

DOI: 10.11779/CJGE201507006

基于膨润土微观结构确定土水特征曲线的残余含水率

朱赞成^{1,2}, 孙德安¹, 王小岗², 陈 霁², 王古平³

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 台州学院建筑工程学院, 浙江 台州 318000; 3. 台州学院物理与电子学院, 浙江 台州 318000)

摘 要: 根据蒙脱石层间水化微观结构, 建立了蒙脱石水化后的含水率计算公式, 并认为蒙脱石发生第 1 层水化时的含水率即为残余含水率。用 4 种膨润土土水特征曲线试验数据, 分析探讨了考虑不同初始干密度和同一初始干密度下不同温度环境等因素对膨润土土水特征曲线的残余含水率影响。研究表明, 膨润土的残余含水率与膨润土的比表面积、水膜厚度以及水膜密度成正比, 而与膨润土的初始干密度和温度无关。通过实测和计算残余含水率比较, 验证了该公式的合理性。

关键词: 膨润土; 土水特征曲线; 残余含水率; 水化

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)07-1211-07

作者简介: 朱赞成(1977-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事非饱和土等方面的科研和教学。E-mail: zancheng_77@163.com。

Determination of residual water content in SWCC based on microscopic structure of bentonite

ZHU Zan-cheng^{1,2}, SUN De-an¹, WANG Xiao-gang², CHEN Fen², WANG Gu-ping³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture,

Taizhou University, Taizhou 318000, China; 3. School of Physics and Electronic Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, China)

Abstract: According to the theory of the interlamellar hydration microscopic structure of montmorillonite proposed by Forslind, a formula for calculating the water content of montmorillonite is established after its hydration. When the montmorillonite absorbs only monolayer of water molecules, the water content is considered as the residual water content. The influences of the initial dry density and temperature on the residual water content of bentonite are investigated by using measured soil-water characteristic curves of four different kinds of bentonites. The results show that the residual water content of bentonite is proportional to the specific surface area of bentonite, the thickness and the density of hydrated layer of water molecules, regardless of the initial density and temperature. The comparison between the measured and predicted residual water contents shows that the proposed formula is reasonable.

Key words: bentonite; soil-water characteristic curve; residual water content; hydration

0 引 言

膨润土因具有高吸水性、较大的膨胀性、极低的渗透性及具有强吸附核素离子性能, 被国际上众多国家首选为核废料地质处置库中工程屏障的缓冲或回填材料。基于矿床储量等因素确定了内蒙古高庙子膨润土为中国核废料处置库的缓冲/回填材料。因核废料的核素衰变早期放热、后期冷却, 处置库中的膨润土主要经历由高温干燥—常温湿润交替过程, 在此过程中, 膨润土中的吸力将随土体温度和含水率变化而发生相应地改变, 必然会引起土体渗透性及骨架应力的改变。位于天然围岩与核废物罐之间的缓冲材料一方面要缓和处置库围岩压力对核废物罐的作用, 同时又能通过自身吸水后体积膨胀, 以堵塞周围介质中的孔隙, 有

效地阻滞核废物罐泄漏放射性物质向周围环境的迁移。因此, 对非饱和膨润土进行土水特性研究, 有着重要的理论和工程意义。

目前国内外众多学者对核废料处置库缓冲/回填材料的土水特性进行了大量研究。Romero 等^[1]、Villar 等^[2]、Hoffmann 等^[3]和 Jacinto 等^[4]利用饱和盐溶液蒸汽平衡法和轴平移技术分别对 Boom、FEBEX、FEBEX 和 MX-80 三种膨润土进行了土水特性研究。结果表明, 同一初始干密度下, 随着温度的升高持水性下降, 而在高吸力时温度对持水性影响不大。在同温度下不

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272194); 浙江省公益性技术应用研究计划项目(2014C37085); 浙江省自然科学基金项目(Y15E080014)
收稿日期: 2014-07-23

同初始干密度膨润土在高吸力阶段的持水曲线几乎重合。

叶为民等^[5]、孙德安等^[6]、张虎元等^[7]、秦冰等^[8]、Ye 等^[9]等众多学者对高庙子膨润土进行了土水特性研究。

从以上众多学者用饱和盐溶液蒸汽平衡法、滤纸法等得到的膨润土土水特性宏观试验结果中,可以发现一个现象,当吸力较高时,温度、干密度对膨润土的持水性影响很小。不同密度或不同温度下的土水特征曲线在高吸力区的某一特定点开始发生交汇(恒体积下吸湿时)或发生相交(自由状态下吸湿/脱湿时)。本文后面将证明这一特定点就是残余含水率的点。

Brooks 等^[10]曾将土体的吸力达到无限值时的含水率定义为残余含水率; Van Genuchten^[11]认为当土体的吸力为 1500 kPa 对应的含水率为残余含水率。这些不正确定义是由于受到当时的试验技术限制所致。Luckner 等^[12]将残余含水率定义为土体孔隙中液体流动与膜流动的分界线。残余含水率一般是指土体在残余状态下水是不连续的,土体表面的水膜被空气和土体所包围,即气连通、水不连通状态下的含水率为残余含水率(Fairbridge 等^[13], Vanapalli 等^[14])。

Fleureau 等^[15]分别对 Jossigny 粉土、FoCa 膨润土的泥浆样和压实样进行了土水特性研究,得到了非膨胀性土和膨胀性土的土水特征曲线。从非膨胀土的土水特征曲线可以看出,残余含水率大致等于缩限,即体积不再收缩时试样的含水率为残余含水率;而从膨胀性土的土水特征曲线可看出,膨胀土的缩限为该膨胀土的进气值所对应的含水率。Zhang^[16]提到非膨胀性土土水特征曲线中的残余体积含水率为常数,即随着吸力的增加,体积含水率基本不变,此含水率即为残余体积含水率。而膨胀性土土水特征曲线可分为 2 部分,当含水率低于临界含水率时,膨胀土中的水处于膜流动状态,临界含水率与残余含水率很接近。Lu 等^[17]认为当土颗粒表面上覆盖的水膜厚度超过 3 层水分子,且孔隙水已形成弯月形水膜时,水合力将迅速地消失,毛细作用成为吸力的主导方式。Zheng 等^[18]采用 Monte Carlo 方法模拟了几种蒙脱石吸附 1~3 层水化膜后的膨胀和体缩过程,发现一旦达到临界含水率,蒙脱石发生体缩至 1 层水膜。Kozaki 等^[19]利用蒙脱石晶层间距推导了压实蒙脱石中孔隙水的总含水率。

本文利用 Forslind 的蒙脱石吸附水膜模型进行微观结构分析,推导出了蒙脱石吸附水膜后的重力含水率理论公式。当膨润土仅含有 1 层水膜时,对应的含水率即为膨润土高吸力区汇合点(或相交点)的重力含水率,且该点为膨润土的残余含水率。并用国外的 FEBEX 钙基膨润土和 MX-80 钠基膨润土及国内的高

庙子钙基和钠基膨润土等 4 种膨润土的土水特征曲线试验数据验证该公式,为膨润土测试土水特征曲线的残余含水率提供理论依据和分析方法。

1 蒙脱石吸水机理

图 1 为 McQueen 等^[20]根据经验数据提出的一个用于描述常见形状和特征的具有指导意义的概念模型。由图可知,该模型表明任何 SWCC(土水特征曲线)都大致由 3 条位于半对数坐标系中的理想直线段所组成。吸力可分为牢固吸附区、水膜吸附区和毛细吸附区 3 个区域。而牢固吸附区所吸附水量的多少与土粒比表面积、交换阳离子的类型及土粒表面电荷密度等因素成一定的函数关系。

极大多数蒙脱石是由各种含有铝硅酸盐矿物的火成岩、沉积岩和变质岩经风化作用,热液蚀变或沉积变质作用等生成的。在风化条件下,蒙脱石在 CaCO_3 型水的长期作用下,发生 Ca^{2+} 和 Na^+ 交替,形成上部蒙脱石钙饱和,下部形成蒙脱石钠饱和。在变质过程中,发生了蒙脱石八面体中的 Al^{3+} 或四面体中的 Si^{4+} 往往部分(或全部)被其它阳离子置换。蒙脱石晶格中由于异价离子置换而产生的负电荷具有吸附阳离子和极性有机分子的能力。因膨润土中的蒙脱石的这种离子置换,为了达到电位平衡,使得膨润土较其它非膨胀土具有很大的阳离子交换能力,因而能吸附较自重数十倍的水。因蒙脱石晶层间距极小(在 10^{-10} m 级),在靠近蒙脱石颗粒附近的水与其发生水化反应,处于水膜吸附区和牢固吸附区,而非毛细作用区。

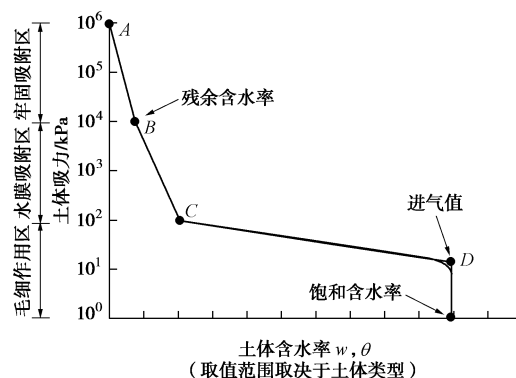


图 1 土水特征曲线的概念模型^[20]

Fig. 1 Conceptual model for general behaviour of soil-water characteristic curve

图 2 为 Bradbury 等^[21]提出的压实膨润土中 3 种状态水筒图。由图可看出,图中蒙脱石晶层薄片(flake)间的孔隙(interlamellar space)中的水为层间水,团聚间的孔隙内水为双电层水和自由水(毛细水)。由图 1 可知,从绝对干燥状态开始吸湿,最先吸湿的是牢固吸附区的水,然后是水膜吸附区的水,最后是毛细

作用区的水。所以, 对于膨润土的吸湿过程, 最先吸湿的是层间水, 然后双电层水, 最后是毛细水, 脱湿过程则反之。

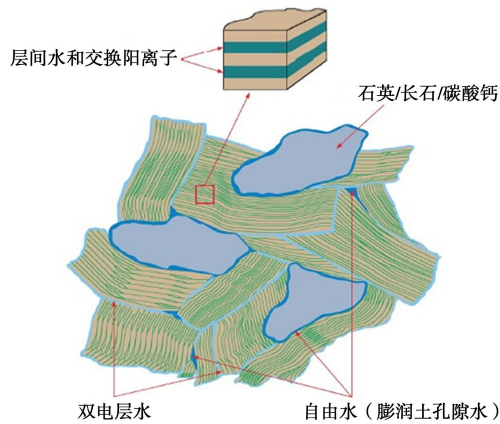


图 2 压实膨润土中层间水、双电层水和自由水简图^[21]

Fig. 2 Schematic representation of interlayer water, double-layer water and “free water” in compacted bentonite

图 3 为 Forslind^[22]提出的蒙脱石与吸附水膜之间的模型, 图 3 (a) 是发生第 1 层水化的蒙脱石晶层与水膜认为蒙脱石表面吸附的水膜结构图, 图 3 (b) 是发生 2 层水化的蒙脱石晶层与水膜结构图, 图 3 (c) 是发生 3 层水化的蒙脱石晶层与水膜的结构图, 可以近似为冰结构模型。图中间为吸附的水膜, 即为图 2 中的层间水, 上下为蒙脱石晶层薄片。

由图 3 可知, 膨润土重力含水率可以由下式得出:

$$w_i = m_w \times 100 / m_s, \quad (1)$$

式中, w_i 为膨润土的重力含水率 (%), m_w 为吸附水膜质量 (g), m_s 为膨润土颗粒质量 (g)。

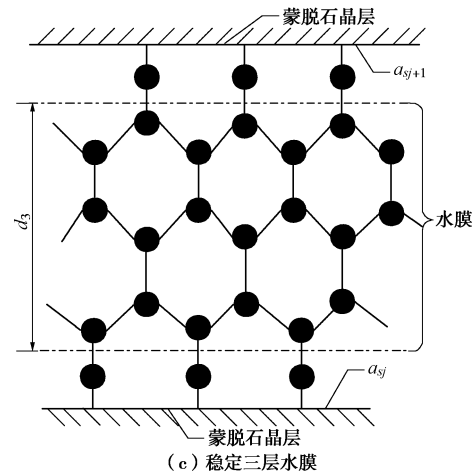
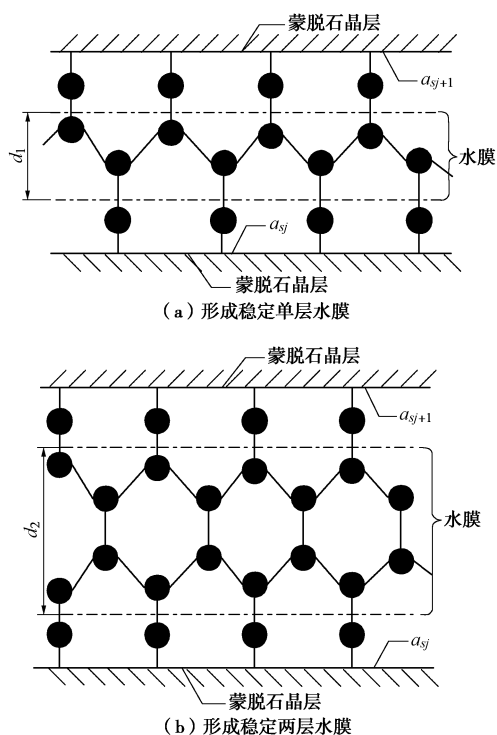


图 3 蒙脱石与层间水模型^[22]

Fig. 3 Model of interlamellar hydration in montmorillonite^[22]

而吸附水膜的质量可由下式得到

$$m_w = V_w \cdot \rho_w, \quad (2)$$

式中, V_w 为水膜体积 (m^3), ρ_w 为水膜的密度 (g/cm^3)。

假设 $m_s = 1 \text{ g}$, 吸附水膜的体积按图 3 所示, 与蒙脱石颗粒的表面积与吸附水膜厚度决定,

$$V_w = \sum_{j=1}^n a_{sj} d_i / 2, \quad (3)$$

式中, a_{sj} 为第 j 块蒙脱石晶面面积 (m^2/g), $\sum_{j=1}^n a_{sj} = a_s$, 比表面积由乙二醇乙醚法 (EGME) 测得。 d_i 为第 i 层水膜厚度 (\AA)。

将式 (2)、(3) 代入式 (1) 中得

$$w_i = a_s \cdot d_i \cdot \rho_w / 2 \times 100. \quad (4)$$

当膨润土只吸附 1 层水膜时, 即为膨润土的残余含水率,

$$w_1 = a_s \cdot d_1 \cdot \rho_w / 2 \times 100. \quad (5)$$

Grim^[23]提出了蒙脱石分子结构模型, 如图 4 所示。就是以蒙脱石晶体中心为原点建立一个坐标系, 这个坐标系一般由 3 根晶轴 x , y , z 轴 (也可以用 a , b , c 轴表示), x 轴在前后, 正端朝前; y 轴在左右方向, 正端朝右; z 轴在上下方向, 正端朝上。 x , y , z 3 根晶轴方向的行列上的节点间距分别表示为 a_0 , b_0 , c_0 , 称为轴长。吸附的水膜即处于 c 轴方向的蒙脱石晶体之间。表 1 为 Pusch 等^[24]用 XRD 试验 (X 射线衍射) 测得不同离子类型蒙脱石的层间水化层数及相应的厚度。从表 1 可以看出, Na 基蒙脱石完全干燥时其分子的 c 轴厚度为 9.62\AA , 发生第 1 层水化时, 蒙脱石 c 轴总厚度为 12.65\AA , 发生第 2 层水化时分子 c 轴总厚度为 15.88\AA , 发生第 3 层水化时, 分子 c 轴总厚度为 19.36\AA 。Ca 基蒙脱石完全干燥时其分子的 c 轴厚度为 9.61\AA , 发生第 1 层水化时, 蒙脱石 c 轴总厚度为

12.50Å,发生第 2 层水化时分子 c 轴总厚度为 15.25Å。

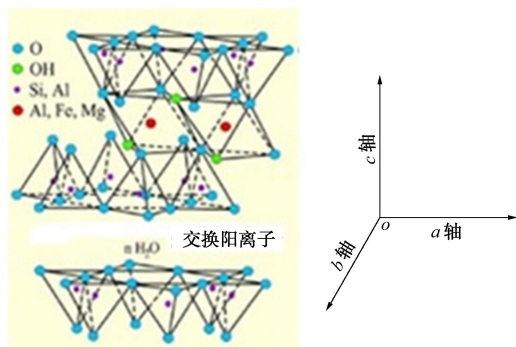


图 4 蒙脱石结构图^[23]

Fig. 4 Schematic diagram of structure of montmorillonite

表 1 蒙脱石交换阳离子类型的层间水化层数及厚度^[24]

Table 1 Number and thickness in Å of interlamellar hydrated layers for differennt exchangeable cations in montmorillontie

阳离子类型	0 水化	第 1 层	第 2 层	第 3 层
Mg(001)	9.52	3.00	3.03	3.05
Ca(001)	9.61	2.89	2.75	—
Na(001)	9.62	3.03	3.23	3.48
K(001)	10.08	2.42	3.73	—

注：表内数值单位均为Å。

2 试验验证

根据蒙脱石的差热分析可知，在 80℃~250℃之间出现第一个吸热谷，脱去层间水和吸附水。第 2 个吸热谷出现于 600℃~700℃之间，脱去结构水。第 3 个吸热谷在 800℃~935℃，晶格完全破坏。其后，紧接着—放热峰，有新相尖晶石和石英生成^[25]。为了验证表 1 中数据，本文将各 10 g 高庙子钙基和钠基膨润土、Kunigel V1 钠基膨润土放入 600℃烘箱内烘 6 h，冷却后，发现高庙子钙基和钠基膨润土由烘前的灰白色变成了红色，而 Kunigel V1 则没发生变色，见图 5 所示，再用 XRD 测试其物相，扫描角度 θ 为 3°~40°。



图 5 烘 600℃后的 3 种膨润土

Fig. 5 Three kinds of bentonites after 600℃

图 6 为 3 种膨润土 600℃烘 6 h 后的 XRD 图，从图 6 (a) 中可看出，GMZ-Ca 烘 6 h 后测得在 $2\theta=9.17^\circ$ 时，对应的 d 值为 9.63Å；图 6 (b) 中可以看出，Kunigel-Na 烘 6 h 后测得在 $2\theta=9.11^\circ$ 时，对应的 d 值为 9.69Å；图 6 (c) 中可看出，GMZ02-Na 烘

后在 $2\theta=9.15^\circ$ 时，对应的 d 值为 9.65Å。与表 1 中的 Na-和 Ca-对应的 0 水化的蒙脱石 c 轴的 d 值很接近。图 5 (a) 中的蒙脱石对应强度峰值较图 5 (b) 和 5 (c) 小，是由于图 5 (a) 的 x 射线狭缝较图 5 (b) 和 5 (c) 小，导致图 5 (a) 峰值强度较弱点，但峰值时的 2θ 值不会变化；图 5 (b) 的蒙脱石对应强度峰值较图 5 (c) 小，是由于 Kunigel-V1 中的蒙脱石含量较 GMZ02-Na 膨润土中的蒙脱石含量低的缘故。

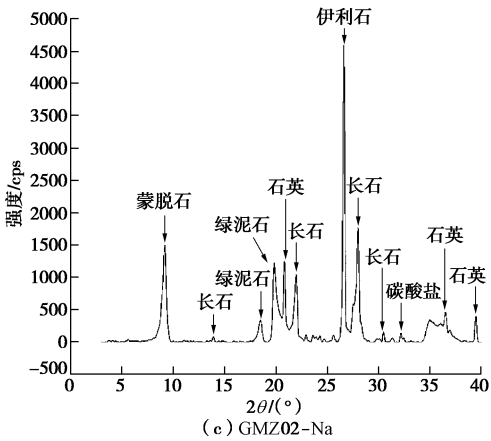
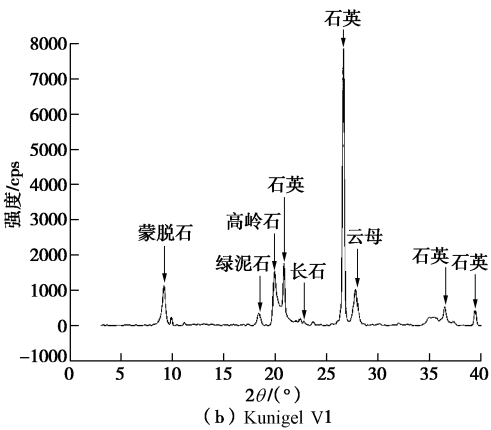
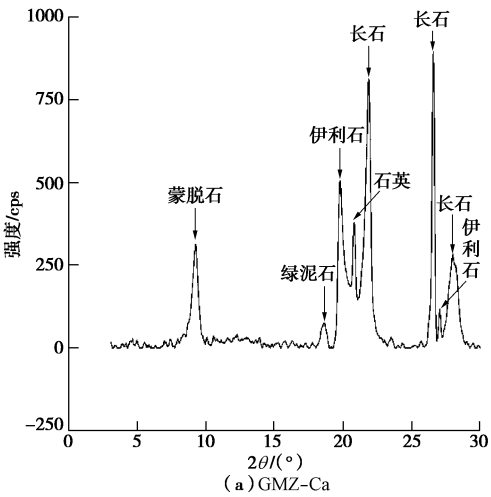


图 6 3 种膨润土 600℃后去除背底的 XRD

Fig. 6 X-ray diffraction profiles of background subtracted for three bentonites dried at 600℃

本文选择了 4 种膨润土的土水特征曲线数据来验证式 (5) 的正确性, 其物理化学属性见表 2 所示。

众所周知, 土中水处于固态、液态和气态。液态水由可分为结合水和自由水, 而结合水又可分为强结合水和弱结合水。Hawkins 等^[26]研究得到钠基蒙脱石层间结合水膜的密度约为 1.05 g/cm³。Derjaguin 等^[27]在室温下研究得到蒙脱石层间结合水膜的密度比自由水的密度高约 2%。Villar 等^[2]对初始干密度 1.60 g/cm³ FEBEX 膨润土的进行了膨胀力试验研究, 发现试验后的层间结合水膜密度约为 1.05~1.22 g/cm³。Jacinto 等^[28]研究了初始干密度 1.60 g/cm³ 的 MX-80 膨润土发现层间结合水膜的密度从 1.09~1.17 g/cm³, 随着吸力的升高, 结合水膜密度逐渐增大。当吸力值超过 10 MPa 后, 初始干密度对水膜密度的影响甚微几乎可以忽略不计。

表 2 4 种膨润土物理化学属性参数和残余含水率

Table 2 Physico-chemical properties and residual gravimetric water contents of fours bentonites				
物化属性	FEBEX ^[29]	MX-80 ^[29]	GMZ- Na ^[30]	GMZ-Ca
阳离子类型	Ca-Mg	Na	Na	Ca
比重	2.70	2.82	2.66	2.725 ^[31]
液限/%	102	526	313	99 ^[31]
塑限/%	53	46	38	41 ^[31]
塑性指数	49	480	275	58 ^[31]
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	725±47	512	570	617 ^[30]
阳离子交换/(meq·g ⁻¹)	0.96~1.02	0.74	0.773	0.83 ^[30]
Na ⁺ /(meq·g ⁻¹)	0.24~0.27	0.61	0.347	0.016 ^[30]
Ca ²⁺ /(meq·g ⁻¹)	0.35~0.42	0.10	0.229	0.529 ^[30]
Mg ²⁺ /(meq·g ⁻¹)	0.31~0.32	0.03	0.115	0.278 ^[30]
K ⁺ /(meq·g ⁻¹)	0.002~0.003	—	0.006	0.0034 ^[30]
实验室环境含水率/%	13.7±1.3	8~11	9.7~11.3	8.6~11.6
蒙脱石含量/%	92±3	65~82	74	73~82 ^[30]
计算残余含水率/%	12.05	8.92	9.93	9.4
试验残余含水率/%	13.4	10.7	10.6	8.3
两者差值/%	1.35	1.78	0.67	1.1

注: 比表面积为乙二醇乙醚法测得。

根据表 1,2 中的 4 种膨润土的阳离子交换类型的第 1 层水化膜厚度和比表面积, 代入式 (5) 中, 可计算得到这 4 种不同阳离子交换类型的膨润土的残余含水率, 见表 2 所示。

图 7 为采用 Whatman 42 号滤纸法测得初始干密度为 1.35 g/cm³ 高庙子钙基膨润土在 20℃, 40℃, 60℃, 80℃下的土水特征曲线。由图可知, 随着吸力的增大, 高庙子钙基膨润土的持水性逐渐减小, 当含水率下降约至 8.3%, 吸力增至约为 135.5 MPa 后, 不同温度下的持水曲线在该点后汇合, 即此时温度对该膨润土的持水性影响甚微, 可认为该点对应的含水率为残余含水率。水膜密度 ρ_w 取 1.05 g/cm³, 与用式 (5) 计算得到的残余含水率为 9.4%。该值与 8.3%对比, 两者差值约为 1.1%。

Ye 等^[9]采用饱和盐溶液蒸汽平衡法, 在 20℃, 40℃,

60℃下, 测得初始含水率为 10.65%及干密度 1.70 g/cm³ 时高庙子钠基膨润土的土水特征曲线, 如图 8 所示。由图可知, 随着温度的升高, 高庙子的持水性逐渐减小, 当含水率下降约至 10.6%, 吸力增至约为 126.2 MPa 后, 不同温度下的持水曲线在该点后汇合, 10.6%可认为是残余含水率。温度对高吸力的持水性影响甚微。水膜密度 ρ_w 取平均值 1.15 g/cm³, 用式 (5) 计算得到的残余含水率为 9.93%。该值与实测含残余含水率 (10.6%) 对比, 两者差值约为 0.67%。

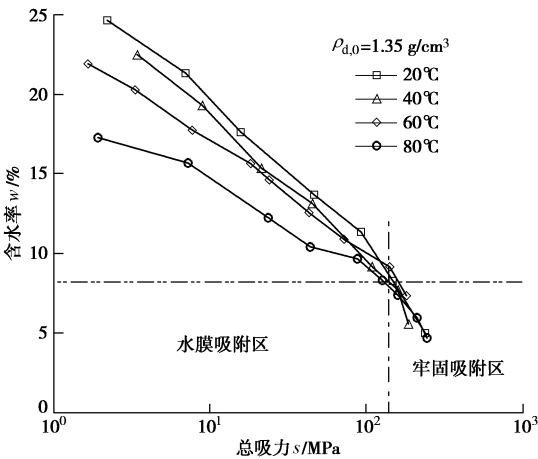


图 7 用 Whatman No.42 滤纸测得不同温度下高庙子钙基膨润土土水特征曲线

Fig. 7 Soil-water characteristic curves of GMZ Ca-bentonite at different temperatures using Whatman No. 42 filter paper

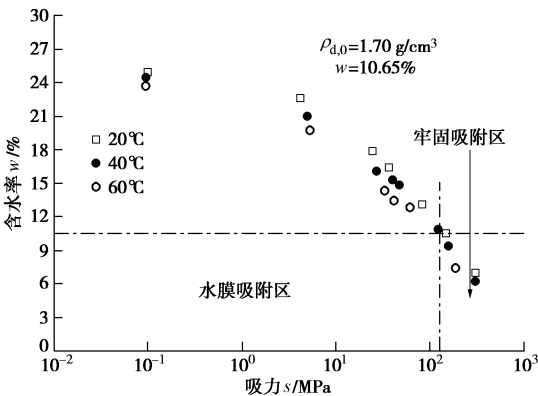


图 8 GMZ 钠基膨润土不同温度下 SWCC (数据来自文献[9])

Fig. 8 Soil-water characteristic curves of confined specimens at different temperatures

Hoffmann 等^[3]利用饱和盐溶液蒸汽平衡法和轴平移技术测得初始干密度为 1.3, 1.5, 1.9 g/cm³ 时 FEBEX 钙基膨润土的土水特征曲线, 如图 9 所示。先用饱和盐溶液蒸汽平衡法将试样从初始吸力为 300 MPa 开始吸湿至 3 MPa, 然后再用轴平移技术将试样从吸力 3 MPa 降至 0 MPa。由图可知, 随着吸力的升高, FEBEX 钙基膨润土的持水性也逐渐减小, 当含水率下降约至 13.4%, 吸力增至约为 85.6 MPa 后, 不同干密度下的持水曲线在该点后开始汇合, 干密度对大于该吸力范

围的土水特征曲线影响甚微。水膜密度 ρ_w 取平均值 1.15 g/cm^3 , 用式(5)计算得到的残余含水率为 12.5%。该值与实测残余含水率 (13.4%) 对比, 两者差值约为 1.35%。

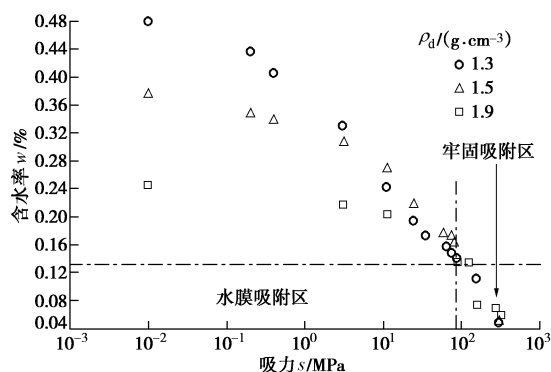


图 9 不同初始干密度 FEBEX 膨润土 SWCC^[3]

Fig. 9 Soil-water characteristic curves of confined specimens at different dry densities

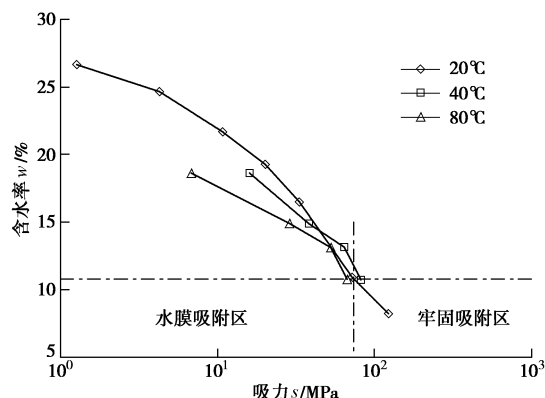


图 10 不同温度下 MX-80 膨润土 SWCC^[4]

Fig. 10 Soil-water characteristic curves of confined specimens at different temperatures

Jacinto 等^[4]利用饱和盐溶液蒸汽平衡法, 在 20°C , 40°C , 60°C , 80°C , 100°C 下测得初始干密度 1.6 g/cm^3 的 MX-80 钠基膨润土的土水特征曲线, 如图 10 所示。由图可知, 随着温度的升高, 该膨润土的持水性也逐渐减小, 当含水率下降约至 10.7%, 吸力增至约为 73.3 MPa 后, 不同温度下的土水特征曲线基本一致, 温度对大于该吸力范围的土水特征曲线影响甚微。水膜密度 ρ_w 取平均值 1.15 g/cm^3 , 用式(5)计算得到的残余含水率为 8.93%。该值与实测残余含水率 (10.7%) 对比, 两者差值约为 1.78%。

Jacinto 等^[28]发现当吸力值超过 10 MPa 后, 初始干密度对水膜密度的影响甚微, 几乎可以忽略不计。因为文中 4 种膨润土由式(5)得到的 1 层水膜的残余含水率, 对应的吸力很高, 已经远超过了 10 MPa, 所以, 当蒙脱石只含 1 层水膜时, 其残余含水率与试样的初始干密度无关。

3 结 论

本文通过对蒙脱石水化后蒙脱石晶层与水化水膜微观结构进行分析, 推导得到了蒙脱石水化后的残余含水率的计算公式, 并通过试验数据对该公式进行验证分析, 可得到如下结论:

(1) 膨润土的残余含水率与该膨润土的比表面积、水膜厚度以及水膜密度成正比。

(2) 膨润土的残余含水率与试样干密度和所受的温度无关。

(3) 通过 4 种膨润土水特征曲线试验数据分析, 验证了该残余含水率计算公式的合理性, 为膨润土的持水特性提供了有效分析方法。

参考文献:

- [1] ROMERO E, GENS A, LLORET A. Suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 65 - 81.
- [2] VILLAR M V, LLORET A. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2004, **26**: 337 - 350.
- [3] HOFFMANN C, ALONSO E E, ROMERO E. Hydro-mechanical behaviour of bentonite pellet mixtures[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, **32**: 832 - 849.
- [4] JACINTO A C, VILLAR M V, GÓMEZ-ESPINA R, et al. Adaptation of the van Genuchten expression to the effects of temperature and density for compacted bentonites[J]. Applied Clay Science, 2009, **42**: 575 - 582.
- [5] 叶为民, 钱丽鑫, 陈 宝, 等. 高压实高庙子膨润土的微观结构特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, **37**(1): 31 - 35. (YE Wei-min, QIAN Li-xin, CHEN Bao, et al. Characteristics of micro-structure of densely compacted gaomiaozi bentonite [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, **37**(1): 31 - 35. (in Chinese))
- [6] 孙德安, 孟德林, 孙文静, 等. 两种膨润土的土水特征曲线[J]. 岩土力学, 2011, **32**(4): 1293 - 1298. (SUN De-an, MENG De-lin, SUN Wen-jing, et al. Soil-water characteristic curves of two bentonites[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 1293-1298. (in Chinese))
- [7] 张虎元, 张 明, 崔素丽, 等. 混合型缓冲回填材料土水特征曲线测试与修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(2): 382 - 390. (ZHANG Hu-yuan, ZHANG Ming, CUI Su-li, et al. Determination and modification of soil-water characteristic curves of bentonite-sand mixtures as high-level waste backfill/buffer material[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering, 2011, **30**(2): 382 – 390. (in Chinese))
- [8] 秦冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **34**(10): 1877 – 1886. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, SUN Fa-xin, et al. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **34**(10): 1877 – 1886. (in Chinese))
- [9] YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Temperature effects on the unsaturated permeability of the densely compacted GMZ01 bentonite under confined conditions[J]. Engineering Geology, 2012, **126**: 1 – 7.
- [10] BROOKS R, COREY A. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Fort Collins, Hydrology Paper, 1964.
- [11] VAN GENUCHTEN M T H. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**: 892 – 898.
- [12] LUCKNER L, VAN GENUCHTEN M T H, NEILSEN D R. A consistent set of parametric models for the flow of water and air as immiscible fluids in the subsurface[J]. Water Resources Research, 1989, **25**: 2187 – 2189.
- [13] FAIRBRIDGE R, FINKL C. The encyclopedia of soil science part 1[M]. Stroudsburg: Hutchinson and Ross Inc. 1979.
- [14] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**: 379 – 392.
- [15] FLEUREAU Jean-Marie, VEBRUGGE Jean-Claude, HUERGO P J, et al. Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**: 1341 – 1357.
- [16] ZHANG F. Soil water retention and relative permeability for full range of saturation[R]. Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
- [17] LU N, GODT J W. Hillslope hydrology and stability[M]. London: Cambridge University Press, 2013.
- [18] ZHENG Y, ZAOU I A, SHAHROUR A. A theoretical study of swelling and shrinking of hydrated Wyoming montmorillonite[J]. Applied Clay Science, 2011, **51**: 177 – 181.
- [19] KOZAKI T, INADA K, SATO S, et al. Diffusion mechanism of chloride ions in sodium montmorillonite[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001, **47**: 159 – 170.
- [20] MCQUEEN I S, MILLER R F. Approximating soil moisture characteristics from limited data: empirical evidence and tentative model[J]. Water Research, 1974, **10**(3): 521 – 527.
- [21] BRADBURY M H, BAEYENS B. Pore-water chemistry in compacted re-saturated MX-80 bentonite[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, **61**: 329 – 338.
- [22] FORSLIND E. A theory of water[R]. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Royal Institute of Technology, Stockholm, 1952, 16: 43.
- [23] GRIM R E. Clay mineralogy[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Inc, 1968.
- [24] PUSCH R, KARNLAND O, Hökmark H. GMM — A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays[R]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 1990.
- [25] 赵珊茸. 结晶学及矿物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (ZHAO Shan-rong. Crystallography and mineralogy[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.(in Chinese))
- [26] HAWKIS R K, EGELSTAFF P A. Interfacial water structure in montmorillonite from neutron diffraction experiments[J]. Clays and Clay Minerals, 1980, **28**(1): 19 – 28.
- [27] DERJAGUIN B V, KARASEV V V, KHROMOVA E N. Thermal expansion of water in fine pores[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1986, **109**(2): 586 – 587.
- [28] JACINTO A C, VILLAR M V, LEDESMA A. Influence of water density on the water-retention curve of expansive clays[J]. Géotechnique, 2012, **62**(8): 657 – 667.
- [29] VILLAR M V, Gómez-Espina R. Effect of temperature on the water retention capacity of FEBEX and MX-80 bentonites[C]// 1st European Conference on Unsaturated Soils: Advances in Geo-engineering. London, 2008: 257 – 262.
- [30] 刘月妙, 温志坚. 用于高放射性废物深地质处置的黏土材料研究[J]. 矿物岩石, 2003, **23**(4): 42 – 45. (LIU Yue-miao, WEN Zhi-jian. Study on clay-based materials for the repository of high level radioactive waste[J]. Journal Mineral Petrol, 2003, **23**(4): 42 – 45. (in Chinese))
- [31] SUN D A, SUN W J. Swelling characteristics of GMZ bentonites and its prediction[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, **6**(2): 103 – 109.