

侧限状态下高压实高庙子膨润土非饱和渗透性的试验研究

叶为民^{1, 2}, 钱丽鑫¹, 陈宝¹, 王驹³, 崔玉军⁴

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092;
3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 4. 法国路桥大学, 巴黎)

摘要: 高放废弃物深地质处置库中, 由高压实膨润土形成的人工屏障, 起着阻隔围岩中地下水渗入内库并引起核素迁移以及库内高放废物的辐射扩散的作用。因此, 有必要研究侧限状态下高压实膨润土的非饱和渗透性能。采用瞬时剖面法试验研究了侧限状态下高压实高庙子膨润土的非饱和渗透特性。结果表明: 侧限状态下, 干密度为 1.7 g/cm^3 的高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数, 数值为 $1.13 \times 10^{-13} \sim 8.41 \times 10^{-15} \text{ m/s}$, 且与土中吸力呈非单一增减关系。当土中吸力约为 68 MPa 时, 非饱和渗透系数最小; 吸力大于 68 MPa 时, 其非饱和渗透系数随着吸力的增加而增加; 而当吸力小于 68 MPa 时, 非饱和渗透系数随着土中吸力的增加而减小。

关键词: 高庙子膨润土; 非饱和渗透系数; 瞬时剖面法; 侧限状态

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)01-0105-04

作者简介: 叶为民(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境地质、非饱和土力学方面的教学与研究工作。E-mail: ye_tju@tongji.edu.cn。

Laboratory test on unsaturated hydraulic conductivity of densely compacted Gaomiaozi Bentonite under confined conditions

YE Wei-min^{1, 2}, QIAN Li-xin¹, CHEN Bao¹, WANG Ju³, CUI Yu-jun⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. United Research Center for Urban Environment and Sustainable Development of Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 4. Cermes/ENPC, Paris, France)

Abstract: In deep geological disposal for high-level radioactive waste, the engineering barrier made by densely compacted bentonite is used to prevent the groundwater infiltrating and the radioactive waste diffusing. It is necessary to study the unsaturated hydraulic conductivity of densely compacted bentonite under the confined conditions. The instantaneous profile method is employed to study the unsaturated hydraulic permeability of densely compacted Gaomiaozi bentonite under the confined conditions. Results show that the coefficient of unsaturated hydraulic conductivity of Gaomiaozi bentonite is between 1.13×10^{-13} and $8.41 \times 10^{-15} \text{ m/s}$, and it does not vary linearly with the soil suction. The coefficient of hydraulic permeability is the lowest at the suction of 68 MPa. And when the suction is higher than 68 MPa, the hydraulic conductivity increases with the increase of the suction; but it is reverse when the suction is below 68 MPa.

Key words: Gaomiaozi bentonite; unsaturated hydraulic permeability; instantaneous profile method; confined condition

0 引言

高放废弃物深地质处置库中, 作为缓冲/回填材料的高压实膨润土的设计功能是遇水吸湿导致土体膨胀变形, 以密封高压实膨润土块体砌置时形成的块体与块体之间和块体与围岩之间的施工缝隙以及围岩中因处置库开挖卸载引起的裂缝, 形成一道完整的人工屏障, 以阻隔围岩中因地下水渗入内库所引起的核素迁

移以及库内高放废物的辐射扩散。因此, 研究侧限状态下高压实膨润土的非饱和渗透性, 对于处置库中人

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40572161, 40772180, 40728003); 国防科工委资助项目 (科工计[2007]831号); 上海市地质工程重点学科 (B308)

收稿日期: 2007-11-15

工屏障的形成过程与运营性能研究, 具有非常重要理论与工程实践意义。

与饱和渗透相比, 非饱和渗透参数的量测方法要复杂得多。目前常用的非饱和渗透参数的量测方法主要有: ①瞬时截面法^[1-9]; ②稳态法^[10-13]; ③空气过压法^[14-17]。基于上述非饱和土渗透方法, 许多学者获得了不少有价值的试验结果。Wind^[18]、Daniel^[7-8]通过试验发现, 渗透性随着吸力的降低而增加, 当吸力为 0 时, 黏土的渗透系数与饱和状态时一样。Ed 等^[19]研究发现, 土体由饱和进入非饱和状态的开始阶段, 渗透系数基本保持不变, 且与饱和状态时相等, 该阶段的临界值是进气值。对于高压实膨润土的非饱和渗透试验, 由于土体自身具有很高的膨胀性与极低渗透性, 对试验过程的控制精度要求较高, 目前国际上关于该类土的非饱和渗透试验的报道甚少。Loiseau^[20]通过侧限条件下 Kunigel 黏土和石英砂混和物 (70%Kunigel 黏土和 30%石英砂) 的非饱和渗透试验, 发现其渗透系数并不是单一地随着吸力的减小而减小, 而是存在一个吸力临界值 (约 23 MPa), 当吸力小于临界值时, 渗透系数随着吸力的减小而增大。

本文采用瞬时截面法对高庙子膨润土进行了非饱和渗透试验。获取了高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数, 分析研究了其随吸力的变化关系。

1 高庙子膨润土的基本性能

高庙子膨润土产自我国内蒙古高庙子地区, 根据其矿床位置、交通条件、矿床储量与开采技术等诸多因素的综合比较, 该膨润土矿床被确定为我国高放废物地质处置库缓冲材料的首选矿床^[21]。试验所采用的高庙子膨润土的基本性能: 颜色为灰白色; 化学成分为 SiO_2 , Al_2O_3 , H_2O ; 比重为 2.66; 碱性系数为 1.14; pH 值为 8.68~9.86; 液限为 276; 塑限为 37; 塑性指数为 239; 吸蓝量为 102 mmol/100g; 总比表面积为 570 m^2/g ; 阳离子交换能力为 77.30 mmol/100 g; 主要交换阳离子为 Na^+ 43.36 mmol/100 g、 Ca^{2+} 29.14 mmol/100 g, Mg^{2+} 12.33 mmol/100 g、 K^+ 2.51 mmol/100 g; 主要矿物为蒙脱石 75.4%、石英 11.7%、长石 4.3%、方英石为 7.3%。数据显示, 高庙子膨润土具有较强的阳离子交换能力、强吸附能力、良好的分散性和水化能力。

2 高压实高庙子膨润土的非饱和渗透试验研究

2.1 试验装置

本次试验采用自行研制的高 150 mm、直径 50 mm 的高强度不锈钢渗透室, 以保证非饱和渗透试验过程

中, 试样处于完全侧限状态。沿不锈钢渗透室的长轴方向 (高度) 上每隔 30 mm 安装 1 只 (共 5 只) 温湿度传感器, 用以测量试样在非饱和渗透试验过程中的温度与相对湿度。温湿度传感器的相关技术指标: 温度测量范围 -30~105℃, 精度 $\pm 0.4^\circ\text{C}$; 相对湿度测量范围 0~100%, 精度 0.1%。

2.2 样品制备

采用特制模具将高庙子膨润土分层压实至高 150 mm、直径 50 mm、干密度为 1.70 g/cm^3 圆柱形试样, 压实过程采用变形控制, 垂向压实速率为 0.1 mm/min, 以保证压实试样的均匀性。试样的初始状态: 含水率为 12.27%, 高度为 150 mm, 直径为 50 mm, 干密度为 1.7 g/cm^3 。

2.3 试验原理

本文采用瞬时截面法测定非饱和土的渗透系数。试验开始后, 在圆柱形试样一端施加连续性水流, 试验用水为饮用蒸馏水; 另一端通过装有植物油的 U 形管与大气相通。试验过程中, 通过湿度传感器自动记录试样不同位置上的相对湿度随时间变化值。环境温度控制常温 ($20^\circ\text{C} \pm 0.4^\circ\text{C}$)。

根据实测相对湿度随时间变化曲线, 结合持水曲线, 便可求取试样的非饱和渗透系数。具体步骤是依据相对湿度, 采用 Kelvin 定律求取吸力, 得出吸力剖面。在一个大气压、且忽略渗析吸力时, 可由吸力 (负孔隙水压力) 除以水的重度 (即 $\rho_w g$) 可得出孔隙水压力水头。由此, 试样中某一点、 t 时刻的水力梯度 (即孔隙水压力头梯度) 就等于水头剖面的坡度。

$$i_w = dh_w / dx, \quad (1)$$

式中, i_w 为 t 时刻试样上 w 点的水力梯度, dh_w / dx 为 w 点的水力坡度, x 为试样渗流方向上的位置坐标。

同时, 根据实测持水曲线, 可求得试样在 t 时刻的体积含水率, 并进一步求取试样上某点的流量 q 。后者数值上等于 Δt 时间内, 试样上某两个确定点间的试样段内发生的水的体积变化。因此, 数值上可将目标试样段的体积含水率剖面, 在 Δt 时间段内积分而得:

$$q = A \frac{\int_x^{x+\Delta x} (\theta)_{t+\Delta t} dx - \int_x^{x+\Delta x} (\theta)_t dx}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中, q 为流量, A 为断面面积, θ 为试样的体积含水率, x 为试样渗流方向上的位置坐标。

根据 Darcy 定律, Δt 时间内的试样的平均非饱和渗透系数:

$$k_w = -\frac{1}{A} \frac{q}{\frac{1}{2} [i_t + i_{t+\Delta t}]} \quad (3)$$

3 试验结果与分析

图1为各传感器实测的相对湿度随时间的变化曲线。曲线显示,非饱和渗透试验开始后,距进水端3 cm处试样中相对湿度快速增加,约300 h后,增速逐渐趋缓;距进水端6 cm处,试验开始100 h后,相对湿度开始快速增加,约500 h后增加速率逐渐减慢;其他传感器所在位置,随着与进水端距离的增加,分别约在试验开始300,400,600 h后,相对湿度开始快速增加,且整个试验过程中,实测湿度增速基本不变。整个试验过程持续约4100 h。根据 Kelvin 定律,图1中的实测相对湿度随时间变化曲线,可转化为相应测量点上的吸力随时间的变化曲线(图2)。

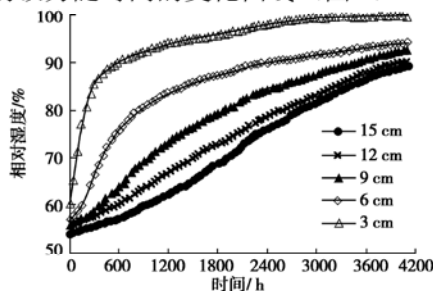


图1 相对湿度随时间的变化曲线

Fig. 1 Variation of relative humidity with time

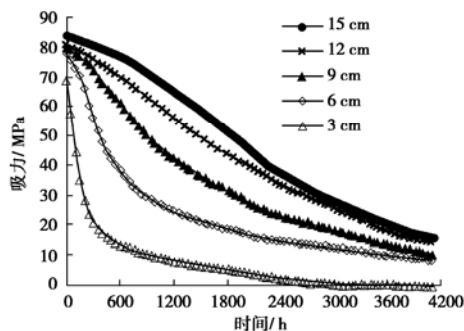


图2 吸力随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation of suction with time

根据图2,由式(1)、(2),可分别求出试样内某点的水力梯度和时间 t 内通过该点的水量(图3,4);再由式(3),求得试样在不同吸力下的非饱和渗透系数,见图5。图5表明,侧限状态下干密度为 1.7 g/cm^3 的高庙子膨润土,其非饱和渗透系数为 $1.13 \times 10^{-13} \sim 8.41 \times 10^{-15} \text{ m/s}$ 。同时,其非饱和水力渗透系数并不是随着吸力单一地变化。当吸力为68 MPa左右,高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数达到最小;当吸力大于68 MPa时,渗透系数随着吸力的增加而增加;当吸力小于68 MPa时,渗透系数随着吸力的增加而减小。产生这一现象的原因,可能是由于试验开始阶段,高庙子膨润土的饱和度较低,土颗粒周围的结合水各自呈环状分布,且彼此分离;试验开始后膨润土试样吸水膨胀,吸力降低,大孔隙逐渐被压缩,有效

孔隙量减少,渗透系数也随之降低,当吸力降到68 MPa左右时,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,饱和度提高,结合水逐步扩展,并连成一体,过水断面的面积逐渐增加,渗透系数也逐渐增大。

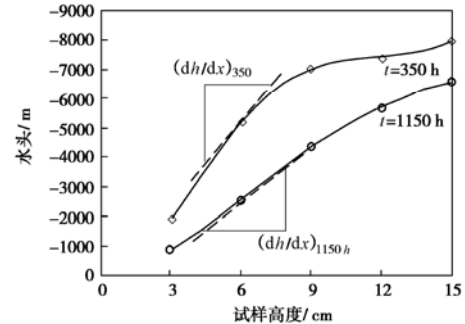


图3 试样内某点特定时刻的水力梯度

Fig. 3 An instantaneous hydraulic gradient at a given point in the specimen

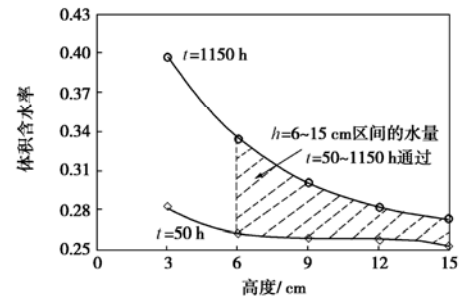


图4 特定时段内、给定区间试样中含水率的变化量

Fig. 4 Flux of water having passed through a cross-section during time period 50~1150 h

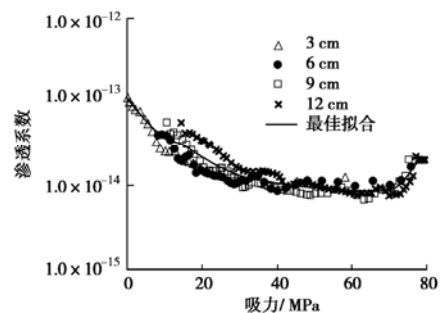


图5 不同吸力下高庙子膨润土的渗透系数

Fig. 5 Unsaturated permeability under various suctions

4 结 语

本文用瞬时截面法试验获取了侧限状态下,高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数。结果表明,侧限状态下,干密度为 1.7 g/cm^3 的高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数,数值上为 $1.13 \times 10^{-13} \sim 8.41 \times 10^{-15} \text{ m/s}$ 。

侧限状态下,高压实高庙子膨润土的非饱和渗透系数,并不是随着土中吸力降低而单一地减小。当土中吸力约为68 MPa时,非饱和渗透系数最小;当吸

力大于 68 MPa 时, 其非饱和和渗透系数随着吸力的增加而增加; 而当吸力小于 68 MPa 时, 非饱和和渗透系数随着土中吸力的增加而减小。究其原因, 可能是由于试验开始阶段, 高庙子膨润土的饱和度较低, 土颗粒周围的结合水各自呈环状分布, 且彼此分离; 试验开始后膨润土试样吸水膨胀, 吸力降低, 大孔隙逐渐被压缩, 有效孔隙量减少, 渗透系数也随之降低, 当吸力降到 68 MPa 左右时, 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, 饱和度提高, 结合水逐步扩展, 并连成一体, 过水断面的面积逐渐增加, 渗透系数也逐渐增大。

参考文献:

- [1] RICHARDS S J, WEEKS L V. Capillary conductivity values from moisture yield and tension measurements in soil columns[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1953, 17(3): 206 - 209.
- [2] WEEKS L V, RICHARDS S J. Soil-water properties computed from transient flow data[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1967, 31(6): 721 - 725.
- [3] WELLELING J, WIT K E. An infiltration method for determination of the capillary conductivity of undisturbed soil cores[J]. IASH/AIHS-UNESCO, 1966(82): 223 - 234.
- [4] VACHAUD G. Analyse des profils hydriques et détermination de $K(\theta)$ [J]. Bulletin du BRGM (deuxième série), Section III, 1969(4): 101 - 105. (in France) (VACHAUD G. Analysis of hydraulic profile and determination on $K(\theta)$ [J]. Bulletin du BRGM (second serie), Section III, 1969(4): 101 - 105.)
- [5] VAUCLIN M. Etude expérimentale et numérique du drainage de nappes à surface libre. Influence de la zone non saturée[D]. Université Scientifique et Médicale de Grenoble. 1975: 196. (in French) (VAUCLIN M. Experimental and numerical study on the free surface drainage. Influence of the unsaturated zone[D]. Scientific and Medical University of Grenoble, 1975: 196.)
- [6] HAMILTON J M, DANIEL D E, OLSON R E. Measurement of hydraulic conductivity of partially saturated soils[C]// American Society for Testing and Materials, Spec. Tech. Pub. 746, Philadelphia, 1981: 182 - 196.
- [7] DANIEL D E. Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(6): 1125 - 1129.
- [8] DANIEL D E. Permeability test for unsaturated soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 1983, 6(2): 81 - 86.
- [9] VICOL T. Comportement hydraulique et mécanique d'un limon non saturé[D]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1990: 257. (in French) (VICOL T. Hydraulic and mechanical behaviour of an unsaturated silty soil[D]. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1990.)
- [10] COREY A T. Measurement of air and water permeability in unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1957, 21: 7 - 11.
- [11] NIELSEN D R, BIGGAR J W. Measuring capillary conductivity[J]. Soil Science Society, 1961, 92: 192 - 193.
- [12] KLUTE A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soil: part 1 methods of soil analysis, [J]. Madison: American Society of Agronomy, 1965, 9: 253 - 261.
- [13] FLEUREAU J M, TAIBI S. Water-air permeability for unsaturated soils[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils UNSAT'95, Paris, 1995(2): 479 - 484.
- [14] GARDNER W R. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data[J]. Soil Science Society of America Journal, Proc. 20, 1956: 317 - 320.
- [15] MILLER E E, ELRICK D E. Dynamic determination of capillary conductivity extended for non-negligible membrane impedance[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1958, 22: 483 - 486.
- [16] KUNZE R J, KIRKHAM D. Simplified accounting for membrane impedance in capillary conductivity determinations[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1962, 26: 421 - 426.
- [17] PECK A J. Diffusivity determination by a new outflow method[J]. IASH/AIHS-UNESCO, 1966(82): 191 - 202.
- [18] WIND G P. Capillary conductivity data estimated by a simple method[J]. Symposium of water in unsaturated zone, Wageningen, IASH/AIHS, UNESCO, 1966, 1: 181 - 191.
- [19] ED DINY S, MASROURI F, TISOT J P. Détermination de la conductivité hydraulique d'un limon non saturé[J]. Revue Française de Géotechnique, 1993, 62: 67 - 74. (in France) (ED DINY S, MASROURI F, TISOT J P. Determination on the hydraulic conductivity of an unsaturated silty soil[J]. Revue Française de Géotechnique, 1993, 62: 67 - 74.)
- [20] LOISEAU C. Water transfer and hydro-mechanical coupling in the artificial barrier[D]. France: ENPC, 2001.
- [21] 刘月妙, 等. 我国高放废物处置库缓冲/回填材料压实膨胀特性研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17(1): 44 - 47. (LIU Yue-miao, et al. Study on compatibility and swelling property of buffer / backfill material for HLW repository[J]. Uranium Geology, 2001, 17(1): 44 - 47. (in Chinese))