

微生物矿化对黏土渗透性影响的试验研究

王修铭^{1,2}, 陈群^{1,2}, 陈秀吉³, 张利民⁴, 周成^{1,2}, 万里^{1,2}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 3. 中国移动通信集团福建有限公司, 福建 福州 350001; 4. 香港科技大学土木工程学院, 香港 999077)

摘要:为探究矿化对黏土渗透性的影响,采用球形赖氨酸芽孢杆菌属 *kp-22* 菌诱导矿化处理黏土,测定了碳酸盐生成率,研究了矿化处理后黏土的渗透性,系统分析了渗透系数随菌液 OD_{600} 值、胶结液浓度和土中镉含量变化的规律,探讨了各因素对渗透系数的影响规律及机理,建立了考虑菌液 OD_{600} 值和胶结液浓度影响的矿化后黏土渗透系数的经验公式。结果表明:矿化后的土样中生成了碳酸盐颗粒,填充了部分土体孔隙,渗透系数最多可降低约一个数量级;随着菌液 OD_{600} 值的增大,矿化后黏土的碳酸盐生成率先升高后逐渐稳定,而土样的渗透系数先减小后趋于平稳,当菌液 OD_{600} 值大于 0.9 时,碳酸盐生成率和渗透系数都变化很小;随着胶结液浓度增大,碳酸盐生成率先升高后下降,而渗透系数先减小后增大,当胶结液浓度为 0.8 mol/L 时,黏土的渗透系数最小;随着土中镉含量的增大,矿化反应受到抑制,渗透系数逐渐增大;矿化后黏土的渗透系数与碳酸盐生成率负相关,两者满足线性关系;所建立的矿化后黏土渗透系数经验公式计算值与试验结果吻合较好。

关键词:微生物矿化;黏土;渗透性;菌液 OD_{600} 值;胶结液浓度

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)01-0029-08

Experimental study on influence of microbial mineralization on permeability of clay//WANG Xiuming^{1,2}, CHEN Qun^{1,2}, CHEN Xiuji³, ZHANG Limin⁴, ZHOU Cheng^{1,2}, WAN Li^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. China Mobile Communications Group Fujian Co., Ltd., Fuzhou 350001, China; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China)

Abstract: In order to explore the influence of mineralization on clay permeability, clay was treated by induction of mineralization through *Sporosarcina kp-22*. The carbonate formation rate of clay after treatment was measured and the clay permeability characteristics were studied. The permeability coefficient variation with the OD_{600} of bacteria, the concentration of cementation solution and cadmium content were investigated. The influence rule and mechanism of each factor on permeability coefficient were discussed. The empirical formulas to calculate permeability coefficient of clay after mineralization considering the OD_{600} and concentration of cementation solution were established. The results show that carbonate crystal was formed in the mineralized soil samples, which can fill some pores in the soil, and the permeability coefficient of clay can be reduced by at most one order of magnitude. With the increase of OD_{600} , the carbonate formation rate in mineralized soil first increased and then gradually stabilized, but the permeability coefficient first decreased and then tended to be stable. When the OD_{600} was greater than 0.9, the carbonate formation rate and the permeability coefficient changed little. With the increasing concentration of cementation solution, the formation rate of carbonate first increased and then decreased. On the contrary, the permeability coefficient first decreased and then increased. When the concentration of cementation solution was 0.8 mol/L, the permeability coefficient was the lowest. With the increasing cadmium content in soil, the mineralization reaction was inhibited and the permeability coefficient increased gradually. Permeability coefficient after mineralization is negatively correlated with carbonate formation rate, which satisfies a linear relationship. The calculated coefficients of the empirical formulas established for permeability coefficient of clay after mineralization agree well with the experimental results.

Key words: microbial mineralization; clay; permeability; OD_{600} of bacteria solution; concentration of cementation solution

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41977239);四川省科技厅港澳台科技创新合作项目(2019YFH0076)

作者简介:王修铭(1998—),男,硕士研究生,主要从事岩土工程研究。E-mail:wangxiuming0831@163.com

通信作者:陈群(1972—),女,教授,博士,主要从事土体渗流及渗透破坏特性研究。E-mail:chenqun@scu.edu.cn

工程经验表明,土木工程的大量安全隐患与渗流问题密不可分,当土作为工程主体时尤为突出。以土质边坡为例,降雨入渗到坡体内部,产生的渗透力使下滑力增大,同时,孔隙水压力升高导致土体抗剪强度降低,最终引发边坡失稳破坏。由此可见,土体渗流问题对工程耐久性的影响不可忽视,研究渗流问题必须掌握土体的渗透性^[1]。传统的化学改性方法能固化土体,但在处理过程中需要添加水泥、石灰或环氧树脂等化学建材^[2-3]。该类材料环保性较差,水泥的生产是引起温室效应的重要因素之一,石灰可造成土地盐碱化,树脂材料具有一定毒性,可能带来水质污染问题^[4]。为此,寻找一种环境友好型替代技术具有重要的现实意义。

微生物矿化技术已广泛用于土体的加固处理,以保证工程的安全稳定。土壤中原有的微生物可通过矿化反应诱导碳酸盐沉淀^[5],进而改变土体的力学性质,同时可抑制部分有害离子随水体的运移,这是一种绿色高效的土体加固技术,具有良好的生态和经济效益。Van Paassen^[6]利用微生物矿化作用加固砂柱,发现其渗透性降低了22%~75%;马瑞男等^[7]也发现微生物拌和固化方法可使砂土的渗透系数降低1~2个数量级。微生物矿化反应的过程受到多种因素的影响。例如;Soon等^[8]发现提高巨大芽孢八叠球菌的浓度能够显著降低土体的渗透性;余清鹏等^[9]的研究结果表明菌液浓度过高会弱化防渗效果;王绪民等^[10]发现随着胶结液浓度增大,砂样的固化效率先升高后降低;Wang等^[11]研究表明污染土中的重金属会严重抑制脲酶活性和微生物生长。

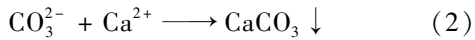
目前微生物矿化处理的对象主要是砂土,对黏土矿化的研究主要围绕土体强度提升等方面展开,对矿化后土体的渗透性研究较少。本文利用球形赖氨酸芽孢杆菌属kp-22菌对黏土进行矿化处理,测定了各矿化土样的碳酸盐生成率,通过变水头渗透试验研究了菌液OD₆₀₀值、胶结液浓度、土体重金属含量对矿化后土体渗透性的影响。

1 试验原理与方法

1.1 试验原理

基于尿素水解的微生物矿化需要能产生脲酶的细菌。该类细菌以尿素为能源,利用自身新陈代谢产生大量高活性脲酶。尿素在脲酶作用下水解成NH₄⁺和CO₃²⁻。当环境中含有一定浓度的金属阳离子时,细菌可将阳离子吸附在细胞表面。碳酸根离子运输到细菌表面,以细菌细胞为晶核,与吸附的Ca²⁺生成碳酸钙,同时将Cd²⁺共同沉淀^[12],降低重金

属离子的可迁移性。矿化反应过程的化学方程式为



1.2 试验方法

陈筠等^[13]采用直接拌和法,将菌液和浓度均为1 mol/L的CaCl₂和CO(NH₂)₂组成的胶结液按1:1的体积比掺入红黏土,获得了较好的矿化效果。本文参考该方法,处理时将菌液、胶结液与黏土迅速搅拌均匀。采用现场测得的黏土干密度的平均值1.508 g/cm³作为试样控制干密度,在模具中制成直径为61.8 mm、高为40 mm的圆柱形土样。预实验结果表明,将土样在温度为22~23℃、湿度为65%~70%的环境中养护2 d后,微生物矿化反应已充分进行,可对矿化效果进行检测。

基于盐酸浸泡法^[14]测定碳酸盐质量分数。将土样烘干、碾碎,取约4 g土样,质量记为m_i,加入2 mol/L的盐酸充分反应12 h。用微孔滤膜进行真空抽滤后烘干土样,质量记为m_f。则土样中碳酸盐质量分数为

$$w = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100\% \quad (4)$$

处理前后黏土中的碳酸盐质量分数分别记为w_b和w_a,则矿化后土样的碳酸盐生成率G_{ca}为

$$G_{ca} = w_a - w_b \quad (5)$$

开展变水头渗透试验以研究矿化后土样的渗透性。由于矿化反应需在恒温恒湿条件下进行,水分蒸发后土样的体积略有缩小,若直接在试验用的环刀中制备矿化后土样,其与环刀边壁会脱离,产生渗透通道,如图1(a)所示。为准确测得土样的渗透系数,先利用自制的内径为101 mm的制样筒制成高40 mm的圆柱形土样,然后参照原状土取样的方式取得渗透土样,见图1(b),土样与环刀边壁不再出现脱离的现象。

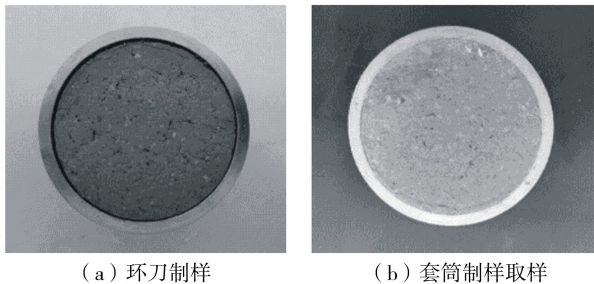


图1 不同方法制成的土样

取样场地选在某工业园区,试验测得土样的比重为2.69,干密度为1.50 g/cm³,液限为37.6%,塑限为19.0%,塑性指数为18.6。采用筛析法和密度

计法测得土样的级配曲线见图 2。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》中的土体分类方法,可将其定名为低液限黏土。

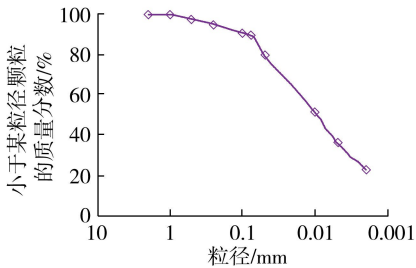


图 2 试验黏土的颗粒级配曲线

影响微生物矿化效果的因素较多,本文主要考虑菌液 OD₆₀₀值、胶结液浓度和重金属含量 3 个因素对微生物矿化后黏土渗透性的影响。菌液 OD₆₀₀值为菌液在 600nm 波长处的吸光度,该值与菌液浓度呈正相关,可反映菌液浓度的高低。结合 kp-22 菌的实验室培养情况,将其 OD₆₀₀值设置为 0.3、0.6、0.9、1.2 共 4 种。Nekolny 等^[15]认为胶结液浓度超过 1 mol/L 时,细菌新陈代谢会受到抑制;Soon 等^[8]也发现胶结液浓度超过 1 mol/L 后,矿化效率会降低。因此,本文仅研究 1 mol/L 内胶结液浓度对矿化效果的影响,保持胶结液中尿素和氯化钙的物质的量比为 1 : 1,将两种成分的浓度均设置为 0.4、0.6、0.8、1.0 mol/L 共 4 种。现场取样土体中重金属镉含量超过了土壤污染风险筛选值,不少研究表明,重金属的存在会降低细菌活性^[16-17],影响微生物诱导矿化的效果,故有必要探究镉含量对矿化效果的影响。前期调研结果表明,四川省内不同地区土体重金属镉含量(质量比)在 2.20 ~ 15.80 mg/kg 之间,试验中镉含量设置为 2、4、8、12、16 mg/kg 共

5 种。进行 3 个因素不同水平的全组合共计 80 组试验,并对未矿化的 5 组不同镉含量的黏土进行渗透试验,探究黏土矿化后碳酸盐生成率的变化规律及不同因素对矿化后土样渗透性的影响。

2 结果与分析

2.1 黏土矿化后碳酸盐生成率

矿化后不同镉含量黏土试样中碳酸盐生成率随菌液 OD₆₀₀值变化的曲线见图 3,图中 *c* 为胶结液浓度。不同镉含量黏土矿化后的碳酸盐生成率随菌液 OD₆₀₀值的变化规律大体一致。随着菌液 OD₆₀₀值增大,碳酸盐生成率先升高而后变化很小。菌液 OD₆₀₀值从 0.3 增大至 0.9,碳酸盐生成率的提高幅度较大,两种浓度菌液处理后,不同胶结液浓度及不同镉含量下共 20 组土样的碳酸盐平均生成率分别为 0.63% 和 1.08%。菌液 OD₆₀₀值为 1.2 时,碳酸盐平均生成率仍维持在 1.08%。

菌液 OD₆₀₀值为 0.3 时,细菌分泌的脲酶不足,尿素分解量少,导致碳酸盐形成所需的 CO₃²⁻ 不足,因此碳酸盐生成率低。OD₆₀₀值低于 0.9 时,细菌个体相距较远,作为碳酸盐的成核点位时互不干涉,碳酸盐生成率主要取决于环境中 CO₃²⁻ 的含量。随着菌液 OD₆₀₀值增大,尿素分解率提高,产生了更多的 CO₃²⁻,与环境中游离的阳离子形成更多碳酸盐。试验用菌为好氧菌,菌液 OD₆₀₀值达到 1.2 后,细菌数量显著增加,但是由于黏土的孔隙小,无法提供充足的氧气,导致单个细菌的成矿能力下降,限制碳酸盐的生成。因此,增大菌液浓度只能在一定范围内有效提高碳酸盐生成率;当菌液过剩时,其浓度增大对碳酸盐的生成不再起促进作用。

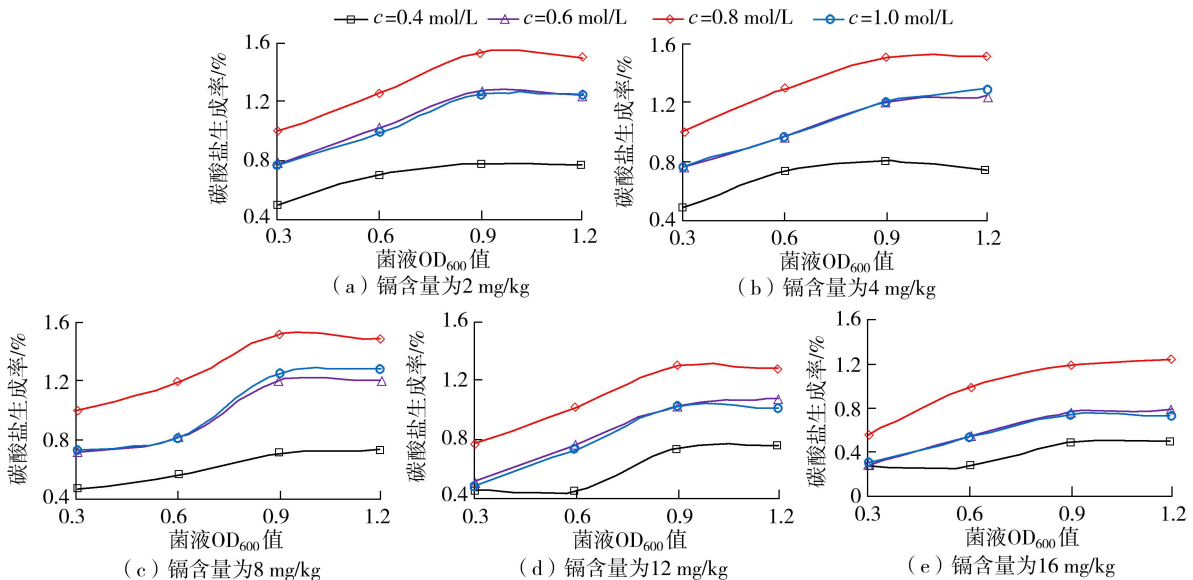


图 3 不同镉含量黏土碳酸盐生成率随菌液 OD₆₀₀ 值的变化

由图3可知,不同镉含量黏土的碳酸盐生成率随胶结液浓度变化的规律基本一致,随着胶结液浓度增大,碳酸盐生成率先上升后下降。胶结液浓度为0.8 mol/L时,碳酸盐生成率最高,不同菌液浓度及不同镉含量下共20组土样的碳酸盐平均生成率为1.21%。

当胶结液浓度为0.4 mol/L时,尿素和氯化钙不足导致矿化反应停滞,碳酸盐生成率较低。随着胶结液浓度增大,溶液中Ca²⁺含量增大,产生更多的碳酸盐固体。胶结液浓度大于0.8 mol/L后, Ca²⁺对细菌的新陈代谢产生抑制作用,导致碳酸盐生成率下降。因此,适当增大胶结液的浓度有利于提高黏土中碳酸盐生成率,但浓度过高会抑制矿化。

由图3可知,同一菌液OD₆₀₀值和胶结液浓度下,随着土体镉含量增大,矿化后土样中的碳酸盐生成率逐渐降低。镉含量从2 mg/kg增大到8 mg/kg,碳酸盐生成率的降幅较小;但镉含量大于8 mg/kg后,镉离子对细菌的毒害作用大幅增大,致使碳酸盐生成率显著降低。

2.2 菌液 OD₆₀₀ 值对矿化后黏土渗透性的影响

在未矿化土样中添加与试验组中菌液、胶结液等体积的纯水后亦采用直接拌和法处理,并在恒温恒湿条件下养护2 d后测定其渗透系数。5组不同镉含量黏土矿化前的渗透系数范围为5.51×10⁻⁶~6.33×10⁻⁶ cm/s,各土样的渗透系数差距很小,故取其平均值5.88×10⁻⁶ cm/s作为未矿化黏土的渗透系数。

矿化后不同镉含量黏土的渗透系数随菌液OD₆₀₀值变化的曲线见图4。随着菌液OD₆₀₀值增大,矿化后黏土的渗透系数先降低后趋于平稳。这与土体碳酸盐生成率随菌液OD₆₀₀值的变化规律相反。

菌液OD₆₀₀值从0.3增大至0.9,渗透系数降低较明显,与未矿化土样相比,两种浓度菌液处理下,不同胶结液浓度及不同镉含量下共20组土样的渗透系数平均降幅分别为50.6%和72.4%。菌液OD₆₀₀值高于0.9后,增大菌液浓度,渗透系数变化不明显,菌液OD₆₀₀值为1.2时,渗透系数平均降幅为72.6%。个别曲线的规律与其他曲线的规律不一致,这是由于变水头渗透试验的影响因素较多,试验结果容易出现离散性,但对总体规律影响不大。

矿化反应产生了碳酸盐固体,不仅填充了土样的孔隙,还胶结了土颗粒,使得土体的渗透系数降低。菌液OD₆₀₀值为0.3时,土样孔隙中碳酸盐生成率低(图3),渗透系数降低不明显。随着菌液OD₆₀₀值增大,碳酸盐生成率提高,渗透系数显著降低。当菌液OD₆₀₀值过高时,细菌相互聚集形成絮凝结构^[14],由于矿化反应空间的限制,碳酸盐生成率变化不明显,渗透系数也无显著变化。以0.8 mol/L胶结液处理镉含量为4 mg/kg的黏土为例,菌液OD₆₀₀值从0.9增大至1.2,土样的碳酸盐生成率由1.52%变为1.53%,仅增大了0.01%(图3)。

2.3 胶结液浓度对矿化后黏土渗透性的影响

矿化后不同镉含量黏土的渗透系数随胶结液浓度变化的曲线见图5。随着胶结液浓度增大,渗透系数先降低后升高。胶结液浓度为0.8 mol/L时,土样渗透系数最小,与未矿化土样相比,不同菌液OD₆₀₀值及不同镉含量下共20组土样渗透系数的平均降幅为79.0%。

胶结液浓度为0.4 mol/L时,碳酸盐生成率较低(图3),渗透系数较未矿化土样变化较小。随着胶结液浓度增大,参与矿化反应的底物增加,矿化效

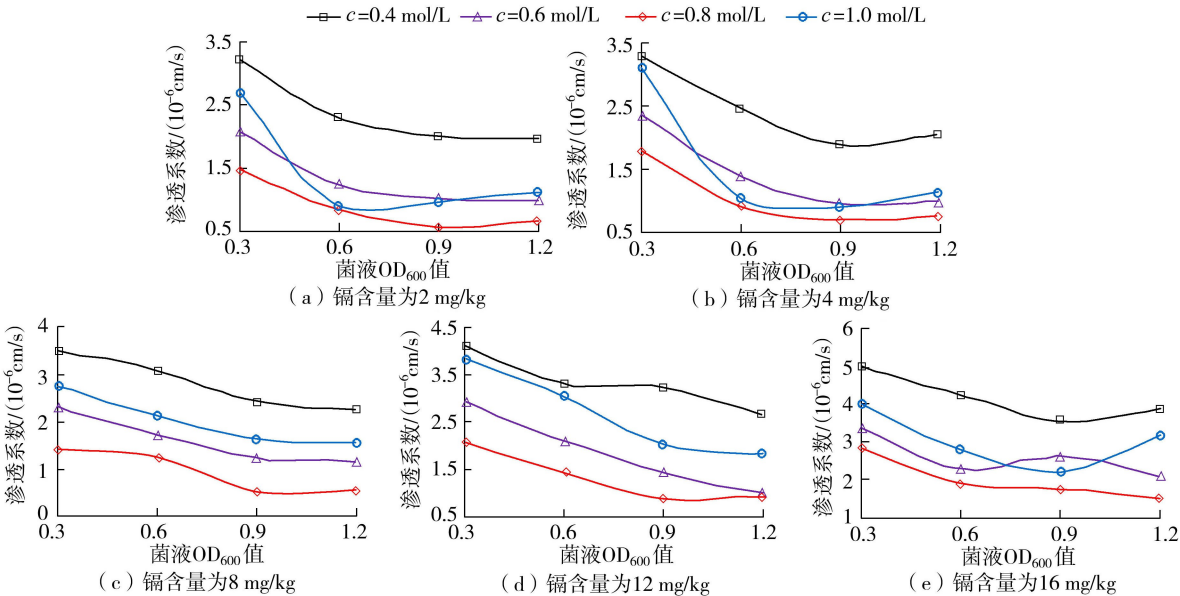


图4 不同镉含量黏土渗透系数随菌液OD₆₀₀值的变化

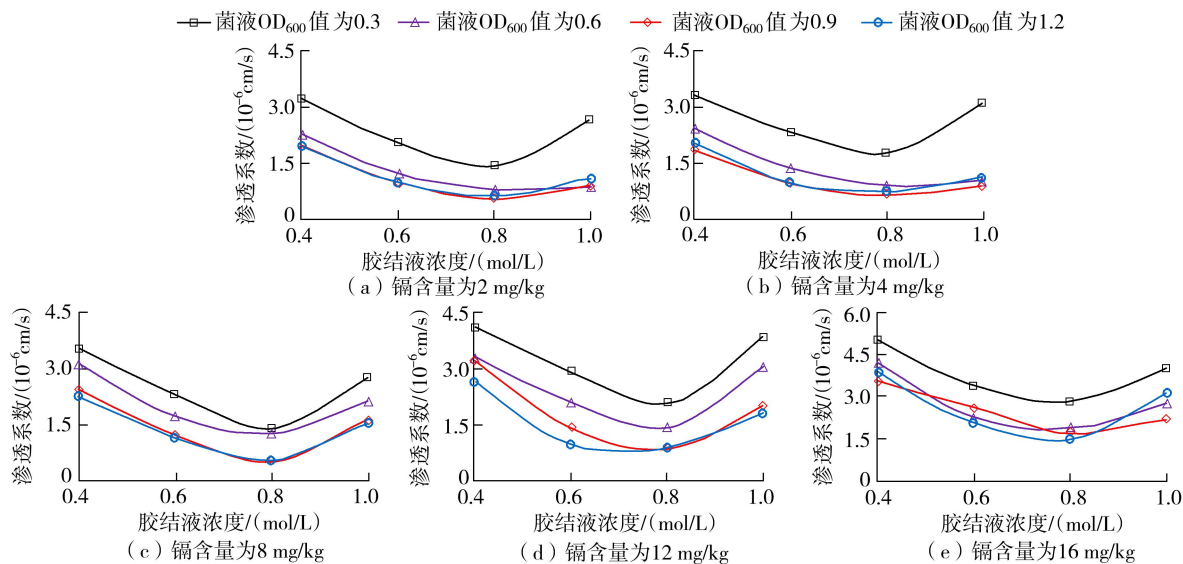


图5 不同镉含量黏土渗透系数随胶结液浓度的变化

率提升,渗透系数明显降低。但胶结液浓度高于 0.8 mol/L 后,碳酸盐生成率降低,渗透系数随之升高。李成杰等^[18]发现 Ca^{2+} 浓度超过 0.5 mol/L 后,芽孢杆菌的脲酶活性下降,结晶效率降低。这一现象与本文得到的试验结果类似,只是对不同环境中的菌种,其受到抑制作用的胶结液浓度与抑制程度不同。Rivadeneira 等^[19]也发现高浓度 Ca^{2+} 会降低细胞膜的通透性,阻碍尿素迁入和 CO_3^{2-} 迁出,从而降低碳酸盐生成率。以 OD_{600} 值为 0.6 的菌液处理镉含量为 16 mg/kg 的黏土为例,胶结液浓度自 0.8 mol/L 增大至 1.0 mol/L,土样中的碳酸盐平均生成率从 0.99% 减小为 0.53%,降幅为 47% (图 3),导致渗透系数由 $1.89 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 增大至 $2.79 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,增幅为 48%。

2.4 镉含量对矿化后黏土渗透性的影响

不同浓度菌液处理的黏土的渗透系数随土体镉

含量变化的曲线见图 6。镉含量为 2 mg/kg 时,黏土的渗透系数最小,随着镉含量的增大,渗透系数逐渐增大,且其增速也变大。与未矿化土样相比,不同浓度菌液及不同浓度胶结液处理后共 16 组土样渗透系数的平均降幅为 74.5%,随着镉含量增大,黏土渗透系数的降幅逐渐减小。

脲酶对重金属的敏感性较高,随着溶液中镉含量增大,脲酶活性显著降低。Qiao 等^[20]研究表明,溶液中 2 mg/L 的镉就会对 kp-22 菌的生长起到抑制作用。在溶液和土体环境中,镉对矿化效果的影响机制应是一致的。刘睿^[21]测定了被铅污染的黏性土中细菌的数量和脲酶的活性,结果表明,随着土体中重金属含量增大,活菌的数量和脲酶的活性都降低,与在溶液中试验得到的结果类似。以 OD_{600} 值为 0.3 的菌液和 0.8 mol/L 的胶结液处理黏土为例,

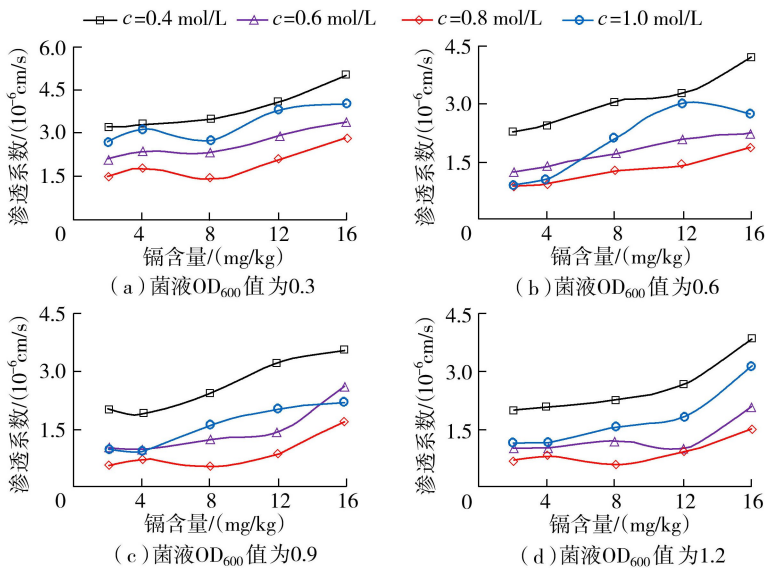


图6 不同浓度菌液处理的黏土渗透系数随镉含量的变化

当镉含量从 2 mg/kg 增大至 16 mg/kg 时,碳酸盐生成率从 1.00% 降低至 0.55% (图 3),相应地,渗透系数由 1.46×10^{-6} cm/s 增大为 2.85×10^{-6} cm/s。土体镉含量小于 8 mg/kg 时,重金属镉对微生物和脲酶的活性抑制作用弱,对土体渗透系数影响较小;镉含量大于 8 mg/kg 后,重金属镉对微生物和脲酶的活性抑制作用逐渐加强,导致渗透系数增幅明显。

2.5 矿化后黏土渗透性

彭劼等^[22]对矿化前后的有机质黏土进行了渗透试验,结果显示矿化后黏土的渗透系数可降低一个数量级。刘建兴^[23]的试验结果也表明直接拌和法矿化处理的黏土渗透系数从 10^{-7} cm/s 降低到 10^{-8} cm/s。由本文试验结果可知,矿化后土样的渗透系数大幅降低,渗透系数在 $5.3 \times 10^{-7} \sim 5.01 \times 10^{-6}$ cm/s 之间,与未矿化土样相比,部分土样的渗透系数降低了一个数量级,渗透系数降幅在 14.8% ~ 91.0% 之间,可见,微生物矿化能明显降低黏土的渗透性。

由前面的分析可知,碳酸盐生成率与渗透系数随各因素的变化规律相反。图 7 为各矿化土样的碳酸盐生成率与渗透系数的相关关系散点图。由图 7 可知,碳酸盐生成率 G_{ca} 与渗透系数 k 呈负相关关系,用线性函数拟合二者的关系式(决定系数 $R^2 = 0.852$)为

$$k = k_0(1 - 0.615G_{ca}) \tag{6}$$

式中 k_0 为拟合直线的截距(4.608×10^{-6} cm/s),其物理意义为碳酸盐生成率为 0 时的渗透系数,即未矿化土样的渗透系数,比试验值(5.88×10^{-6} cm/s)略低。Soon 等^[24]整理了 14 个土样矿化后的渗透系数与碳酸盐生成率的关系,结果表明渗透系数与碳酸盐生成率之间线性关系的拟合效果一般($R^2 = 0.65$)。本文的拟合效果更好,这可能是由于数据总量更多,个别数据点的离散对整体规律的影响较小。

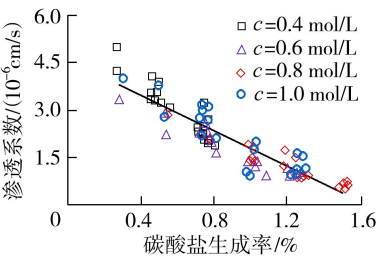


图 7 渗透系数与碳酸盐生成率的关系

由图 3 可知,矿化后各试样的碳酸盐生成率随菌液 OD₆₀₀ 值和胶结液浓度变化的规律性较强,试验结果离散性较小,故本文利用 MATLAB 建立不同镉含量下碳酸盐生成率与菌液 OD₆₀₀ 值和胶结液浓度的经验关系。随着菌液 OD₆₀₀ 值增大,脲酶浓度随之增大,脲酶可催化生物化学反应,提高碳酸盐生成

率,但受到反应底物含量的限制,菌液 OD₆₀₀ 值大于 0.9 后,其催化作用不再明显,故碳酸盐生成率变化较小。二者的关系曲线形状与幂函数相似,故用幂函数拟合渗透系数与菌液 OD₆₀₀ 值的关系为

$$G_{ca} = mA^n \tag{7}$$

式中: A 为菌液 OD₆₀₀ 值; m 、 n 为拟合参数, m 为菌液 OD₆₀₀ 值为 1.0 时的碳酸盐生成率, n 为双对数坐标下碳酸盐生成率与菌液 OD₆₀₀ 值的关系曲线的斜率。以镉含量为 2 mg/kg 的情况为例,不同浓度胶结液处理土样的渗透系数随菌液 OD₆₀₀ 值变化曲线的拟合参数及决定系数 R^2 见表 1。

表 1 不同胶结液浓度下的拟合参数和决定系数

胶结液浓度/(mol/L)	m	n	R^2
0.4	0.788	0.327	0.856 8
0.6	1.169	0.324	0.915 5
0.8	1.488	0.327	0.918 8
1.0	1.189	0.326	0.927 7

由表 1 可知,各拟合曲线的决定系数均大于 0.85,说明式(7)的拟合效果良好。随着胶结液浓度增大,参数 m 先增大后减小,取值范围为 0.788 ~ 1.488,变化范围较大;而参数 n 随胶结液浓度变化离散程度较小,胶结液浓度变化对 n 值的影响程度较低,故直接取 n 的平均值 0.326。在拟合参数 m 中考虑胶结液浓度的影响,建立碳酸盐生成率与菌液 OD₆₀₀ 值与胶结液浓度的关系式。拟合参数 m 与胶结液浓度的关系曲线见图 8, m 随胶结液浓度变化的曲线与一元二次函数的抛物线相似,故可用一元二次函数拟合它们的关系:

$$m = m_1c^2 + m_2c + m_3 \tag{8}$$

式中 m_1 、 m_2 、 m_3 为拟合参数,分别为 -4.25、6.71 和 -1.25。该拟合曲线的决定系数为 0.938,说明此式能较好地表达参数 m 和胶结液浓度的关系。

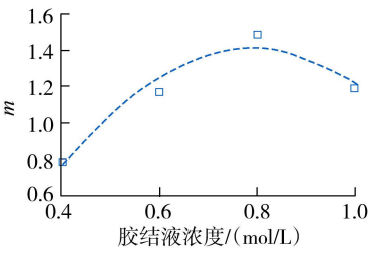


图 8 拟合参数 m 与胶结液浓度的关系

由图 7 可知,黏土矿化后的渗透系数与碳酸盐生成率满足较好的线性关系,将式(7)和式(8)代入式(6),化简后即得到渗透系数与菌液浓度和胶结液浓度的关系式:

$$k = k_0[1 - 0.615(m_1c^2 + m_2c + m_3)A^n] \tag{9}$$

按照上述方法对不同镉含量黏土矿化后渗透系数的试验结果进行拟合,求取式(9)的参数,列于

表2中。

表2 不同镉含量下黏土矿化后渗透系数的拟合参数

镉含量/(mg/kg)	m_1	m_2	m_3	n
2	-4.25	6.71	-1.25	0.326
4	-4.37	6.96	-1.33	0.341
8	-4.50	7.17	-1.47	0.398
12	-4.48	7.16	-1.46	0.471
16	-0.67	1.08	0.50	0.593

□ 菌液OD₆₀₀值为0.3 (试验值) ◇ 菌液OD₆₀₀值为0.9 (试验值) △ 菌液OD₆₀₀值为0.6 (试验值) ○ 菌液OD₆₀₀值为1.2 (试验值)
--- 菌液OD₆₀₀值为0.3 (计算值) ---- 菌液OD₆₀₀值为0.9 (计算值) -.- 菌液OD₆₀₀值为0.6 (计算值) --- 菌液OD₆₀₀值为1.2 (计算值)

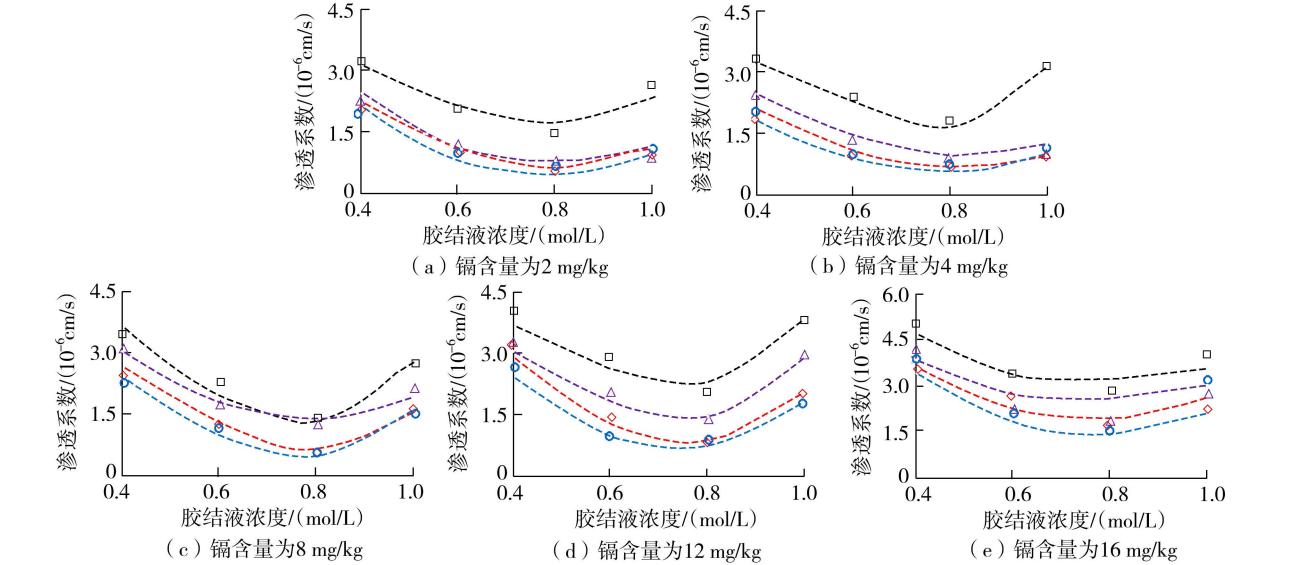


图9 渗透系数的试验与计算结果对比

3 结 论

a. 采用直接拌和法处理黏土后,矿化土样中生成了碳酸盐颗粒。随着菌液 OD₆₀₀值增大,碳酸盐生成率先升高后逐渐稳定。菌液 OD₆₀₀值从 0.3 增大至 0.9,碳酸盐生成率逐渐增大,继续增大菌液 OD₆₀₀值对碳酸盐生成率影响不大。随着胶结液浓度增大,碳酸盐生成率先上升后下降,胶结液浓度为 0.8 mol/L 时达到峰值。

b. 随着菌液 OD₆₀₀值增大,黏土的渗透系数先减小后趋于平稳。与未矿化土样相比,菌液 OD₆₀₀值从 0.3 增大至 0.9,黏土的渗透系数逐渐减小,此后渗透系数变化不明显。随着胶结液浓度增大,渗透系数先减小后增大。胶结液浓度为 0.8 mol/L 时,黏土的渗透系数最小。随着镉含量增大,土体渗透系数逐渐增大,且增速也变大。

c. 矿化后黏土的渗透系数最多可降低约一个数量级。利用幂函数拟合碳酸盐生成率随菌液 OD₆₀₀值变化的曲线,其中包含幂函数的指数和系数两个拟合参数。胶结液浓度对幂函数的指数影响很小,故直接取其平均值;幂函数的系数与胶结液的浓度符合一元二次函数关系。渗透系数与碳酸盐生成

利用表中参数和式(9)计算矿化后黏土的渗透系数,试验与计算结果的对比如图9。由图9可知,试验点和计算曲线的变化规律基本一致,仅当镉含量为 16 mg/kg 时,部分计算值与试验值的相对误差较大。总体而言,大部分试验数据与计算结果偏差较小,说明式(9)中各参数求取方法合理,可考虑将其用于计算较低镉含量下黏土矿化后的渗透系数。

率呈负相关关系,依据二者较好的线性关系,建立了关于菌液 OD₆₀₀值和胶结液浓度的矿化后黏土渗透系数的经验公式。

参考文献:

[1] 邱昊天,王媛,巩佳琨,等. 泡沫流体对堤基土体渗流特性影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023, 51(5): 70-78. (QIU Haotian, WANG Yuan, GONG Jiakun, et al. Effect of foam fluid on seepage characteristic in embankment foundation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 70-78. (in Chinese))

[2] 魏涛,张健. 水泥环氧复合灌浆技术研究及应用[J]. 长江科学院院报,2021,38(12): 1-5. (WEI Tao, ZHANG Jian. Cement-epoxy composite grouting technology: research and application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(12): 1-5. (in Chinese))

[3] 祝裙,李长明,狄龙飞,等. 黄河淤泥固化改性材料力学性能与微观结构试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 99-104. (ZHU Jun, LI Changming, DI Longfei, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructures of modified Yellow River sludge

- materials [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (1): 99-104. (in Chinese))
- [4] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36 (2): 197-210.
- [5] CASTRO-ALONSO M J, MONTAÑEZ-HERNANDEZ L E, SANCHEZ-MUÑOZ M A, et al. Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and its potential in bioconcrete: microbiological and molecular concepts [J]. Frontiers in Material, 2019, 6: 126.
- [6] VAN PAASSEN L. BiogROUT, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation [D]. Delft: Delft University of Technology, 2009.
- [7] 马瑞男, 郭红仙, 程晓辉, 等. 微生物拌和加固钙质砂渗透特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2018, 39 (增刊 2): 217-223. (MA Ruinan, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui, et al. Permeability experiment study of calcareous sand treated by microbially induced carbonate precipitation using mixing methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (Sup2): 217-223. (in Chinese))
- [8] SOON N W, LEE L M, KHUN T C. Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140 (5): 04014006.
- [9] 余清鹏, 李娜, 符平, 等. 微生物灌浆加固砂土效果的试验研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17 (3): 204-210. (YU Qingpeng, LI Na, FU Ping, et al. Experimental study on reinforcement effect of microbial grouting on sandy soil [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17 (3): 204-210. (in Chinese))
- [10] 王绪民, 郭伟, 余飞, 等. 营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (增刊 2): 363-368. (WANG Xumin, GUO Wei, YU Fei, et al. Experimental study of effect of nutrient concentration on physico-mechanical properties of cemented sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (Sup2): 363-368. (in Chinese))
- [11] WANG Yuanpeng, SHI Jiyan, WANG Hui, et al. The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 67 (1): 75-81.
- [12] 钱春香, 王瑞兴, 詹其伟. 微生物矿化的工程应用基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [13] 陈筠, 施鹏超, 白文胜, 等. 微生物矿化作用对红黏土的影响研究 [J]. 中国岩溶, 2019, 38 (4): 612-618. (CHEN Jun, SHI Pengchao, BAI Wensheng, et al. Effect of microbial mineralization on red clay [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38 (4): 612-618. (in Chinese))
- [14] OLIVEIRA P J V, FREITAS L D, CARMONA J P S F. Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29 (4): 04016263.
- [15] NEKOLNY D, CHALOUKPA J. Protein catabolism in growing *Bacillus megaterium* during adaptation to salt stress [J]. FEMS Microbiology Letters, 2000, 184 (2): 173-177.
- [16] 杨廷章, 李龙飞, 谭添, 等. 重金属 Cd、Pb 离子对土壤酶活性的抑制影响 [J]. 吉林农业, 2019 (16): 70-71. (YANG Tingzhang, LI Longfei, TAN Tian, et al. Inhibitory effect of heavy metals Cd and Pb ions on soil enzyme activity [J]. Agriculture of Jilin, 2019 (16): 70-71. (in Chinese))
- [17] 陈影, 陈苏, 冯天朕, 等. 辽河干流河岸带土壤酶活性特征及相关性研究 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43 (7): 1-7. (CHEN Ying, CHEN Su, FENG Tianzhen, et al. Characteristics and correlation of soil enzyme activities in riparian zone of Liao River trunk stream [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43 (7): 1-7. (in Chinese))
- [18] 李成杰, 魏桃员, 季斌, 等. 不同钙源及 Ca^{2+} 浓度对 MICP 的影响 [J]. 环境科学与技术, 2018, 41 (3): 30-34. (LI Chengjie, WEI Taoyuan, JI Bin, et al. Study on MICP affected by different calcium sources and Ca^{2+} concentrations [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41 (3): 30-34. (in Chinese))
- [19] RIVADENEYRA M A, DELGADO G, SORIANO M, et al. Precipitation of carbonates by *Nesterenkonia halobia* in liquid media [J]. Chemosphere, 2000, 41 (4): 617-624.
- [20] QIAO S Y, ZENG G Q, WANG X T, et al. Multiple heavy metals immobilization based on microbially induced carbonate precipitation by ureolytic bacteria and the precipitation patterns exploration [J]. Chemosphere, 2021, 274: 129661.
- [21] 刘睿. 微生物诱导碳酸盐沉淀修复铅污染土试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [22] 彭劼, 温智力, 刘志明, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (4): 733-740. (PENG Jie, WEN Zhili, LIU Zhiming, et al. Experimental research on MICP-treated organic clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (4): 733-740. (in Chinese))
- [23] 刘建兴. 微生物诱导矿化加固黏性土的试验与机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [24] SOON N W, LEE L M, KHUN T C, et al. Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17 (4): 718-728.

(收稿日期: 2023-02-01 编辑: 俞云利)