

渗透条件对膨润土改性黄土渗透系数的影响

赵天宇¹, 张虎元¹, 严耿升¹, 吴军荣², 刘吉胜¹

(1. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 兰州 730000)

摘要:室内采用柔性壁渗透仪实测了膨润土改性黄土的渗透性能,分别在控制渗透时间、围压和渗透压等条件下探究了各自对改性黄土渗透系数的影响。研究表明,试验初期试样的渗透系数在同一数量级上有较大波动,随着持续时间增加渗透系数趋于稳定,稳定后几乎不随时间发生变化,增大围压和渗透压都可以引起改性黄土渗透系数在同一数量级上降低。因此,在填埋场设计时可以通过预测防渗衬里的围压和渗透压来预留渗透系数的安全储备。

关键词:改性黄土; 渗透系数; 围压; 渗透压

中图分类号: TU 411.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)05-0108-05

目前国内外广泛采用卫生填埋法处理固体废弃物。卫生填埋场衬里的防渗处理是建造填埋场的关键技术,低渗透性的衬里层能阻止污染物迁移和气体扩散,有效防止渗滤液对填埋场外部环境的污染。Mitchell^[1~3]等已证明压实粘土是良好的填埋场衬里材料,但一些地区由于粘土资源匮乏不能满足填埋场的建造要求,给填埋场建设带来了巨大困难。Goldman^[4]通过研究证明,当合适的粘土资源远离填埋场 10km 以上时就应该考虑对当地土进行改性。

国内外关于填埋场改性衬里已有较多研究,改性材料主要集中在膨润土^[5~7]、石灰^[8~9]、粉煤灰^[10]或几种材料组成的混合材料^[11]。研究表明,膨润土与天然土混合形成的改性土是建造填埋场衬里的绝佳材料,该成果已被国外不少填埋场应用。我国西北地区天然粘土匮乏但黄土广泛分布,黄土的渗透系数在 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 之间,不能满足填埋场衬里的防渗设计要求。同时,我国膨润土蕴藏量十分丰富,总量居世界第二位^[6]。因此,利用膨润土改性黄土具有良好的物质基础和地域优势。

卫生填埋场是一项长期工程,使用过程中应力状态及渗透条件在不断发生变化,必然会引起衬里层渗透性能的变化,正确揭示不同围压和渗透压状态下改

性黄土渗透系数的变化情况,了解外界条件变化是否会破坏衬里的防渗功能就显得十分重要。探究渗透条件对改性黄土渗透系数的影响可以很好地预测应力状态变化时改性衬里渗透系数的响应,为填埋场的建造提供理论依据和设计参数,确保衬里渗透系数有足够的安全储备。本文利用柔性壁渗透仪探究了渗透时间、渗透围压及渗透压对膨润土改性黄土渗透性能的影响,旨在为卫生填埋场膨润土改性黄土衬里防渗设计提供理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选取两种代表性黄土作为试验材料:一种为粘性较大的兰州黄土(代号 LH);另一种为砂性较大的榆林黄土(代号 YH),表 1 为两种黄土的基本物理性质指标。选取高庙子膨润土(代号 GMZ)和商品膨润土(代号 SP)作为改性材料,其基本性质见表 2。

室内采用 JDS-2 型电动标准轻型击实仪制取试样,选取接近或已达到填埋场防渗要求的 LH+12% GMZ、LH+14% GMZ、YH+12% GMZ、YH+14% GMZ、LH+30% SP、LH+35% SP、YH+30% SP、YH+35% SP(渗透系数都达到 10^{-7} cm/s 数量级)共 8 个试样进行试验观测。

1.2 试验方法

当多孔材料的渗透系数 $k \leq 1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 时,传统刚性壁渗透仪(如南 55 型渗透仪等)的侧壁渗水便会发挥很大作用,使渗透系数的测定结果严重偏离真值。相比之下,柔性壁渗透仪(Flexible-Wall Permeameter)具有以下优点:①通过围压与渗透压之间的压力差使柔性

收稿日期: 2009-02-14; 修订日期: 2010-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678075); 中国建筑股份有限公司资助项目(CSCEC-2008-Z-21)

作者简介: 赵天宇(1985-),男,博士研究生,主要从事环境岩土工程相关研究。

通讯作者: 张虎元, E-mail: zhanghuyuan@lzu.edu.cn

薄膜紧贴试样侧面,能够有效防止侧壁渗水和短流影响;②可实现试验样品的反压饱和与精确加压渗透;③施加于试验样品上的围压和渗透压可调节,能够提高试样的渗流速度,缩短传统方法中过长的试验历时。

表 1 黄土基本物理性质
Table 1 Physical properties of loess soils

土样	颗粒组成 (%)					比重	液限 (%)	塑限 (%)	土的分类
	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	< 0.005				
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)				
兰州黄土 (LH)	1.2	6.7	75.3	8.4	8.4	2.73	24.8	15.5	粉土
榆林黄土 (YH)	22	22.8	45.6	3.8	5.7	2.75	20.7	12.8	粉土

表 2 膨润土基本物理性质
Table 2 Physical properties of bentonite

膨润土类别	粒度 (mm)	蒙脱石含量 (%)	比表面积 (m ² /g)	风干含水量 (%)	比重	塑限 (%)	液限 (%)
高庙子膨润土 (GMZ)	< 0.002 为主 ^[12]	74 ^[12]	570 ^[12]	9.93	2.71	32.43	228.00
商品膨润土 (SP)	0.002 ~ 0.01 为主	38% (粘土矿物总量)	—	7.12	2.72	27.12	56.09

试验采用美国 HUMBOLDT 公司生产的 HM—4160A 型柔性壁渗透仪(图 1),参照 ASTM D5084—03 标准^[13],以蒸馏水作为渗流液,在变水头条件下测定改性黄土渗透系数。渗透试验开始前将围压设置为 100kPa,采用 30、60、90kPa 逐级施加反压力分别饱和 1、3、5d,确保试样完全饱和。渗流过程中蒸馏水由试样底部进入,从顶部流出。入渗、出渗压力及围压由空气压缩机提供,通过气-液界面施加于试样之上。

$$k = 4.6 \frac{a_{in} a_{out} L}{A(t_0 - t_s)(a_{in} + a_{out})} \cdot \lg \frac{(h_{in} - h_{out})_{initial} + (\frac{100p_{in} - 100p_{out}}{r_w})_{initial}}{(h_{in} - h_{out})_{final} + (\frac{100p_{in} - 100p_{out}}{r_w})_{final}} \quad (1)$$

压力 p_{out} 为大气压,水的容重 $\gamma_w = 10.0 \text{ kN/cm}^3$,可将上式简化为:

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_0 - t_s)} \lg \frac{(h_{in} - h_{out})_{initial} + 10p_{initial}}{(h_{in} - h_{out})_{final} + 10p_{final}} \quad (2)$$

式中: k ——渗透系数 (cm/s);
 L ——渗透液通过试样的长度 (cm);
 A ——试样横截面积 (cm²);
 $t_0、t_s$ ——测读水头的起始和终止时间 (s);
 $h_{in}、h_{out}$ ——入渗量管和渗出量管的水头 (cm);
 $p_{in}、p_{out}$ ——加在入渗水头和渗出水头上的气体压力 (kPa)。

按照试验设计,保持围压和渗透压不变探究了渗透时间对渗透系数的影响;分别控制围压、渗透压探究了各自对渗透系数的影响;同时改变围压和渗透压探究了二者共同作用对膨润土改性黄土试样渗透系数的影响,试验历时 50d。

2 结果与分析

2.1 时间对改性黄土渗透系数的影响

试验持续时间是低渗透性材料渗透系数测定过程中的一个重要影响因素,一般认为试验初期材料的渗透系数大于其真实值,达到一定时间后材料的渗透系数几乎不发生变化,此时即为真值。GCRAN

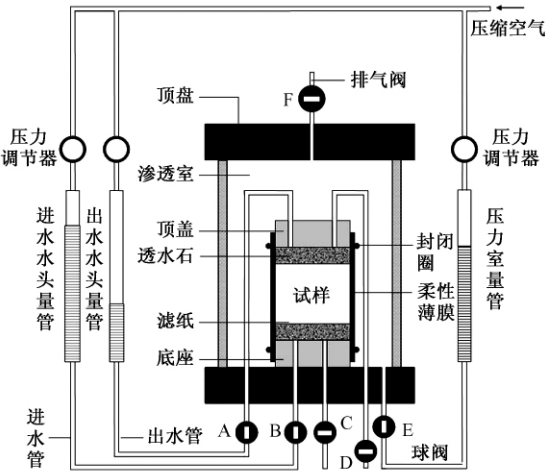


图 1 柔性壁渗透仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a flexible-wall permeameter

依据达西定律,按照《GB/T50123—1999 土工试验方法标准》^[14]中变水头渗透试验渗透系数的计算方法,柔性壁渗透仪在变水头条件测定改性黄土的渗透系数可由式(1)求得。

由于渗透仪量管的横截面积 $a_{in} = a_{out}$,渗出管的

SÄLLFORS^[15]总结前人的试验结果发现,试验时间过短会造成试样饱和不完全或膨胀不完全,导致测得的渗透系数较实际情况高出许多。一般来说,研究者普遍认同终止渗透试验的依据主要有三点^[16-17]:(1)渗流量超过一个孔隙体积(Pore Volume, PV 数),即入渗的水量刚好足够彻底置换出试样孔隙中原有的水和空气;(2)单位时间里渗入流量等于渗出流量;(3)渗透系数保持稳定。

选取 LH + 12% GMZ (图 2)、YH + 12% GMZ (图 3) 两个试样来说明试验持续时间对渗透系数测定的影响。可以看出,试验初期试样的渗透系数变化较大:(LH + 12% GMZ) 试样的渗透系数逐步降低,到第四天后基本趋于稳定,渗透系数从最初的 $9.5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 降至 $7.7 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$; (YH + 12% GMZ) 试样在试验初期渗透系数波动幅度较大,最大值达 $2.4 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$,最小值至 $1.35 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$,到第五天后基本趋于稳定。同时,观测到试验初期渗流液的渗入量与渗出量相差较大,渗透系数趋于稳定后渗入量与渗出量基本相等。从图中也可以看出,当渗透系数趋于稳定后,渗透系数在同一数量级上波动幅度都小于 0.5,远远小于渗透系数允许的误差(波动幅度不超过 2),因此认为测定值能够真实地反映材料渗透系数的大小。

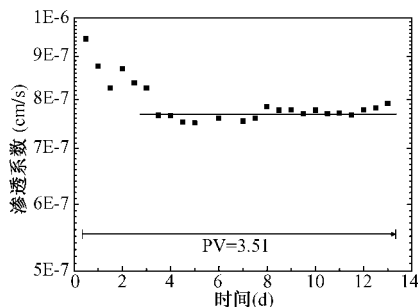


图 2 (LH + 12% GMZ) 试样渗透系数与渗透持续时间关系

Fig. 2 Relationship between coefficient of permeability and penetration time of (LH + 12% GMZ)

可以看出,试验初期测定的渗透系数存在一定的偏差,因此应等到渗透系数趋于稳定后方可停止试验。图 2~3 代表了试样渗透系数随试验持续时间变化的两种典型情况,对比测定的多组试验,发现渗透系数大的试样多出现试验初期渗透系数逐步降低的情况,而渗透系数小的试样多出现试验初期渗透系数波动幅度较大的情况,彭祥捷^[18]通过粉煤灰和干污泥改性粘土长期防渗试验也得出了相同的规律。

总体看来,试验初期试样渗透系数随持续时间增

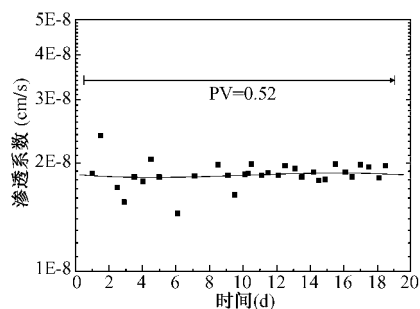


图 3 (YH + 12% GMZ) 试样渗透系数与渗透持续时间关系

Fig. 3 Relationship between coefficient of permeability and penetration time of (YH + 12% GMZ)

大会有一定的变化,但变化范围都在同一数量级内,且变化幅度最大不超过 3,因此可以认为试验持续时间对材料渗透系数的影响不大,尤其是趋于稳定后渗透系数几乎不随时间发生变化。

2.2 围压对改性黄土渗透系数的影响

图 4~5 为 LH + 12% GMZ、YH + 12% GMZ 试样在渗透压为 25kPa 条件下渗透系数随围压增加的变化关系。渗透历时分别为 28.5d 和 30.5d,渗流量分别达到 3.52 和 0.91 个 PV 数。

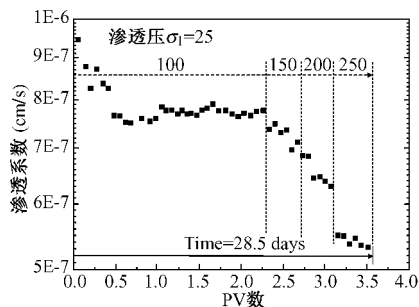


图 4 (LH + 12% GMZ) 试样渗透系数随围压变化关系

Fig. 4 Relationship between coefficient of permeability and confining pressure of (LH + 12% GMZ)

注:图中压力单位均为 kPa,下文相同

从图中可以看出,在 100kPa 围压条件下试样的渗透系数随试验持续时间增大逐渐趋于稳定,在不改变渗透压的情况下逐级增加试样围压至 150kPa、200kPa、250kPa,渗透系数在同一数量级上逐级降低,LH + 12% GMZ 试样的渗透系数从 $7.7 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 降低至 $5.3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,YH + 12% GMZ 试样从 $2.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 降低至 $1.4 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。

试验结果表明,试样的外在围压越大则其渗透系数越小。增大围压在一定程度上可以引起固结压密使试样更密实,减小了试样的孔隙体积,导致试样的渗透

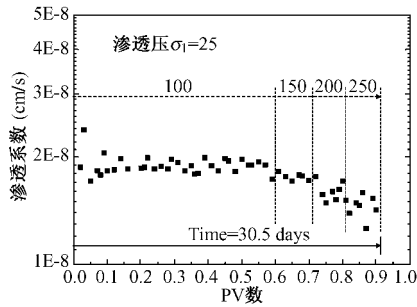


图5 (YH + 12% GMZ) 试样渗透系数随围压变化关系
Fig. 5 Relationship between coefficient of permeability and confining pressure of (YH + 12% GMZ)

系数降低。从测试结果来看,围压只同一数量级上对渗透系数有一定的降低作用,不会发生数量级的跃迁,同时可以看出它对渗透系数大的试样的影响程度更显著一些,因为渗透系数大的试样孔隙体积相对更大,容易被压缩。徐德敏等^[19]的试验研究也发现,不论孔隙性介质试样渗透性大小如何,围压升、降引起的渗透系数变化均处于同一数量级,渗透系数越大的试样受围压条件的影响就越大。

2.3 渗透压对改性黄土渗透系数的影响

图6~7为LH + 35% SP、YH + 35% SP试样在围压为125kPa条件下渗透系数随渗透压增加的变化关系。渗透历时分别为29.1d和29.9d,渗流量分别达到3.54和2.52个PV数。

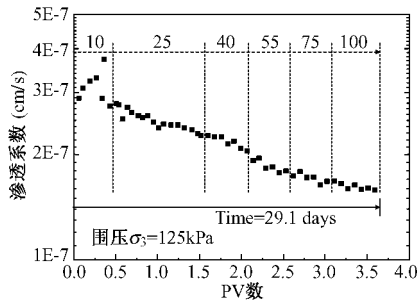


图6 (LH + 35% SP) 试样渗透系数随渗透压变化关系
Fig. 6 Relationship between coefficient of permeability and osmotic pressure of (LH + 35% SP)

由前述分析可知,当试验持续时间达到一定值时改性黄土的渗透性趋于某个稳定值,因此认为试验中引起渗透系数降低的原因只是渗透压的改变。由图可知,在不改变试样围压(125kPa)的情况下逐级将渗透压从10kPa增至25、40、55、75、100kPa,改性黄土试样的渗透系数也在同一数量级上逐级降低,LH + 35% SP试样的渗透系数从 3.1×10^{-7} cm/s降低至 1.6×10^{-7} cm/s,YH + 35% SP试样从 3.8×10^{-8} cm/s降低至

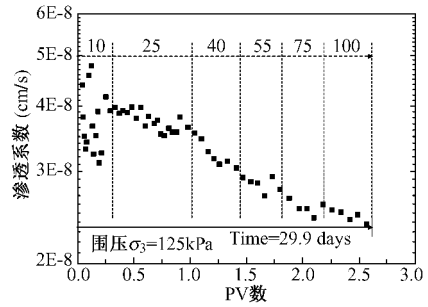


图7 (YH + 35% SP) 试样渗透系数随渗透压变化关系
Fig. 7 Relationship between coefficient of permeability and osmotic pressure of (YH + 35% SP)

2.5×10^{-8} cm/s。

Naim Muhammad^[20]用柔性壁渗透仪测定膨润土-砂的渗透系数,将渗透压依次设置为450、1300、2200kPa,测定了三组试样(渗透系数均小于 3.0×10^{-9} cm/s)渗透系数的变化情况,结果显示试样的渗透系数在同一数量级上有较小的降低(降低量不超过 0.7×10^{-9} cm/s)。本次试验结果与Naim Muhammad等人的研究结果相同,即加大渗透压会在同一数量级上较小范围地降低试样的渗透系数。与增大围压降低试样渗透系数相同,增加渗透压对渗透系数大的试样影响效果更显著一些。

关于增大渗透压降低渗透系数的解释主要有两种,一是增加渗透压相当于增大了竖向压力,引起试样的竖向固结压密,减小了试样的孔隙度,这种情况多发生于粗粒土的渗流体系中;另一种解释是试样总体孔隙度不发生变化,只是其中的细颗粒被冲刷积聚在靠近试样顶部(渗流自底部向顶部)的局部,有效阻滞渗流液的通过,它多出现于压实粘土等细粒土中。本次试验前后测定了试样的孔隙率,发现渗透后试样孔隙率只有微小降低,且LH + 35% SP与YH + 35% SP试样中含有较多细颗粒,因此认为试样渗透系数的降低是上述两种机制共同作用引起的。

2.4 围压与渗透压共同作用对改性黄土渗透系数的影响

图8~9所示为LH + 14% GMZ、LH + 30% SP试样在围压和渗透压同时改变的条件下改性黄土试样渗透系数的变化情况。将围压、渗透压分别设置为110~10kPa、125~25kPa、140~40kPa、155~55kPa、175~75kPa、200~100kPa,二种试样渗透历时分别为29.3d和29d,渗流量分别达到3.24和3.51个PV数。

由图可知,同时增加围压和渗透压时改性黄土试样的渗透系数也是降低的,而且要比单独增加围压或

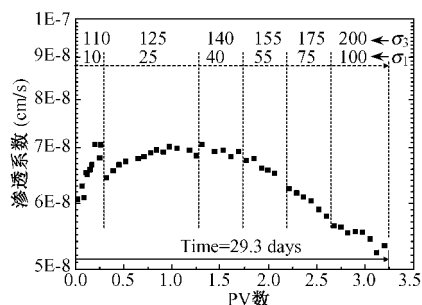


图 8 (LH + 14% GMZ) 试样渗透系数随围压与渗透压变化关系

Fig. 8 Coefficient of permeability of (LH + 14% GMZ) related to confining pressure and osmotic pressure

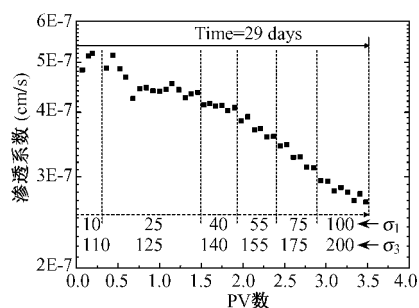


图 9 (LH + 30% SP) 试样渗透系数随围压与渗透压变化关系

Fig. 9 Coefficient of permeability of (LH + 30% SP) related to confining pressure and osmotic pressure

渗透压降低幅度大, LH + 14% GMZ 试样的渗透系数从 $6.9 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 降低至 $5.3 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, LH + 30% SP 试样从 $4.9 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 降低至 $2.8 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。与围压和渗透压各自对渗透系数影响规律相同, 同时改变二者时对渗透系数大的试样影响更显著一些。

3 结论

(1) 试验持续时间是影响膨润土改性黄土渗透系数测定准确性的一个重要因素, 试验初期试样的渗透系数在同一数量级内偏离真实值, 趋于稳定后渗透系数几乎不随时间发生变化。

(2) 膨润土改性黄土在渗透过程中受到围压和渗透压的影响, 增大围压和渗透压都可以引起试样渗透系数在同一数量级上降低, 同时增加二者可以在更大程度上降低改性黄土的渗透系数。因此, 在填埋场设计时可以通过预测防渗衬里的围压和渗透压来预留渗透系数的安全储备。

(3) 试样渗透系数越大, 渗透趋于稳定所需时间就越短, 对围压与渗透压影响的敏感程度也越明显。

参考文献:

- [1] Mitchell J K, Hooper D R, Campanella R G. Permeability of compacted clay [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1965, 91 (S4): 41 - 65.
- [2] Daniel D E. In situ hydraulic conductivity tests for compacted clays [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1989, 115 (9): 1205 - 1227.
- [3] Benson C H, Zhai H, Wang X. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994b, 120 (2): 366 - 387.
- [4] Goldman L J. Clay liners for waste management facilities: design, construction, and evaluation [M]. Park Ridge, N J: Noyes Data Corp, 1990.
- [5] Chapuis R P. Permeability testing of soil-bentonite mixtures [C]. // Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm: 1981: 744 - 745.
- [6] 刘阳生, 白庆中. 膨润土改性天然粘土防渗材料的研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10 (2): 143 - 149.
- [7] 陈延君, 王红旗, 赵勇胜, 等. 用改性膨润土作垃圾填埋场底部衬里的试验 [J]. 中国环境科学, 2005, 25 (4): 437 - 440.
- [8] Broderick G, Daniel D E. Stabilizing compacted clay against chemical attack [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116 (10): 1549 - 1567.
- [9] 赵晓霞, 王宪恩. 石灰在填埋场防渗层中的改性研究 [J]. 环境科学与技术, 2005, 28 (5): 32 - 34.
- [10] Palmer B G, Edil T B, Benson C H. Liners for waste containment constructed with class F and class C fly ashes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 76 (2): 193 - 216.
- [11] 史敬华, 赵勇胜, 洪梅. 垃圾填埋场防渗衬里粘性土的改性研究 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2003, 33 (3): 355 - 359.
- [12] 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): 42 - 45.
- [13] ASTM D 5084-03, Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter [S].
- [14] GB/T 50123-1999 土工试验方法标准 [S].

(下转第 117 页)

Application of the expert system to mine environment treatment

CHEN Qi¹, WU Qiang², XU Jia-cheng¹

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China*)

Abstract: An expert system for mine environmental treatment is designed and its design routine, structure and function is discussed in this article. The expert system mainly contains the identification of mine environmental effects, the choice of treatment models and design and optimization of treatment engineering. The mechanism of design of the three parts is described and its work process is expounded with examples.

Key words: expert system; mine environmental effect; treatment model

责任编辑:汪美华

(上接第 112 页)

- [15] GÖRAN SÄLLFORS, ANNA-LENA ÖBERG-HÖGSTA. Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes [J]. *Geotechnical and Geological Engineering* 2002, 20:65 – 80.
- [16] Ameta N K, Akgun H, Kockar M K. Effect of Bentonite on Permeability of Dune Sand [J]. *EJGE* 2008, 13:1 – 7.
- [17] Chalermyanont T, Arrykul S. Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners [J]. *Songklanakarin J Sci Technol* 1999, 36:815 – 825.
- [18] 彭祥捷. 粉煤灰、干污泥改性粘土防渗层的可行性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [19] 徐德敏. 高渗压下岩石(体)渗透及力学特性试验研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [20] Naim Muhammad. Hydraulic, Diffusion, and Retention Characteristics of Inorganic Chemicals in Bentonite [D]. Florida: University of South Florida, 2004.

Influence of penetrative conditions on permeability of modified loess soil by bentonite

ZHAO Tian-yu¹, ZHANG Hu-yuan¹, YAN Geng-sheng¹, WU Jun-rong², LIU Ji-sheng¹

(1. *Lanzhou University, Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China;*

2. *China Northwest Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The process stress of sanitary landfill is changing constantly in use, which will cause the penetrative conditions to change in landfill liner. It is of great realistic significance to explore the influence of these changes on the seepage performance of landfill liner. The permeability of modified loess soil by bentonite was tested with a flexible-wall permeameter and the impact on coefficient of permeability of the modified loess soil was investigated under different conditions of penetration time, confining pressure and osmotic pressure. The research results show that coefficient of permeability of modified loess soil fluctuates in the same order in the initial stage and the coefficient of permeability tends to be stable. Furthermore, the coefficient of permeability of modified loess soil can be reduced in the same order with the increasing confining pressure and osmotic pressure. Therefore, the safety of coefficient of permeability can be reserved by predicting the penetrative conditions in a sanitary landfill liner design.

Key words: modified loess soil; coefficient of permeability; confining pressure; osmotic pressure

责任编辑:汪美华