

缓冲材料砌块不同组合形式长期性能演化研究

高玉峰^{1,2,3}, 刘月妙^{1,2}, 曹胜飞^{1,2}, 李涛⁴, 郑维翰⁴

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029;

2. 国家原子能机构高放废物地质处置创新中心, 北京 100029;

3. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;

4. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 高水平放射性废物地质处置库中缓冲层由缓冲材料砌块堆砌组成, 层内不同类型的砌块接缝导致砌块存在不同的组合形式。采用 LAGAMINE 软件, 对缓冲材料砌块 6 种不同组合形式进行计算, 分析了不同组合形式的温度、饱和度和膨胀力随时间的变化规律。缓冲材料温度在开始 10 年内均低于 100℃, 之后明显降低, 到 100 年时均低于 35℃, 1 000 年时废物罐释放的热量基本可以忽略不计; 砌块内接缝数量越多, 完全饱和和用时就越短, 水化 1 350 天后, 所有砌块组合形式内部均完全饱和; 随着径向接缝增加, 缓冲材料饱和越快, 外环接缝附近优先出现膨胀力极大值; 砌块中的径向和环向接缝使膨胀力最大值明显下降, 且径向接缝的影响大于环向接缝, 2 000 年后, 缓冲材料膨胀力趋于稳定。

关键词: 高放废物; 缓冲材料; 砌块; 组合形式; 长期性能

中图分类号: TL942; TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)01-0061-07

Long-term Performance Evolution of Buffer Material Blocks in Different Combination Forms

GAO Yufeng^{1,2,3}, LIU Yue-miao^{1,2}, CAO Shengfei^{1,2}, LI Tao⁴, ZHENG Wei-han⁴

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;

2. CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058;

4. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The buffer layer in the geological disposal repository of high-level radioactive waste is composed of buffer material blocks. Different types of block joints in the layer lead to different combination forms of blocks. LAGAMINE software was used to calculate six different combination forms of buffer material blocks and analyze the change rule of temperature, saturation and expansion force of different combination forms with time. The temperature of the buffer material was below 100℃ in the first 10 years, and then decreased significantly to below 35℃ in 100 years, and the heat released by the waste tank was basically negligible in 1 000 years. The more joints in the block, the shorter the time of full saturation. After 1 350 days of hydration, all the block combinations are fully saturated. With the increase of radial joints, the saturation of buffer material is faster, and the maximum value of expansion force appears preferentially near the outer ring joints. The radial and circumferential joints in the blocks significantly reduce the maximum expansion force, and the influence of radial joints is greater than that of circumferential joints. After 2 000 years, the expansion force of buffer material tends to be stable.

Keywords: high-level radioactive waste; buffer material; block; combination forms; long-term performance

收稿日期: 2022-09-27

修稿日期: 2022-10-23

基金项目: 核设施退役治理专项资助科研项目(科工二司[2020]194号); 国家原子能机构高放废物地质处置创新中心基金资助项目(CXJJ2110-04)

作者简介: 高玉峰(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事废物处置缓冲材料性能研究等方面工作。E-mail: hdygyaoyf@163.com

高水平放射性废物(简称高放废物)是一种放射性强、毒性大、核素半衰期长并且发热的特殊废物,需要把它们与人类生存环境长期、可靠地永久隔离,使其在进入生物圈之前衰变到人类可接受的水平。安全处置放射性废物已被提到保证核能工业可持续发展、保护人民健康、保护环境的高度来认识。废物的安全处置,在科学技术方面是一个重大难题^[1]。

目前世界上公认的安全可靠、技术可行的方法为深地质处置,即将高放废物埋置在 500 m ~ 1 000 m 深度范围内稳定的地质体中。《中华人民共和国放射性污染防治法》已明确规定,我国高放射废物采用集中的深地质处置。高放废物处置库采用“多重屏障系统”设计,即把废物体贮存在废物罐中,通过与缓冲/回填材料构成的工程屏障和外部围岩构成的天然屏障实现与外界的隔离^[2-5]。其中,缓冲材料通常包裹在废物罐周围,有助于近场机械应力的均匀分布,可有效封堵围岩裂隙,阻止地下水接触废物罐,调节地下水 pH 值,吸附放射性核素,同时对辐射热起到导体作用,是工程屏障的重要组成部分,是地质处置库安全性和稳定性的有效保障^[6-9]。膨润土以其低渗透性、高膨胀性、高吸附性等而被选作缓冲材料的基材^[10-11]。

目前,缓冲材料长期性能的数值模拟方面相关研究较多,采用不同模拟软件对处置库近场进行热-水-力耦合分析,得到不同位置的温度场、应力场及变形场的分布及变化规律,为处置库设计建造提供理论依据。Kesson 等^[12]模拟了瑞典 Aspö 硬岩实验室中进行的 MX-80 膨润土热-水-力耦合实验,给出了处置库中不同位置温度、相对湿度、孔隙水压力及应力的模拟结果。张玉军^[13]对核废物处置库近场的热-水-力耦合过程进行了数值模拟,分析并讨论了缓冲材料和围岩中温度、饱和度、孔隙水压力和正应力随时间的变化。刘月妙等^[14]采用 FLAC^{3D}模拟了处置库近场热-水-力耦合条件下温度场、应力场和变形场规律。Collin 等^[15]利用 LAGAMINE 分析了缓冲层中的热-水-力耦合过程,研究了非饱和土体中的液相、蒸汽相、气相以及热量的迁移。蔡国庆等^[16]利用 ABAQUS 模拟了高放废物地质处置库中缓冲材料的热-水-力耦合过程,分析了不同位置的温度、饱和度、竖向应力及位移、孔隙水压力及吸力的分布及变化规律和温度场的影响。乔兰等^[17]采用 LAGAMINE 数值软件,分析膨润土在热-水-力多场耦合条件下的长期性能,研究了温度、饱和度和吸力和膨胀力随时间的变化规律。

废物罐周围的缓冲层由缓冲材料砌块堆砌组成,在施工过程中,废物罐与膨润土砌块、围岩与膨润土砌块,以及膨润土砌块之间,不可避免地会留下接缝。而且由于砌块的组合形式不同,层内存在不同类型的砌块接缝。陈宝等^[18]采用自制的多功能膨胀-渗透仪,对不同接缝宽度的试样进行水化试验,发现接缝的存在会改变试样的渗透系数和膨胀力。张虎元等^[19-21]对砌块间的接缝材料的选择进行了试验研究,结果表明接缝材料干密度对试样的渗透性能影响显著;同时接缝的存在会影响砌块膨胀力的演化,另外地下水中的盐分也会影响接缝的愈合效果。吴树高和李涛^[22]总结了缓冲材料膨润土组合砌块界面特性及其阻隔性能的研究现状。许韬等^[23]利用 Comsol Multiphysics 平台进行计算,研究了接缝对缓冲回填材料膨胀、渗透和导热性能的影响,以及愈合效应的产生,并重点分析了接缝的类型、数量、干密度和宽度以及砌块的拼接形式对渗透性能的影响。

目前国内外考虑接缝存在的缓冲材料性能研究较多,但关于缓冲材料砌块不同组合形式的长期性能演化规律相关研究较少。本文通过对 6 种缓冲材料砌块组合形式,采用 LAGAMINE 软件,模拟 10 000 年时间尺度的热-水-力耦合演化过程,分析缓冲材料的温度、饱和度和膨胀力演化过程和规律。

1 本构模型及基本假定

1.1 孔隙流体渗透模型

水的质量守恒方程可以通过液态水和水蒸汽守恒方程的叠加获得,即:

$$\frac{\partial \rho_w n S_r}{\partial t} + \text{div}(f_w) + \frac{\partial \rho_v n S_{r,g}}{\partial t} + \text{div}(i_v \rho_v f_g) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水的密度; n 为介质的孔隙率; S_r 为水的饱和度; f_w, f_g 为介质 α (水或气) 的宏观流速; i_v 为蒸汽的扩散流; ρ_v 为水蒸汽密度; $S_{r,g}$ 为气体饱和度; t 为时间。

描述液态水的流动采用达西定律:

$$f_w = - \frac{k_{int} k_{r,w}}{\mu_w} (\nabla p_w + g_p \nabla y) \quad (2)$$

式中: f_w 为液体的宏观速度; μ_w 为液态水的动力粘滞系数; g 为重力加速度; k_{int} 为固有渗透系数; $k_{r,w}$ 为相对渗透系数; p_w 为液体水压; y 为垂直方向坐标; ∇ 为拉普拉斯算子。

在本项研究中,假设水蒸汽的扩散流动服从菲克定律,即:

$$i_v = -D_{atm} \tau n S_{r,g} \nabla p_v \tag{3}$$

式中: D_{atm} 为摩尔扩散系数; τ 为孔隙介质的折曲率; n 为介质的孔隙率; p_v 为蒸汽压。

1.2 热扩散模型

缓冲材料中热的传播主要与热传导、热对流和蒸汽化现象有关,扩散方程为:

$$q' = -\lambda \nabla T + [c_{p,w} \rho_w f_w + c_{p,a} (i_a + \rho_a f_a) + c_{p,v} (i_v + \rho_v f_g)] (T - T_0) + (i_v + \rho_v f_g) L \tag{4}$$

式中: q' 为总热量; λ 为介质的热传导系数; $c_{p,a}$ 为介质 a 的比热; ρ_a 为介质 a 的密度; i_a 为空气的扩散流; f_a 为 a 的宏观速度; L 为潜热; T 为温度; T_0 为初始温度。

1.3 力学模型

力学模型采用非饱和土的巴塞罗那模型 (BBM)^[24]。

(1) 塑性屈服面。在 (p, q) 空间内,对于给定的吸力值,塑性屈服面可以写为以下形式:

$$F_1 = q^2 - M^2 (p + p_s) (p_0 - p) = 0 \tag{5}$$

式中: p 为平均净应力; q 为偏应力; M 为临界状态线 (CSL) 倾斜度; p_s 为土体的张拉强度; p_0 为土体在吸力为 s_0 时的预固结压力。

土体的预固结压力随吸力的变化由 Alonso 提出的如下关系式进行描述,即 LC 曲线:

$$p_0 = p_c \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \tag{6}$$

式中: p_0^* 为饱和条件下土的预固结压力; p_c 为参考压力; κ 和 $\lambda(s)$ 分别代表弹性和塑性压缩刚度。

在非饱和条件下,由于吸力可以增强土颗粒间的黏聚力,进而起到对土体的强化作用。因此,塑性压缩刚度往往随饱和度发生变化,即:

$$\lambda(s) = \lambda(0) [(1 - r) \exp(-\beta s) + r] \tag{7}$$

式中: $\lambda(s)$ 是饱和条件下的塑性压缩刚度; r 和 β 是描述土体刚度随吸力变化规律的相关参数。

由于吸力的变化也会导致土体产生不可恢复的体积变形,因此吸力屈服曲线 (SI) 被引入到模型中来反映这一现象,其表达式为:

$$F_2 = s - s_0 = 0 \tag{8}$$

式中: s 为吸力; s_0 为 SI 曲线的硬化参数,代表土体承受的历史最大吸力值。

(2) 硬化法则。在 BBM 模型中,塑性屈服面的硬化演变取决于总体的塑性体积应变,由硬化参数控制,硬化准则如式 (9) 所示:

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{1 + e}{\lambda(0) - \kappa} d\varepsilon_v^p \tag{9}$$

式中: p_0^* 为饱和条件下的土的预固结压力; e 为土体的孔隙比; λ 为饱和条件下的塑性压缩刚度; κ 为弹

性压缩刚度。

1.4 基本假定

为了构建缓冲材料耦合分析数学模型,提出如下基本假设:

(1) 力学响应符合小变形条件,并假定岩土介质在饱和与非饱和状态下,修正的 Terzaghi 有效应力原理均能够适用。

(2) 水和干空气均包含于气液两相流体中。其中,水蒸汽和干空气两种组分组成气相;液态水和溶解于液态水中的干空气组成液相。依据连续介质理论平,每一相的两种组分完全混合并占据相同的空间。

(3) 广义 Darcy 定律适用于气液两相的流动,广义 Fick 定律适用于水蒸汽和干空气的扩散,Dalton 分压定律适用于水蒸汽和干空气的压力,Kelvin 湿度定律适用于饱和水蒸汽压力。

(4) 固体颗粒土的密度是平均温度、应力、吸力的函数;液相密度是温度和压力的函数,气相满足理想气体状态方程,也是温度和压力的函数。

(5) 广义 Fourier 定律适用于热传导,假定固 - 液 - 气三相在空间中任何一点均具有相同的温度值,且两相间的热交换只存在于相变过程中。

2 物理模型和边界条件

2.1 物理模型

模型使用 LAGAMINE 自带的几何模块进行绘制,采用“ALONSO-GENS”模块计算砌块的力学行为,采用“WAVAT”模块计算砌块的热传导和渗流过程。几何设计参数选取 (见图 1) 如下:

(1) 废物罐的外径是 550 mm,内部颗粒填充区的内径设计为 550 mm;外径定为 570 mm。

(2) 缓冲材料砌块组成的环形区域内径为 570 mm,外径为 1 500 mm。

(3) 颗粒填充区的内径和外径分别为 1 500 mm 和 1 600 mm。

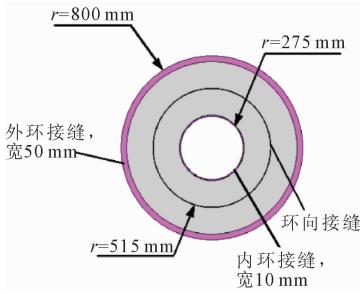


图 1 模型几何设计参数 (双环双砌块组合形式)

采用软件 LAGAMINE 对 6 种计算工况进行热-水-力耦合作用下的数值模拟,计算时间均为 10 000 年。缓冲材料砌块 6 种平面组合形式(单环单砌块组合、双环双砌块组合、单环双砌块组合、单环八砌块组合(直径 1.2 m 和 1.6 m)和双环 6-12 砌块组合)的有限元数值计算模型如图 2 所示,除图 2(e)直径为 1.2 m 外,其余直径为 1.6 m。

图中划分了缓冲材料的类别,其中压实砌块采用灰色,颗粒接缝填充区采用粉色。根据接缝与砌块的相对位置,在接缝填充区,划分了外环接缝(砌块与围岩之间)、环向接缝(砌块与废物罐之间的内环接缝)及径向接缝(砌块之间)。

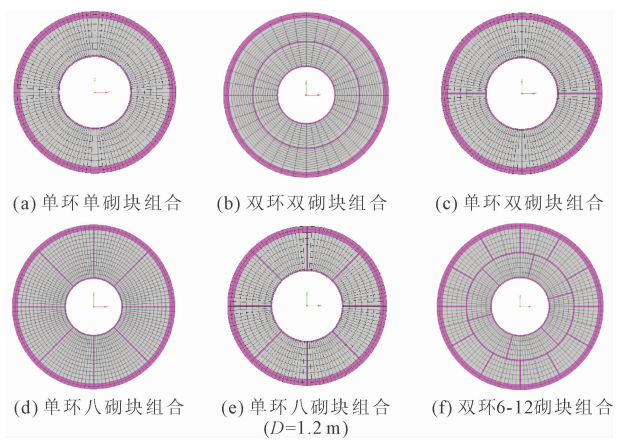


图 2 缓冲材料 6 种组合形式的有限元计算模型

2.2 边界条件

本次数值模拟忽略缓冲材料在低水头作用下的饱和过程,假设废物罐放入处置库后一千年地下水水头才达到 5.2 MPa,并保持不变直到一万年。水力边界的水压设置为 5.2 MPa。考虑到废物罐为不透水介质,将缓冲材料内边界设置为水体的零通量边界。

处置库围岩和废物罐会较大程度地限制缓冲材料的水化膨胀变形,因此将缓冲材料内外边界视为径向位移和环向位移完全约束。

废物罐释放热量随时间变化参照日本公布的相关数据^[25]。根据加拿大和中国的测试数据,地下 560 m 处的围岩温度大约为 20.0℃,为了简化计算,将缓冲材料外边界的温度设置为 20.0℃。

废物罐和处置库围岩可以近似看作不透气介质,将缓冲材料内外边界设置为气体的零通量边界,同时将网格所有节点的气压都固定为 0.1 MPa。

2.3 计算参数

数值模拟计算时缓冲材料砌块的初始干密度为 1.7 g/cm³、初始饱和度为 27%,接缝宽度为 10 mm,接缝材料(颗粒)的初始干密度为 1.3 g/cm³、初始饱和度为 28%,缓冲材料砌块和颗粒的含水率都选为 8.0%,砌块和颗粒的初始吸力为 80.1 MPa。数值模拟采用的相关参数见表 1。

热传导系数 λ 、干密度 ρ_d 及饱和度 S_r 关系^[26]:

$$\lambda = 1.07S_r + 0.6\rho_d - 0.5 \tag{10}$$

表 1 数值模拟相关参数表

物理参数		力学参数	
颗粒密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.6×10^3	饱和初始压缩系数 $\lambda_{(0)}$	0.1333
颗粒比热 $c_{p,s}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2.6	弹性压缩系数 κ	0.024
水密度 $\rho_w/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.0×10^3	饱和条件下预固结压力 p_0^*/MPa	0.6
水动力粘滞系数 $\lambda_w/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.009×10^3	吸力变化弹性刚度系数 κ_s	0.08
水比热 $c_{p,w}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	4.18×10^3	吸力变化塑性刚度系数 λ_s	0.25
空气密度 $\rho_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.205	初始吸力值 s_0/MPa	80
空气动力粘滞系数 $\lambda_a/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.80×10^{-5}	参考应力 p_c/MPa	0.45
空气比热 $c_{p,a}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.0×10^3	吸力变化土体刚度系数控制参数 r	0.836
水蒸汽比热 $c_{p,v}/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1.90×10^3	吸力变化土体刚度系数控制参数 β/MPa^{-1}	0.07
蒸发作用潜在热 $L/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2.50×10^6		
孔隙曲折率 τ	0.1		

砌块的土水特征关系^[4]:

$$S_{rb} = 0.1 + \frac{63}{70 + (7 \times 10^{-6}S)^{0.9}} \tag{11}$$

颗粒的土水特征关系^[26]:

$$S_{rp} = 0.01 + \frac{8.174}{8.256 + (1.57 \times 10^{-6}S)^{0.637}} \tag{12}$$

相对饱和度公式^[27]:

$$k_{r,w} = \frac{(S_r - 0.1)^3}{0.9^3} \quad (13)$$

3 计算结果分析

3.1 温度演化规律

6 种缓冲材料砌块组合模型第 10 年时的温度分布云图见图 3。砌块组合模型(以双环双砌块为例)运行 100 年、1 000 年和 10 000 年时温度云图见图 4。第 10 年时,各组合的最高温度分布在 72.8℃~99.5℃。第 100 年时,各组合的最高温度分布在 30.8℃~34.8℃,缓冲材料 6 种砌块组合形式的温度均有明显的下降;双环双砌块组合形式的温度最高,单环八砌块组合形式($D=1.2\text{ m}$)的温度最低。第 1 000 年时,废物罐释放的热量基本稳定。各砌块组合形式的温度稳定在 20.0℃~22.1℃,且不同组合之间的温度差别很小,到 1 000 年时废物罐释放的热量基本可以忽略不计。到 10 000 年时,废物罐温度不再改变,缓冲材料不同组合形式的温度都稳定在 20.0℃。

从图中可以看出,随着废物罐释放热量的衰减,所有组合模型的温度都在逐渐下降。在缓冲材料模型的温度分布云图中,同一时刻温度最高的砌块组合都是双环双砌块组合,第 10 年时它的温度范围为 20.0~100.3℃,而到 100 年时,其温度范围为 20.0~34.9℃。双环双砌块组合形式的最高温高于其它组合形式的主要原因是:砌块的导热系数高于接缝的导热系数,该组合没有径向接缝,水蒸汽无法沿径向接缝从温度高的位置扩散到温度低的位置,导致散热速度慢,同时该组合中间的环向接缝使它的整体导热性能低于单环单砌块组合,因此双环双砌块组合形式的温度最高。

6 种砌块组合形式在 10 年内最高温度均低于 100℃,之后明显降低,到 100 年时均低于 35℃,1000 年时废物罐释放的热量基本可以忽略不计。

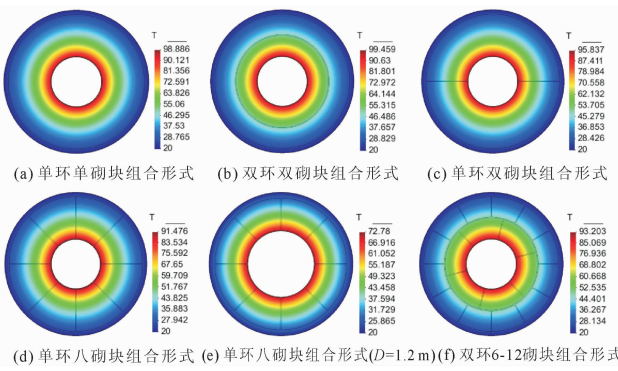


图 3 砌块组合模型运行 10 年时温度云图(单位:℃)

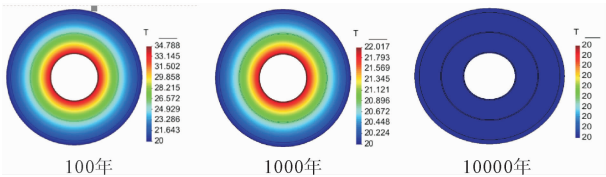


图 4 砌块组合模型(双环双砌块)运行 100 年,1 000 年,10 000 年时温度云图(单位:℃)

3.2 饱和度演化规律

根据前述假设,缓冲材料到 1 000 年时外边界水头达到 5.2 MPa,并保持不变直到 10 000 年,同时不考虑缓冲材料在前 1 000 年的渗透饱和过程。6 种组合形式水化第 0 天,砌块的饱和度整体约为 27%。

如图 5 为地下水到达单环单砌块组合形式外边界后,第 0 天、第 400 天、第 800 天、第 1 200 天的饱和度分布情况。水化第 0 天,砌块的饱和度整体约为 27%。水化开始后,水力边界附近的砌块饱和度逐渐升高,且饱和度升高区域向砌块内部发生扩展,到第 800 天时内环接缝附近砌块的饱和度还在增长。到第 1 200 天时,基本所有区域的饱和度都变为 100%,饱和度不再发生变化。

接缝的渗透率远大于砌块,导致接缝越多,渗透率越大,越有利于缓冲材料整体饱和。且径向接缝及其附近区域的饱和度的增长比环向接缝明显更快。

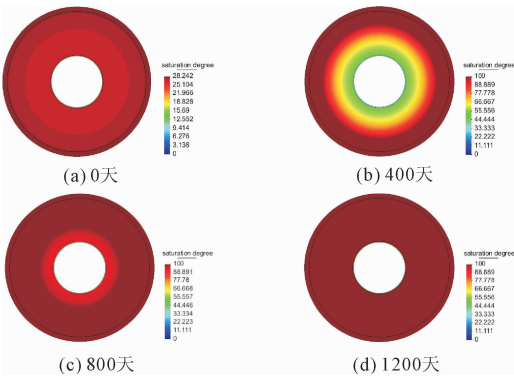


图 5 单环单砌块组合饱和度分布图

3.3 膨胀力演化规律

膨胀力演化规律与饱和度保持一致(见表 2)。图 6 所示为单环单砌块组合形式在水头为 5.2 MPa 的地下水渗入后第 0 天、第 400 天、第 800 天、第 1 200 天、2 000 年和 10 000 年的膨胀力分布情况。水化第 0 天,缓冲材料所有区域的膨胀力为负数,主要因为缓冲材料在前 1 000 年中,受到废物罐辐射热,土体收缩出现了拉应力。到 400 天时,膨胀

力极大值出现在内环接缝附近与临近外环接缝的砌块区域中。临近外环接缝的砌块中,膨胀力极大值约为 2.7 MPa,该区域膨胀力较大的原因是,砌块含水量较大,膨胀应变大,受到周围砌块的挤压约束,同时距离内环接缝与外环接缝都有一定距离,能够发生的膨胀变形小,导致膨胀力集中;内环接缝附近的膨胀力极大值约为 2.9 MPa,该区域膨胀力较大的原因是,砌块整体发生膨胀,而缓冲材料内边界(即缓冲材料与废物罐交界处)的位移被固定,胀变形被内边界限制,导致膨胀力聚集。到 1 200 天时,缓冲材料基本完全饱和,膨胀力由内到外逐渐减小;其中,内环接缝附近膨胀力最大,约为 7.3 MPa。到 2 000 年时,膨胀力的数值有所变化,相对于水化 1 200 天时,各点的不均匀程度有所下降,主要是缓冲材料应力分布不均匀,应力不断调整导致的。到 10 000 年时,缓冲材料的膨胀力基本不再有变化。

表 2 不同砌块组合形式水化过程的饱和度和膨胀力			
砌块组合	时间/d	饱和度/%及分布	最大膨胀力及分布/MPa
单环单砌块	400	—	2.9 内环接缝
	1200	100 全域	7.3 内环接缝
双环双砌块	450	100 外环砌块	—
	1350	100 全域	6.5 内环接缝
单环双砌块	300	—	3.5 外环接缝
	600	100 径向接缝	—
	900	100 全域	4.5 内环接缝
单环八砌块	100	100 径向接缝	2.2 外环接缝
	300	100 全域	5.1 砌块中部
单环八砌块 (D=1.2 m)	150	100 全域	2.3 内环接缝
双环 6-12 砌块	120	100 外环接缝	3.6 外环砌块
	240	100 除内环接缝外	—
	360	100 全域	3.1 内环接缝

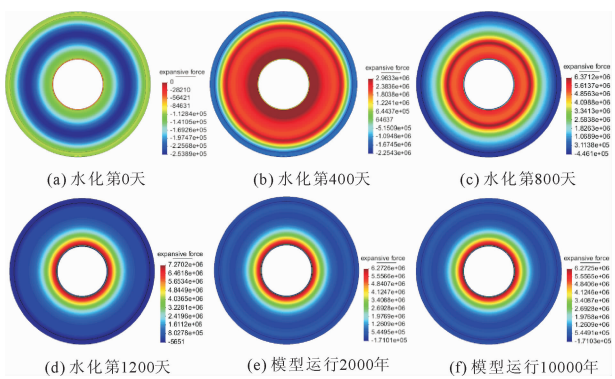


图 6 单环单砌块组合膨胀力分布图

缓冲材料水化后,膨胀力逐渐增大,到饱和时出现最大值。随着径向接缝增加,缓冲材料饱和越快,

外环接缝附近优先出现膨胀力极大值;饱和时膨胀力一般由内向外逐渐减小,内环接缝附近出现膨胀力极大值。当模型运行 2 000 年时,缓冲材料的膨胀力比水化饱和时的膨胀力有所降低。到 10 000 年时,缓冲材料的膨胀力与 2 000 年时相比基本没有变化。

3.4 膨胀力与干密度的关系

对于不同砌块组合的缓冲材料,其膨胀力的分布到 10 000 年时都出现了由内环接缝到外环接缝,膨胀力分布逐渐下降的趋势。选取直径为 1.6 m 的缓冲材料砌块组合形式模型上 $r=0.3\text{ m}$ 和 $r=0.7\text{ m}$ 处的监测点,分析膨胀力与干密度变化的关系;对于直径为 1.2 m 的缓冲材料,选取 $r=0.3\text{ m}$ 和 $r=0.5\text{ m}$ 处的监测点。从计算结果中提取这些监测点在 10 000 年时的膨胀力,将靠近砌块组合内边界监测点的膨胀力记为 P_{in} ,靠近组合外边界监测点的记为 P_{out} ,则膨胀力(单位:MPa)与平均干密度 $\bar{\rho}_{d0}$ (单位: g/cm^3) 的拟合结果为:

$$P_{in} = 1829.9\bar{\rho}_{d0}^2 - 5874.9\bar{\rho}_{d0} + 4716.7$$

$(R^2 = 0.5584)$

$$P_{out} = -732.58\bar{\rho}_{d0}^2 + 2382.5\bar{\rho}_{d0} - 1936$$

$(R^2 = 0.5832)$

以上两式表明,膨胀力的数值与平均干密度有一定关系,但是该公式只考虑到平均干密度对膨胀力的影响。事实上,缓冲材料的组合形式与尺寸也会对膨胀力的大小产生影响。

表 3 为不同组合的膨胀力在 10 000 年时,膨胀力云图的最大值。当膨胀力达到稳定时,单环单砌块,膨胀力最大值为 6.3 MPa;双环双砌块,膨胀力的最大值为 5.4 MPa;单环双砌块组合,膨胀力的最大值为 4.1 MPa;其余 3 种存在径向接缝的组合,膨胀力最大值在 1.8 MPa ~ 2.9 MPa 的范围。通过膨胀力数据对比可知,径向接缝和环向接缝使膨胀力最大值明显下降,且模型中存在环向接缝相较于模型中存在径向接缝,膨胀力最大值下降的更加显著。

表 3 不同砌块组合接缝对膨胀力的影响			
砌块组合	最大膨胀力 /MPa	环向接缝数量	纵向接缝数量
单环单砌块	6.05 ~ 6.27	0	0
双环双砌块	5.06 ~ 5.37	1	0
单环双砌块	2.15 ~ 4.07	0	2
单环八砌块	1.75 ~ 1.94	0	8
单环八砌块 (D=1.2 m)	1.85 ~ 1.92	0	8
双环 6-12 砌块	1.87 ~ 2.91	1	18

4 结 论

(1) 6种砌块组合形式在开始10年内最高温度均低于100℃,且双环双砌块组合形式的温度最高,单环八砌块组合形式($D=1.2\text{ m}$)的温度最低;之后明显降低,到100年时均低于35℃,1000年时废物罐释放的热量基本可以忽略不计。

(2) 缓冲材料水化后,内部饱和度逐渐上升,对不设置环向接缝和径向接缝的砌块组合形式模型,内部达到完全饱和所需的时间最长;砌块组合形式模型内接缝数量越多,完全饱和用时就越短;距离径向接缝越近的部位,饱和度上升越明显;水化1350d后,所有砌块组合形式内部都已经完全饱和,此后的饱和度不再有变化。

(3) 缓冲材料内部的膨胀力与砌块组合形式密切相关,砌块中的径向和环向接缝使膨胀力最大值明显下降,其中径向接缝的影响大于环向接缝。

(4) 缓冲材料水化后,膨胀力逐渐增大,到饱和时出现最大值。随着径向接缝增加,缓冲材料饱和越快,外环接缝附近优先出现膨胀力极大值;饱和时膨胀力一般由内向外逐渐减小,内环接缝附近出现膨胀力极大值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王 驹,苏 锐,陈 亮,等.论我国高放废物地质处置地下实验室发展战略[C]//第七届废物地下处置学术研讨会论文集,北京:中国原子能出版社,2018.
- [3] 王 驹.中国高放废物地质处置21世纪进展[J].原子能科学技术,2019,53(10):2072-2082.
- [4] Chen L, Liu Y M, Wang J, et al. Investigation of the thermal-hydro-mechanical (THM) behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test[J]. Engineering Geology, 2014,172(8):57-68.
- [5] Zhao Jingbo, Chen Liang, Collin F, et al. Numerical modeling of coupled thermal-hydro-mechanical behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test[J]. Engineering Geology, 2016,214: 116-126.
- [6] 刘月妙,蔡美峰,王 驹,等.高放废物地质处置库预选缓冲材料压缩性能研究[J].铀矿地质,2007,23(2):91-95.
- [7] 曹胜飞,刘月妙,谢敬礼,等.缓冲材料热-水-力耦合模型试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(4):1123-1130.

- [8] 谢敬礼,刘月妙,曹胜飞,等.高庙子膨润土及其混合材料导热性能研究[J].地下空间与工程学报,2019(15):1719-1725.
- [9] 谢敬礼,马利科,高玉峰,等.北山花岗岩岩屑-膨润土混合材料导热性能研究[J].岩土力学,2018,39:2823-2828.
- [10] 刘月妙,温志坚.用于高放射性废物深地质处置的粘土材料研究[J].矿物岩石,2003,23(4):42-45.
- [11] Pusch R. Highly compacted sodium bentonite for isolating rock-deposited radioactive waste products [J]. Nuclear Technology, 1979,45(9):153-157.
- [12] Kesson M, Jacinto A C, Gatabin C, et al. Bentonite THM behaviour at high temperatures: experimental and numerical analysis[J]. Géotechnique, 2009,59(4):307-318.
- [13] 张玉军.核废料处置概念库近场热-水-应力耦合二维有限元模拟[J].岩土工程学报,2006,28(9):1053-1058.
- [14] 刘月妙,王 驹,蔡美峰,等.高放废物处置库近场热-水-力耦合长期稳定性分析[C]//第二届废物地下处置学术研讨会,2008:268-275.
- [15] Collin F, Li X L, Radu J P, et al. Thermo-hydro-mechanical coupling in clay barriers [J]. Engineering Geology, 2002,64(2/3):179-193.
- [15] 蔡国庆,赵成刚,田 辉.高放废物地质处置库中非饱和缓冲层的热-水-力耦合数值模拟[J].岩土工程学报,2013,32(S1):1-8.
- [17] 乔 兰,曹胜飞,陈 亮,等.缓冲材料试验台架热-水-力耦合数值模拟研究[J].中国矿业,2013,22(5):117-121.
- [18] 陈 宝,陈建琴,曹永超.接缝对高压实膨润土工程屏障自封闭性能的影响[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):618-624.
- [19] 张虎元,朱 飞,王赵明.地下水含盐量抑制缓冲砌块接缝的愈合效果[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S1):2892-2901.
- [20] 张虎元,王 英,马国梁,等.膨润土粉密封条件下缓冲砌块接缝的膨胀应力发展研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):2200-2208.
- [21] 张虎元,王学文,刘 平,等.缓冲回填材料砌块接缝密封及愈合研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3605-3614.
- [22] 吴树高,李 涛.缓冲材料膨润土组合砌块界面特性及其阻隔性能研究现状[C]//第六届废物地下处置学术研讨会论文集.敦煌:中国原子能出版传媒有限公司,2016.
- [23] 许 韬.含施工接缝的非饱和膨润土缓冲材料热-水-力耦合过程及愈合效应[D].北京:北京交通大学,2019.

采用支盘水泥搅拌桩的处理效果明显好于等截面水泥搅拌桩;对于软基处理深度小于 10 m 的复合路基,采用等截面水泥搅拌桩仍有较高的性价比。

(2) 以沉降量为控制指标,支盘水泥搅拌桩与等截面水泥搅拌桩的桩长存在一个等效桩长对应关系,即:支盘水泥搅拌桩与等截面水泥搅拌桩的桩长存在线性对应关系,桩间距存在指数函数对应关系。

(3) 在处理实际工程问题时,可根据等效桩长和桩间距对应关系,综合选择合理的支盘水泥搅拌桩的桩长和桩间距设计值。对于均质软土层可选择设置 2 个支盘,中心布置深度分别为 $-0.55L$ 、 $-0.85L$ (L 为桩长),对于含夹层的软土层可优先选择性质较好的土层设置支盘。

参考文献:

- [1] 李 然,刘 润,徐 余,等. 水泥搅拌桩法处理软土地基中桥头跳车现象的影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2):725-729.
- [2] Memar M, Zomorodian S M A, Vakili A H. Effect of pile cross-section shape on pile group behaviour under lateral loading in sand[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2020,20(5):308-319.
- [3] 黄财明,杨 涛,盛志成. 中字形变径水泥土搅拌桩复合地基固结分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(3):152-158.
- [4] 曹 洋,郑林达. 钉型水泥土搅拌桩加固软土路堤的数值分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):217-222.
- [5] 鞠彦忠,宋明择,王德弘,等. 支盘群桩在复合荷载作用下的承载特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(4):918-930.
- [6] 孙 涛. 变截面劲性水泥土旋喷搅拌桩关键技术

与机理研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.

- [7] Zhang Minxia, Xu Ping, Cui Wenjie, et al. Bearing behavior and failure mechanism of squeezed branch piles[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018,10(5):935-946.
- [8] 吴成钢,姚传勤,朱 兵. 多支型挤扩支盘桩在深厚软土地基中的应用[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2021,37(6):49-52.
- [9] 童 宇,马宏伟,吴怡颖,等. 挤扩支盘桩-土相互作用的机理研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2020,40(2):13-18.
- [10] 吴晓龙,孙克强,林泽航. 挤扩支盘桩在高速公路桥头软土地基处理中的应用[J]. 广东公路交通,2020,46(4):57-60,66.
- [11] Ma Hongwei, Wu Yiyang, Tong Yu, et al. Research on bearing theory of squeezed branch pile[J]. Advances in Civil Engineering, 2020,2020(1):1-12.
- [12] 赵四汉,刘 鑫,洪宝宁,等. 路堤荷载下含硬壳层软土地基破坏模式[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):337-345.
- [13] 李连祥,李先军. 不同扩径体数量、位置对支盘桩承载力的影响[J]. 山东大学学报(工学版),2016,46(5):88-94.
- [14] 陈海军,孙志彬,张聚文. 淤泥层中沉管隧道基础形式选型及沉降数值分析[J]. 公路交通技术,2022,38(3):95-102.
- [15] 张金保,韩玉花,王海静,等. 挤扩支盘灌注桩承载力影响因素的数值模拟研究[J]. 公路,2021,66(7):81-87.
- [16] 王伊丽,徐良英,李碧青,等. 挤扩支盘桩竖向承载力特性和影响因素的数值研究[J]. 土木工程学报,2015,48(S2):158-162.

(上接第 67 页)

- [24] Eduardo Alonso, Gens A A, García-Tornel A J. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Geotechnique. 1990,3(40):405-430.
- [25] Chijimatsu M, Nguyen T S, Jing L, et al. Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository-BMT1 of the DECO-VALEX III project. Part 1: Conceptualization and characterization of the problems and summary of results[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2005,42(5/6):720-730.
- [26] 刘月妙,蔡美峰,王 驹. 高放废物处置库缓冲材料导热性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(S2):3891-3896.
- [27] Hoffmann C, Alonso E, Romero E. Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures[J]. Phys. Chem. Earth Parts A/B/C, 2007,32(8-14):832-849.
- [28] 孙文静,刘仕卿,孙德安,等. 饱和高庙子膨润土的渗透特性[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(1):115-119.