

文章编号:1671-6833(2018)02-0061-06

胶粉改性土-膨润土固结压缩特性试验

何 俊, 颜 兴, 胡晓瑾, 王小琦

(湖北工业大学 土木与建筑工程学院,湖北 武汉 430068)

摘 要:为增强土-膨润土防渗帷幕对污染物的吸附能力,以废旧轮胎胶粉为土-膨润土防渗帷幕的改性剂,开展胶粉改性土-膨润土材料的固结试验,研究胶粉特征和模拟渗滤液对固结压缩性质的影响规律.研究表明:胶粉改性土-膨润土为中~高压缩性土;由于胶粉颗粒具有不同于黏土颗粒的压缩性和憎水性特征,随着胶粉掺入比的增加,土样的压缩性增强,固结速度加快;胶粉尺寸较大时,土样的压缩性较大、固结速度较快;当胶粉掺入比一定时,模拟渗滤液作用下土样液限降低、结合水量减小、结合水膜变薄,使土样压缩性减小、固结速度加快.

关键词:胶粉改性土-膨润土;固结系数;压缩系数;模拟渗滤液

中图分类号: TU43 文献标志码: A doi:10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2018. 02. 008

0 引言

随着我国汽车工业的迅猛发展,废旧轮胎数量急剧增加. 据统计,2015 年我国约产生废旧轮胎 3.3 亿条,重 1 200 万吨,并以每年 8%~10% 的速度增长,而无害化利用率仅 60%^[1]. 废旧轮胎橡胶具有质轻、渗透性和吸附能力强等特点,是性质优良的土工材料,大量应用于路基、边坡加固、挡土墙或桥台轻质填料等土木工程中,也被作为排水、渗滤液处理、日覆盖、隔热等材料应用于垃圾填埋场中,效果良好^[2-3]. 目前仍有大量未被利用的废旧轮胎被露天堆放在垃圾填埋场,橡胶的降解非常缓慢,严重污染环境和威胁人体健康,研究废旧轮胎资源化利用具有重要意义.

在垃圾填埋场防渗以及污染场地修复工程中,防渗帷幕应用广泛,常见的防渗帷幕有黏土-膨润土系、水泥膨润土系和混凝土防渗帷幕等^[4]. 其中,土-膨润土系防渗帷幕价格低廉、防渗效果良好,但其抗化学腐蚀性能较差,因此土-膨润土系防渗帷幕的工程性能受到影响. 朱伟等^[5]发现,0.2 mol/L CaCl₂ 溶液渗透时,砂-黏土混合土渗透系数相比自来水时都有不同程度的增大,但增大倍数没有超过 10. 文献[6-7]发现,强酸、强碱作用可改变黏土的结构,从而改变黏土的工

程性质. 文献[8]研究 NaCl、CaCl₂、MgCl₂ 对掺入 10% 和 20% 膨润土的混合土的影响,发现随着溶液浓度增大,压缩指数减小. 文献[9]研究 Pb(NO₃)₂ 对高岭土-膨润土系防渗帷幕固结压缩性能的影响,发现压缩指数随铅浓度增大而减小.

添加改性材料是提高土-膨润土系防渗帷幕吸附性能的常用方法. 由于土-膨润土的固结压缩性质对其渗透性和厚度都有重要影响,而渗透性和厚度决定了防渗帷幕中污染物的运移特性,进而影响防渗帷幕的有效性^[10],因此,对改性土-膨润土防渗帷幕固结压缩性质的研究非常重要. 研究发现,沸石和活性炭颗粒对改性材料的固结和渗透性影响不大^[11-13];利用废旧轮胎胶粉对土-膨润土系防渗帷幕进行改性可有效提高对有机污染物 VOC 的吸附能力^[14]. 但由于胶粉本身变形较大^[15],胶粉改性土-膨润土防渗帷幕的固结压缩性如何,尤其是在填埋场渗滤液作用下胶粉特征对变形和固结性质的影响规律还不清楚.

为提高土-膨润土防渗帷幕材料对有机污染物的吸附能力,以废旧轮胎胶粉作为土-膨润土的改性材料,开展胶粉改性土-膨润土材料的一维固结试验,研究模拟渗滤液作用下胶粉特征对土-膨

润土固结压缩性质的影响规律,为胶粉改性土-膨润土防渗帷幕的应用打下基础.

1 试验方案

1.1 试验材料

选用粗细两种尺寸的橡胶颗粒,其中细橡胶颗粒粒径小于 0.55 mm,粗橡胶颗粒粒径小于 1.40 mm,其颗粒分布曲线见图 1. 根据《土的工程分类标准》细橡胶颗粒为粗砂-细砂粒组,粗橡胶颗粒为粗砂粒组,均属于级配不良砂. 按照美国 ASTM D6270—98 的定名,所选用的材料属于橡胶颗粒 (granulated rubber) 中的胶粉 (ground rubber). 胶粉的比重为 1.20,风干含水率为 0.

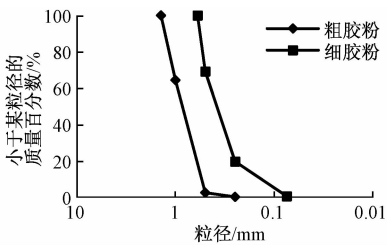


图 1 废旧轮胎胶粉级配曲线

Fig.1 Grading curves for waste tire ground rubber

考虑到工程实际中土料的差异性,选用应用较普遍的商用高岭土作为防渗帷幕的原位土. 高岭土为水洗 S180-0 型,其中 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别为 46.36% 和 40.0%,并含有少量 Fe_2O_3 和 K_2O . 高岭土粒度为 44 μm ,比重为 2.70,风干含水率为 1.5%;液限和塑限分别为 35.2% 和

22.4%,为低液限黏土;采用 BET 法测得高岭土的比表面积为 3.88 m^2/g .

膨润土选用粉末状钠基膨润土,其粒度为 38 μm ,蒙脱石含量为 85%~90%. 膨润土风干含水率为 14.1%,液限和塑限分别为 232.0% 和 43.0%,为高液限黏土;膨润土的比表面积为 66.36 m^2/g .

城市生活垃圾填埋场中的渗滤液是一种污染负荷高、成分复杂的有机废水,其性质变化范围大,可分为无机污染物和有机污染物两大类. 由于 Ca^{2+} 和 Cl^- 是填埋场渗滤液中常见的污染物离子,苯酚是我国环保部门优先控制的污染物^[16],笔者选择 0.05 mol/L 的 CaCl_2 和 1 g/L 的苯酚代表渗滤液中无机污染物和有机污染物,用其混合溶液模拟渗滤液进行试验,并与自来水试验进行对比.

1.2 试验方法

根据前期坍落度试验,取满足 110 mm 坍落度要求对应含水率为控制含水率(见表 1). 按照 0%、7.5%、15.0%、25.0% 的掺入比(胶粉与风干高岭土质量比),将胶粉与高岭土混合均匀,加入分别用自来水和模拟渗滤液配置的膨润土浆,搅拌均匀后密封,养护 7 d. 膨润土浆液采用膨润土与液体按照质量比 5:100 配置. 可以看出,110 mm 坍落度对应含水率随胶粉掺入比的增加略有减小.

由于粗胶粉颗粒尺寸大于 0.5 mm,而界限含水率试验适用于粒径小于 0.5 mm 颗粒组成的土,故只对细胶粉混合土按照土工试验规程 (SL 237—1999) 进行界限含水率试验,见表 1.

表 1 坍落度试验结果汇总

Tab.1 Summary of slump test results

土样	胶粉掺入比	110 mm 对应 含水率	液限		塑限	
			自来水	模拟渗滤液	自来水	模拟渗滤液
高岭土-膨润土	0	45.7	37.99	36.78	20.65	20.73
	7.5	44.6	36.99	36.22	20.32	21.01
	15.0	44.3	36.53	34.83	21.39	21.24
	25.0	42.9	35.71	34.68	20.75	20.32
粗胶粉改性 土-膨润土	7.5	46.1	—	—	—	—
	15.0	44.5	—	—	—	—
	25.0	43.6	—	—	—	—

依据土工试验规程 (SL 237—1999),将土样装入直径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀,振捣去除土样内的气泡,抽气饱和 24 h 后进行固结试验. 模拟渗滤液拌和的土样进行固结试验时,将固结室中注入模拟渗滤液,用塑料薄膜罩在固结仪上

以防模拟渗滤液挥发. 以 24 h 为周期,逐次加载 12.5、25.0、50.0、100.0、200.0、300.0 和 400.0 kPa,计量每级压力下土样的变形量,得到压缩和固结指标.

采用吴凤彩提出的容量法^[17],取高岭土和膨

润土颗粒,分别用自来水和模拟渗滤液进行吸附结合水试验.将干燥土样装入盛有定量水的容量瓶,根据容量瓶液面的变化计算吸附结合水量 w ,即

$$w = \frac{\rho_e \rho}{\rho_e - \rho} \cdot \frac{\Delta V}{m_s}, \quad (1)$$

式中: ρ_e 为吸附结合水的平均密度, kg/m^3 ,取 $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; ρ 为室温($20\text{ }^\circ\text{C}$)时自由水的密度, kg/m^3 ; ΔV 为自由水转化为结合水时水体积的变化量; m_s 为干燥土样质量.

2 试验结果分析

2.1 胶粉特征对土样压缩、固结性质的影响

2.1.1 胶粉特征对压缩性的影响

图2为胶粉改性土样的压缩系数 a 与压力 P 的关系曲线(3种掺入比时规律相同,以掺入比为25.0%时的数据为代表).由图2可以发现:①压缩系数随压力增大而减小,表明随着压力增大,胶粉改性土样骨架逐渐被压密、抵抗变形的能力逐渐增强;②相同压力下粗胶粉改性土样压缩系数大于细胶粉改性土样,胶粉尺寸较大时土样的压缩性较大;③100~200 kPa压力下胶粉改性土样的压缩系数为 $0.39 \sim 0.80 \text{ MPa}^{-1}$,属于中~高压缩性土.

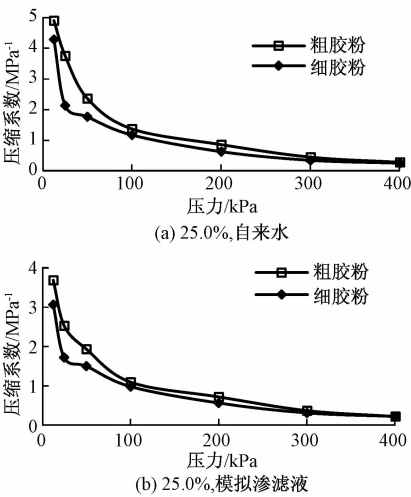


图2 不同尺寸胶粉改性土样压缩系数与压力的关系
Fig.2 Relationship between compressibility coefficient and pressures for soils modified with different size rubber

图3为压缩率与掺入比及液限的关系.其中 C_c 为压缩指数, e_0 为初始孔隙比,压缩率可以用来消除初始含水率(或初始孔隙比)的影响^[11].由图3可以看出,不同胶粉尺寸和试验用水情况

下,压缩率在 $0.06 \sim 0.12$ 变化,与文献[11~12]得到的土-膨润土防渗帷幕材料压缩率范围一致.当胶粉掺入比一定时,试验用水和胶粉尺寸的变化导致土样压缩率有一定差异,试验的离散性导致差异的规律性不强,总体来看,压缩率随胶粉掺入比的增加呈增大趋势.图3(c)为压缩率与土样液限的关系.由图3(c)可以看出,压缩率随液限的增大而减小,与文献[11~12]的结果相反.其原因在于胶粉颗粒与土颗粒存在一定的差异:作为粗砂-细砂粒组成的胶粉颗粒加入到土中引起液限降低(见表1),由于胶粉颗粒与文献[11]和文献[12]中的活性炭及沸石等改性材料不同,混合土压缩时除了孔隙被压缩以外,胶粉颗粒本身也可能被压缩^[18],故掺入量越大土样的压缩性越强,因此出现压缩率随液限增大而减小的现象.

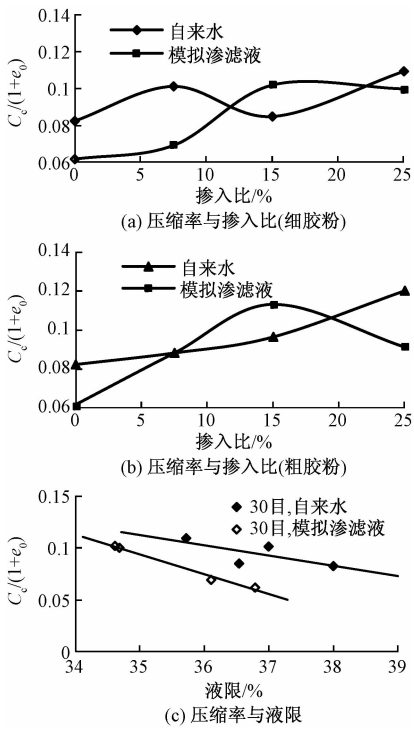


图3 压缩率与掺入比及液限的关系
Fig.3 Relationship between compression rate and mixing ratio or liquid limit

2.1.2 胶粉特征对固结性质的影响

图4为不同尺寸胶粉改性土固结系数 C_v 与压力关系曲线,图5为不同掺入比胶粉改性土固结系数与压力关系曲线.由图4、图5可以看出:①胶粉改性土固结系数在 $0.5 \times 10^{-3} \sim 6.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$,与文献[13]中沸石改性土-膨润土材料的试验结果接近.②土样固结系数随着压力的增加呈现出先增大后减小的趋势,与正常固结软土的变化规律一致^[19].固结系数与渗透系数成正

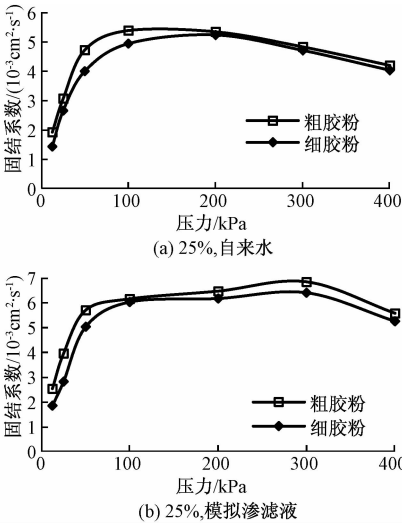


图 4 不同尺寸胶粉改性土样固结系数与压力的关系
Fig. 4 Relationship between consolidation coefficient and pressures for soils modified with different size rubber

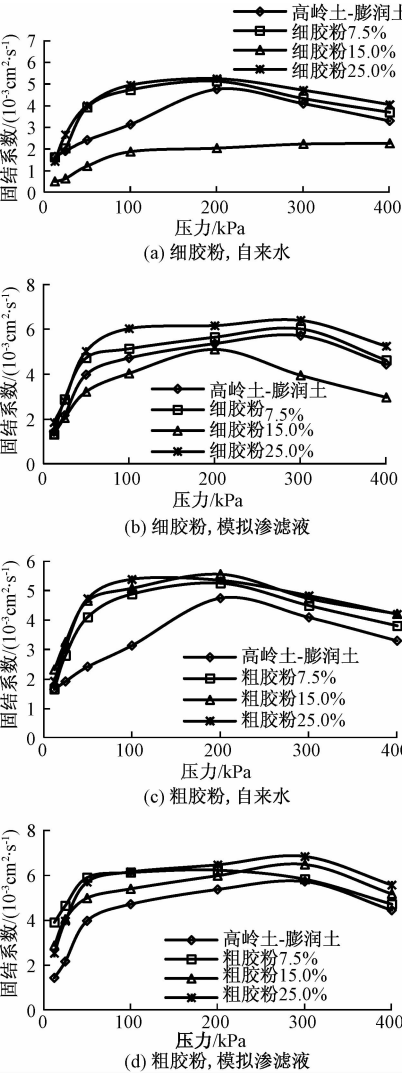


图 5 不同掺入比胶粉改性土样固结系数与压力的关系
Fig. 5 Relationship between consolidation coefficient and pressures at different rubber mixing ratio

比、与压缩系数成反比. 随着压力增大, 压缩系数和渗透系数均减小. 当压力较小时, 压缩系数减小相对较快 (见图 2), 固结系数随压力增大而增大; 当压力较大时, 压缩系数减小速度减慢, 而随着孔隙压缩、自由水排出, 结合水占主要地位, 渗透系数减小更显著, 固结系数随压力增大而有所降低. ③粗胶粉改性土固结系数略大于细胶粉改性土, 表明胶粉尺寸大有助于加速土样固结. ④除少数数据点外, 随着胶粉掺入比的增加, 胶粉改性土固结系数有增大的趋势, 表明土样固结速度随着胶粉掺入比的增加而增快.

2.2 模拟渗滤液对土样压缩、固结性质的影响

2.2.1 模拟渗滤液对压缩性质的影响

图 6 为自来水和模拟渗滤液作用下胶粉改性土压缩系数与压力关系曲线. 由图 6 可以看出, 两种情况下胶粉改性土压缩系数均随压力增大而减小. 当胶粉掺入比相同时, 模拟渗滤液条件下土样的压缩系数略小于自来水条件下的对应值, 前者压缩性较小, 与文献 [8-9] 试验规律相同; 两种情况下压缩系数最大相差 1.7 倍, 但压力增至 400 kPa 时压缩系数基本一致.

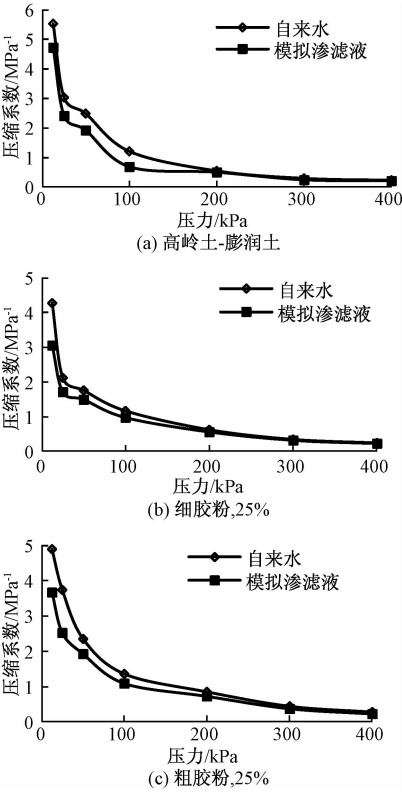


图 6 不同溶液作用下胶粉改性土压缩系数与压力的关系
Fig. 6 Relationship between compressibility coefficient and pressures under different solutions

2.2.2 模拟渗滤液对固结性质的影响

图7为不同试验用水情况下胶粉改性土固结系数与压力关系的代表性曲线.由图7可以看出,两种情况下固结系数随压力的变化规律一致,均随压力增大先增大后减小.当胶粉掺入比相同时,模拟渗滤液条件下土样固结系数均大于自来水条件下的对应值,前者为后者的1.0~3.2倍,表明模拟渗滤液作用下土样的固结速度增快.

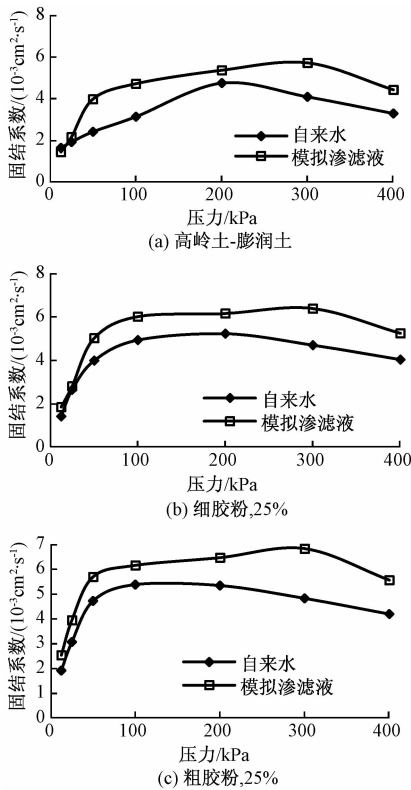


图7 不同溶液作用下胶粉改性土固结系数与压力的关系

Fig.7 Relationship between consolidation coefficient and pressures under different solutions

2.3 讨论

总体而言,随着胶粉掺入量增加,土样的压缩性增强、固结速度增快.①胶粉颗粒自身的压缩性大于黏土颗粒^[18],故土样的压缩性随胶粉掺入比的增加而增大;而胶粉粒径大于黏土颗粒,导致土样固结速度增快.②由表1可知,不同掺入比时,110 mm 塌落度对应含水率变化范围为42.9%~46.1%;土样含水率虽然变化不大,但由于胶粉具有憎水性(其吸水率仅1.1%左右)^[18],造成胶粉掺入比越大土样中黏土颗粒含水率越高,压缩性增强.③由表1可知,细胶粉改性土110 mm 塌落度对应含水率约为土样液限的1.2倍,土样处于流塑状态,孔隙中存

在一定量的自由水.由表1和图8可以看出,当胶粉掺入比增加时,土样液限减小,而液限大致反映土中结合水量,因此孔隙中结合水量减少而自由水量增多,自由水更容易被排出,固结速度增快.

以上分析还发现,模拟渗滤液作用下土样压缩性稍小,固结速度增快.其原因可从液限和结合水的变化来分析.图8为液限与胶粉掺入比的关系曲线,图9为模拟渗滤液对吸附结合水量的影响.从图8可知,当掺入比相同时模拟渗滤液条件下,液限比自来水条件下小0.77%~1.7%.从图9可知,在模拟渗滤液作用下高岭土吸附结合水量减小2.2%,膨润土减小39.2%.因此,模拟渗滤液中Ca²⁺与土中Na⁺发生离子交换,液限降低、结合水量减小,结合水膜厚度变薄,使土颗粒团聚,压缩性降低;自由水含量相对增大,导致固结速度加快.

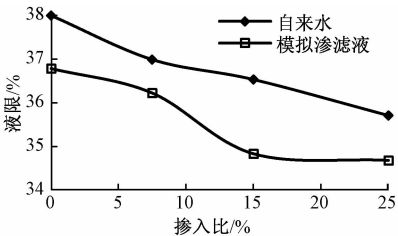


图8 液限与胶粉掺入比的关系曲线

Fig.8 Relationship between liquid limit and rubber mixing ratio

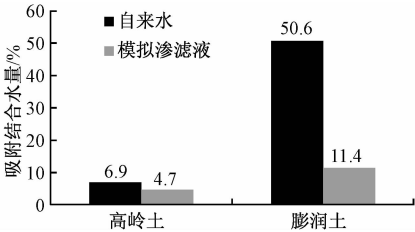


图9 模拟渗滤液对吸附结合水量的影响

Fig.9 Effect of simulated leachate on adsorbed water

3 结论

(1)在100~200 kPa 压力下,胶粉改性土压缩系数为0.39~0.80 MPa⁻¹,属于中~高压缩性土;由于胶粉颗粒具有不同于黏土颗粒的压缩性和憎水性,胶粉改性土的压缩性随胶粉掺入比增加而增大;胶粉尺寸较大的改性土压缩性较大,粗胶粉改性土的压缩系数约为细胶粉改性土的1.2~1.4倍.

(2)胶粉改性土固结系数为0.5×10⁻³~

$6.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$,随压力增加呈现先增大后减小的趋势;随着胶粉掺入比增加,土样液限减小,孔隙中自由水量增大,胶粉改性土的固结速度增快;粗胶粉改性土的固结系数略大于细胶粉改性土。

(3)当胶粉掺入比一定时,模拟渗滤液的作用使土样压缩系数减小,固结系数增大,其主要原因在于模拟渗滤液中 Ca^{2+} 与土中 Na^{+} 发生离子交换,使液限降低、结合水量减小、结合水膜厚度变薄,导致土样压缩性减小、固结速度增快。

(4)在本文条件下,胶粉和模拟渗滤液对土-膨润土材料的压缩系数和固结系数有一定影响,但在土-膨润土防渗帷幕材料常见范围之内。为确定合理的胶粉掺入量,还需增加胶粉掺入比、选用实际渗滤液进行试验,并结合渗透性和吸附性综合确定。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中国资源综合利用年度报告(2014) [R/OL]. http://www.sdpc.gov.cn/xwzx/xwfb/201410/t20141009_628793.html.

[2] EDIL T B. A review of mechanical and chemical properties of shredded tires and soil mixtures [J]. *Recycled materials in geotechnics*, 2005(127): 1-21.

[3] 李丽华, 马强, 王翠英, 等. 废旧轮胎颗粒水泥混合土三轴试验研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2014, 35(4): 33-35.

[4] 詹良通, 刘伟. 垃圾填埋场污染物击穿竖向防渗帷幕时间的影响因素分析及设计厚度的简化计算公式[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(11): 1-10.

[5] 朱伟, 徐浩青, 王升位, 等. CaCl_2 溶液对不同黏土基防渗墙渗透性的影响[J]. *岩土力学*, 2016, 37(5): 1224-1230.

[6] DAPPOLONIA D J. Soil-bentonite slurry trench cutoffs [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 1980, 106(4): 399-417.

[7] YEO S, SHACKELFORD C D, EVANS J C. Membrane behavior of model soil-bentonite backfills [J]. *Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2005, 131(4): 418-429.

[8] SHARIATMADARI N, SALAMI M, KARIMPOUR-

FAED M. Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers [J]. *International journal of civil engineering*, 2011, 9(2): 103-110.

[9] 范日东, 杜延军, 陈左波, 等. 受铅污染的土-膨润土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 841-847.

[10] 何俊, 胡晓瑾, 阮晓晨, 等. 两种土压力水平下防渗帷幕的防污能力[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(2): 63-67.

[11] DU Y J, FAN R D, LIU S Y, et al. Workability, compressibility and hydraulic conductivity of zeolite-amended clayey soil/calcium-bentonite backfills for slurry-trench cutoff walls [J]. *Engineering geology*, 2015, 195: 258-268.

[12] MALUSIS M A, BARBEN E J, EVANS J C. Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2009, 135(5): 664-672.

[13] HONG C S, SHACKELFORD C D, MALUSIS M A. Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite-amended soil-bentonite backfills [J]. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 2012, 138(1): 15-25.

[14] PARK J K, KIM J Y, EDIL T B. Mitigation of organic compound movement in landfills by shredded tires [J]. *Water environment research*, 1996, 68(1): 4-10.

[15] REDDY K R, STARK T D, MARELLA A. Beneficial use of shredded tires as drainage material in cover systems for abandoned landfills [J]. *Practice periodical of hazardous, toxic, and radioactive waste management*, 2010, 14(1): 47-60.

[16] 陈永贵, 张可能, 邓飞跃, 等. 粘土固化注浆帷幕对渗滤液中苯酚的吸附性能研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2009, 40(1): 243-247.

[17] 吴凤彩. 粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J]. *岩土工程学报*, 1984, 6(6): 84-93.

[18] 李朝晖. 废轮胎颗粒与黄土混合物岩土工程特性研究[D]. 兰州: 兰州大学土木工程与力学学院, 2011.

[19] 林鹏, 许镇鸿, 徐鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(1): 106-108.

mers[J]. Bioresource technology, 2011, 102 (21) : 10104 – 10113.

[12] DADI A P, VARANASI S, SCHALL C A. Enhance-ment of cellulose saccharification kinetics using an ionic liquid pretreatment step[J]. Biotechnology and bio-engineering, 2006, 95 (5) : 904 – 910.

[13] WATANABE H. The study of factors influencing the depolymerisation of cellulose using a solid catalyst in ionic liquids [J]. Carbohydrate polymers, 2010, 80 (4) : 1168 – 1171.

Alcoholysis of Cellulose into Ethyl Levulinate Catalyzed by SO₄²⁻/ZrO₂/USY

CHANG Chun, AN Ran, KONG Pengfei

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Solid acid catalyst SO₄²⁻/ZrO₂/USY was prepared by precipitation-dipping method. And the effects of different parameters on the conversion of cellulose to ethyl levulinate were also investigated. The results showed that 10% SO₄²⁻/ZrO₂/USY presented the highest catalyst activity when calcined at 400 ℃ for 3 h, and the high yield (38. 1 mol%) of EL was obtained at 200 ℃ for 3 h, with a catalyst dosage of 10 g/L. EL yields of 50. 77 mol% , 39. 55 mol% , 44. 87 mol% and 43. 59 mol% could be obtained from fructose, glucose, sucrose and inulin, respectively. The catalysts were characterized by XRD, FT-IR, BET, NH₃-TPD and TG-DTA. The prepared solid acid catalyst could be recycled and reused four times with good catalytic activity.

Key words: SO₄²⁻/ZrO₂/USY; cellulose; catalyze; alcoholysis; ethyl levulinate

(上接第 65 页)

Consolidation Properties of Ground Rubber Modified Soil-bentonite Backfills

HE Jun, YAN Xing, HU Xiaojin, WANG Xiaoqi

(College of Civil and Architectural Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The waste tire ground rubber was used as a modified material, to enhance the contaminants adsorption capacity of soil-bentonite backfill. Based on the consolidation tests of soil-bentonite modified with ground rubber, the effects of ground rubber and simulated leachate on consolidation and compression properties were studied. The soil-bentonite modified with ground rubber was medium to high compressibility soil. As ground rubber particles had different compressibility and hydrophobicity from clay particles, the compressibility and consolidation velocity of the samples increased slightly with the increase of rubber mixing content. For the sample modified with bigger ground rubber, the compressibility and consolidation velocity were larger. When the rubber mixing content is constant, simulated leachate would decrease the liquid limit, the combined water and the thickness of absorbed water, which would reduce the compressibility and increase the consolidation velocity of the sample.

Key words: soil-bentonite modified with ground rubber; coefficient of consolidation; coefficient of compressibility; simulated leachate