

CaCl₂作用下PAC改良膨润土滤饼的渗透特性研究

沈胜强^{1,2}, 杜延军^{1,2}, 魏明俐³, 薛强³, 杨玉玲^{1,2}

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏南京 210096; 2. 东南大学江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏南京 210096;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北武汉 430071)

摘要: 膨润土在盐溶液作用下化学相容性降低, 严重影响膨润土系隔离墙的防渗性能。PB 为提高膨润土在盐溶液作用下的防渗性能, 通过将 2% 的聚阴离子纤维素(PAC)与钠化膨润土(CB)直接拌合, 制备一种聚合物改良膨润土(PB)。基于改进滤失试验测试不同压力下受 CaCl₂ 溶液和蒸馏水作用的 PB 滤饼渗透系数(分别为 k_c 和 k_w)。结果表明, 随 CaCl₂ 浓度增大, PB 试样的滤失液体积和滤饼渗透系数增大, 但 PB 试样滤失液体积始终小于规范限值(25 mL)。在试验溶液浓度范围内, PB 滤饼渗透系数小于未经改良的 CB 滤饼渗透系数。相同有效应力作用下, 随 CaCl₂ 浓度增大, PB 滤饼含水率 w 降低, 导致孔隙比虽减小, PB 但渗透系数增大; 而有效应力的增长可抵消一部分化学溶液对滤饼渗透系数的影响。当 CaCl₂ 浓度 60 mM 时, PB 的 $k_c/k_w < 10$, 其渗透系数无明显增长, 表明采用 PAC 对膨润土进行改良, 可有效提高盐溶液作用下膨润土滤饼的防渗性能。

关键词: 土力学; 聚阴离子纤维素; 膨润土; 竖向隔离墙; 渗透系数; 化学相容性

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)11-2810-08

Hydraulic conductivity of filter cakes of polyanionic cellulose-amended bentonite slurries in calcium chloride solutions

SHEN Shengqiang^{1,2}, DU Yanjun^{1,2}, WEI Mingli³, XUE Qiang³, YANG Yuling^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The incompatibility between the bentonite and inorganic solutions has adverse impact on the impermeability of the filter cakes and backfills in soil-bentonite slurry walls. To improve the hydraulic performance of bentonite were backfills exposed to inorganic solutions, the Polyanionic Cellulose(PAC) and sodium activated bentonite were directly blended to produce a polymer-amended bentonite termed as PB. The Calcium Chloride(CaCl₂) solutions were selected as the test solutions, and the hydraulic conductivities of the bentonite filter cakes to distilled water(k_w) and to concentrated CaCl₂ solutions(k_c) were measured through modified filtrate loss tests under various applied pressures. The results indicate that the k_c of PB filter cake increases with the increase in CaCl₂ concentrations, whereas the filtrate loss volumes(V) of PB specimens remains

收稿日期: 2017-07-25; **修回日期:** 2017-09-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330641); 国家自然科学基金资助项目(51278100); 江苏省重点研发计划(BE2017715)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41330641 and 51278100) and Jiangsu Key Research and Development Project(Grant No. BE2017715)

作者简介: 沈胜强(1989-), 男, 2011年毕业于内蒙古工业大学交通工程专业, 现为博士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: sqiangqiang110@163.com。通讯作者: 杜延军(1972-), 男, 博士, 现任教授、博士生导师, 主要从事环境岩土工程研究方面的研究工作。E-mail: duyuanjun@seu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jme.2017.1167

less than the standard limits(25 mL). The hydraulic conductivity of PB is lower than that of CB in the range of CaCl₂ concentration used in the study. The water contents(*w*) of both filter cakes decrease with the increasing of CaCl₂ concentration for a given average effective pressure, which results in the decreasing in the void ratio of filter cakes and increasing in the *k_c* of both filter cakes. The increasing of average effective pressure can partially counteract the adverse effect on *k_c* caused by the increasing of CaCl₂ concentration. The hydraulic conductivity ratio(*k_c/k_w*) of the PB filter cake is less than 10 when the CaCl₂ concentration is no more than 60 mM, illustrating that the *k_c* of PB filter cake has no significant increasing. Therefore, mixing PAC with bentonite can improve the hydraulic performance effectively.

Key words : soil mechanics ; polyanionic cellulose ; bentonite ; vertical cutoff walls ; hydraulic conductivity ; chemical compatibility

1 引言

近年来,工业企业的转型或迁移遗留下大量的工业场地旧址,江苏省近 5 年内约 5 000 家重污染的企业相继停产或搬迁。原有场地的污染问题严重阻碍了场地再利用,影响人类健康和城市发展^[1-5]。地下水污染状况同样严峻,90%浅层地下水受到污染,更有 37%的地下水不宜作为饮用水源^[5]。《2014 年中国环境状况公报》显示,在近 5 000 个地下水监测点位中,较差级的监测点比例为 45.4%,极差级的监测点比例为 16.1%;在主要河流、湖泊等地表水监测点位中,V 类水占到了 9.2%,工业废水排放是其主要污染源。

重金属污染是工业场地及内地下水中常见的污染类型之一。美国超基金(Superfund)在治理工业污染场地及其地下水时^[6-8],通常处理方式是先利用土-膨润土竖向隔离墙(soil-bentonite vertical cutoff wall,简称 S-B 隔离墙)或炉渣-水泥-膨润土竖向隔离墙(slag-cement-bentonite cutoff wall)将污染场地及地下水与周边区域隔离,将污染地下水阻滞在一定区域内,防止污染物迁移;然后采取物理、化学和生物修复等技术综合治理。S-B 隔离墙作为一种重要技术手段广泛应用于污染场地及地下水修复中^[6-8]。

在 S-B 竖向隔离墙施工时,应预先开挖沟槽;向槽内灌注膨润土泥浆维持稳定性^[8-14]。待沟槽侧壁形成厚 2~4 mm 的滤饼后,将隔离墙材料(backfills)回填入沟槽,并对顶部覆盖压实,形成竖向隔离屏障^[14]。W. E. Grube^[15]认为隔离墙材料的回填将会破坏滤饼的完整性,从而降低滤饼的防渗性能,但 M. A. Khoury 等^[8-14]认为回填隔离墙材料对滤饼完整性的影响有限,滤饼是隔离墙的防渗系统

中的重要组成部分。T. B. Nguyen 等^[9,11-12,14]的研究表明膨润土滤饼的渗透系数为 $8.2 \times 10^{-12} \sim 2.6 \times 10^{-10}$ m/s,与 S-B 竖向隔离墙材料的渗透系数设计推荐值(约 1.0×10^{-9} m/s)相比,低 1~2 个数量级。因此,膨润土滤饼对隔离墙整体防渗性能起到了重要作用^[8-14]。

已有研究表明,膨润土在稀溶液或蒸馏水作用下,具有良好的防渗性。而现存的污染地下水离子强度(ionic strength)较高,膨润土暴露在此环境下,双电层厚度^[16]减小,膨胀指数减小,导致渗透路径通畅,滤饼渗透系数增大。因此,有必要开展提高污染液作用下膨润土防渗性能的研究。

改进滤失试验(modified fluid loss test, MFL)是将石油行业的 API 滤失试验改进得到的一种可方便、有效的测试滤饼渗透系数的试验方法^[17-18]。根据达西定理和滤失理论,通过一定时间段内的滤失液体积反算出渗透系数^[8-13]。D. Lee 等^[10]测试了不同膨润土掺量浆液所形成滤饼的渗透系数,结果表明膨润土浆液最优掺量为 6%,当掺量超过 6%时,滤饼渗透系数无明显降低。Y. Liu 等^[11]对比了分别由 MFL 试验和柔性壁渗透试验测定的膨润土渗透系数,二者结果基本一致。T. B. Nguyen 等^[12]通过 MFL 试验测定了采用聚合物对膨润土改良前后的滤饼渗透系数差异。J. Chung 和 D. E. Daniel^[13]研究表明,有效应力较小时(100 kPa),滤饼渗透系数(MFL 试验测得)和 GCL 渗透系数(柔性壁渗透试验测得)结果趋于一致;有效应力较大时(>100 kPa),MFL 试验结果略高于柔性壁渗透试验结果。

国外较早开展了利用聚合物改良提高膨润土的防渗性能的研究工作:G. Di Emidio 等^[19-20]通过向膨润土浆液中添加羧甲基纤维素钠(CMC),高温烘干后研磨制得了 HYPER Clay,在一定浓度的海水、CaCl₂ 溶液作用下可维持低渗透系数;J. Scalia 等^[21-22]

研究了聚合物膨润土复合材料(BPC)的化学相容性,试验测得 BPC 在盐、酸、碱溶液作用下的具备良好的化学相容性,防渗效果较优。聚阴离子纤维素(polyanionic cellulose, PAC)是一种高分子聚合物,无毒无味,应用广泛。常作为食品中的增稠剂、石油钻井施工中的降滤失剂和洗化用品中的乳化剂等;关于 PAC 改良膨润土滤饼化学相容性的研究尚未见报道。

本研究通过将 PAC 和膨润土粉末直接拌合制备了一种聚合物改良膨润土,基于 MFL 试验测试了在蒸馏水和 CaCl₂ 溶液作用下 PAC 改良膨润土滤饼的渗透系数,分析讨论了 CaCl₂ 浓度、有效应力、孔隙比等对滤饼渗透系数的影响规律。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

钙基膨润土来源广泛,但防渗性较钠基膨润土差;因此在出售前,厂商大多对其进行钠化处理,以提高防渗性能。试验所用膨润土即为钙基膨润土经钠化处理后制得的商用膨润土(记为 CB),其基本性质指标如表 1 所示。

表 1 CB 和 PB 的基本性质指标

Table 1 Properties of bentonite used in this study

物理指标	土的分类	细粒含量/%	黏粒含量/%	相对密度	pH	液限
CB	CH	100	49	2.63	10.33	269.4
PB	-	-	-	2.60	10.12	379.2
测试方法	ASTM D 2487	ASTM D 422	ASTM D 422	ASTM D 854	ASTM D 4972	ASTM D 4318

所用聚合物为 PAC,由无锡市凤民环保科技有限公司生产。PAC 因其含有较多的羧基和羟基等亲水基团,因而具有极强的亲水性和保水性,常用作食品中的增稠剂和农业中的保水剂。PAC 的详细物理化学性质来自产品说明书,如表 2 所示。

表 2 试验用聚合物基本理化性质表

Table 2 Properties of polymer used in this study

聚合物名称	类型	粒径/mm	重均分子量 <i>M_w</i>	多分散系数 <i>PDI</i>	表观黏度/(Pa·s)	w/%	相对密度 <i>G_s</i>	pH
PAC	阴离子型	<0.151	730 000	3.22	35	5.7	1.26	7.3

将 CB 与 PAC 分别风干后,再进行拌合,其中

聚合物掺量为 2%(与膨润土干土质量之比),将 2 g 聚合物和 100 g 膨润土一同放入 250 mL 的 PE 瓶内,拧紧瓶盖后,手持振荡 5 min,静置密封养护 24 h。文中 PAC 改良膨润土用 PB 表示(见表 1)。

选择 CaCl₂ 溶液为模拟污染地下水。与 Pb²⁺, Zn²⁺ 等相比, Ca²⁺ 水化半径小,对膨润土双电层压缩程度更大^[16, 23]。CaCl₂ 浓度取为 5, 10, 20, 40, 60 mM, 对应的 Ca²⁺ 的质量浓度为 0 ~ 2 400 mg/L, 该浓度已经涵盖了 Y. J. Du 等^[2-4, 24] 的重金属(或 CaCl₂) 浓度;蒸馏水(distilled water, DW)作为对照组。蒸馏水作用下的试样,记为 PB-0,受 20 mM 的 CaCl₂ 溶液作用试样,记为 PB-20,其余试样均据此编号。

2.2 试验方法

为满足膨润土浆液的施工和易性要求^[25],试验测得 PB 掺量取为 10% 时,可满足各项和易性指标的目标值,其浆液施工和易性指标如表 3 所示。

表 3 PB 浆液和易性目标值与实测值

Table 3 Target and measured values of slurries workability

物理指标	滤失液体积/mL	pH	玛氏黏度/s	密度/(g·cm ⁻³)
实测值	5.8	9.4	45	1.03
目标值	<25	9~11	约 40	1.03~1.10

试验采用 API 标准滤失仪,滤纸类型采用慢速定量滤纸。试验中,将膨润土浆液倒入滤杯至内刻度线(共约 250 mL),将滤杯密封后,并装配到滤失仪上。向膨润土浆液顶部处施加气压 *P*₀; 试验分 5 批次进行,气压值依次设定为 50, 100, 200, 400 和 690 kPa。记录时间 *t* 内的滤失量 *V*,记录时间间隔为 5 或 7.5 min,试验持续 30 min 后结束,建立 *P*₀*tV*⁻¹-*V* 关系。取出附有滤饼的滤纸,用土工刀轻微抹去滤饼表面附着的浆液,利用游标卡尺测定滤饼厚度 3 次,取平均值;之后测定滤饼含水率。

膨润土滤饼渗透系数可通过下式^[13]确定:

$$k_c = \frac{\beta \gamma_w V^2}{2P_0 A^2 t} = \frac{\beta \gamma_w}{2A^2 \varphi} \quad (1)$$

式中:*k_c* 为溶液作用下的滤饼渗透系数;*V* 为滤失液体积(mL);*t* 为试验持续时间(s);*A* 为滤杯和滤饼横截面积(m²);*P*₀ 为滤饼所受总压力,为所施加气压与滤饼上覆水压之和(kPa),试验中将 *P*₀ 简化为所施加气压值;*φ* 为 *P*₀*tV*⁻¹-*V* 曲线斜率(kPa·s·mL⁻²);*β* 为滤饼体积与 *V* 比例系数,根据下式确定^[13]:

$$\beta = \frac{LA}{V} = \frac{C_m \rho_w (1+e)}{(1-C_m) \rho_s - e C_m \rho_w} \quad (2)$$

式中： C_m 为膨润土浆液中膨润土掺量(%)； ρ_s 为膨润土颗粒的密度(g/cm³)； ρ_w 为水的密度(g/cm³)； e 为滤饼孔隙比，根据滤饼含水率(w)、相对密度(G_s)确定(滤饼饱和度为 100%)； k_w 为蒸馏水作用下的滤饼渗透系数； k_c/k_w 为渗透系数比，用来描述受溶液作用后的滤饼渗透系数的变化幅度。

J. Chung 和 D. E. Daniel^[13]认为膨润土滤饼所受有效应力沿厚度方向呈非线性分布，假定 $\lg k - \lg P_0$ 呈线性关系时，则膨润土滤饼所受平均有效应力 $P_{e,ave}$ (kPa)可表示为

$$P_{e,ave} = P_0 \left(\frac{1-\alpha}{2-\alpha} \right) \quad (3)$$

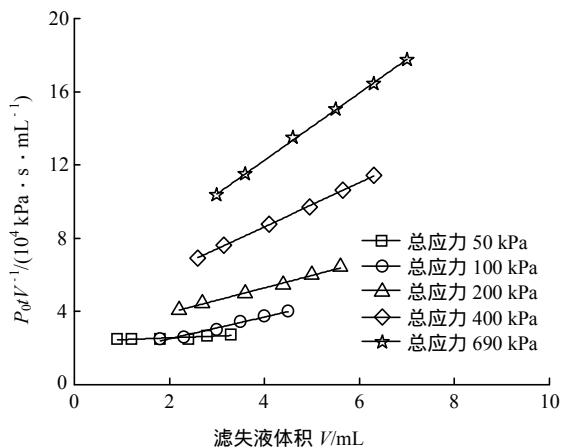
式中： α 为 $\lg k - \lg P_0$ 曲线斜率的绝对值。试验中滤饼的平均有效应力可根据式(3)确定。

3 分析与讨论

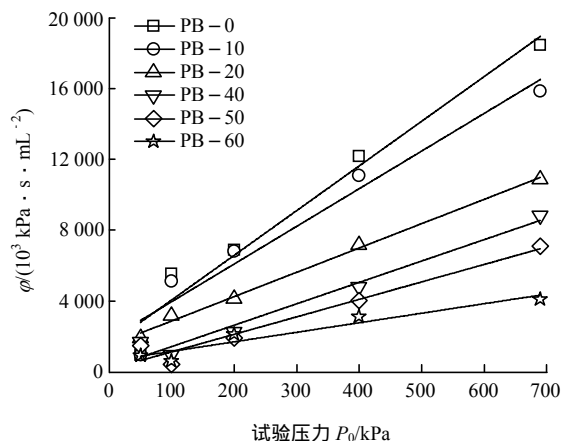
3.1 滤失液体积

以 PB-0 的滤失试验结果为例，图 1(a)为 PB-0 试样的 $P_0 t / V - V$ 的关系。二者呈良好线性关系，对其进行线性拟合，决定系数 $R^2 = 0.978 \sim 0.999$ ；即在 P_0 恒定状态下， ϕ 为定值。图 1(b)为不同压力下的 ϕ 值与滤饼所受总应力的关系。总体上，PB 滤饼试样的 ϕ 值与对应压力 P_0 呈良好线性关系；随 P_0 增大， ϕ 值增大；而相同 P_0 作用下，随 CaCl₂ 浓度增大， ϕ 值减小。

图 2 为滤失液体积 V 与滤饼所受 $P_{e,ave}$ 关系， V 与 $\lg P_{e,ave}$ 呈较好的线性关系。随 $P_{e,ave}$ 的增大，PB 浆液滤失液体积 V 增大；相同 $P_{e,ave}$ 作用下， V 随 CaCl₂ 浓度增大而增大。CaCl₂ 浓度 60 mM 时，



(a) PB-0 浆液的 $P_0 t / V$ 与滤失量 V 关系



(b) ϕ 值与总应力关系

图 1 试样各参数与总应力关系

Fig.1 Relationship between index of specimens and applies overall pressures

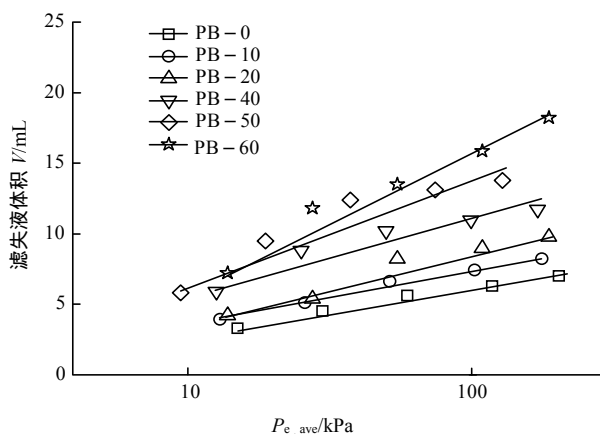


图 2 滤失液体积 V 与滤饼所受 $P_{e,ave}$ 关系

Fig.2 Relationship between filtration loss volume(V) and average effective pressure($P_{e,ave}$)

$V < 20$ mL；而当 CaCl₂ 浓度 > 60 mM 时，PB 试样的滤失液体积显著增大，经 100 kPa 试验压力作用 30 min 后， V 达到 89 mL(4~5 倍)，远超过规范限值(< 25 mL)，即渗透系数也较大；表明 PB(PAC 掺量为 2%)制备质量分数 10%的 PB 浆液，所能承受的最大 CaCl₂ 浓度为 60 mM；超过该浓度，滤饼的防渗性能明显降低。PB 浆液滤失量及滤饼物理性质指标如表 4 所示。

3.2 滤饼渗透系数

图 3 为 PB 滤饼渗透系数与滤失量体积关系。整体上，滤饼的渗透系数与滤失液体积呈良好线性关系，滤饼渗透系数随滤失液体积增大而增大。对比相同试验条件下 CB 滤饼的渗透系数和滤失液体积的结果可知(参见沈胜强等^[26])；渗透系数与滤失液体积变化一致，PB 滤饼的渗透系数和滤失液体积均小于同条件下 CB 滤饼的渗透系数和滤失液体

表 4 PB 浆液滤失量及滤饼物理性质指标

Table 4 Filtration loss volume and physical properties of PB filter cakes under various pressures

试样名称	滤失量/mL	相对密度 G_s	含水率/%	孔隙比 e
PB-0	3.3 ~ 7.0	2.600	323 ~ 385	8.40 ~ 10.01
PB-5	3.9 ~ 8.2	2.606	330 ~ 383	8.60 ~ 9.97
PB-10	4.2 ~ 9.8	2.612	315 ~ 371	8.22 ~ 9.67
PB-20	5.9 ~ 10.2	2.617	304 ~ 353	7.96 ~ 9.23
PB-40	5.8 ~ 13.8	2.622	266 ~ 349	7.00 ~ 9.15
PB-60	5.2 ~ 18.2	2.629	260 ~ 340	6.85 ~ 8.94

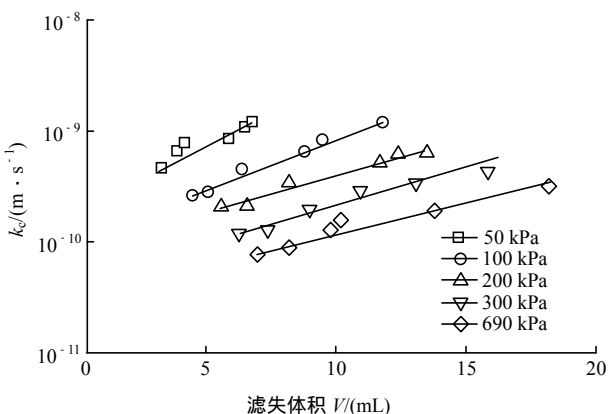


图 3 PB 滤饼渗透系数与滤失液体积关系

Fig.3 The relationships between hydraulic conductivity(k_c) of bentonite filter cake and filtration loss volume(V)

积。可能原因为聚阴离子纤维素有效降低了试样的滤失液体积，其含有的羧基可与 Ca^{2+} 发生螯合反应^[27]，羟基可与 Ca^{2+} 络合^[28]，此 2 类结合方式均可降低 Ca^{2+} 对膨润土双电层的压缩(双电层的压缩可导致渗流通道增大，渗流路径畅通)，进而减小了 Ca^{2+} 对膨润土滤饼渗透系数的影响。

图 4 为 PB 滤饼渗透系数与平均有效应力的关系。在相同(或相近)的 $P_{e,ave}$ 作用下，PB 滤饼渗透系数随 $CaCl_2$ 浓度增大而增大；在试验溶液浓度范围内，PB 滤饼的渗透系数均随 $P_{e,ave}$ 的增大而呈降低趋势；且此趋势不受溶液浓度变化的影响。PB 滤饼渗透系数与平均有效应力可表示为

$$\lg k_c = -0.661 \lg P_{e,ave} - 8.34 \quad (R^2 = 0.870) \quad (4)$$

通过式(4)计算出 PB 滤饼渗透系数，与试验实测渗透系数在同一数量级，且二者误差在 1/2 ~ 2 倍以内(即某一有效应力下的计算值与该应力下的试验实测值之比)，在工程中，可通过计算 PB 滤饼所受平均有效应力，反演其渗透系数。

3.3 滤饼孔隙比

图 5(a)为 PB 试样的滤饼孔隙比与有效应力关

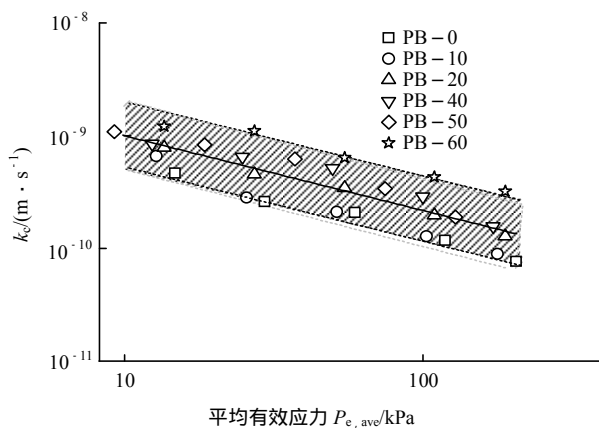
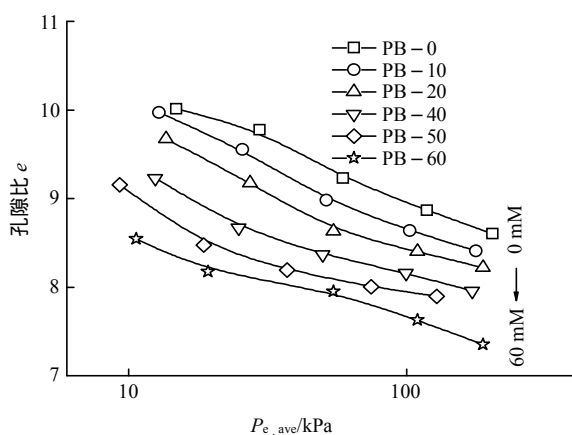
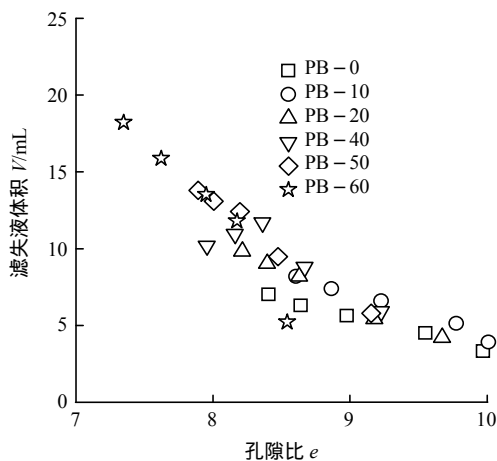


图 4 PB 滤饼渗透系数与平均有效应力关系

Fig.4 The relationship between hydraulic conductivity(k_c) of filter cakes and average effective pressure($P_{e,ave}$)



(a) 滤饼 e - $P_{e,ave}$ 关系



(b) e - V 关系

图 5 滤饼孔隙比与滤失液体积、有效应力的关系

Fig.5 Relationship between void ratio and filtrate loss volumes and average effective pressures

系，图 5(b)为滤饼孔隙比与其含水率之间关系。各浓度作用下的 PB 试样所受 $P_{e,ave}$ 范围相近，为 9 ~ 188 kPa；在此 $P_{e,ave}$ 范围内，PB-0 滤饼的 e 范围为 8.6 ~ 10.0，PB-60 滤饼的 e 范围为 7.4 ~ 8.5。随 $P_{e,ave}$ 的增大，受相同 $CaCl_2$ 浓度浓度作用的 PB 滤

饼孔隙比降低；在相同(或相近)的 $P_{e,ave}$ 作用下，PB 滤饼的孔隙比随 CaCl₂ 浓度增大而降低。

饱和状态的土样，其孔隙比受相对密度(G_s)和含水率(w)控制。试验测得，各试样 G_s 变化较小，均在 2.60 ~ 2.63 范围，变化幅度小于 1%。而 PB 滤饼的含水率变化范围为 384% ~ 260%，变化幅度(滤饼含水率变化幅度与滤饼含水率最大值之比)均为 30%左右，造成滤饼的孔隙比随含水率降低而减小。因此，滤饼的孔隙比主要受含水率变化影响。根据图 2 可知，随 $P_{e,ave}$ 增大，滤失液体积 V 增大，进而减小了滤饼的含水率(数据见表 3)，最终导致孔隙比(e)降低，呈现图 5(a)所示的变化规律。受不同浓度 CaCl₂ 溶液作用 PB 滤饼呈现出不同的 e - $\lg(P_{e,ave})$ 曲线，表明受到溶液作用后，土体性质发生改变，导致其压缩特性产生差异。

3.4 滤饼渗透系数与孔隙比

图 6 为膨润土滤饼孔隙比与渗透系数的关系。同一 CaCl₂ 浓度作用下，随滤饼孔隙比增大，PB 滤饼的渗透系数均呈上升趋势；受不同 CaCl₂ 浓度作用的滤饼，其孔隙比相同(或相近)时，随 CaCl₂ 浓度增大，滤饼渗透系数增大。原因为随 CaCl₂ 浓度升高，膨润土膨胀量减小，膨润土团聚体间孔隙连通性增大，渗流孔道更加畅通，导致渗透系数增大^[21]。

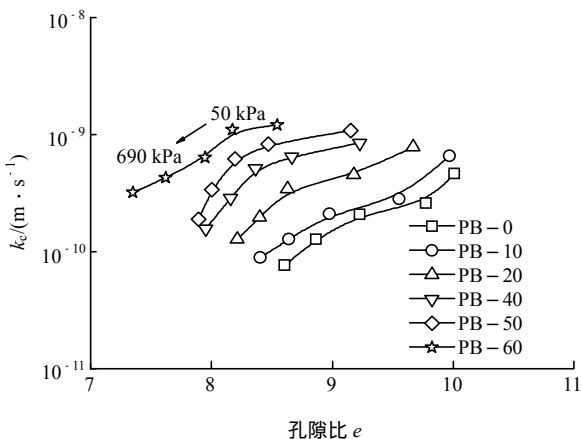
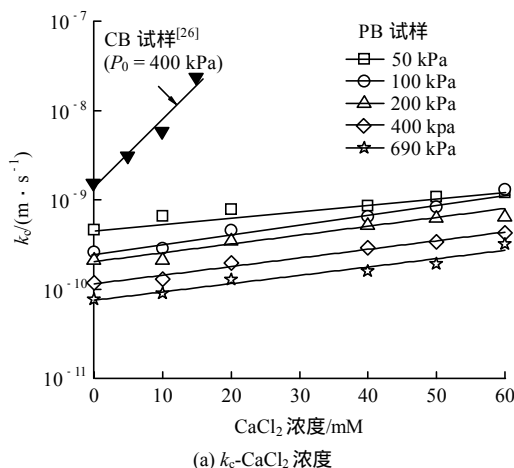


图 6 膨润土滤饼孔隙比与渗透系数的关系

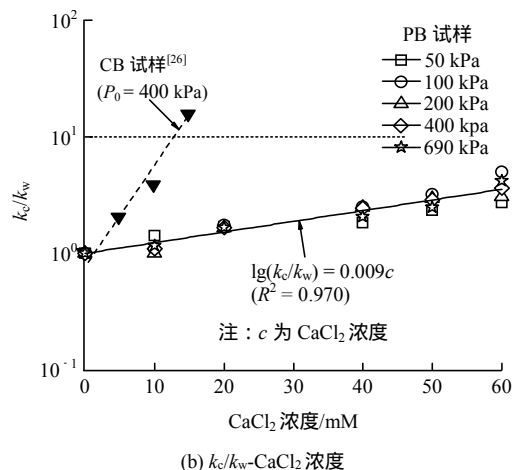
Fig.6 The relationships between void ratio(e) of bentonite filter cake and hydraulic conductivity(k_c) in CaCl₂ solution with various concentrations

3.5 滤饼渗透系数与 CaCl₂ 浓度

PB 试样滤饼的渗透系数与 CaCl₂ 浓度关系曲线如图 7(a)所示。总体上，随 CaCl₂ 浓度的增大，PB 滤饼的渗透系数呈增大趋势；在半对数坐标系下，对滤饼渗透系数与 CaCl₂ 浓度关系进行拟合，各级



(a) k_c -CaCl₂ 浓度



(b) k_c/k_w -CaCl₂ 浓度

图 7 PB 滤饼渗透系数与 CaCl₂ 浓度关系

Fig.7 Relationships between hydraulic conductivity of PB filter cakes and CaCl₂ concentrations

试验压力下的数据均呈较好的线性关系，决定系数 R^2 达到 0.701 ~ 0.985。对比沈胜强等^[26]研究结果，在试验选择的溶液浓度范围内，PB 滤饼渗透系数小于未改良的 CB 滤饼渗透系数；并且在 CaCl₂ 浓度 > 15 mM 时，CB 试样滤失液体积急剧增大，无法形成滤饼；而 PB 试验在 CaCl₂ 浓度 60 mM 时，滤失液体积 $V <$ 浆液和易性限值(25 mL)；表明未经改良的膨润土在溶液中化学相容性已经明显降低，而经聚合物改良膨润土(PB)的化学相容性则变化较小。

图 7(b)中 PB 滤饼的渗透系数比与 CaCl₂ 浓度关系结果则进一步表明：当 CaCl₂ 浓度 60 mM 时，PB 的渗透系数比(k_c/k_w) < 10，即其渗透系数受该浓度范围内的溶液影响不大，无明显增长；而经 15 mM 的 CaCl₂ 溶液作用的 CB 试样(数据源于沈胜强等^[26])的渗透系数比则大于 10。表明未改良膨润土遇到 CaCl₂ 溶液时，化学相容性明显降低，而掺入聚阴离子纤维素可有效提高膨润土在盐溶液中的防渗性能。

图 8 为 PB 滤饼的渗透系数、孔隙比与 CaCl₂ 浓度之间的关系；表 5 为不同孔隙比下 PB 滤饼的渗透系数比(k_c/k_w)。滤饼孔隙比的增长和 CaCl₂ 溶液浓度的增长，均能导致 PB 滤饼渗透系数增大。结合表 5 中数据，在相同(或相近)的孔隙比下，随 CaCl₂ 浓度增大，PB 的 k_c/k_w 的最大值为 10.73(此时 $e = 8.87 \pm 0.1$)，PB 滤饼的最大渗透系数(1.20×10^{-9} m/s)与隔离墙材料渗透系数设计推荐值(1×10^{-9} m/s)相近。上述结果表明，PB 滤饼在 0 ~ 60 mM 的 CaCl₂ 浓度和 50 ~ 690 kPa 试验压力作用下，渗透系数虽有所增长，但 k_c/k_w 基本 0 ~ 10 范围，且渗透系数最大值 $\approx 1 \times 10^{-9}$ m/s；而 CaCl₂ 浓度 > 15 mM 的 CaCl₂ 时，CB 试样无法形成滤饼，防渗性能大幅降低。因此，与 CB 相比 PB 的抗盐性能有明显提高。

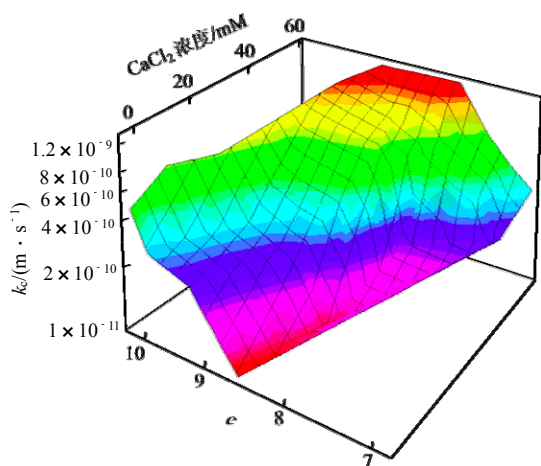


图 8 PB 试样的 k_c - e -CaCl₂ 浓度关系

Fig.8 The relationship between hydraulic conductivity(k_c) in various CaCl₂ solution under different void ratios

表 5 不同溶液浓度下 PB 滤饼的渗透系数比

Table 5 The hydraulic conductivity ratio(k_c/k_w) of filter cakes in CaCl₂ solution

CaCl ₂ 浓度/mM	k_c/k_w				
	$e = 10.01 \pm 0.1$	$e = 9.77 \pm 0.1$	$e = 9.23 \pm 0.1$	$e = 8.87 \pm 0.1$	$e = 8.61 \pm 0.1$
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.42	1.09	—	1.79	1.67
20	—	2.52	—	—	2.73
40	—	—	4.07	—	—
50	—	—	5.19	—	—
60	—	—	—	10.73	—

4 结 论

本文通过向膨润土中添加 2% 的 PAC 对膨润土

进行改良，测试了不同压力、不同 CaCl₂ 浓度作用下 PB 滤饼的渗透系数。分析了试验压力、孔隙比、溶液浓度对滤饼渗透系数的影响。主要结论如下：

(1) 滤失液体积与半对数坐标下的有效应力呈线性关系；当 CaCl₂ 浓度 60 mM 时，PB 滤饼的滤失液体积小于浆液和易性限值(25 mL)，而当 CaCl₂ 浓度 > 60 mM 时，滤失液体积显著增大。

(2) 滤饼渗透系数随滤失液体积增大而增大；相同条件作用下，PB 滤饼渗透系数小于 CB 滤饼渗透系数，掺入 PAC 可降低滤失液体积、滤饼渗透系数。

(3) 随 CaCl₂ 浓度增大，膨润土双电层被压缩，含水率降低，造成滤饼孔隙比减小，但渗流孔道更加通畅，导致滤饼渗透系数增大；而增加有效应力可以抵消一部分因溶液浓度增大造成的 PB 滤饼渗透系数的影响。

(4) 在 0 ~ 60 mM 的 CaCl₂ 溶液作用下，PB 滤饼渗透系数无明显增长， $k_c/k_w < 10$ ；表明通过将 2% 的 PAC 与干燥膨润土直接拌合的方式改良膨润土，可有效提高 CaCl₂ 溶液(0 ~ 2 400 mg/L，即 0 ~ 60 mM)作用下膨润土滤饼的防渗性能。

参考文献(References)：

[1] 国土资源部环境保护部. 全国土壤污染调查报告[R]. 北京：国土资源部环境保护部，2014.(Ministry of Environmental Protection of PRC, Ministry of Land and Resources of PRC. The soil pollution survey report[R]. Beijing：Ministry of Environmental Protection of PRC, Ministry of Land and Resources of PRC, 2014.(in Chinese))

[2] DU Y J, FAN R D, REDDY K R, et al. Impacts of presence of lead contamination in clayey soil-calcium bentonite cutoff wall backfills[J]. Applied Clay Science, 2014, 108 : 111 – 122.

[3] 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.

[4] 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 – 848.(FAN Ridong ,DU Yanjun ,CHEN Zuobo ,et al. Compressibility and permeability characteristics of lead contaminated soil-bentonite vertical cutoff wall backfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5) : 841 – 848.(in Chinese))

[5] 陈梦舫. 我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J]. 中国科学院院刊, 2014 ,29(3) : 327 – 335.(CHEN Mengfang. Review on heavy metal remediation technology of soil and groundwater at industrially contaminated site in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of

- Sciences , 2014 , 29(3) : 327 – 335.(in Chinese)
- [6] LI C N ,LO C W ,SU W C ,et al. A study on location-based priority of soil and groundwater pollution remediation[J]. Sustainability , 2016 , 8(4) : 377.
- [7] ARMANYOUS A M ,GHORABA S M ,RASHWAN I M H , et al. A study on control of contaminant transport through the soil using equal double sheet piles[J]. Ain Shams Engineering Journal , 2016 , 7(1) : 21 – 29.(in Chinese)
- [8] KHOURY M A , FAYAD P H , LADD R S. Design , construction and performance of a soil-bentonite cutoff wall constructed in two stages[M]// Slurry Walls : Design , Construction , and Quality Control. ASTM International , 1992 : 289 – 300.
- [9] NGUYEN T B ,LEE C ,CHOI H. Estimation of hydraulic conductivity of bentonite filter cake in laboratory[C]// DATTA M , SRIVASTAVA R K ,RAMANA G V ,et al. Proceedings of 6th International Congress on Environmental Geotechnics. New Delhi , India : McGraw-Hill , 2010 : 1 393 – 1 396.
- [10] LEE D , KIM K , LEE H , et al. Measurement of hydraulic properties of bentonite cake formation deposited on base soil medium[J]. Applied Clay Science , 2016 , 123 : 187 – 201.
- [11] LIU Y ,GATES W P ,BOUAZZA A , et al. Fluid loss as a quick method to evaluate hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners under acidic conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal , 2013 , 51(2) : 158 – 163.
- [12] NGUYEN T B , LEE C , LIM J , et al. Hydraulic characteristics of bentonite cake fabricated on cutoff walls[J]. Clays and Clay Minerals , 2012 , 60(1) : 40 – 51.
- [13] CHUNG J , DANIEL D E. Modified fluid loss test as an improved measure of hydraulic conductivity for bentonite[J]. Geotechnical Testing Journal , 2008 , 31(3) : 243 – 251.
- [14] HENRY L B , FILZ G M , DAVIDSON R R. Formation and properties of bentonite filter cakes[C]// Filtration and Drainage in Geotechnical/ Geoenvironmental Engineering. [S.l.] : ASCE , 1998 : 69 – 88.
- [15] GRUBE W E. Slurry trench cut-off walls for environmental pollution control[M]. Slurry Walls : Design , Construction and Quality Control , ASTM International , 1992 : 69 – 77.
- [16] MITCHELL J K , SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York : Wiley , 2005 : 154 – 166.
- [17] American Petroleum Institute. Recommended practice for field testing water-based drilling fluids[M]. [S.l.] : American Petroleum Institute , 2003 : 50 – 82.
- [18] ASTM D5891 – 02. Standard test method for fluid loss of clay component of geosynthetic clay liners[M]. [S.l.] :ASTM International , West Conshohocken , Pa. 2009 : 1 – 3. doi : 10.1520/D5891 – 02R09.
- [19] DI EMIDIO G , VAN IMPE W F , FLORES R D. Advances in geosynthetic clay liners : polymer enhanced clays[C]// Geo-Frontiers2011@ Advances in Geotechnical Engineering. [S.l.] : ASCE , 2011 : 1 931 – 1 940.
- [20] DI EMIDIO G , MAZZIERI F , VERASTEGUI-FLORES R D , et al. Polymer-treated bentonite clay for chemical-resistant geosynthetic clay liners[J]. Geosynthetics International , 2015 , 22(1) : 125 – 137.
- [21] SCALIA J. Bentonite-polymer composites for containment applications[Ph. D. Thesis][D]. Madison :The University of Wisconsin Madison , 2012.
- [22] BOHNHOFF G L. Membrane behavior , diffusion , and compatibility of a polymerized bentonite for containment barrier applications[Ph. D. Thesis][D]. Fort Collins : Colorado State University , 2012.
- [23] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京 :高等教育出版社 ,2001 :174 – 175.(LI Xueyuan. Soil chemistry[M]. Beijing : Higher Education Press , 2011 : 174 – 175.(in Chinese))
- [24] 雷鸣 , 曾敏 , 廖柏寒 , 等. 某矿区土壤和地下水重金属污染调查与评价[J]. 环境工程学报 , 2012 , 6(12) : 4 687 – 4 693.(LEI Ming , ZENG Min , LIAO Bohan , et al. Investigation and evaluation on heavy metal contamination in soils and groundwater of a mine zone[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering , 2012 , 6(12) : 4 687 – 4 693.(in Chinese))
- [25] Office of Emergency and Remedial Response , U.S.EPA. Slurry trench construction for pollution migration control[R]. Washington DC : U.S. Environmental Protection Agency , 1984.
- [26] 沈胜强 , 杜延军 , 张润 , 等. 基于改进滤失试验的 CaCl₂ 溶液作用下膨润土滤饼渗透系数[J]. 东南大学学报 : 自然科学版 , 2016 , 46(A01) : 179 – 183.(SHEN Shengqiang , DU Yanjun , ZHANG Run , et al. Hydraulic conductivity of bentonite filter cakes in concentrated calcium chloride solutions based on modified fluid loss test[J]. Journal of Southeast University : Natural Science Edition , 2016 , 46(A01) : 179 – 183.(in Chinese))
- [27] 常青. 絮凝学研究的新领域—具有重金属捕集功能的高分子絮凝剂[J]. 环境科学学报 , 2015 , 35(1) : 1 – 11.(CHANG Qing. New research area of flocculation in water treatment-macromolecule flocculant with the function of trapping heavy metal[J]. Acta Scientiae Circumstantiae , 2015 , 35(1) : 1 – 11.(in Chinese))
- [28] 聂发辉 , 刘荣荣 , 周永希 , 等. 利用木质纤维素废弃物吸附重金属离子的研究进展[J]. 水处理技术 , 2016 , 42(1) : 12 – 19.(NIE Fahui , LIU Rongrong , ZHOU Yongxi , et al. Research advances of lignocellulosic wastes of the adsorption of metal ions in wastewater[J]. Technology of Water Treatment , 2016 , 42(1) : 12 – 19.(in Chinese))