

考虑微观结构的非饱和渗透系数计算公式

牛文杰^{1,2}, 叶为民^{1,2}, 陈宝^{1,2}, 钱丽鑫^{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:分维理论是预测非饱和渗透系数的一种常用方法。在对有侧限条件下高庙子膨润土的非饱和渗透系数的试验结果分析后,发现分维理论并不适用,其缺陷在于不能够反映膨润土这种特殊粘土在水化过程中的微观结构变化。因为膨润土是一种纳米材料,其小孔隙和大孔隙分布在水化过程中都会发生变化,而一般性粘土和砂土没有这种特殊的物理化学特性。结合 Kozeny - Carman 关于多孔介质的半经验公式,提出了半经验 - 半理论的考虑微观结构的膨润土的非饱和渗透系数计算公式。在对高庙子膨润土的扫描电镜试验和压汞试验资料分析的基础上,定性验证了所提出公式的正确性。

关键词:膨润土;分维理论;微观结构变化;非饱和渗透系数;侧限条件

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2009)06 - 0034 - 06

The Equations of Unsaturated Permeability Considering the Microstructure/NIU Wen-jie^{1,2}, YE Wei-min^{1,2}, CHEN Bao^{1,2}, QIAN Li-xin^{1,2} (1. The Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The fractal theory is a common method to predict the unsaturated permeability. But the theory can not be used in the computing of unsaturated permeability of Gaomiaozi bentonite in confined condition. The microstructure of bentonite changed a lot in the saturation process, and this phenomenon can not be reflected in the equations of fractal theory. The micro pores and macro pores of bentonite changed a lot in the saturation process which is different with the common sand or clay. With the consideration of Kozeny-Carman equation, a semiempirical-semitheoretical unsaturated permeability equation considering the microstructure of bentonite has been proposed based on the SEM test and MIP test of Gaomiaozi bentonite. The new equation was used in the analysis of unsaturated permeability of Gaomiaozi bentonite in the confined condition.

Key words: bentonite; fractal theory; microstructure change; equations of unsaturated permeability; confined condition

0 引言

在核废料处置工程中,需要对装填核废料的包装容器设置屏障以阻隔核素和水分的迁移,压实土通常被作为密封材料^[1]。膨润土最重要的性质之一就是极低的渗透特性($10^{-9} \sim 10^{-13}$ cm/s; JNC, 2000)和膨胀的性质^[2]。因此,压实膨润土和砂 - 膨润土混合物被用来作为核废料的缓冲和回填材料越来越受到关注^[3]。

膨润土作为一种非饱和土,吸力、相对渗透系数和土 - 水曲线对非饱和渗透系数的影响越来越得到关注,考虑含水量变化的非饱和渗透系数计算公式的研究主要集中在: Averjanov 在 1950 年提出的考虑含水量变化的渗透系数经验关系式和 Campbell 在 1973 年提出的渗透系数经验计算公式^[4]。另外, Mualem 在 1976 年提出了适用于非饱和粉质粘土的计算模型公式^[5]。考虑饱和度变化的非饱和渗透系数计算公式的研究体现在 Brooks 和 Corey 描述的

饱和度变化下的相对渗透系数计算公式。另外, Van Genuchten 在 1980 年提出了描述液体的相对渗透系数 $k_{rel}^l(S^l)$ 和有效饱和度 S_{eff} 之间的关系式。国内对非饱和土的渗透系数计算的研究,表现在考虑有效饱和度(徐永福等, 2005)^[6]和吸力^[7](孙大松等, 2004)修正的非饱和渗透系数计算公式上。

对于膨润土这种特殊的粘土,上述公式已经不能够描述微观结构的变化对渗透系数的影响,主要存在以下几方面问题:

(1) 膨润土的微结构和孔隙结构对它的渗透系数有非常大的影响(Pusch 等, 1990);

(2) 粘土层的层间孔隙几乎不允许流体通过,只有微孔隙和宏孔隙是流体流通的主要通道(Pusch 等, 1990; Lchikawa 等, 1990);

(3) 膨润土水化过程中,一部分水被吸附到颗粒的表面,一部分水进入了层间,孔隙度和有效渗流路径发生了变化^[4];

收稿日期: 2008 - 12 - 11

作者简介: 牛文杰(1982 -),男(汉族),河南漯河人,同济大学博士研究生,地质工程专业,从事岩土工程研究工作,上海市四平路 1239 号同济大学博士 3 号楼 203 - 2 室, nwj1982@sohu.com, tjengineer1982@sina.com。

(4)当膨润土进一步变湿时,孔隙分布会有变化^[8];

(5)膨润土的渗透系数随干密度的增加而降低,其主要原因在于:当密度增加时,孔隙率和孔隙孔径相应减小,同时许多孔隙成为盲孔,这将导致水的流动被阻碍^[9]。

本文通过对侧限条件下高压实膨润土室内渗透实验和微结构实验的结果分析,讨论了一般性非饱和和土渗透系数计算公式的适用条件,指出了微结构是高压实膨润土这种特殊粘土渗透系数的主要控制因素,应强调孔隙率和颗粒直径等微结构参数对于膨润土渗透系数计算的重要性,建议采用同时考虑孔隙率和颗粒直径等微结构参数及相对渗透系数的计算公式。

1 微结构和膨润土的非饱和渗透系数

由上述分析可见,对非饱和渗透系数的早期研究主要是集中在对一般非饱和渗透系数的研究上。因此,下面主要分析对膨润土这种特殊的膨胀性粘土的非饱和渗透系数的研究。

Towhata等(1993)发现温度增加时,渗透系数有增高的趋势。他们认为当温度升高,吸附水退化进入大量纯水时,结果是水流的通道尺度增加,因此对于液相的固有渗透系数增加了。Romero等(2001)认为温度除了改变动力粘滞度,热化学效应改变了粘土的结构和孔隙分布因而改变了渗透系数。

C. Imbert等(2005)认为,膨润土水化过程中,膨润土的含水量和毛细压力都变化了。一部分水被吸附到颗粒的表面。一部分水进入了层间。孔隙度也发生了变化。有效渗流路径也发生了变化。A. Lloret(2006)发现,当膨润土进一步变湿时,孔隙分布会有变化,隐藏的和潜在的集体间孔隙模式会系统性地出现,但是粒状的孔隙尺寸会减小。

Satoru Suzuki(2005)分析了膨润土水化过程中微结构的变化:在水化第二阶段到第三阶段,大厚度的层叠体可以裂开成较薄的层数较少的一些层叠体,并且层间距离保持常数。较薄的层叠体间的微孔隙一般比层间孔隙大,导致可以观察到的集体膨胀。因此,集体膨胀被认为是3个过程:水星的膨胀,层间的双电层膨胀和层叠体的裂开,见图1。

膨润土的微结构和孔隙结构对它的渗透系数有非常大的影响(Pusch等,1990)。粘土层的层间孔隙几乎不允许流体通过,只有微孔隙和宏孔隙是流

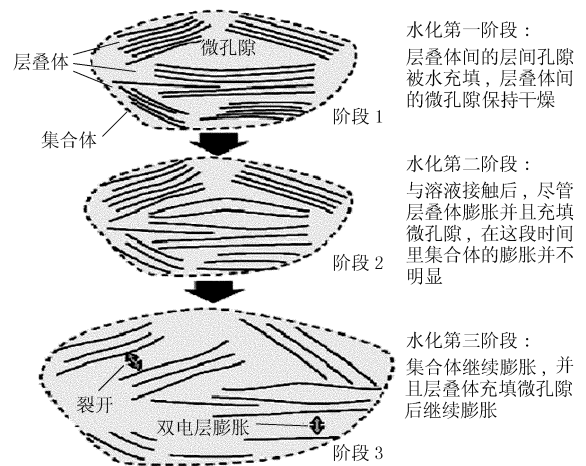


图1 膨润土微结构变化图

体流通的主要通道(Pusch等,1990;Lchikawa等,1990)。渗透系数的增加因此主要归功于集体中层叠体间的微孔隙和集体间的宏孔隙。当集合体的膨胀受到接触溶液的盐分影响时,膨润土的微结构会作为盐分的函数而变化,可能会使渗透系数增加(Pusch等,1990;JNC,2000)。

M. V. Villar(2006)指出,当渗流液体的盐度降低时,有效孔隙度将减少是因为孔隙空间被结合水(DDL)占据,结合水的粘滞度比自由水的要高。对于蒙脱石含量很高的膨胀土,当电解液浓度增加时,粘土颗粒的膨胀压力将减小,流通孔道的尺寸增加了,因此固有渗透系数增加了,这将导致渗透系数的增加(Studds等,1998)。Satoru Suzuki(2005)认为,当接触盐溶液时,膨润土的渗透系数通常增加(Pusch等,1990;JNC,2000)。这是因为膨润土的微结构发生了变化,接触溶液的盐度决定了膨润土的膨胀。A. Lloret(2006)提出,流经液体的盐度的增加导致了粘土集合体的渗流收缩,并导致了很可能与固有渗透系数相关的宏结构的孔隙体积的变化。当膨润土的密度低时,盐水的渗透系数比消过电离的水的渗透系数增加的更加明显。Karlund等(1992)和Villar等(2003)在MX-80中发现水分盐度的增加会使渗透系数增加;Pusch(2001)在Friedland Ton粘土也发现同样的规律;Mata和Ledesma(2003)在花岗岩/Na膨润土混合物中也验证了上述规律的正确性。

刘月妙(2003)指出,渗透系数随干密度的增加而降低,其主要原因在于:

(1)密度增加,孔隙率减小,孔隙孔径也相应减小。孔隙水压力与自由水压力的压力差绝对值增大,孔隙水在土中保持得越牢固,即水越难流动,渗

透系数越低。

(2)孔径的弯曲度随密度的增大而增大,同时许多孔隙成为盲孔,使水难以在其中流动。

(3)粘土中有许多极小的颗粒,它们有可能在试样微小的孔隙中流动,由此也将造成部分通孔成为盲孔,从而阻碍水的流动。

M. V. Villar (2005) 发现可以通过经验公式把 FEBEX 粘土的蒸馏水的渗透系数和干密度联系起来,随着干密度段的不同,这种经验公式是不同的。Nachabe H. Mahmood (1995) 对 FEBEX 工程 (ENRE-SA, 1998) 做的模拟试验 (Madrid, Spain) 得到了渗透系数随干密度变化的关系式。压实膨润土的渗透系数随干密度的改变而变化,通常干密度增加时渗透系数减小 (W. J. Cho, 1999)。温度升高时,粘土孔隙壁上的吸附水退化了,导致有效孔隙度的增加 (Pusch, 1980), 渗透系数也增加了。

徐永福 (2005) 认为非饱和土的渗透性与土体孔隙的弯曲因子有关,而弯曲因子又直接与应力状态,土体吸力和土体结构有关。

Nachabe H. Mahmood (1995) 提到, Gardner's (Gardner, 1958) 的渗透函数的经验公式是:

$$K(h) = K_{sm} \exp(\alpha h) \quad (1)$$

式中: $h(L)$ ——土-水压力; α ——宏孔隙尺度的倒数,例如 $\alpha^{-1} = \lambda$; λ ——宏孔隙尺度; K_{sm} ——饱和渗透系数。

Mingliang Xie 等 (2003) 提出总的孔隙比 e_0 可以分为微孔隙比 e_m 和宏孔隙比 e_M , 因此有 $e_0 = e_m + e_M$ 。微孔隙中的水被认为是不可移动的。因此,固有渗透系数 k 是宏孔隙的函数,可以计算如下:

$$k = k(e_M) = k[e_M(S^1)] \quad (2)$$

Yasuaki Ichikawa (2004) 提到,当孔隙比 e 变化时,渗透系数发生了很大变化。

但是高压实膨润土这种特殊粘土的渗透特性与微结构的改变联系比较紧密。

干密度,压应力,水化,盐度,温度等会影响膨润土的微结构。当膨润土的微结构改变时,膨润土的有效过水断面会发生改变,因而膨润土的渗透系数会发生变化。

2 高庙子膨润土水化过程中的微结构变化

2.1 试样制备

压汞试验要求渗析试验或汽相法一经完成,立即将试样速冻干燥,以去除孔隙水。为此,首先将土样由渗析试验或汽相法试验装置中取出,迅速放入

-80℃的超低温冰箱中冷冻 24 h,以速冻至冰点,然后将冰冻试样在真空状态下通过升华去除水分。这一过程可消除由于气、水相之间弯液面引起的表面张力。并且,在理想状态下,这一处理过程可以将因土样失水而可能引起的土的微结构变化、并进而引起土体出现收缩的可能性降至最低。

2.2 试验装置和试验过程

本次试验所采用的压汞仪见图 2,最小注入孔径为 7~8 nm。压汞试验在真空状态下升华后开始。

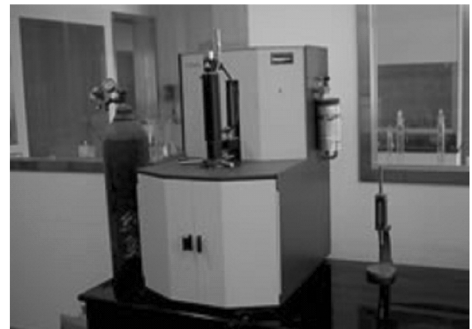


图2 试验采用的压汞仪

2.3 试验结果

有侧限条件下的高压实膨润土的压汞试验的结果见图 3 和图 4。

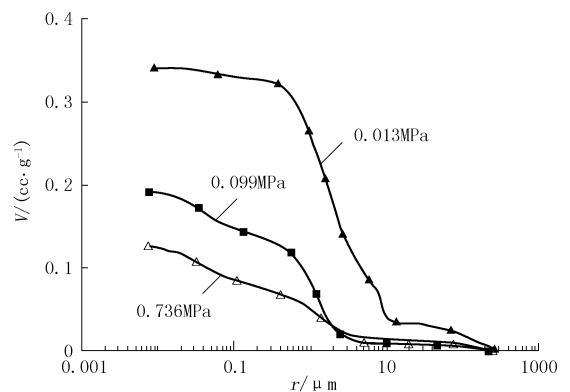


图3 各吸力下水银累计注入图

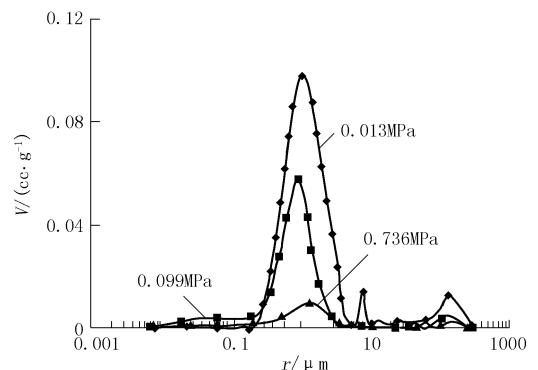


图4 各吸力下孔隙体积分布图

2.4 试验结果分析

由于在 0.013 MPa 吸力点数据出现了明显的偏差,故该吸力点不作为讨论的依据。初始状态下的孔隙比为 0.57,侧限状态下体积恒定,因此 0.736 MPa 时压汞孔隙量探测到了 59%,0.099 MPa 时压汞探测到的孔隙量为 89%。由图 4 看出加有侧限的土样在 0.736 MPa 时孔隙呈现双重分布,孔隙体积量主要分布在 0.4 ~ 3 μm 与 34 ~ 243 μm 范围内。而当吸力降为 0.099 MPa 时,34 ~ 243 μm 范围内的孔隙量变少,而变少的孔隙量转而补充给了 0.2 ~ 4 μm 的孔隙范围内,这说明侧限状态下的土样在吸力降低的情况下,大孔隙逐渐被压缩,转变成了小孔隙,使土中的孔隙分布变得更加均匀。

3 考虑微结构的非饱和土渗透系数计算模型

非饱和土的渗透系数往往数值上变化范围很大且不易测量。因此,非饱和土渗透参数的获取一直是非饱和土研究中的一个难点。实践中常常需要采用简单有效的间接方法来获取渗透性参数。为此,许多学者对此进行过探讨,并提出了一系列非饱和土渗透系数的经验公式(Averjanov, 1950; Campbell 1973; Davidson, 1969; Brooks 和 Corey, 1964; Gardner, 1958 等)。

X. F. Xu 等人(2005)^[6]基于分形理论给出了土的非饱和渗透系数 k_w 与饱和渗透系数 k_s 的关系:

$$k_w = k_s S_e^\lambda \quad (3)$$

式中: S_e ——土的有效饱和度;常数 $\lambda = (3D - 11)/(3 - D)$,其中 D 是土体分维。

Kozeny - Carman 公式(Carman, 1937)^[11]认为多孔介质的饱和渗透系数 k_s 符合下列半经验公式:

$$k_s = \eta (f^{3.66} S^2) / (1 - f)^2 \quad (4)$$

式中; S ——颗粒平均直径; f ——孔隙率; η ——常数。

联立(3)、(4)式,得到考虑孔隙介质微观结构的非饱和渗透系数计算公式:

$$k_w = \eta [(f^{3.66} S^2) / (1 - f)^2] S_e^\lambda \quad (5)$$

4 新模型的参数确定和应用

4.1 模型参数及其确定

公式(5)中,待定参数包括:描述土体孔隙特征参数孔隙率 f 和平均颗粒直径 S ,与土体孔隙分布的分维有关的常数 λ ,和比例常数 η 。

上述模型参数可以通过下列室内实验来获取:由 MIP 试验(水银注入试验)以及 SEM(扫描电镜试

验)^[10],得到高压实膨润土孔隙率 f 和平均颗粒直径 S ;由压汞试验得到土体孔隙分布的分维常数 D ,并根据计算公式(3)中的 $\lambda = (3D - 11)/(D - 3)$,可以得到常数 λ ;以及由高压实膨润土饱和时的渗透系数值和微结构参数值并根据公式(5)来获取比例常数 η 。

4.2 结果与分析

钱丽鑫(2007)针对取自于中国内蒙古兴和县的高庙子膨润土(土性见表 1),完成了侧限条件下的高压实试样(1.7 g/cm³)的非饱和渗透试验,试验结果见图 5。

表 1 试样的基本性质

指标	密度/(g · cm ⁻³)	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 /%	初始含水量 /%	初始吸力/kPa	粘土含量 /%	细颗粒含量 /%
数值	2.71	276	37	239	11.14	95958	60	98

注:矿物成分为蒙脱石、石英、正长石、白云母、钠长石。

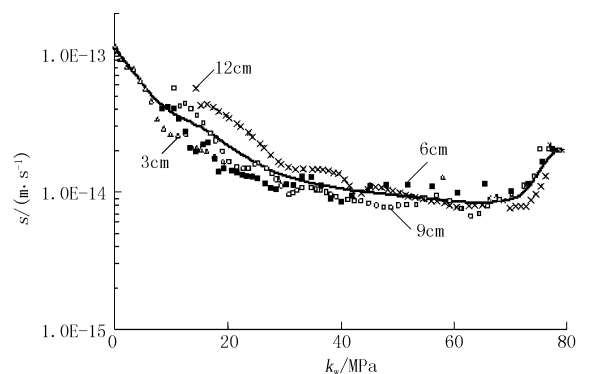


图 5 侧限条件下高压实高庙子膨润土的 $k_w - s$ 曲线

试样的模型参数值见表 2。

表 2 不同吸力值下模型参数值

吸力值 s /MPa	孔隙率 f	平均颗粒直径 S /μm	λ	η
0	0.180	2		
38	0.177	5	6.636	1.073E - 11
57	0.174	7		
84	0.355	30		

注:在孔隙比近似不变的情况下,质量含水量和体积含水量计算的有效饱和度值基本相同。大颗粒平均颗粒直径 S 主要是根据文献[1]的 SEM 图片来得到颗粒平均值,另外在 84 MPa 吸力点,还参考了文献[10]的粉末状态环境扫描电镜试验得到的 SEM 图片。

图 5 表明,侧限条件下,试验开始后,随着吸力降低(含水量增加),高压实膨润土的非饱和渗透系数先减小再增加。分析认为,非饱和渗透系数的变化特点,应该与高压实膨润土水化过程中的微观结构变化有关。试验开始阶段,高庙子膨润土的饱和度较低,土粒周围的结合水各自呈环状分布,彼此分离。膨润土试样吸水膨胀后,吸力降低,大孔隙逐渐

被压缩,孔隙量减小,渗透系数也随之降低。当吸力达到 65 MPa 左右,渗透系数达到最小。此后,膨润土试样继续吸水,吸力进一步降低,但同时随着饱和度的提高,土粒周围结合水层逐步扩展,最后连成一体,过水断面的面积增加,渗透系数也逐渐增大。

Satoru Suzuki 等(2005)^[2]通过对 MIP 试验和环境扫描电镜试验结果分析,同样发现有侧限条件下膨润土的水化过程是一个大孔隙逐渐减小,最后全部转化为均质小孔隙的过程^[1]。

根据图 6 计算得到膨润土的大孔隙 (> 1 μm) 对应的分维值是 2.45。具体计算过程是:当孔隙半径在 1 ~ 10 μm 变化时,双对数坐标图(图 6)上对应段斜直线的斜率是 $k = 0.55$,根据土体分维值计算公式 $D = 3 - k$ 可以得到 $D = 2.45$ 。

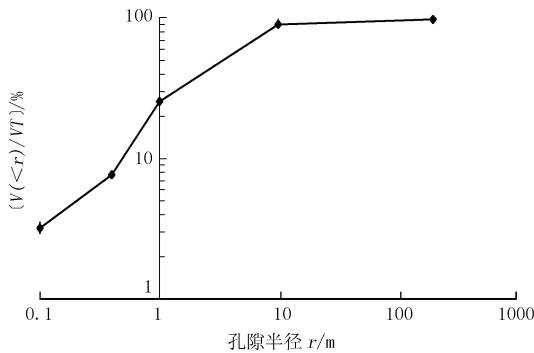


图 6 孔隙体积分布图

根据文献[1]的 MIP 数据结果可以分析得到膨润土在 0, 1.74, 9, 38, 57 MPa 的水银注入试验计算得到的大孔隙分维值基本相同,因此笔者推测膨润土在 38, 57, 84 MPa 的水银注入试验确定的孔隙分布分维值应该相同,所以统一按照 0.013 MPa 时膨润土的大孔隙 (> 1 μm) 对应的分维值 2.45。

根据常数 λ 计算公式^[7] $\lambda = (3D - 11)/(D - 3)$,可以得到 $\lambda = 6.636$ 。

由图 5 可以得到膨润土的饱和渗透系数 k_s 是 $1.2E - 13$ m/s。把膨润土饱和渗透系数 $1.2E - 13$ m/s 和此时的参数值 $f = 0.18, S = 2, S_e = 1$ 代入公式(5)可以得到常数 $\eta = 1.073E - 11$ 。

在本算例中,根据表 2 的参数值,考虑微观结构的非饱和渗透系数计算公式是:

$$k_w = 1.073 \times 10^{-11} \frac{f^{3.66} S^2}{(1-f)^2} S_e^{6.636} \quad (6)$$

结果如图 7 所示,图 7 可以看出,常规的非饱和渗透系数计算公式基本上满足非饱和渗透系数在 $1.0 \times 10^{-13} \sim 1.0 \times 10^{-14}$ m/s 的范围内,基于孔隙介质微结构特点的非饱和渗透系数计算公式获得的非

饱和渗透系数与其相应实测值之间具有良好的一致性。

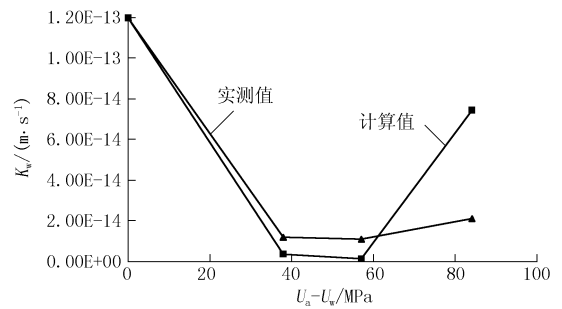


图 7 计算值与实测值比较

5 结语

非饱和土的渗透系数往往数值上变化范围很大且不易测量。本文在研究一般性非饱和土渗透系数计算公式的适用条件的基础上,研究高压实膨润土微观结构对其非饱和渗透特性的影响,建立同时考虑孔隙率和颗粒直径等微结构参数的相对渗透系数的计算模型,采用侧限条件下高压实膨润土的室内非饱和渗透和微观结构试验结果,分析验证了所建模型的正确性。

与实测值相比,本文提出的基于微观结构的非饱和渗透系数计算模型,能够较好地预测膨润土的非饱和渗透系数。

参考文献:

- [1] CUI Y. J., LOISEAU C. Water Transfer through a Confined Heavily Compacted Swelling Soil [A]. Proceedings of 1st World Forum of Chinese Scholars in Geotechnical Engineering [C]. Shanghai, China:2003. 1 - 18.
- [2] Satoru Suzuki, Somchai Prayongphan, Yasuaki Ichikawa, et al. In Situ Observations of the Swelling of Bentonite Aggregates in NaCl Solution [J]. Applied Clay Science, 2005, (29): 89 - 98.
- [3] Hideo Komine. Simplified Evaluation on Hydraulic Conductivities of Sand-bentonite Mixture Backfill [J]. Applied Clay Science, 2004, (26): 13 - 19.
- [4] C. Imbert, E. Olchitzky, T. Lassabatere, et al. Evaluation of a Thermal Criterion for an Engineered Barrier System [J]. Engineering Geology, 2005, (81): 269 - 283.
- [5] 刘海宁,姜彤,刘汉东. 非饱和土渗透函数方程的间接确定 [J]. 岩土力学, 2004, 25(11).
- [6] X. F. Xu. Fractal-textured Soils and Its Unsaturated Mechanical Properties [A]. International Symposium on Engineered Barriers for High Level Radioactive Waste Disposal [C]. 2005. 96 - 109.
- [7] 孙大松,刘鹏,夏小和,等. 非饱和土的渗透系数 [J]. 水利学报, 2004, (3).
- [8] A. Lloret, M. V. Villar. Advances on the Knowledge of the Thermo-hydro-mechanical Behaviour of Heavily Compacted "FEBEX" Bentonite [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2006.
- [9] 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).
- [10] 钱丽鑫, 叶为民, 陈宝. 用于高放废物深地质处置库缓冲材料的高庙子膨润土研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [11] M. V. Villar, A. Lloret. Influence of Temperature on the Hydro-mechanical Behaviour of a Compacted Bentonite [J]. Applied Clay Science, 2004, (26): 337 - 350.
- [12] M. V. Villar. Infiltration Tests on a Granite/Bentonite Mixture; Influence of Water Salinity [J]. Applied Clay Science, 2006, (31): 96 - 109.
- [13] HÖKMARK Harald. Hydration of the Bentonite Buffer in a KBS-3 Repository [J]. Applied Clay Science, 2004, (26): 219 - 233.
- [14] M. V. Villar, P. L. Martin, J. M. Barcala. Modification of Physical, Mechanical and Hydraulic Properties of Bentonite by Thermo-hydraulic Gradients [J]. Engineering Geology, 2005, (81): 284 - 297.
- [15] H. Akgün, M. K. Kockar, Ö. Aktürk. Evaluation of a Compacted Bentonite/Sand Seal for Underground Waste Repository Isolation [J]. Environ Geol, 2006.
- [16] L. M. Candelarla, M. R. Matsumoto. Effects of NAPL Contaminants on the Permeability of a Soil-bentonite Slurry Wall Material [J]. Transport in Porous Media, 2000, (38): 43 - 56.
- [17] W. J. Cho, J. O. Lee, K. S. Chun. The Temperature Effects on Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite [J]. Applied Clay Science, 1999, (14): 47 - 58.
- [18] T. Kanno, Fujita T., Takeuchi S., et al. Coupled Thermo-hydro-mechanical Modelling of Bentonite Buffer Material [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, (23): 1281 - 1307.
- [19] Yasuaki Ichikawa, Katsuyuki Kawamura, Nattavut Theramast, et al. Secondary and Tertiary Consolidation of Bentonite Clay: Consolidation Test, Molecular Dynamics Simulation and Multiscale Homogenization Analysis [J]. Mechanics of Materials, 2004, (36): 7 - 513.
- [20] Ivan Dananaj, Jana Frankovska, Ivan Janotka. The Influence of Smectite Content on Microstructure and Geotechnical Properties of Calcium and Sodium Bentonites [J]. Applied Clay Science, 2005, (28): 223 - 232.
- [21] J. Cuevas, M. V. Villar, M. Martin, et al. Thermo-hydraulic Gradients on Bentonite: Distribution of Soluble Salts, Microstructure and Modification of the Hydraulic and Mechanical Behaviour [J]. Applied Clay Science, 2002, (22): 25 - 38.
- [22] 徐永福, 叶翠明, 赵书权, 等. 压应力对非饱和土渗透系数的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6).
- [23] Nachabe H. Mahmood. Estimating Hydraulic Conductivity for Models of Soils with Macropores [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995, (121).
- [24] 李永乐, 刘翠然, 刘海宁, 等. 非饱和土的渗透特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3861 - 3865.
- [25] Z. Liu, N. Boukpeti, X. Li, et al. Modelling Chemo-hydro-mechanical Behaviour of Unsaturated Clays: A Feasibility Study [J]. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 2005, (29): 919 - 940.
- [26] 徐永福, 兰守奇, 孙德安, 等. 一种能测量应力状态对非饱和土渗透系数影响的新型试验装置 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1).

我国探月地学研究取得可喜进展

中国地质调查局网站 2009-06-16 消息 为交流国际探月及行星科学研究最新成果资讯, 推动我国探月地学研究的深入开展, 2009年6月16~18日, 国土资源部中国地质调查局在京主办“探月与地学科学国际研讨会”。围绕国际探月科学研究的最新进展及中国月球与行星科学研究动态, 中外科学家进行了广泛的交流研讨。科学家的学术报告主要涉及行星探测与行星科学、月球遥感与月球地质、月球地球化学与月岩样品研究、月球地球物理、当前月球探测动态、未来月球与行星探测计划等多方面内容。

月球是地球的卫星, 也是人类探测太空奥秘的基地, 因此, 月球探测与行星科学研究受到国际社会的广泛关注。研讨会为中外探月与行星科学研究提供了一个良好的交流平台, 必将对我国探月科学发展及国际科技合作产生重要的促进作用。

国土资源部高度重视探月地学研究这项前沿性探索工作, 开展了大量相关研究工作, 最近编制了国土资源部探月科学研究规划纲要, 提出了国土资源部近期探月科学研究重点是: “一张图、二个流程、三点建议, 相应地搞好两个基础”。

“一张图”指月球地形地貌图及元素(矿物)分布图, “二个流程”指高精度地形图测编流程和光谱遥感数据处理流程, “三个建议”指就月球着陆点、月球微型钻机配备、月球磁力仪配备等提出建议, “两个基础”指加强月球和行星遥感数据库建设和翻译出版《月球科学新认识》。

2008年, 国土资源部中国地质调查局正式启动了“月球地质遥测信息综合分析研究”项目, 重点开展月球地质及形成演化、月球深部结构、月球遥感及地形地貌、月岩测年、火星实验场、行星天体化学、微型钻机等研究工作。目前, 项目进展顺利, 并已取得了阶段性研究成果:

一是获取多种国际月球探测高分辨率数据, 为月球科学研究奠定了重要基础。

二是开展月球表面“阿里斯基尔”陨石坑矿物与岩石化学填图, 提取了陨石坑地区的氧化亚铁的含量分布, 揭示了月海玄武岩区氧化亚铁分布规律及控制因素。

三是进行月岩(壤)化学成分相关性分析。

四是利用离子探针测年方法, 对美国华盛顿大学提供的第一批月球陨石锆石样品成功地进行了年龄测定, 为月球早期历史及演化提供了高精度的年代学证据。

五是开展了青藏高原北部柴达木盐湖与火星表面地质类比研究, 包括地质地貌、沉积环境、沉积矿物及硫酸盐矿物等类比, 为火星生命存在及演化提供了新的类似模型。

六是提出我国月球表面微型钻机的设计方案, 包括月球取样钻机钻进能力与动力源、月表钻进方法、取样钻具、月表钻进方法及取样钻具的地表试验等内容。

中国地质调查局是国内知名的国家级地质调查机构, 承担着国家基础性、公益性地质调查和战略性矿产勘查工作, 也是中国行星科学、航空航天遥感的权威研究中心之一, 其所属的中国地质科学院从事相关研究工作已近半个世纪的历史, 与国内外相关研究机构具有广泛的联系。根据国土资源部探月科学研究规划纲要, 中国地质调查局将进一步加强与国家航天局、国家探月工程中心、教育部深空探测联合中心、中国科学院空间研究中心、中国测绘科学院等国内相关部门(单位)的合作与协调, 以地球科学研究为基础, 积极参与和推动探月与行星科学研究的国际合作, 促进中国探月科技进步与行星科学发展。