

DOI: 10.11779/CJGE20230679

工程尺度缓冲材料热-水-力多场耦合数值模拟研究

赵敬波¹, 曹胜飞^{*1}, 李杰彪^{1,2,3}, 陈亮¹, COLLIN Frederic⁴, 刘月妙¹, 张奇¹

(1. 核工业北京地质研究院国家原子能机构高放废物地质处置创新中心, 北京 100029; 2. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055; 4. Departement GeomaC, University of Liege, Sart Tilman B52/3, Chevreuils Road, 1, B-4000 Liege)

摘要: 缓冲材料作为填充在废物罐与地质体之间重要的人工屏障, 对高放废物处置库的长期安全至关重要。以工程尺度缓冲材料热-水-力多场耦合大型模型试验系统 (China-Mock-up) 为研究对象, 采用有限元数值模拟软件 LAGAMINE, 考虑试验过程中复杂的边界条件与材料属性, 实现了近 5 a 试验数据的定量模拟。模拟结果可准确预测试验系统内部不同特征点温度随室温周期性波动及线性增长这一动态变化规律; 能够较好地反映不同特征点相对湿度随时间的行为演化趋势, 在加热器附近区域呈现出先干燥后饱和的现象, 远离加热器区域则逐渐增大; 模拟的总应力与实测试验数据间表现较好地一致性, 能够反映试验台架内部不同特征点的总应力随时间逐渐增大这一演化过程。揭示了多场耦合条件下缓冲材料 (膨润土) 温度、湿度及应力的相互作用关系, 为深入认识处置库环境下缓冲材料行为演化特征提供了重要的参考依据。

关键词: 缓冲材料; China-Mock-up 试验; 热-水-力多场耦合模拟; 高庙子膨润土

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)08-1712-11

作者简介: 赵敬波(1988—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事高放废物地质处置水文地质与缓冲材料等方面的研究工作。E-mail: zhaojingbobriug@outlook.com。

Numerical simulation of coupled thermo-hydro-mechanical (THM) behavior of buffer material in the China-Mock-up tests at engineering scale

ZHAO Jingbo¹, CAO Shengfei¹, LI Jiebiao^{1,2,3}, CHEN Liang¹, COLLIN Frederic², LIU Yuemiao¹, ZHANG Qi¹

(1. CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 4. Departement GeomaC, University of Liege, Sart Tilman B52/3, Chevreuils Road, 1, B-4000 Liege, Belgium)

Abstract: The buffer material plays a crucial role in the long-term safety of a high-level radioactive waste repository as it serves as a defense between the waste container and the host rock. To investigate the long-term performance of Gaomiaozi (GMZ) bentonite under repository conditions, based on the China-Mock-up test at engineering scale, the finite element code LAGAMINE is established to establish the THM numerical model. The complex boundary conditions and material properties involved in the test are considered, and the simulated results of temperature, relative humidity and swelling pressure are compared with the experimental ones over the past five years. The temperature in the China-Mock-up test is found to be periodic and linear, primarily influenced by the room temperature, which is accurately captured by the proposed model. Furthermore, the overall variation of the relative humidity at different locations is well reproduced. A desaturation-saturation process is observed in proximity to the heater, while it does not occur far from the heater. Additionally, the simulated results exhibit good agreement with the recorded data, effectively reflecting the increasing trend of stress over time. Besides, the interaction between temperature, humidity and stress of bentonite under the coupled THM conditions is achieved. These findings provide valuable insights into the long-term behavior of buffer materials in a repository environment and serve as an important reference for further understanding.

Key words: buffer material; China-Mock-up test; coupled THM model; Gaomiaozi bentonite

基金项目: 国家国防科技工业局项目 (地下实验室条件下缓冲材料原位试验安装技术研究); 国家自然科学基金项目(U2267217); 核设施退役及放射性废物治理专项项目 (科工二司[2022]736 号)

收稿日期: 2023-07-19

***通信作者** (E-mail: csf831016@163.com)

0 引言

高放废物的安全处置是关系到核工业可持续发展和保护环境、保护公众健康的重大问题。目前国际上公认的高放废物处置方式为深地质处置, 采用“多重屏障系统”进行处置库设计^[1]。缓冲材料作为废物罐和处置围岩之间重要的人工屏障, 在放射性衰变热、地下水入侵和围岩应力等作用下, 将经历复杂的热-水-力耦合过程。因此, 评价其长期性能对高放废物处置库的安全至关重要^[2]。膨润土由于具有极低的渗透性、良好的膨胀性、持水性及长期稳定性, 现已被国际上多个国家选作高放废物深地质处置缓冲材料, 如 MX-80、FEBEX、Kunigel V1、高庙子膨润土等。

为了揭示缓冲材料在高放废物处置库条件下的热-水-力耦合行为演化特征, 开展工程尺度的模型试验是一种重要途径。然而, 由于试验时间尺度的限制, 开展相应的数值模拟研究是预测和评价缓冲材料长期耦合性能的必要手段。据此, 国际上多个高放废物地质处置地下实验室采用工程尺度模型试验和数值模拟相结合的方式研究缓冲材料热-水-力多场耦合性能。针对 MX-80 膨润土, 瑞典 SKB 先后分别采用不同数值软件/程序 ABAQUS、CODE_BRIGTH、COMPASS, 基于不同尺度的室内及原位试验, 提出了模拟处置库条件下温度-水压-膨胀力行为演化数值模拟方法^[3-5]。并且在瑞士 Mont Terri 地下实验室开展了全尺寸原位试验 (FE) 和 1:2 尺寸的加热试验 (HE-E) 研究, 分别采用程序 TOUGH 2、OpenGeoSys 等模拟并验证了 MX-80 膨润土多场耦合性能^[6-7]。对于 FEBEX 膨润土, 类似研究在西班牙 Madrid 和瑞士 Grimsel 分别开展了室内 mock-up 试验和现场原位试验, 同样使用不同程序/软件确立了 FEBEX 膨润土多场耦合理论模型及相应的模拟方法^[8-10]。在加拿大 AECL 地下实验室, 选择了膨润土与砂混合材料作为缓冲材料, 通过工程尺度的现场试验 (BCE 和 ITT) 研究并模拟围岩与压实缓冲材料之间的长期演变关系^[11-13]。与此同时, 在其它国家也开展了类似试验与数值模拟工作, 例如: 韩国的 KENTEX 试验、捷克 Mock-Up-CZ 试验、比利时的 OPHELIE Mock-up 试验等^[14-16]。国际上专门成立了 DECOVALEX 计划开展高放废物地质处置系统围岩中多个物理场的耦合过程研究和工程屏障的可行性评估, 并提出了描述缓冲材料各种不同力学行为的本构模型, 例如: BBM 模型、BE_xM 模型等^[17-19]。

目前中国已经筛选出内蒙古高庙子膨润土作为处置库缓冲材料首选矿床, 并开展了大量关于渗透性、导热性、力学特性的试验研究^[20-22]。为了模拟缓冲材

料在处置库条件下的行为演化特征, 核工业北京地质研究院于 2011 年设计并建造了工程尺度的大型缓冲材料多场耦合性能模型试验系统 (China-Mock-up)^[23]。Chen 等^[24]、Zhao 等^[25]提出了高庙子膨润土热-水-力多场耦合理论模型及数值模拟方法, 初步验证了理论模型与数值模拟方法的可靠性。本文则是在前期研究成果的基础上, 采用有限元数值模拟软件 LAGAMINE, 考虑试验过程中真实复杂边界加载条件和 5 种不同的材料属性, 实现了近 5 a 试验数据的定量模拟, 准确拟合了缓冲材料内部温度、相对湿度及总应力演化规律, 建立并验证了缓冲材料多场耦合性能理论模型与数值模拟技术, 为后续处置库条件下缓冲材料长期性能评价提供技术支撑。

1 模型试验简介

根据中国高放废物处置概念模型, China-Mock-up 试验被设计成圆柱体形状, 主要组件包括外围的碳钢腔体 (内径 900 mm×高 2200 mm, 厚度 25 mm)、膨润土破碎颗粒、压实膨润土块体、加热器 (直径 300 mm×高 1600 mm)、数据采集系统、加水系统、温控系统、传感器等, 如图 1 所示, 其中加热器又可分为加热芯和氧化镁导热材料。在加热器与膨润土块之间、膨润土块与碳钢台架之间分别添加了 15, 50 mm 厚的破碎颗粒。压实膨润土多为扇形块体, 干密度为 1.71 g/cm³, 初始含水率为 8.7%, 初始吸力为 80 MPa。

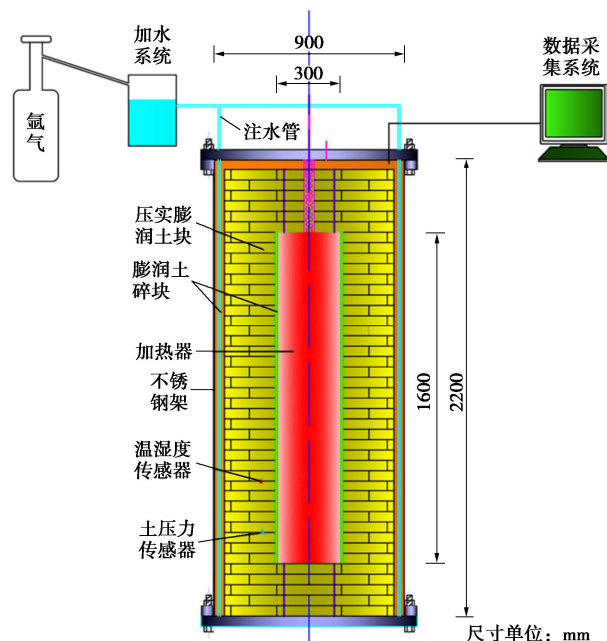


图 1 China-Mock-up 模型试验装置结构剖面图^[23]

Fig. 1 Sketch of China-Mock-up facility^[23]

为了系统获得缓冲材料内部温度、湿度、应力、变形等数据, 试验装置内部分别布设了温度传感器、

湿度传感器、应力传感器、位移传感器、孔隙水压力传感器、电阻应变片等 10 种不同类型的传感器, 布设过程中确保每一层及各层之间的传感器具有关联互补功能。该试验系统是中国目前尺寸最大的缓冲材料热-水-力-化学耦合试验台架, 可用于模拟高放废物处置库环境下的缓冲材料长期耦合性能试验研究。

2 热-水-力多场耦合数学模型

为了更好地模拟 China-Mock-up 试验过程中膨润土内部的热量运移、液态水传播、水蒸气扩散与冷凝、土体膨胀/收缩等复杂行为, Chen 等^[24]提出了描述高庙子膨润土热-水-力多场耦合行为的理论模型。本文采用相同的理论模型, 主要包括水分运移方程、热量运移方程及力学本构模型。

2.1 水分运移方程

膨润土内部水的存在形式分为两种: 液态水和水蒸气。基于质量守恒定律, 土体中水分运移规律的控制方程可以通过两者质量守恒方程叠加获得, 即

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho_w n S_{r,w})}{\partial t} + \text{div}(\rho_w f_w)}_{\text{液态水}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho_v n S_{r,g})}{\partial t} + \text{div}(i_v \rho_v f_g)}_{\text{水蒸气}} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_w 和 ρ_v 为水与水蒸气的密度; n 为孔隙度; t 为时间; $S_{r,w}$ 和 $S_{r,g}$ 为水、水蒸气的饱和度; f_w , f_g 为水与水蒸气的速度; i_v 为水蒸气弥散作用。为了确保数值模型具有较好的收敛性与稳定性, 在模拟过程中假设试验台架内部气压保持不变, 忽略气体扩散这一过程, 故在多孔介质中只考虑液态水的运移过程, 其满足广义达西定律:

$$f_w = -\frac{k_{\text{int}} k_{r,w}}{\mu} [\nabla p_w + \rho_w g \nabla y] \quad (2)$$

式中: p_w 为压力; k_{int} , $k_{r,w}$ 分别为饱和渗透率和相对渗透率; μ 为动力黏滞系数。

2.2 热量运移方程

热量运移模型是基于能量守恒定律提出的, 假设材料各组成部分处于热动平衡状态, 所有成分可以由温度指标定义。在温度场控制方程中涵盖了固体、水、气体等各个介质的能量守恒, 可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} [E_s \rho_s (1-n) + E_w \rho_w S_{r,w} n + E_g \rho_g S_{r,g} n] + \nabla \cdot (i_c + j_{Es} + j_{Ew} + j_{Eg}) = Q \quad (3)$$

式中: E_s , E_w , E_g 分别为固体、液体及气体的内能; i_c 为热传导作用; j_{Es} , j_{Ew} , j_{Eg} 分别为固体、液体及气体中的热对流作用; Q 为源汇项。

2.3 力学本构模型

本文力学本构模型采用是 Alonso 等^[21]提出的 BBM 模型, 能够较好地反映饱和度对土体的力学特性

显著影响。其 LC 屈服面在 (p, q, s) 三维空间中可以描述为

$$q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (4)$$

式中: p 为平均净应力; q 为偏应力; M 为临界状态曲线倾斜度; p_0 为前期固结压力; p_s 为考虑吸力的存在对土体黏聚力的增强作用。在 (p, s) 二维空间存在 LC 屈服线和 SI 屈服线, 分别可以表示为

$$\left. \begin{aligned} p_0 &= p_c \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-k}{\lambda(s)-k}} \\ F_2 &= s - s_0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: p_0^* 为饱和时的固结压力; p_c 为参考应力; s_0 为前期固结时最大吸力; k 为弹性压缩曲线斜率; $\lambda(0)$ 和 $\lambda(s)$ 为饱和状态下吸力为 s 时的压缩参数, 其函数关系为

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r] \quad (6)$$

式中: r 为土体受吸力影响下的最大刚度参数; β 为控制土体刚度系数随吸力增长速率的参数。其中模型硬化准则可表示为

$$\left. \begin{aligned} dp_0^* &= \frac{(1+n)p_0^*}{\lambda(0)-k} d\varepsilon_v^p, \\ ds_0 &= \frac{(1+n)(s_0 + p_{at})}{\lambda_s - k_s} d\varepsilon_v^p \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: λ_s 和 k_s 分别为吸力引起的体积变形塑性刚度参数和弹性刚度参数; p_{at} 为标准大气压力; ε_v^p 为塑性体积应变。

3 热-水-力多场耦合数值模型

3.1 模型结构与网格剖分

考虑到 China-Mock-up 模型试验装置的实际结构, 采用 2D 轴对称模型, 分别考虑加热芯、氧化镁导热材料、外围碳钢腔体、压实膨润土块和填充的破碎颗粒五种不同属性材料, 结果如图 2 所示。每一种材料属性都假设是均质各向同性的, 忽略膨润土块体、碎块颗粒间的缝隙, 其中膨润土碎块颗粒认为其饱和渗透率比压实的块体偏大, 分别取值为 2.5×10^{-18} , $2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, 其它参数取值与膨润土块相同。本研究采用比利时列日大学开发的有限元数值软件 LAGAMINE, 其可实现不同类型网格剖分和局部加密, 提供了一系列描述土体力学特性的本构方程 (例如: 莫尔库仑模型、BBM 模型等), 能够定量模拟多场耦合条件下土体内部热量运移、水分运移、气体扩散、土体变形等问题。模型采用的是矩形网格, 网络单元总数为 1482, 结点总数为 4244 (图 2)。选取约 5 年的温度、相对湿度、总应力试验数据进行模型验证工作。

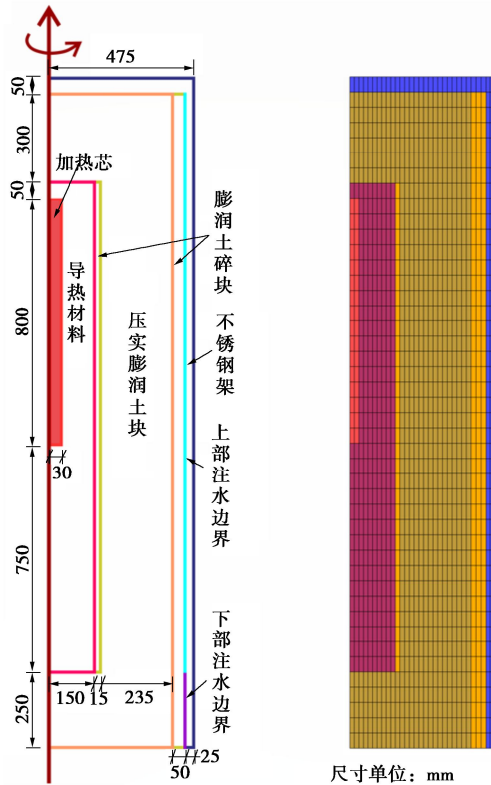


图 2 China-Mock-up 试验数值模型与网格剖分结果

Fig. 2 Numerical model for China-Mock-up experiment and mesh grids

3.2 模型参数的确定

前期研究已开展了土水特征试验、非饱和渗透试验、压缩试验、导热性能试验等, 为本研究提供了模型所需的多场耦合参数。首先对于非饱和土, 吸力 s 与饱和度 $S_{r,w}$ 的函数关系可表示为

$$S_{r,w} = S_{r,res} + a_3 \frac{S_{r,u} - S_{r,res}}{a_3 + (a_1 s)^{a_2}} \quad (8)$$

式中: $S_{r,u}$ 为土体的最大饱和度, 取 1.0; $S_{r,res}$ 为在土体的残余饱和度, 其值为 0.1。根据土水特征试验数据, 采用最小二乘法进行数值拟合, 结果如图 3。式 (8) 中参数为 $a_1 = 7.0 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$, $a_2 = 0.9$, $a_3 = 70$ 。

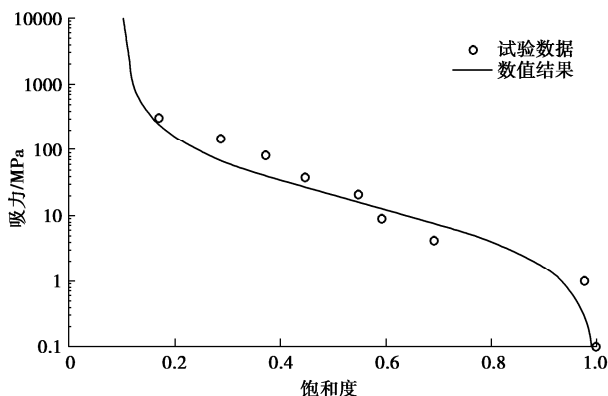


图 3 高庙子膨润土土水特征曲线

Fig. 3 Water-retention curve of Gaomiaozi bentonite

非饱和和渗透试验采用瞬时截面法来测定膨润土的渗透系数, 通过土样特定截面的流量以及该截面的水力梯度, 得到土体在特定时间特定截面上的平均渗透系数。根据前期试验数据, 相对渗透率 $k_{r,w}$ 拟合公式为

$$k_{r,w} = \frac{(S_{r,w} - S_{r,res})^3}{(S_{r,u} - S_{r,res})^3} \quad (9)$$

拟合结果见图 4。

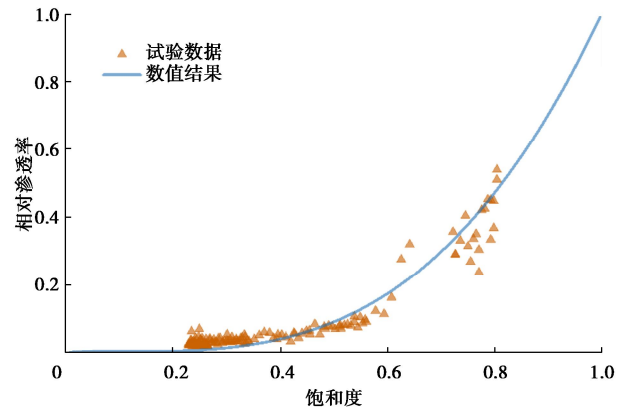


图 4 饱和度与相对渗透率之间的拟合曲线图

Fig. 4 Relative permeability of GMZ bentonite as a function of degree of saturation

基于热传导试验, 高庙子膨润土饱和度 $S_{r,w}$ 与导热系数 k 的关系为 (图 5)

$$k = 1.6S_{r,w} + 0.02 \quad (R^2 = 0.976) \quad (10)$$

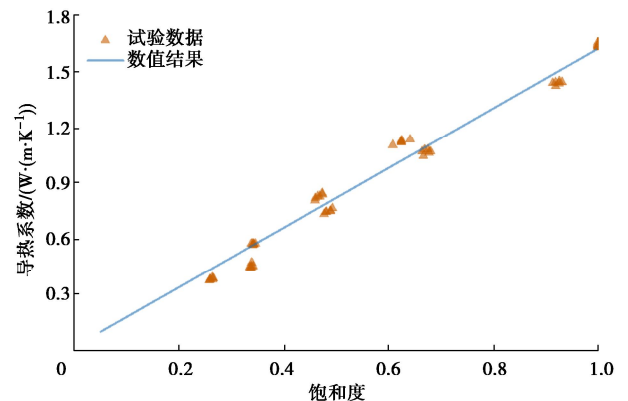


图 5 高庙子膨润土导热系数与饱和度的关系

Fig. 5 Thermal conductivity of GMZ bentonite as a function of degree of saturation

由于现阶段获得的模型参数相对比较有限, 其余则是参考国外具有代表性膨润土的试验数据^[24]。

3.3 模型边界条件设置

在试验过程中实际温度边界分为加热芯和试验腔体外围两部分。加热芯温度是根据试验设计的温度逐步升高的, 最终稳定保持在 90°C 。在试验开始前 255 d, 处于试验调式阶段, 加热过程中加热芯的温度控制

相对较差,使得试验初期实测数据的变化幅度相对较大。模型中对加热过程进行简化处理:0~135 d,温度保持在30℃;136~255 d,温度从30℃升高至90℃;256 d之后,温度维持在90℃。按照此方式采用阶梯函数方式模拟这一加热过程,并对加热芯处的结点进行温度赋值,如图6所示。在试验腔体外围虽然添加了保温层,但是试验前1500 d保温效果相对较差受室温影响较为明显,呈季节性波动,之后由于试验环境的改变,温度保持相对较小的波动范围。基于此,数值模型刻画外围温度边界时主要是采用傅里叶函数与线性函数分段拟合试验数据进行边界设置,其中在700 d左右室温出现小幅度明显的波动,这一过程采用人为方式进行边界处理,如图7所示。

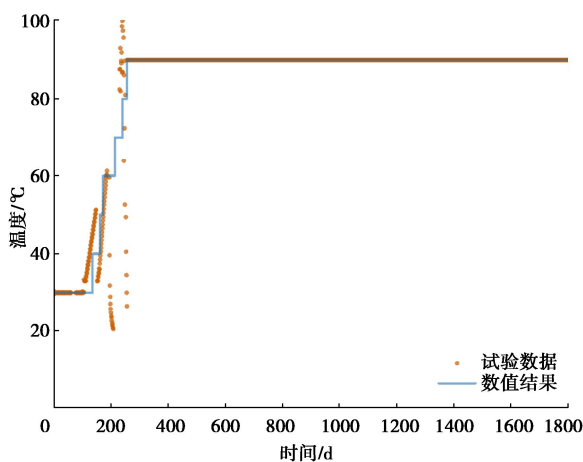


图6 试验加热过程及数值拟合结果

Fig. 6 Heating process and numerical results of heater strip

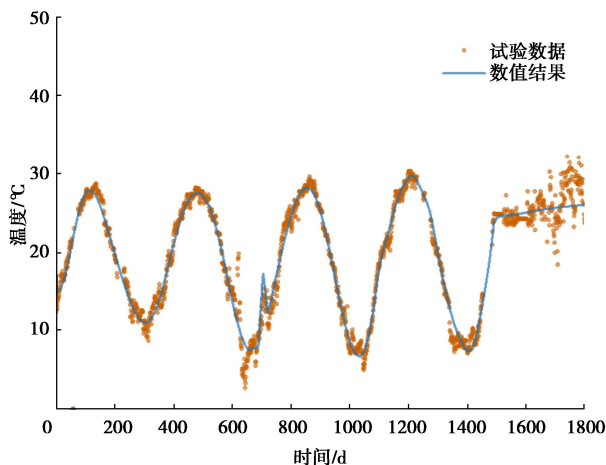


图7 室温与数值拟合结果随时间的变化

Fig. 7 Variation in room temperature and numerical results with time

试验注水管固定于腔体内壁上,水是从试验台架底部注入,注水量随时间逐渐累积增大的,如图8(a)所示。在实际的注水过程中,受重力作用影响,试验台架底部的水量相对于上部区域较多。为了更真实地

模拟试验真实注水条件,在模型中注水边界分为两部分,见图2。试验前期上部注水量相对较小,下部的注水量更大,随着下部膨润土逐渐趋于饱和,下部注水量随时间逐渐减少,上部则相应逐步增大。考虑试验过程中影响每天注水量的试验因素很多,实际每天注水量并不完全相同,数值模型采用平均注水速率的简化方式分别对上部 and 下部水量边界赋值描述整个的注水过程,如图8(b)所示。

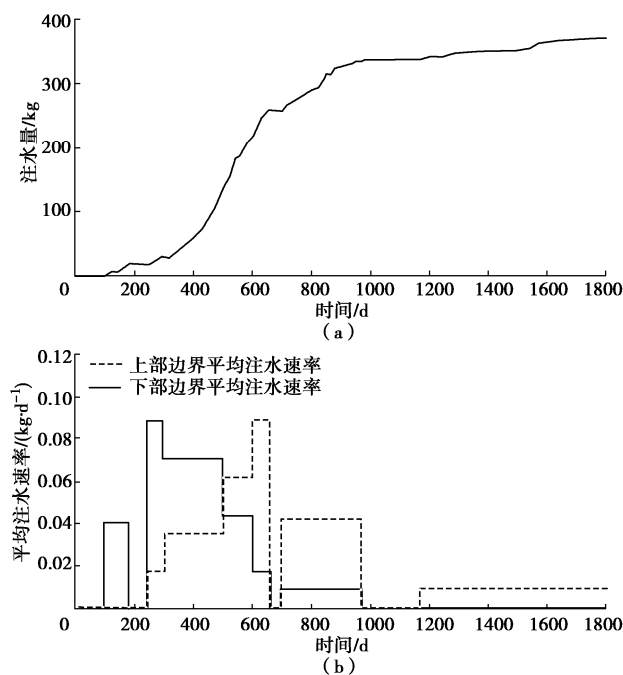


图8 注水量及平均注水速率随时间的变化

Fig. 8 Water injection process in China-Mock-up test

4 结果与讨论

4.1 温度场模拟结果

试验台架不同位置内部特征点温度随时间的变化如图9所示。结果表明模拟值与试验数据的吻合程度较高,能够很好地反映试验台架内部温度随时间演变这一过程,这充分说明在本研究中各个材料设定的热学参数及边界条件是合理的。其次,图9内部特征点的温度曲线可以说明,在试验台架内部的温度受室温波动非常明显,而在数值模型中,采用分段函数方式刻画外部温度边界条件,能够很好地反演出台架内部温度前期随室温波动及后期线性变化这一规律。同时在0~255 d期间,试验台架内部处于加热过程,各个特征点的温度是加热芯加热温度与室温综合作用的结果。例如:从135~255 d模型加热芯边界设置的温度是阶梯的方式逐渐增高,而外围边界室温的温度是逐渐降低的,模拟结果是这两方面综合作用的结果。对于图9(a), (b)中的特征点距离加热芯相对较远,模拟结果主要受室温的影响呈现降低趋势;对于图9

(c) ~ (f) 中的特征点距离加热芯相对较近, 在这一时间段加热芯的温度从 80°C 升高到 90°C , 相应模拟温度也呈现升高趋势。之后加热芯影响的区域随时间逐步稳定, 然后室温对模拟结果呈现主导作用, 模拟温度呈现下降趋势, 同时在 174 d 左右类似的现象也出现过。但是此期间内部特征点温度整体趋势是增加的, 说明在这一过程中大趋势仍然受加热芯加热的影响。同时从 700~720 d 这一阶段, 监测到的温度数据由于室温作用影响出现较小幅度的波动, 该现象可以通过模型中边界条件的精细刻画得到准确地预测。在 1500 d 之后, 室温波动幅度较小, 本数值模型通过采用线性的方式也可较好地模拟这一规律。

图 9 (e), (f) 模拟结果还表明在试验台架中上部特征点反映出数值结果低于试验数据, 其原因是加热器开始加热后, 水分会随着温度升高发生蒸发现象, 产生水蒸气, 导致膨润土内部局部温度较高区域的气体压力升高, 气体会携带着部分热量向上部和外部运移。由于试验台架装置采用的是封闭式设计, 在台架外围还封装了一层保温材料, 故试验台架上部区域的热量随着时间推移会逐渐聚集, 导致上部温度逐渐升高。在数值模拟过程中, 为了获取较好的数值收敛结果, 整个模拟过程中假设膨润土内部不同位置的气体压力随时间保持不变, 忽略了气体迁移过程中携带的热量, 使得数值结果低于试验数据。同时, 图 9

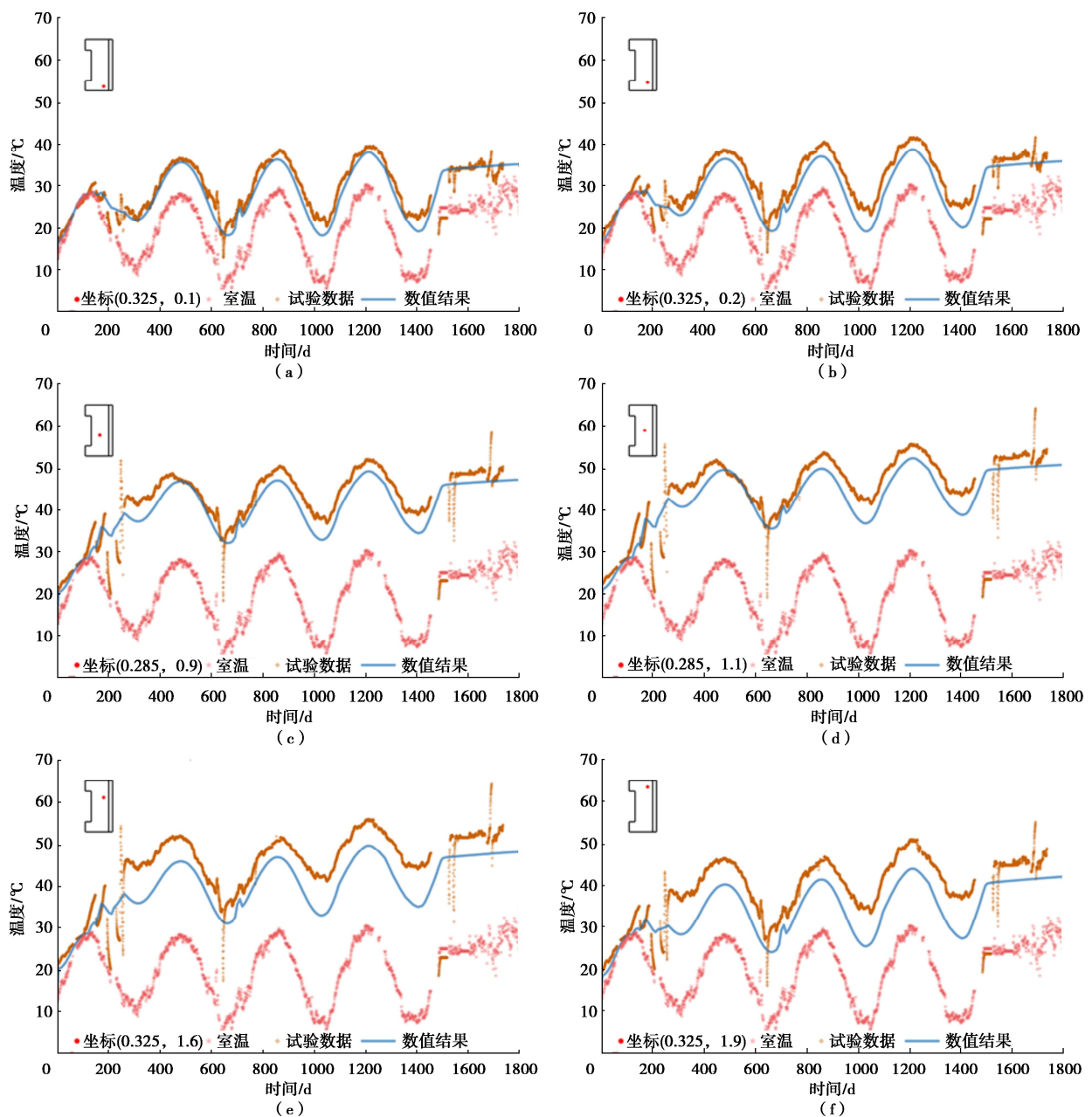


图 9 试验台架膨润土内部不同区域特征点温度的模拟结果

Fig. 9 Comparison between predictive temperature and experimental results at different locations of China-Mock-up facility

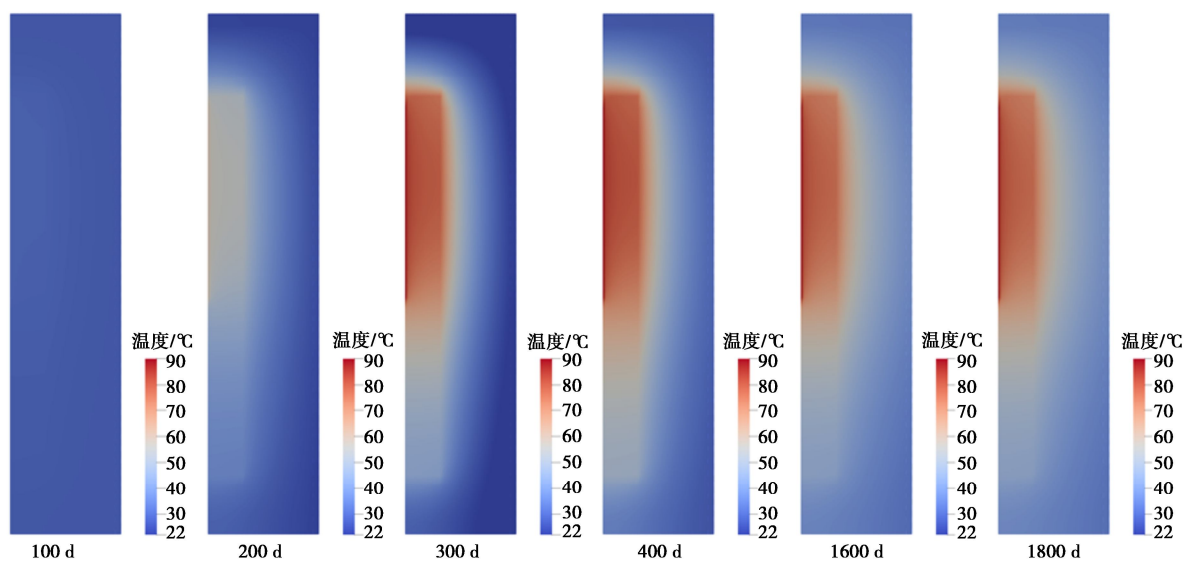


图 10 试验台架内部不同时刻温度场分布云图

Fig. 10 Temperature distribution at different time

(a), (b) 模拟结果则说明在试验台架底部受这一现象影响不明显。

图 10 为不同时刻试验台架内部温度场的分布云图, 该结果可较好地反映不同材料导热性能差异。根据图 10 可知, 在加热芯处的模拟温度最高, 其次氧化镁材料具有良好的导热性能, 其温度与加热芯的温度差异不是很明显。相对而言, 膨润土块体及破碎颗粒的导热系数相对较低, 且靠近外围边界, 受室温的影响, 其内部温度场不同位置差异性较为明显。其次, 模拟结果还表明在 100 d 时加热芯的温度保持在 30°C, 温度与室温接近, 试验台架内部温度场整体差异不大。后续随着加热芯的温度升高, 氧化镁导热材料内部温度快速升高, 当达到 300 d 左右时, 温度场已经趋近于较为稳定的状态, 主要受室温变化发生相应的波动, 例如: 在 300 d 时, 室温接近 8.7°C, 之后室温逐渐升高, 到 400 d 时室温则达到 21.5°C, 通过温度场云图可较好地反映试验台架内部温度场随时间的变化特征。通过对比 1600 d 与 1800 d 温度场云图可知, 在这一期间, 室温呈近似线性波动, 变化幅度较小, 相应的温度场分布差异性不是很明显。

4.2 渗流场模拟结果

图 11 为试验台架内部不同区域特征点相对湿度随时间的模拟结果。通过数值结果与试验数据的对比可知, 本研究中采用的模拟方法整体上能够反映膨润土内部水分在多场耦合条件下的运移规律。在试验开始运行阶段, 尚未开始加热和注水, 在这一阶段相对湿度随时间保持不变。随着加热器开始运行, 靠近加热器的特征点, 相对湿度发生明显降低, 之后随着注

水作用的影响, 相对湿度相应地开始逐渐升高并趋于饱和, 如图 11 (b) ~ (d), (f) 所示, 在这一阶段, 相对湿度曲线表现出先干燥后饱和的趋势。然而在图 11 (a), (e) 中上述现象并未出现, 其原因主要是这两个特征点位置靠近注水边界, 距离加热芯相对较远, 受注水过程影响比较明显, 相对湿度随时间逐渐升高趋势。图 11 的模拟结果还可以反映出试验数据与数值结果在前期吻合程度较好, 例如: 对于图 11 (b) ~ (d) 中的前 600 d 而言, 模拟结果能够较好地反映试验过程中相对湿度随时间变化规律。但是随着时间推进, 试验监测到的相对湿度增长的速率明显高于模拟值, 其原因是膨润土砌块之间、砌块与传感器之间以及膨润土颗粒存在缝隙, 在实际注水过程中, 水分会优先沿着缝隙渗入到膨润土内部, 扩散至传感器的位置。在数值模拟的过程中是假设膨润土块之间和颗粒之间不存在缝隙, 是均质各向同性的整体, 水分是按照不同材料的渗透性逐渐从外向内缓慢迁移, 迁移速率远小于沿缝隙运移的速度, 使得模拟结果小于试验监测数据。

膨润土内部不同时刻水分迁移过程中渗流场模拟结果如图 12 所示。在前 100 d, 由于暂时未注水, 膨润土内部的水压与初始吸力保持相同, 随着时间推移, 加热器周围区域的水压受加热影响开始降低, 在 600 d 最小水压可达 -230 MPa 左右, 这一模拟结果与图 11 (b) ~ (d) 相对湿度随时间的变化规律是保持一致的。后续随着注水量累积增多, 水分由外向内缓慢运移, 加热产生的干燥区域范围逐步缩小, 土体内部的水压逐渐升高。同时渗流场云图还表明经过近 5 年

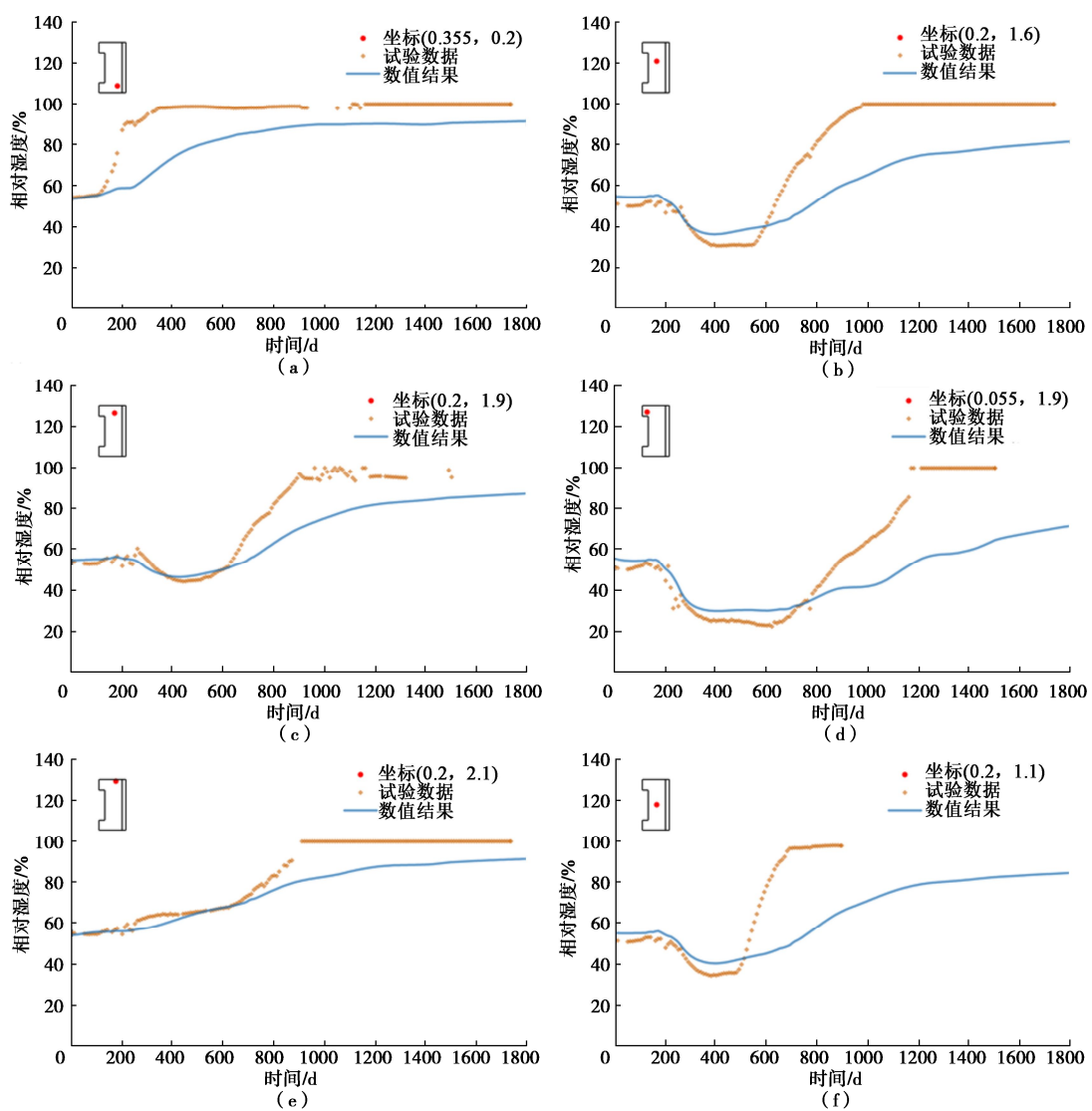


图 11 试验台架膨润土内部不同区域特征点相对湿度的模拟结果

Fig. 11 Comparison between predictive relative humidity and experimental results at different locations of China-Mock-up facility

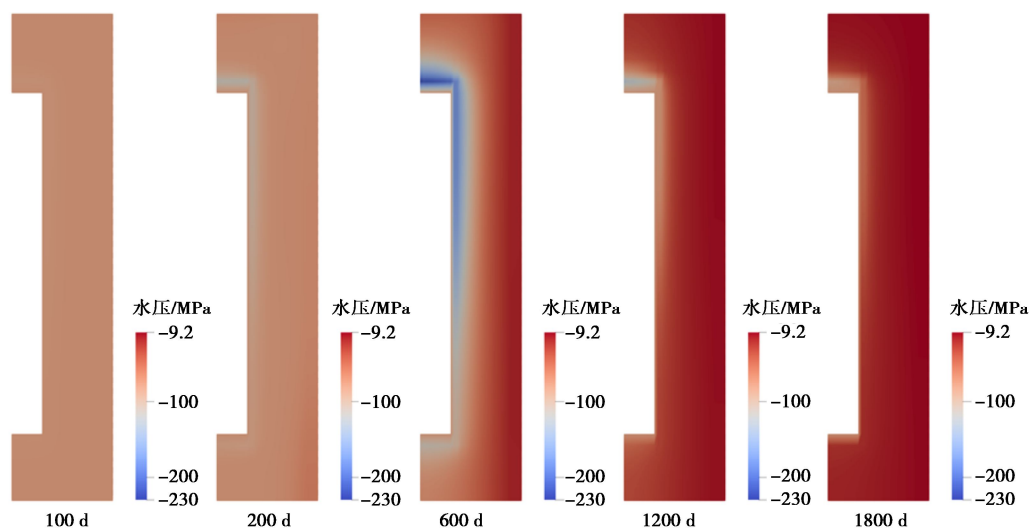


图 12 试验台架内部不同时刻水压分布云图 (仅显示膨润土块体和破碎颗粒)

Fig. 12 Porewater pressure distribution at different times (Only the domains representing compacted bentonite blocks and crushed bentonite pellets are presented here)

水分运移, 试验台架内膨润土仍尚未完全达到饱和, 最大水压约为 -9.2 MPa , 这充分说明了膨润土块体的渗透率极低, 水分运移缓慢。

4.3 应力场模拟结果

压实膨润土块体中应力的变化是膨润土遇水膨胀和加热器的热效应双重作用引起的, 是一个相对复杂的演化过程。本研究假设了总应力在各个方向上是一样的, 忽略了各向异性特征, 图 13 则为试验台架不同区域特征点总应力随时间的变化结果, 其中图 13 (a) 试验数据测量的总应力是环向的, 图 13 (b) ~ (f) 中测量的是径向的。从模拟结果可以看出, 随着时间的推移, 注水量的增多, 总应力整体趋势是逐渐增大

的, 模拟结果整体上能够反映试验过程总应力的演化趋势。其次, 对于膨润土中间部位, 如图 13 (d), (e) 所示, 受温度与水分运移速率的影响, 这两个特征点的应力在试验开始增长缓慢, 可能受加热的影响, 且膨润土渗透系数极低, 水分迁移较为缓慢, 吸力逐渐减小, 然后土体才开始发生明显的膨胀现象。但是对于试验过程中部分特征点的总应力出现两次先下降后升高(主要包括 92~1176 d 和 1200~1500 d 这两个试验段), 其原因同样是由于传感器与压实膨润土块体安装过程中以及不同膨润土块体间存在缝隙, 使得水分快速运移到这些特征点处, 总应力升高, 后续由于停止注水, 水压降低, 相应的总应力出现降低的情形,

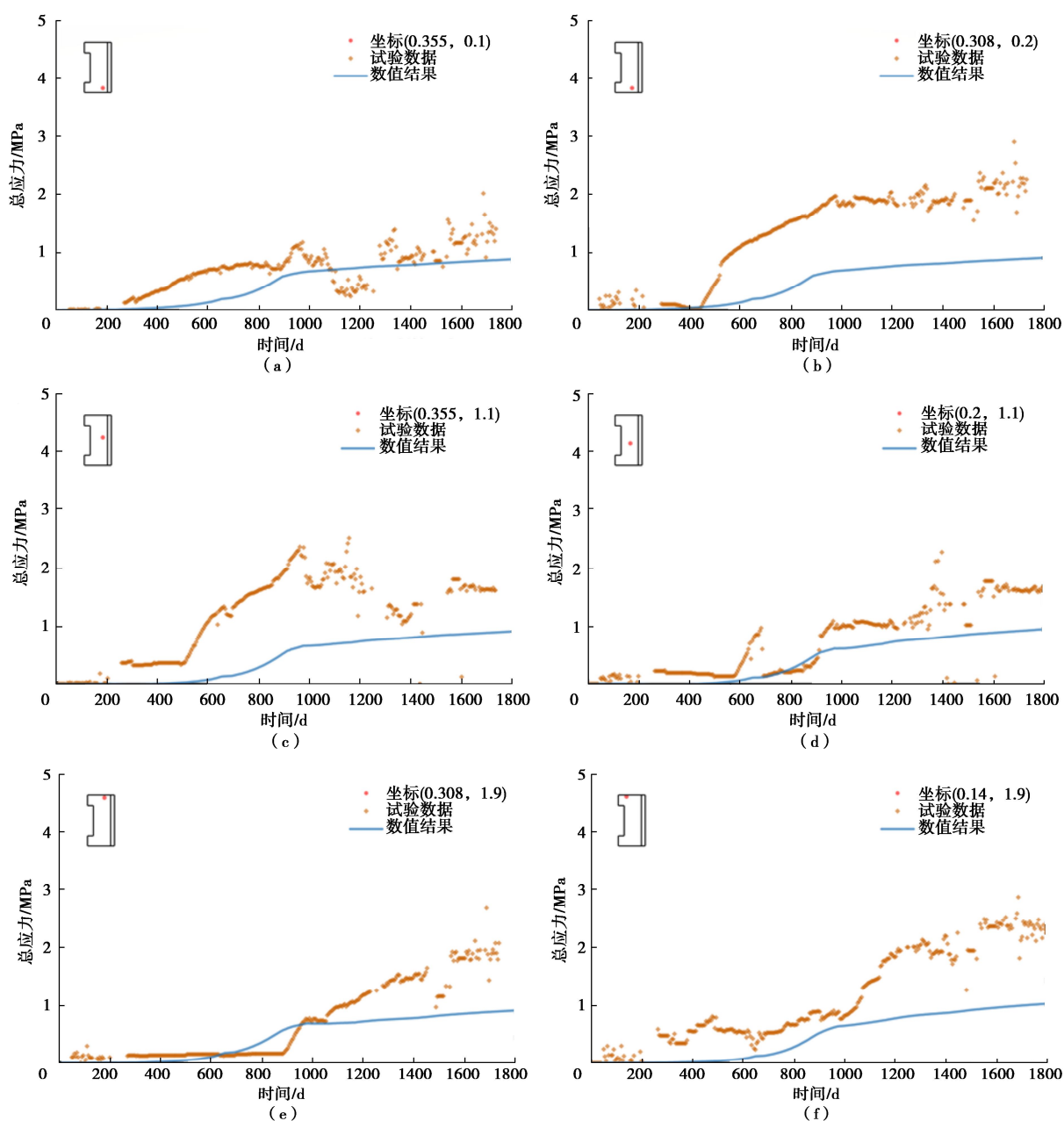


图 13 试验台架膨润土内部不同区域特征点总应力模拟结果

Fig. 13 Comparison between predictive total stress and experimental results at different locations of China-Mock-up facility

结果如图 13 (a), (c) 所示。对于数值模拟而言, 由于现阶段很难将这些缝隙在模型中进行刻画, 使得模拟的总应力试验开始阶段与实测数据的吻合程度相对较好, 后续由于水分沿着缝隙快速迁移, 模拟的总应力低于实测数据值, 但模拟结果整体可以反映膨润土块体的膨胀演化趋势, 该认识可为处置库条件下缓冲材料长期耦合性能评价提供参考依据。

5 结论及建议

(1) 综合考虑 China-Mock-up 试验系统内部 5 种不同材料属性, 建立了工程尺度条件下高庙子膨润土热-水-力多场耦合数值模拟方法, 能够准确模拟预测了近 5 a 试验台架内部不同特征点温度随时间演化规律。

(2) 模拟结果表明经过近 5 a 运行试验台架内部膨润土尚未达到饱和状态, 靠近加热器的特征点, 相对湿度随时间表现出先干燥后饱和的趋势, 远离加热器的特征点, 相对湿度随时间逐渐增大, 可较好地反映试验台架内部不同特征点相对湿度的整体行为演化趋势。

(3) 模拟的总应力与实测试验数据间表现较好的一致性, 整体上能够反映试验台架内部不同特征点的总应力随时间逐渐增大这一演化趋势, 该认识可为处置库环境下缓冲材料多场耦合性能提供参考依据。

(4) 针对膨润土块、颗粒之间缝隙, 建议后续开展相关室内试验, 分析土体在膨胀过程中缝隙处渗透性、变形规律, 建立描述膨润土块间缝隙愈合机理的本构方程, 提出相应的缝隙接触面数值模拟方法。其次, 考虑到候选场址围岩和地下水的影响, 建议后续在处置深度开展多场耦合条件下现场原位试验研究, 为研究真实处置库环境下缓冲材料行为演化特征提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 郭永海, 王 驹, 金远新. 世界高放废物地质处置库选址研究概况及国内进展[J]. 地学前缘, 2001, **8**(2): 327-332. (GUO Yonghai, WANG Ju, JIN Yuanxin. The general situation of geological disposal repository siting in the world and research progress in China[J]. Earth Science Frontiers, 2001, **8**(2): 327-332. (in Chinese))
- [2] 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): 1123-1129. (CAO Shengfei, LIU Yuemiao, XIE Jingli, et al. Study on thermo-hydro-mechanical coupling behaviors of buffer material[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, **16**(4): 1123-1129. (in Chinese))
- [3] CLEALL P J, MELHUIH T A, THOMAS H R. Modelling the three-dimensional behaviour of a prototype nuclear waste repository[J]. Engineering Geology, 2006, **85**(1/2): 212-220.
- [4] HÖEKMARK H, LEDESMA A, LASSABATERE T, et al. Modelling heat and moisture transport in the ANDRA/SKB temperature buffer test[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, **32**(8-14): 753-766.
- [5] BAG R. Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Behaviour of MX80 Bentonite in Geotechnical Applications[D]. Cardiff: Cardiff University, 2011.
- [6] MÜELLER H R, WEBER H P, KÖEHLER S, et al. The full-scale Emplacement (FE) Experiment at the Mont Terri URL[C]// 5th International Conference on Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Montpellier, 2012.
- [7] WANG X R, SHAO H, WANG W Q, et al. Numerical modeling of heating and hydration experiments on bentonite pellets[J]. Engineering Geology, 2015, **198**: 94-106.
- [8] SAMPER J, ZHENG L, MONTENEGRO L, et al. Coupled thermo-hydro-chemical models of compacted bentonite after FEBEX in situ test[J]. Applied Geochemistry, 2008, **23**(5): 1186-1201.
- [9] MICHALEC Z, BLAHETA R, HASAL M, et al. Fully coupled thermo-hydro-mechanical model with oversaturation and its validation to experimental data from FEBEX experiment[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, **139**: 104567.
- [10] XU H, ZHENG L, RUTQVIST J, et al. Numerical study of the chemo-mechanical behavior of FEBEX bentonite in nuclear waste disposal based on the Barcelona expansive model[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **132**: 103968.
- [11] THOMAS H R, CLEALL P J, DIXON D, et al. The coupled thermal-hydraulic-mechanical behaviour of a large-scale in situ heating experiment[J]. Géotechnique, 2009, **59** (4): 401-413.
- [12] GUO R P, DIXON D, CHANDLER N. Use of numerical simulations to assess hydraulic and mechanical measurements of bentonite-sand buffer in an in-floor borehole[J]. Engineering Geology, 2010, **114**(3/4): 433-443.
- [13] GUO R P. Thermo-hydro-mechanical modelling of the buffer/container experiment[J]. Engineering Geology, 2011, **122**(3): 303-315.
- [14] CHO W J, LEE J O, KWON S. Analysis of thermo-

- hydro-mechanical process in the engineered barrier system of a high-level waste repository[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, **240**(6): 1688-1698.
- [15] PACOVSKÝ J, SVOBODA J, ZAPLETAL L. Saturation development in the bentonite barrier of the Mock-Up-CZ geotechnical experiment[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, **32**(8/9/10/11/12/13/14): 767-779.
- [16] ROMERO E, LI X L. Thermo-hydro-mechanical characterization of OPHÉLIE backfill mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(4): 733-740.
- [17] RUTQVIST J, BARR D, BIRKHOLZER J T, et al. Results from an international simulation study on coupled thermal, hydrological, and mechanical processes near geological nuclear waste repositories[J]. Nuclear Technology, 2008, **163**(1): 101-109.
- [18] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Géotechnique, 1990, **40**(3): 405-430.
- [19] ALONSO E E, VAUNAT J, GENS A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays[J]. Engineering Geology, 1999, **54**(1/2): 173-183.
- [20] 王 驹, 陈伟明, 苏 锐, 等. 高效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 Weiming, 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))
- [21] CUI Y J, TANG A M, QIAN L X, et al. Thermal-mechanical behavior of compacted GMZ bentonite[J]. Soils & Foundations, 2011, **51**(6): 1065-1074.
- [22] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. An unsaturated hydraulic conductivity model for compacted GMZ01 bentonite with consideration of temperature[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(4): 1937-1944.
- [23] 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.
- [24] CHEN L, WANG J, LIU Y M, et al. Numerical thermo-hydro-mechanical modeling of compacted bentonite in China-mock-up test for deep geological disposal[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, **4**(2): 183-192.
- [25] ZHAO J B, CHEN L, 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.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊为全国中文核心期刊、中国科学引文数据库 (CSCD) 核心期刊和中国科技核心期刊。本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”“Scopus 数据库”等国际数据库收录。本刊官网 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章, “中

国知网”“万方网”“维普网”全文收录本刊。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金和油气资源等行业中从事岩土力学与岩土工程专业的科研、设计、施工、监理和学习人员。

本刊为月刊, A4 开本, 双栏排版, 222 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购 (不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)