

砂-膨润土混合屏障材料渗透性影响因素研究

陈永贵^{①②} 叶为民^① 王琼^① 陈宝^①

(^①同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092)

(^②长沙理工大学土木与建筑学院 长沙 410004)

摘要 膨润土因具有渗透性低、阳离子交换能力高等优点被认为是最适合高放废物深地质处置库中屏障系统的缓冲材料,工程实践发现随着水化过程的进行,纯高压实膨润土强度不断降低,并最终影响到工程屏障系统功能的发挥。针对这一问题,在膨润土中加入一定比例的石英砂,可以有效地提高工程屏障的热传导特性、压实性、力学强度和长期稳定性,降低工程造价。本文研究了影响砂-膨润土混合物渗透性的主要因素,包括膨润土含量、粒径分布、含水量和干密度、压实方法以及膨润土类型等。结果表明,砂土混合物渗透性主要受膨润土的渗透性控制,渗透系数随着膨润土含量和干密度的增加而减小,当膨润土含量超过某一界限值后,继续增加膨润土含量对降低渗透系数的作用有限;细颗粒和级配良好的混合物渗透系数小,当土体内部发生渗透侵蚀将增大渗透系数;最优含水量条件下压实得到的渗透系数最低,高于最优含水量压实得到的渗透系数比低于最优含水量压实得到的渗透系数要小。

关键词 砂-膨润土混合物 放射性废料 缓冲材料 渗透性 膨润土

中图分类号:TU473 **文献标识码**:A

INFLUENCE FACTORS OF SAND-BENTONITE MIXTURES ON HYDRAULIC CONDUCTIVITY

CHEN Yonggui^{①②} YE Weimin^① WANG Qiong^① CHEN Bao^①

(^①Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092)

(^②School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004)

Abstract Bentonite is attracting a greater attention as buffer and backfill material of the engineering barrier for geological disposal of high-level radioactive nuclear waste, because it can offer impermeability and swelling properties. But the pure compacted bentonite strength decreases with increasing hydration, which will reduce the buffer capability in the practice engineering. To solve this problem, sand is often used to form compacted sand-bentomite mixtures (SBMs) to provide high thermal conductivity, excellent compaction capacity, long-time stability, and low engineering cost. The factors affecting the hydraulic conductivity of SBMs are studied in this paper. They include bentonite content, grain size distribution, moisture content, dry density, compacting method and energy, and bentonite type. The studies show that the hydraulic conductivity of SBMs is controlled by the hydraulic conductivity of the bentonite. It also decreases as dry density and bentonite content increase. But when the bentonite content reaches a critical point, the influence of increasing bentonite to decrease the hydraulic conductivity is limited. A fine and well-graded

* 收稿日期: 2009-03-10; 收到修改稿日期: 2009-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40802064, 40728003); 国防科工委资助科研项目(科工计[2007]831号); 湖南省教育厅资助科研项目(09B006).

第一作者简介: 陈永贵, 工程地质专业. Email: cyg@csust.edu.cn

SBM is likely to have a lower hydraulic conductivity than a coarse and poorly graded material. The internal erosion or erodibility based on the grain size distribution of the SBMs has a negative effect on the final hydraulic conductivity. The lowest hydraulic conductivity is gained when the mixtures are compacted close to optimum moisture content. Also, the mixtures compacted at moisture contents slightly above optimum values give lower hydraulic conductivity than when compacted at slightly under the optimum moisture content.

Key words Sand-bentonite mixtures, Radio-active waste, Buffer material, Hydraulic conductivity, Bentonite

1 引言

核废物的安全处理处置问题一直是困扰核工业全面发展的关键因素,而其中高水平放射性废弃物(高放废物)的处置问题尤为突出。对于这一问题,目前国际上主要倾向于采用深地质埋藏的方法^[1]。根据围岩的不同,国际上在建或拟建的处置库可分为单屏障库与双屏障库两种类型。前者主要修建在盐岩或黏土岩中,如德国、法国与比利时的处置库等;后者主要修建在坚硬岩层中,如美国尤卡山、日本以及中国北山处置库等。作为高放废物深地质处置库中屏障系统的重要组成部分,缓冲材料是填充在废物体和地质体之间的最后一道人工屏障,起着工程屏障、水力学屏障、化学屏障、传导和散失放射性废物衰变热等重要作用,具体表现为延缓地下水的化学侵蚀以延长放射性废料容器的寿命、阻滞核种的迁移、提供废料容器的支承并吸收周围岩层错动时产生的过量应力、以及将放射性废料衰减过程中所释放的热能消散至周围岩体,是地质处置库安全性和稳定性的有效保障。由于处置场必须长时间维持成效,因此缓冲材料在营运中及封闭后可能遭遇的环境变化下,如何确保上述功能需求的长期稳定,为处置场近场防护中重要的一环。

早在上世纪70年代末,瑞典科学家 Pusch^[2] 经过对黏土矿物的比较、分析和一系列试验研究,发现膨润土具有渗透性低、阳离子交换能力高、热传导系数较大、力学强度较高和较好的力学特性等优点,并据此认为以蒙脱石为主要成分的膨润土是高放废物地下处置场最适合的缓冲材料。此后, Yong 等(1986)^[3] 研究表明膨润土具有压缩性高、干燥条件下收缩性低、膨胀力和变形性适中以及物理化学特性较稳定等优点,不仅使膨润土的加工、运输方便,而且能够保证处置系统整体在高温、化学梯度及水蒸汽等作用下的长期安全。目前研究较多的膨润土有日本 Kunigel-V1 膨润土^[4]、美国 Wyoming MX80 膨润土^[5]、西班牙 Cortijo de Archidona (Almería) 膨

润土^[6] 以及中国高庙子膨润土^[7] 和台湾日兴膨润土^[8]。

然而,随着核科学的发展和核技术在国防、工业、农业、医学以及科研等领域的广泛应用和深入拓展,越来越多的学者经过研究发现,工程实践中随着水化过程的进行,纯高压实膨润土强度会不断降低,并最终影响到其人工屏障系统功能的发挥。针对这一问题,国内外不少学者开展过探索性研究,结果表明,在膨润土中加入一定比例的石英砂可以有效地提高工程屏障的热传导特性^[9-11],同时进一步增加缓冲材料的压实性能,提高力学强度,改善长期稳定性,降低工程造价^[12]。

实际上,工程实践中,缓冲材料屏障功能的一个重要评价指标是其渗透性能^[13-15]。影响缓冲材料渗透性的因素很多,如膨润土矿物成分、密实度、含水量、温度等;同时,在人工屏障的形成过程中,由于围岩的制约,膨润土在吸湿过程中会产生有限的膨胀变形,伴随自身微观结构产生一系列变化,并反过来影响屏障系统的渗透性能^[16-18]。但是,目前针对砂-膨润土混合物的渗透特性研究尚处在初级阶段。本文对目前国际上在这方面的研究进展作一总结和归纳,以便为今后对砂-膨润土混合屏障材料的渗透特性开展科学研究提供借鉴。

2 影响因素

一般认为影响砂-膨润土混合物渗透性大小的因素主要有膨润土含量、粒径分布、含水量和干密度、压实方法以及膨润土类型等,以下依次讨论。

2.1 膨润土含量

膨润土含量是描述砂土混合物的基本参数。因膨润土具有较低的渗透性,砂土混合物渗透系数必将随着膨润土含量的增加而减小^[19,20]。然而,由于膨润土价格昂贵,大量使用膨润土使得工程建设成本增加,因此在满足缓冲/回填要求的前提下确定砂土混合物中膨润土的最低含量就显得尤为重要。研

究表明^[21, 22],对渗透性能而言,膨润土占砂土混合物干重的4%~13%比较合适,当膨润土含量超过这一范围而继续增加时,膨润土将会完全包裹砂颗粒,使砂土混合物塑性增强而不易被压实,而且实际工程中为过多地降低渗透系数而增加膨润土含量并不经济。

Komine 和 Ogata (1996)^[20]通过电子扫描电镜观察到,在膨润土含量为5%和10%的混合物中,孔隙随着膨润土吸水量的增加逐渐减小,而在膨润土含量20%和50%的混合物完全吸水膨胀后没有明显孔隙,这一现象表明随着膨润土含量的增加和水化过程的进行,砂土混合物中的孔隙逐渐减少。渗透试验中,当砂土混合物中膨润土含量由5%增至20%时,渗透系数由 $1 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低为 $5 \times 10^{-10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,降低了20倍,主要是因为砂粒间孔隙尺寸的降低和总孔隙减少;当膨润土含量由20%增至50%时,渗透系数由 $5 \times 10^{-10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低为 $1 \times 10^{-10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,仅降低了5倍。由此可见,膨润土超过20%时混合物中仅有一些小孔隙供膨润土膨胀充填。所以,在这种情况下即使增大膨润土的含量来减小膨润土的孔隙,对渗透系数的降低作用也非常有限。

Abichou 等(2002)^[23]对膨润土含量对砂土混合物渗透系数影响的研究结果见图1。从图1中可以看出,砂土混合物渗透性随膨润土含量增加的变化过程可以分为3个阶段。第一阶段(区域A),膨润土含量从0增加到2%,渗透系数降低很小,仅减小8倍;第二阶段(区域B),膨润土含量从2%增加到5%,渗透系数急剧降低,超过了4个数量级;第三阶段(区域C),渗透系数降低又变得平缓。这一现象可以解释为:混合物中没有掺入膨润土时,砂粒间

的空隙比较大,渗水能力强,此时渗透系数由空隙的几何特征决定;当掺入2%的膨润土时,膨润土将砂颗粒包裹起来,减小了渗水断面,部分地降低了渗透系数;当掺入5%膨润土时,包裹在砂颗粒外面的膨润土厚度增加,并充填了砂粒之间的孔隙,堵塞部分渗水通道,显著降低了混合物的渗透系数;此后继续掺入膨润土对降低渗透系数的作用减弱。

微观结构分析表明,随着膨润土含量的增加,包裹在细粒砂土表面的膨润土厚度增大,水可渗流的空间相对减小;而且一旦膨润土吸水膨胀,会进一步填充孔隙,降低砂土混合物的渗透性^[23]。当膨润土含量超过8%时,水化膨润土可充填混合物的全部孔隙,将砂粒全部包裹使得混合物成为类似于膨润土的连续结构,混合物中不存在明显的渗流通道,混合物的渗透系数接近纯膨润土的渗透系数。虽然继续增加膨润土含量可以使孔隙比降低,渗流通道减小和变得更加弯曲,但始终不可能完全消除渗流通道,所以对渗透系数的影响有限。由此可见,砂土混合物的渗透系数取决于其中膨润土的渗透系数^[19],并可由下式计算^[24]:

$$k_m = k_b \frac{S_b}{S} = k_b \left[1 - \frac{V_s}{V} \right] \quad (1)$$

式中, k_m 为混合材料的渗透系数; k_b 为膨润土的渗透系数; S_b 为渗透断面上膨润土所占截面积; S 为混合物总渗透截面积; V_s 为混合物中砂的体积; V 混合物总体积。

2.2 粒径分布

粒径分布也是描述土性质的一个重要参数,对渗透系数有重要影响。相同条件下,粗粒土比细粒土具有更大的渗透系数,级配不良的土比级配良好的土具有更大的渗透系数,这是因为细粒土比粗粒土接触更紧密,孔隙更小,而级配良好的土中细小颗粒可以充填在较大颗粒的空隙中,降低了土体孔隙率。水在多孔介质中渗流时,渗透系数与平均粒径的关系可表达为^[25, 26]:

$$k = \frac{D_e^2 \cdot \rho \cdot g}{5\mu \cdot \varepsilon} \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); D_e 为平均粒径(m); ρ 为水的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g 为重力加速度($9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$); μ 为动黏滞系数($\text{Pa} \cdot \text{s}$); ε 为与孔隙度有关的无量纲函数, $\varepsilon = n^3 / (1 - n)^2$ 。

Marcotte 等(1994)^[27]、Barrington 等人(1998)^[28]指出,在实际渗流工程中经常会出现细小

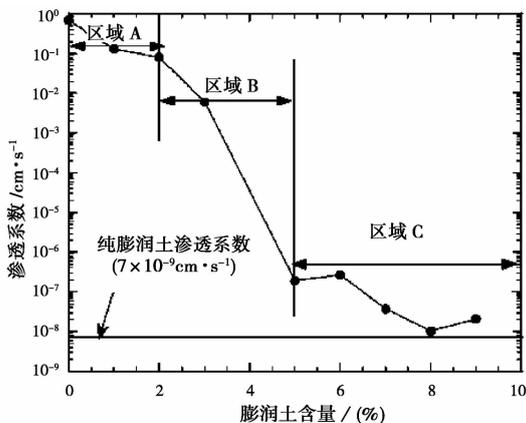


图1 渗透系数与膨润土含量的关系^[23]

Fig. 1 Hydraulic conductivity vs. bentonite content for SBMs

颗粒从混合土体材料中被侵蚀出来,导致渗透系数增大。而目前对砂土混合物渗透系数的评估并没有考虑这一现象,其理论研究明显滞后。土体内部侵蚀包括细小颗粒在土粒间孔隙中的移动和某一粒径范围土颗粒的流失。对于渗透条件下土体内是否发生侵蚀,Istomin(1957)提出了如下判别标准^[29]:

$U < 10$, 不发生;

$10 < U < 20$, 过渡状态;

$U > 20$, 发生内部侵蚀。

式中: U 为不均匀系数, $U = D_{60}/D_{10}$,其中 D_{60} 、 D_{10} 分别为分别代表粒径分布曲线上通过百分率为60%、10%所对应的土颗粒粒径。

土的侵蚀性用侵蚀速率来表示,它与水力剪切力呈近似线性关系^[30]:

$$\varepsilon'_e = C_e(\tau_l - \tau_c) \quad (2)$$

式中: ε'_e 为单位面积的侵蚀速率($\text{kg}/\text{s}/\text{m}^2$); C_e 为侵蚀速率系数($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); τ_l 为施加的水力剪切力($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$); τ_c 为临界水力剪切力(N/m^2)。

Kaoser等(2006)^[31]通过试验得到砂土混合物渗透系数与侵蚀速度之间的关系曲线(见图2),并得到经验公式:

$$k = a(\varepsilon'_e)^b$$

$$a = 10. (25)^{-20\eta}$$

$$b = 1 - 0.1\eta$$

式中, η 为混合物中膨润土的质量百分数。

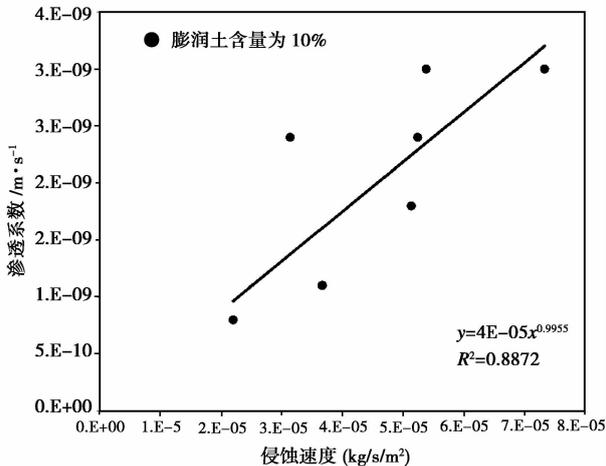


图2 渗透系数与侵蚀速度的关系^[31]

Fig. 2 Hydraulic conductivity versus rate of erosion (mixture with 10% bentonite)

2.3 含水量和干密度

含水量是控制砂土压实质量的重要指标。在一

定的压实条件下,使土最易压实,并能达到最大密实度的含水量称为最优含水量,此时对应的干密度为最大干密度。对于砂土混合物等黏性材料,压实材料的渗透系数与压实时的含水量有密切关系。在最优含水量条件下压实得到的渗透系数最低;当略高于(一般为2%^[32])最优含水量压实时,黏土颗粒可以更好地再定向排列,膨润土填充在大孔隙中并得到部分水化,使砂土混合物将得到较好的捏合,孔隙分布更加均匀^[33];当低于最优含水量压实时,黏土晶格发生聚合,混合物中将会产生更多的大孔隙,从而产生较大的渗透系数^[34]。因此,高于最优含水量压实得到的渗透系数比低于最优含水量压实得到的渗透系数要小。

干密度的大小反映了土颗粒间孔隙的情况,干密度越大,则土颗粒间孔隙越小,渗透系数越小。

2.4 压实方法

不同压实方法和压实对渗透性的影响,在于压实土结构性方面^[35]。搓揉压实产生的剪应变最大,有利于黏土颗粒的定向排列,故土的渗透性最小。静压法产生的剪应变最小,形成的土的渗透性较大。而动力击实介于两者之间。增加压实能可使土更趋向分散结构,分散结构具有较小的孔隙,从而渗透性降低,这种影响在于于最优含水量一侧较小,在湿于最优含水量一侧较大。同时充分混合能够降低渗透系数的离散性。

Sällfors等人(2002)^[34]引入一个新的参数 k_1 来描述砂土混合物的压实状态, k_1 定义为砂土混合物中膨润土质量与孔隙体积的比值,见式(3)。通常用来描述膨润土含量的参数是指膨润土质量占混合物总质量的百分数,在不同的压实状态下这一数值不变,因此不能反映砂土混合物的压实状态,而 k_1 值则不同,它能够反映出压实状态的变化。将多位学者对砂土混合物渗透性的研究结果整理后得到渗透系数与 k_1 值的关系曲线,如图3^[34]所示。

$$k_1 = \frac{m_s^{\text{bentonite}}}{nV^{\text{mixture}}} = \frac{m_s^{\text{bentonite}}}{V_p^{\text{mixture}}} \quad (3)$$

式中: $m_s^{\text{bentonite}}$ 为膨润土的质量, n 为孔隙率, V^{mixture} 为混合物的总体积, V_p^{mixture} 为混合物中的孔隙体积。

从图3中可以看出,无论对哪一组试验,当 k_1 小于0.5时,单位空隙体积所分摊的膨润土量较少,混合物中孔隙较多,此时增加膨润土含量有利于降低渗透系数;当 k_1 值大于0.5时,单位空隙体积所分摊的膨润土量较多,混合物中孔隙较少,膨润土含

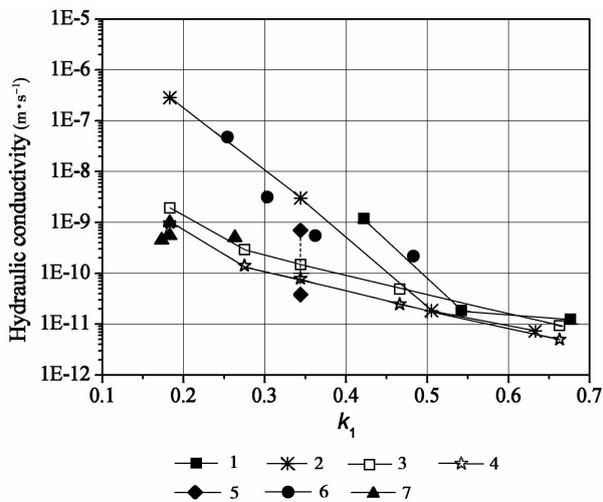


图3 渗透系数与 k_1 的关系曲线^[34]

Fig. 3 Illustration of hydraulic conductivity versus k_1

2. 接近或湿于最优含水量压实;3. 纯膨润土,变水头试验;
4. 纯膨润土,固结试验;6. 粗砂;7. 中砂

量增加对渗透系数的影响并不明显。

2.5 膨润土类型

膨润土是一种具有膨胀特性的细粒黏土,含有大量的膨胀性黏土矿物(蒙脱石),这类矿物在吸水时水分子进入晶格内部,使矿物本身发生膨胀。膨润土的膨胀性能与矿物组成、离子交换能力、表面结构特征、液体介质极性等因素有关。膨润土的胀缩性使它在遇水时显著膨胀、失水时显著收缩,过份的无侧限膨胀和收缩都能使屏障系统产生裂缝,影响渗透性。

通常膨润土都要经过干燥和研磨预处理,或通过离子置换改善其工程特性。如将钙离子置换为钠离子可以增强膨润土的膨胀能力;将膨润土经过聚合物处理,可以增加其抵抗盐溶液、酸溶液及受污染溶液的能力。目前应用比较广泛的膨润土主要有钠基膨润土,钙基膨润土和钠活化膨润土。

3 结论

对核废物地下处置库回填材料而言,其渗透系数是屏障系统发挥隔离作用的关键所在。本文对当前国内外已有的主要研究成果进行了综述,分析了对砂-膨润土混合物渗透性影响的主要因素。事实上,影响砂-膨润土混合物渗透系数的因素有很多,其中有些因素目前还没有考虑到,或因条件限制而

无法开展针对性研究,需要在今后的研究中进一步深入探讨。

参 考 文 献

- [1] 沈珍瑶. 世界各国高放废物地质处置最新进展[J]. 中国地质, 2001, **28**(12): 19~21.
Shen Zhenyao. Recent advances in research on high-level radioactive nuclear waste[J]. Chinese Geology, 2001, **28**(12): 19~21.
- [2] Pusch R. Highly compacted sodium bentonite for isolating rock-deposited radioactive waste products [J]. Nuclear Technology, 1979, **45**(2): 153~157.
- [3] Yong R N, Boonsinsuk P, Wong G. Formulation of backfill material for a nuclear fuel waste disposal vault[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1986, **23**(2): 216~228.
- [4] Komine H. Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill[J]. Applied Clay Science, 2004, **26**(1-4): 13~19.
- [5] Lemaire T, Moyné C, Stemmelen D. Imbibition test in a clay powder(MX-80 bentonite)[J]. Applied Clay Science, 2004, **26**(1-4): 235~248.
- [6] Villar M V, Pérez del Villar L, Martín P L, et al. The study of Spanish clays for their use as sealing materials in nuclear waste repositories: 20 years of progress [J]. Journal of Iberian Geology, 2006, **32**(1): 15~36.
- [7] Chen Bao, QIAN Lixin, YE Weimin, CUI Yujun, WANG Ju. SOIL-water characteristic curves of Gaomiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(4): 788~793.
- [8] 陈炳坤. 高放射性废弃物最终处置场缓冲材之回胀稳定性与微观结构研究[D]. 台湾: 国立中央大学, 2006.
Chen Binkun. Swelling stability and microstructure of buffer materials in high-level radioactive waste disposal site. Taiwan: National Central University, 2006.
- [9] Chapius R P. Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(1): 47~57.
- [10] Kenny T C, Van Veen W A, Swallow M A, Sungaila M A. Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(4): 364~374.
- [11] Mingarro E, Rivas P, del Villar L P, dela Cruz B, Gomez P, Hernandez A I, Turrero M J, Villar M V, Campos R, Co'zar J S. Characterization of clay (bentonite)/crushed granite mixtures to build barriers against the migration of radionuclides; diffusion studies and physical properties. Task 3—Characterization of radioactive waste forms (A series of final reports (1985-1989), No. 35, Nuclear science and technology series) [R]. Luxembourg: Commission of the European Communities, 1991.
- [12] 崔玉军. 高放核废物地质处置中工程屏障研究新进展[A]. 第260次香山科学会议“高放废物地质处置”会议论文集

- [C]. 北京: 香山科学会议第 206 次学术讨论会筹备组, 2005, 166 ~ 173.
- Cui Yujun. Recent advances in research on engineering barrier for geolical disposal of high-level radioactive nuclear waste[A]. Proceeding of the Vangshan Science Conference on Geological Disposal of High Level Radioactive Waste[C]. Beijing: Vangshan Science Conference Preparatory Group of No. 206, 2005, 166 ~ 173.
- [13] Sivapullaiah P V, Sridharan A, Stalin V K. Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(2): 406 ~ 413.
- [14] Goran S, Anna-Lena O-H. Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2002, **20**(1): 65 ~ 80.
- [15] Kanno T, Wakamatsu H, Hatta M, Miwa K. Static and permeability sorption tests of buffer materials for geologic disposal for high-level wastes[A]. In: Waste Management '89-Waste Processing, Transportation, Storage and Disposal, Technical Programs and Public Education. Proceedings of the Symposium[C], La-Grange Park, IL, USA: ANS, **1989**: 647 ~ 51.
- [16] Delage P, Marcial D, Cui Y J, Ruiz X. Ageing effects in a compacted bentonite; A microstructure approach[J]. Geotechnique, 2006, **56**(5): 291 ~ 304.
- [17] Laine E. Microstructure of Bentonite in Relation to its Physical Properties in Nuclear Waste Repositories[R]. TKK-IGE-A-25, Finland: Laboratory. of Engineering Geology and Geophysics, Helsinki University of Technology, 2001.
- [18] Cuevas J, Villar M V, Martin M, Cobena J C, Leguey S. Thermo-hydraulic gradients on bentonite; Distribution of soluble salts, microstructure and modification of the hydraulic and mechanical behaviour[J]. Applied Clay Science, 2002, **22**(1-2): 25 ~ 38.
- [19] Kenney T, Van Veen W, Swallow M, Sungaila M. Hydraulic conductivity of simulated sand-bentonite mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992(3), 29; 364 ~ 374.
- [20] Komine H, Ogata N. Observation of swelling behavior of bentonite by new electron microscope[A]. In: Proceedings of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics[C], Osaka, Japan, 1996: 563 ~ 568.
- [21] Chapuis R. Simulated sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(1): 47 ~ 57.
- [22] Sällfors G, Öberg-Högsta A-L. Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes[J]. Journal of Geotechnical and Geological Engineering, 2002, **20**(1): 65 ~ 80.
- [23] Abichou T., Benson C H, Edil T B. Micro-Structure and Hydraulic Conductivity of Simulated Sand-Bentonite Mixtures[J]. Clays and Clay Minerals, 2002, **50**(5): 537 ~ 545.
- [24] Farajollahi A, Wareham D G. Predicting hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures using a minicompaction apparatus[A]. In: Proceeding of the International Conference Geotechnical & Geological Engineering[C], Melbourne, Australia, 2000.
- [25] Kovacs G. Seepage Hydraulics[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981: 38 ~ 42; 240 ~ 243.
- [26] Geankoplis C J. Transport Processes and Unit Operations(Second edition)[M]. Boston, USA: Allyn and Bacon Inc., 1983: 129 ~ 134.
- [27] Marcotte D, Marron J C, Fafard M. Washing of bentonite in laboratory hydraulic conductivity tests[J]. Journal of Environmental Engineering, 1994, **120**(3): 691 ~ 698.
- [28] Barrington S F, El Moueddeb K, Jazestani J, Dussault M. The clogging of non woven geotextiles with cattle manure slurries[J]. Geosynthetics International. 1998, **5**(3): 309 ~ 325.
- [29] Istomina V S. Filtration Stability of Soils (in Russian) [M]. Moscow, Leningrad: Gostroizdat, 1957.
- [30] Wan C F, Fell R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(4): 373 ~ 380.
- [31] Kaoser S, Barrington S, Elektorowicz M, Ayadat T. The influence of hydraulic gradient and rate of erosion on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures[J]. Soil & Sediment Contamination, 2006, **15**(5): 481 ~ 496.
- [32] Met I, Akgün H, Türkmenoğlu A G. Environmental geological and geotechnical investigations related to the potential use of Ankara clay as a compacted landfill liner material[J]. Environmental Geology, 2005, **47**(2): 225 ~ 236.
- [33] Akgün H, Koçkar M K, Aktürk Ö. Evaluation of a compacted bentonite/sand seal for underground waste repository isolation[J]. Environmental Geology, 2006, **50**(3): 331 ~ 337.
- [34] Sällfors G, Öberg-Högsta A-L. Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2002, **20**: 65 ~ 80.
- [35] 黄文熙. 土的工程性质[M]北京: 中国水利电力出版社, 1983.
- Huang Wenxi. Engineering Properties of Soil. Beijing: China WaterPower Press, 1983.