隙, 附属矿物环具有更强的抑制作用。

(3) 与本文试验采用平整亚克力裂隙相比, 实际处置库中不规则花岗岩裂隙及裂隙摩阻的增大均将限制膨润土的侵入。

参 考 文 献:

- [1] 孙文静, 刘仕卿, 孙德安, 等. 高掺砂率膨润土混合土膨胀特性及其膨胀量预测[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1620 - 1626. (SUN Wen-jing, LIU Shi-qing, SUN De-an, et al. Swelling characteristics of bentonite-sand mixtures with a high sand mixing ratio and its prediction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1620 - 1626. (in Chinese))
- [2] 叶为民, 王琼, 潘虹, 等. 高压实高庙子膨润土的热传导性能[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 821 - 826. (YE Wei-min, WANG Qiong, PAN Hong, et al. Thermal conductivity of compacted GMZ01 bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 821 - 826. (in Chinese))
- [3] 王驹, 陈伟明, 苏锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801 - 812. (WANG Ju, CHEN Wei-ming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 801 - 812. (in Chinese))
- [4] WEN Zhi-jian. Physical property of China's buffer material for high-level radioactive waste repositories[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 794 - 800. (WEN Zhi-jian. Physical property of China's buffer material for high-level radioactive waste repositories[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 794 - 800. (in Chinese))
- [5] NGUYEN T S, BÖRGESSON L, CHIJIMATSU M, et al. A case study on the influence of THM coupling on the near field safety of a spent fuel repository in sparsely fractured granite[J]. Environmental Geology, 2009, 57(6): 1239 - 1254.
- [6] WANG Q, MINH TANG A, CUI Y J, et al. The effects of technological voids on the hydro-mechanical behaviour of compacted bentonite-sand mixture[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(2): 232 - 245.
- [7] 蔡叶青, 陈永贵, 叶为民, 等. 处置库近场膨润土胶体产生及稳定性研究进展[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 1996 - 2005. (CAI Ye-qing, CHEN Yong-gui, YE Wei-min, et al. Advances in formation of bentonite colloid and its

- stability in near-field of high-level radioactive waste repository[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 1996 – 2005. (in Chinese)
- [8] 徐永福. 高放废物地质处置库中膨润土的侵蚀机理和模型研究综述[J]. 地球科学进展, 2017, **32**(10): 1050 – 1061. (XU Yong-fu. Mechanisms and models for bentonite erosion used for geologic disposal of high level radioactive waste: a review[J]. Advances in Earth Science, 2017, **32**(10): 1050 – 1061. (in Chinese))
- [9] PUSCH R. Stability of Bentonite Gels in Crystalline Rock—Physical Aspects[R]. Luleå: SKBF/SKB Technical Report 83-04.
- [10] KANNO T, WAKAMATSU H. Experimental study on bentonite gel migration from a deposition hole[C]// Proceedings of the Third International Conference on Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management, RECOD'91, 1991, Sendai, 1983.
- [11] KANNO T, MATSUMOTO K, SUGINO H. Evaluation of extrusion and erosion of bentonite buffer[C]// Proc 7th Int Conf on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM'99), 1999, New York.
- [12] KANNO T, IWATA Y, SUGINO H. Modelling of bentonite swelling as solid particle diffusion[C]// Proceedings of the International Symposium on Suction, Swelling, Permeability and Structure of Clays- IS-Shizuoka, 2001, Shizuoka.
- [13] 黄依艺, 陈宝. 高压实膨润土在处置库围岩裂缝中的侵入行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(12): 2561 – 2569. (HUANG Yi-yi, CHEN Bao. Intrusion behaviors of highly compacted bentonite into host-rock fractures in a HLW disposal repository[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(12): 2561 – 2569. (in Chinese))
- [14] REID C, LUNN R, EL MOUNTASSIR G, et al. A mechanism for bentonite buffer erosion in a fracture with a naturally varying aperture[J]. Mineralogical Magazine, 2015, **79**(6): 1485 – 1494.
- [15] YE W M, CHEN Y G, CHEN B, et al. Advances on the knowledge of the buffer/backfill properties of heavily-compacted GMZ bentonite[J]. Engineering Geology, 2010, **116**(1/2): 12 – 20.
- [16] ZENG Z X, CUI Y J, CONIL N, et al. Analysis of boundary friction effect on the homogenization process of compacted bentonite/claystone mixture with technological voids upon hydration[J]. Acta Geotechnica, 2021, **16**(2): 525 – 533.
- [17] LIU L C, MORENO L, NERETNIEKS I. A dynamic force balance model for colloidal expansion and its DLVO-based application[J]. Langmuir, 2009, **25**(2): 679 – 687.
- [18] GONZALEZ S. The Swelling Pressure of Bentonite and Sand Mixtures[D]. Stockholm: KTH Chemical Science and Engineering, 2013.
- [19] 叶为民, 刘樟荣, 崔玉军, 等. 膨润土膨胀力时程曲线的形态特征及其模拟[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(1): 29 – 36. (YE Wei-min, LIU Zhang-rong, CUI Yu-jun, et al. Features and modelling of time-evolution curves of swelling pressure of bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(1): 29 – 36. (in Chinese))
- [20] ZOU W L, YE J B, HAN Z, et al. Effect of montmorillonite content and sodium chloride solution on the residual swelling pressure of an expansive clay[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(19): 1 – 12.
- [21] PETER R C. The Role of Accessory Minerals in Inhibiting Bentonite Erosion in the Geological Disposal of Higher Activity Radioactive Waste[D]. Glasgow: University of Strathclyde, 2016.