

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.017

酸污染下老黏土工程特性演变试验研究

陈小川¹, 张振华², 郭杨¹, 奚邦禄², 张骏¹, 乐腾胜¹

(1. 安徽省建筑科学研究设计院 安徽省建筑抗震减灾与绿色运维重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为探究酸污染下老黏土的工程特性演变规律,文章配制 3 种不同 pH 值的酸性溶液对老黏土进行持续浸泡试验,系统开展比重、自由膨胀率、直剪、液塑限、粒度分析等室内土工试验,并利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、X 射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)对土体微观结构及物质组成进行分析,从微观角度研究酸污染下老黏土工程特性演变规律。试验结果表明:在酸溶液的浸泡下,老黏土内部矿物不断溶蚀,土颗粒粒径减小,比表面积增加,微观结构变得松散、破碎,土体的比重、黏聚力、压缩模量、液塑限等工程指标数值下降,内摩擦角基本不变,自由膨胀率及渗透系数得到提高。基于试验结果,探究了酸污染下老黏土工程特性的演变机理,建立了老黏土抗剪强度、压缩模量、渗透系数、自由膨胀率的工程特性指标变化率随浸泡溶液 pH 值变化的数理模型,指出用黏聚力、压缩模量、渗透系数对酸污染后老黏土的污染等级进行评价较为合理。

关键词:老黏土;工程特性;酸污染;演变规律

中图分类号:TU442

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)11-1549-07

Experimental study on the evolution of engineering properties of old clay under acid pollution

CHEN Xiaochuan¹, ZHANG Zhenhua², GUO Yang¹, XI Banglu², ZHANG Jun¹, YUE Tengsheng¹

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Building Earthquake Disaster Mitigation and Green Operations, Anhui Institute of Building Research and Design, Hefei 230031, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to explore the evolution law of engineering properties of old clay under acid pollution, three acidic solutions with different pH values were prepared to carry out continuous soaking test on old clay, and then the laboratory soil tests such as specific gravity, free expansion rate, direct shear, liquid-plastic limit, and particle size analysis were conducted systematically. The microstructure and material composition of soil were analyzed by scanning electron microscope(SEM) and X-ray diffractometer(XRD), and the evolution law of engineering properties of old clay under acid pollution was studied from a microscopic perspective. The test results show that under the immersion of acid solution, the internal minerals of old clay continue to dissolve, the soil particle size decreases, the specific surface area increases, the microstructures become loose and broken, the specific gravity, cohesion, compression modulus, and liquid-plastic limit decrease, the internal friction angle basically remains unchanged, and the free expansion rate and permeability coefficient are improved. Based on the test results, the evolution mechanism of engineering properties of old clay under acid pollution is discussed, and a mathematical model is established to describe the variation rates of engineering properties indicators(shear strength, compression modulus, permeability coefficient, and free expansion rate) of old clay

收稿日期:2023-07-19; **修回日期:**2023-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51979068);安徽省住房和城乡建设科学技术计划资助项目(2022-YF018)和绿色建筑与装配式建造安徽省重点实验室开放基金资助项目(2021-JKYL-003)

作者简介:陈小川(1994—),男,安徽合肥人,安徽省建筑科学研究设计院工程师;

奚邦禄(1991—),男,安徽芜湖人,博士,合肥工业大学讲师,通信作者, E-mail: xibanglu@126.com.

with pH value of immersion solution. It is reasonable to evaluate the pollution level of old clay after acid pollution by using the indicators of cohesion, compression modulus, and permeability coefficient.

Key words: old clay; engineering properties; acid pollution; evolution law

老黏土一般指第四纪晚更新世及其以前沉积的黏性土,在安徽合肥地区广泛分布,其成因多为冲洪积或残坡积,颜色通常为黄褐色,含有铁锰结核及高岭土条纹,稠度状态为硬塑性至坚硬性^[1]。近几年,合肥地区融入长三角的进程明显加快,工业产业化发展势头迅猛。然而工业生产不可避免地会产生“废气、废水、废渣”等污染,如轮胎厂在生产过程中会产生硫化氢和二氧化碳等酸性气体,遇水后会变成酸性溶液。酸性污染源与土体接触后会与其内部矿物发生反应,从而改变土体结构,使其力学性能发生显著变化。同时,这种酸带来的污染在短期内是不能完全恢复的。因此,明确酸污染下老黏土的工程特性演变规律为实际工程提供参考显得尤为重要。

学者们从 20 世纪 80 年代以来针对酸碱污染下的土体力学性质、物质组成、微观结构开展了大量的研究工作,获得了很多有价值的研究成果。目前研究的对象主要集中于淤泥质黏土、红黏土、黄土、膨胀土。在淤泥质黏土的研究方面,文献[2-4]研究酸污染对淤泥质黏土基本物理性质、工程特性、力学强度的影响,发现酸污染后土体的有机质含量变少,黏粒组含量变高,孔隙变大,压缩性增强,抗剪强度劣化,且土体的性质随着酸浓度的提升变化明显。在红黏土的研究方面,文献[5-8]研究酸碱污染对红黏土力学性能的影响规律,研究表明,酸碱污染均会使得红黏土的黏聚力和内摩擦角下降。在黄土的研究方面,文献[9-11]研究酸碱污染对黄土力学性能和工程特性的影响,发现酸污染会改变土体的粒度分布、渗透系数、压缩特性及力学性能。即使黄土均取自同一地区,但其对酸碱的敏感程度仍呈现出一定的差异性。在膨胀土的研究方面,文献[12-15]研究不同 pH 值酸溶液与干湿循环共同作用对膨胀土的微观结构及抗剪强度影响,结果表明,酸溶液与干湿循环二者共同作用对试样裂隙发育及抗剪强度劣化的促进作用更显著,且随着 pH 值减小,抗剪强度衰减越显著。

综上,目前已有学者研究了酸作用下各类土的抗剪强度变化规律,但尚未系统地探究酸作用下老黏土的工程特性演变规律。老黏土由于历史沉积等原因,内部矿物组成与红黏土、黄土、膨胀

土等有显著差异,通常具备弱膨胀性、低压缩性、低渗透性土等特殊岩土工程特性,酸溶液作用下这些岩土工程特性如何变化是工程设计需要关注的重点。本文以合肥广泛分布的老黏土为研究对象,探究其工程特性在酸侵蚀下的变化规律,为老黏土地区的工程建设提供参考。

2 研究方案

2.1 试验材料

2.1.1 试验土样

试验土样取自合肥市某工地,取土深度为 2~3 m,土样成黄褐色、质地均匀、呈硬塑状态,局部含直径 1~3 mm 的球状铁锰结核。通过室内土工试验获得土体的基本物理力学性质如下:土体的天然含水率为 23.2%,比重为 2.72,最优含水率为 22.0%,液限为 49%,塑限为 24.0%,最大干密度为 1.60 g/cm³,自由膨胀率为 61%。由此可见老黏土属弱膨胀土。

土样的 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测试结果显示土体的矿物组成及质量分数为:蒙脱石 19.23%,伊利石 33.87%,高岭石 10.21%,石英 31.05%,长石 4.52%,方解石 1.12%。由此可见土体主要由石英、蒙脱石、伊利石、高岭石等矿物组成,其中黏土类矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石)据总质量分数的 63.31%。

2.1.2 酸性溶液制备

常见的酸性试剂包括浓盐酸和浓硫酸,前人在研究酸污染土时,选用这两者的都有。参考文献[2-4]的研究,同时考虑到试验过程的便利性,本次试验选用 1 mol/L 的盐酸作为制备酸性溶液的原始材料,利用去离子水将其稀释成 pH 值分别为 1、3、5 的 3 种不同浓度的酸性溶液备用。其中:pH=1 的酸溶液用于模拟较强的酸污染环境,如工厂酸储藏室发生渗漏;pH=5 的酸溶液用于模拟酸雨或者降雨对酸溶液的稀释作用;pH=3 的酸溶液用于模拟两者强弱之间的酸性污染环境。pH=7 的去离子水作为对照。

2.1.3 预备试验

老黏土的渗透系数较低,本次采用抽真空饱和的方式对试样进行浸泡。为了保证所制酸污染土试样的均匀性,参考相关学者的制样方法和经

验^[16-17],初始浸泡时间设置 4 个时间段,分别为 5、10、15、20 d。浸泡完成后将试样沿样心切开,观察试样内部是否有不均匀浸泡导致的硬核,经过反复试验,确定最佳浸泡时间为 15 d,此时试样内部已完全浸湿,无浸泡不均匀导致的硬核,且酸与土样反应溢出的气泡数量基本趋于稳定,可以认为此时试样与酸溶液的反应达到相对稳定状态。浸泡完成后,将试样自然风干并定时称其质量,控制含水率为 22%,用塑封膜包裹待用。

2.2 试验方案

每组 pH 值设置 12 个平行试样,其中 4 个试样用于直剪试验(快剪),4 个用于渗透测试及压缩试验,4 个环刀样烘干研磨后用于比重试验、自由膨胀率试验、物质组成试验、颗粒粒径分析试验。每次直剪试验之前从试样上取 1~2 g 土样制成切片,利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察试样在酸碱作用后的微观结构变化。

试验仪器包括:ZJ 型应变控制式直剪仪、Gemini500 型 SEM、X 射线衍射仪、Bettersize 2600 型激光粒度分析仪、中压固结仪等。

3 试验结果及分析

3.1 比重

利用比重瓶法测量不同 pH 值溶液浸泡后土体比重变化,结果如图 1 所示。

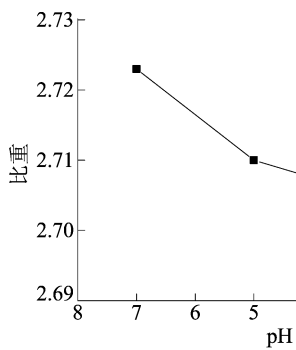
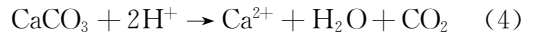
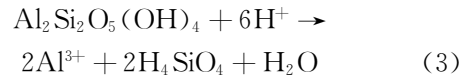
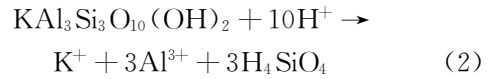


图 1 比重随溶液 pH 值的变化曲线

由图 1 可知,随着溶液 pH 值降低,土颗粒比重逐渐下降,当 pH 值从 7 降到 1 时,土颗粒比重从 2.723 降至 2.694,下降幅度达到了 1.07%。这主要是由于土中的矿物与酸溶液发生反应后变成离子进入溶液中,导致土颗粒比重下降。主要反应包括蒙脱石、伊利石、高岭石和方解石与酸之间的化学反应,具体反应式^[18]如下:



3.2 黏聚力及内摩擦角

不同 pH 值溶液作用后老黏土的内摩擦角和黏聚力通过直剪试验测得,老黏土的内摩擦角和黏聚力随溶液 pH 值的变化如图 2 所示。

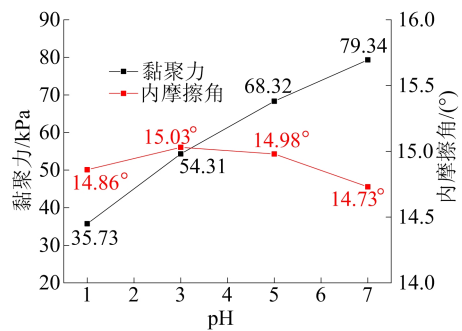


图 2 内摩擦角和黏聚力随溶液 pH 值的变化

由图 2 可知:土样在酸溶液浸泡后黏聚力呈显著减小的趋势,且在酸性较弱(pH=5)时就出现明显弱化,较 pH=7 的中性溶液浸泡的试样黏聚力下降了 11.02 kPa,降幅达到了 13.89%;在酸性较强时(pH=1),黏聚力相较 pH=7 的中性溶液浸泡的试样黏聚力出现显著下降,总计下降了 43.61 kPa,降幅达到了 54.97%。这主要是由于土体内部部分矿物在酸溶液的不断淋滤和溶蚀下逐渐流失,土体骨架逐渐变松散、连接变弱,导致试样黏聚力持续下降。

对于内摩擦角,其在酸溶液浸泡下变化不明显,整体变化幅度不足 1°。这主要是由于土体的内摩擦角一般受控于土体密度、级配、矿物和颗粒粗糙度等多个因素,且与土体的沉积历史密切相关^[19-20],老黏土在历史上经过较长时间的沉积,遇酸溶液反应后短时间内很难出现明显变化。类似的试验结果及结论在文献^[16]的研究中也得到了验证。

3.3 压缩模量

压缩模量是衡量土体压缩性的重要指标,也是用来计算地基沉降的重要参数。通过固结试验获得不同 pH 值酸溶液浸泡后老黏土的压缩模量变化,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,土样在酸溶液浸泡后压缩

模量呈显著减小的趋势,且随着酸溶液 pH 值的降低,压缩模量劣化幅度逐渐增加。当 pH 值从 7 降到 1 时,土体的压缩模量由 16.4 MPa 下降至 9.6 MPa,下降幅度达到了 41.46%。这主要是由于内部矿物被酸溶蚀后土体内部出现孔隙及裂隙,土体结构变得更加松散,在上部压力作用下更容易被压缩。

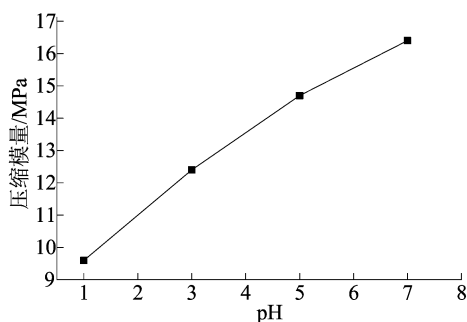


图 3 压缩模量随溶液 pH 值的变化曲线

3.4 界限含水量

土体界限含水量是划分土体状态的重要指标,其中液、塑限是黏土工程分类的主要依据。不同 pH 值酸溶液浸泡后土体的液、塑限及塑性指数变化如图 4 所示。

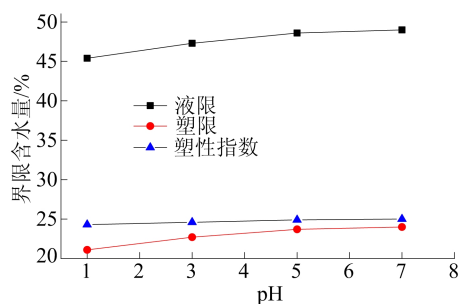


图 4 界限含水量及塑性指数随溶液 pH 值的变化

从图 4 可以看出,酸溶液浸泡后土体的液限、塑限随溶液 pH 值的降低均呈现逐渐减小的趋势,且随着溶液 pH 值的降低,液限、塑限下降的速度明显加快。当酸溶液的 pH=1 时,土体的液限和塑限分别从 pH=7 时的 49.0%、25.0% 下降至 45.4%、24.3%,液限和塑限的降幅分别达到 7.3% 和 2.8%。相较于塑限,液限受酸溶液影响的程度更加明显。塑性指数在酸溶液的作用下几乎不发生改变。土体的液、塑限本质上是土体稠度变化的临界含水量,土颗粒主要是靠结合水膜连接在一起,故土体液、塑限的变化实质上是黏粒结合水膜(扩散双电层)厚度的变化。在酸性溶

液作用下,黏粒表面电动点位和热力学点位被弱化^[21-22],大量黏粒表面携带正负电荷,其中带正电荷的吸附氯离子,带负电的吸附氢离子,两者均会导致黏土层间的结合水膜变薄,使得液限和塑限降低。

3.5 渗透系数

土体渗透系数是综合表征土体渗透性强弱的一个指标,反映了水渗过土体的难易程度。利用变水头法获得不同 pH 值酸溶液浸泡后土体的渗透系数的变化如图 5 所示。

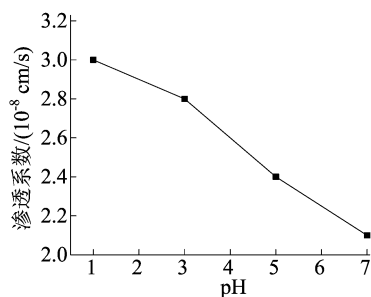


图 5 渗透系数随溶液 pH 值的变化曲线

由图 5 可知,酸溶液浸泡后土体的渗透系数逐渐增大。pH=7 的中性溶液浸泡后土体渗透系数为 2.1×10^{-8} cm/s, pH=1 的酸性溶液浸泡后土体渗透系数上升至 3.0×10^{-8} cm/s,上升幅度达到 42.8%。说明在酸溶液浸泡下,土体内部矿物溶蚀,孔隙及裂隙数量增加,土体内部的渗流通道数量增加,表现为土体渗透系数持续上升。

3.6 自由膨胀率

酸溶液作用后老黏土的膨胀特性通过自由膨胀率试验测得,自由膨胀率随溶液 pH 值的变化曲线如图 6 所示。

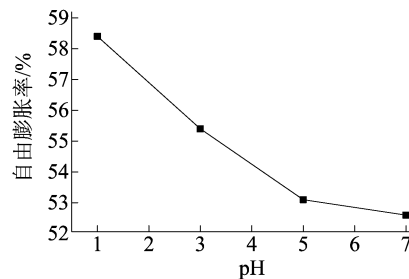


图 6 自由膨胀率随溶液 pH 值的变化曲线

由图 6 可知,在酸溶液作用下,老黏土的自由膨胀率会得到提高,当 pH 值从 7 降到 1 时,土体的自由膨胀率由 52.6% 增加至 58.4%,升幅达到了 11.03%。

3.7 粒径分布

传统的筛析法无法对 0.075 mm 以下粒径的颗粒组分进行分析,而 0.075 mm 以下粒径组分(黏粒)是土体产生膨胀的主要原因。本次研究采用 Bettersize 2600 型激光粒度分析仪对 pH=3 的酸溶液和 pH=7 的中性溶液浸泡后土体进行颗粒粒度测试,结果见表 1 所列。

表 1 试样粒径成分变化情况

pH	粒径分布/ μm			比表面积/ (m^2/kg)
	D10	D50	D90	
3	2.065	8.347	22.81	461.1
7	2.235	9.860	27.29	408.5

由表 1 可知,酸溶液作用下,土体的比表面积从 408.5 m^2/kg 增加至 461.1 m^2/kg ,增加幅度达到了 12.88%,说明单位质量土体所具有的总面积增大,土体表面与水接触的面积增多,因此酸作用下土体自由膨胀率会得到提高(图 6)。在粒径分布方面,pH=3 的酸溶液浸泡后土体 D10、D50、D90 处的粒径均小于 pH=7 的中性溶液浸泡后的土体粒径,这说明在酸的侵蚀下,土颗粒粒径发生由粗到细的变化。

4 矿物组成及微观结构

4.1 XRD 测试结果分析

利用 X 射线衍射仪对不同 pH 值溶液浸泡后土体内部矿物组分进行测试,运用 JADE 软件对 XRD 图进行分析,结果如图 7 所示。

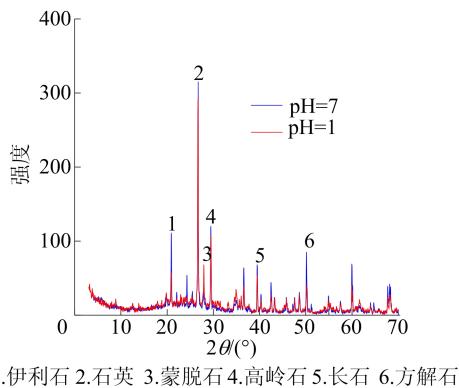


图 7 不同 pH 值溶液作用后土体的 XRD 图

由图 7 可知,随着溶液 pH 值的降低,矿物特征峰强度出现衰减。与 pH=7 的中性溶液相比,pH=1 的酸性溶液作用后土体的伊利石、方解石的特征峰值均出现了明显下降。这说明在酸性溶

液作用下,老黏土中伊利石、方解石的结晶程度逐渐变差,有序晶体结构成分不断减少^[18],游离氧化物出现不同程度的溶蚀和淋滤,该过程涉及的主要反应如反应式(2)、反应式(4)所示。

4.2 微观结构测试结果分析

利用场发射电子显微镜对不同 pH 值溶液浸泡后土体微观结构进行测试对比,然后用 Image Pro Plus(IPP)软件对土体的微观结构图进行数字化处理,主要步骤包括二值化处理,孔隙、裂隙提取,孔隙率计算。2 000 倍下不同 pH 值溶液浸泡后试样的 SEM 图(左图)和经过 IPP 软件处理后的二值化图(右图)如图 8 所示。二维可视化孔隙率随 pH 值的变化如图 9 所示。

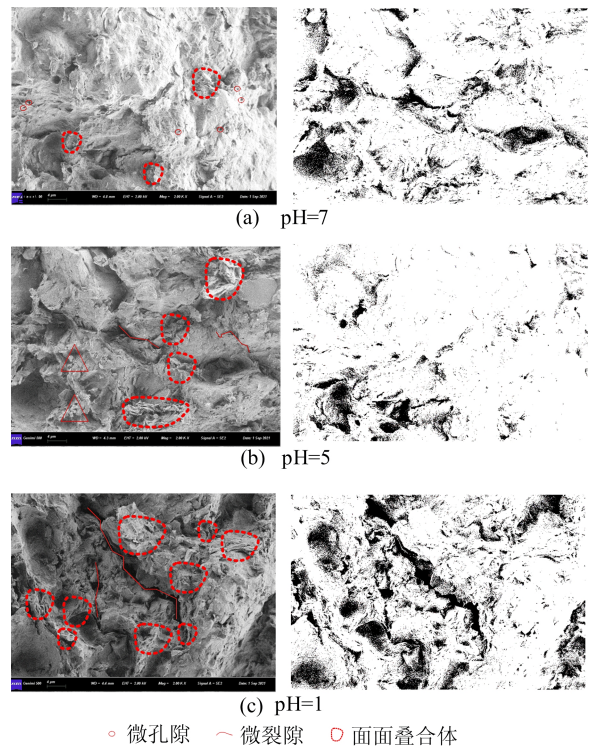


图 8 不同 pH 值溶液浸泡后土体微观结构的变化

土体的微观结构按其 主要特征可归纳为颗粒形态、胶结物质、粒间接触及孔隙结构。pH=7 的中性溶液浸泡后,土体颗粒形态较为完整,颗粒间以牢固的面-面接触为主,结合较为紧密、完整,试样表面孔隙及裂隙数量较少(图 8a);弱酸溶液(pH=5)浸泡后,土体微观结构劣化,出现长裂隙,原有的致密结构变得松散破碎,颗粒间点-面接触比例增加(图 8b 中三角形标注),孔隙与颗粒间的间隙不清晰,颗粒表面变得杂乱;随着溶液 pH 值的降低(pH=1),土体微观结构劣化更为明显,孔隙及裂隙数量明显增加,试样变得更加松

散破碎和杂乱,裂隙进一步扩张(图 8c)。

由图 8 可知,随着浸泡溶液 pH 值降低,试样中面面叠合体的数量进一步增加。微观结构中的叠聚体是土体体积产生胀缩的基本单元体,叠聚体在土体微观结构的占比越大,其膨胀性就越强^[18]。老黏土微观结构中存在面面叠聚体单元,具备此项结构特征,因而具有一定的膨胀性。即使像伊利石和高岭石等膨胀性较弱的黏土矿物,一旦其具有面面叠聚结构形式,都可以产生结构性膨胀^[23],故酸溶液作用后老黏土的自由膨胀率提高可以从微细观层面进行解释:随着浸泡溶液酸性的增强,试样叠片结构边缘逐步打开,叠聚体数量不断增加,表现为土体的比表面积增大(表 1),土体表面与水接触的面积增多,因此自由膨胀率在酸溶液的作用下不断提升(图 6)。

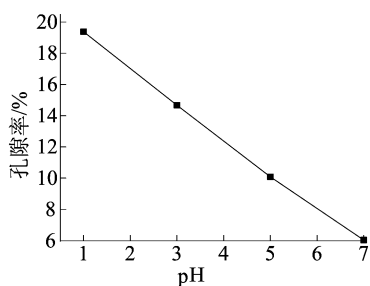


图 9 孔隙率随 pH 值的变化曲线

由图 9 可知,随着溶液 pH 值下降,孔隙率几乎呈线性增加,当 pH 值从 7 降低到 1 时,土体的孔隙率从 6.03% 上升至 19.38%。由此可见,酸溶液会不断侵蚀土颗粒内部的矿物,使土体原致密结构变得松散破碎,表现为土体孔隙率持续上升。

5 损伤机制

老黏土的矿物成分以石英、蒙脱石、伊利石、高岭石为主,其中蒙脱石、伊利石、高岭石等黏土矿物是土体中胶结物的主要组成部分。上述矿物中,石英为酸性氧化物,几乎不与酸溶液发生化学反应,蒙脱石、伊利石、高岭石、方解石遇酸溶液后会发生化学反应,具体如反应式(1)~(4)所示。在酸溶液作用下,土体内部矿物不断淋滤和溶蚀,土颗粒粒径由大变小,部分胶结物变成离子进入溶液中,土骨架之间的胶结变弱,在微观结构上表现为土体表面变得松散,孔隙、裂隙及叠聚体数量增加,裂隙不断发展直至贯通形成渗流通道,在宏观上即表现为土体的比重、黏聚力和压缩模量下降,渗透系数增加,该演变示意图如图 10 所示。

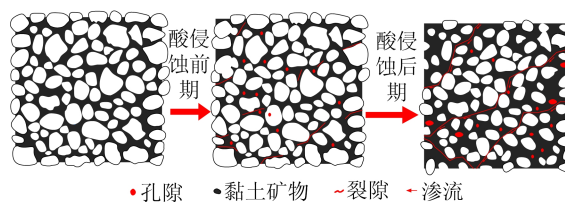


图 10 酸侵蚀下老黏土微观结构演变示意图

6 老黏土污染程度评价

根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[24](以下简称《规范》)中的规定,环境污染对土工程特性的影响程度可采用强度、变形、渗透等工程特性指标的变化率进行综合评价,工程特性指标变化率通过污染前后工程特性指标的差值与污染前指标的百分比获得,本次选用抗剪强度、压缩模量、渗透系数、自由膨胀率 4 个主要参数对老黏土受酸污染后的程度进行评价,分别建立以上 4 个指标的工程特性变化率随 pH 值变化的数理模型,如图 11 所示。

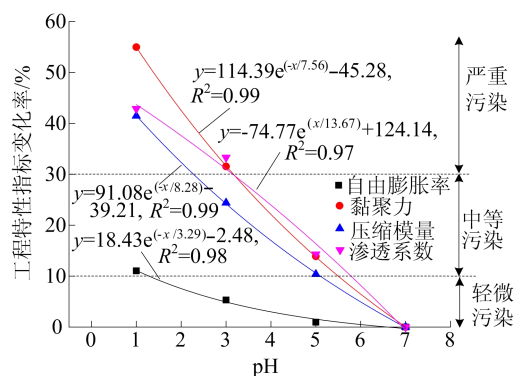


图 11 工程特性指标变化率随 pH 值变化的数理模型

《规范》中规定:工程特性指标变化率达到 10% 即可判定为中等污染土,基于数理模型反算得到当用黏聚力、压缩模量、渗透系数、自由膨胀率进行评价时,溶液的 pH 值分别达 5.50、5.10、5.78、1.28,可判定受污染后的老黏土为中等污染土。用黏聚力、压缩模量、渗透系数进行酸污染后老黏土污染程度评价时 pH 值较为接近,而用自由膨胀率时 pH 值差异较大,故在对老黏土进行污染程度评价时首选黏聚力、压缩模量、渗透系数作为具体评价指标,不宜选用自由膨胀率工程特性指标变化率对土的污染程度进行评价。

7 结论

1) 酸溶液作用下,老黏土试样比重、黏聚力、

压缩模量、液塑限等工程指标出现明显下降,内摩擦角基本不变,自由膨胀率及渗透系数得到提高。

2) 老黏土内部矿物与酸溶液发生化学反应,胶结物质不断流失,微观表面变得破碎杂乱,叠聚体数量上升,比表面积增加,孔隙率持续上升。

3) 建立了老黏土抗剪强度、压缩模量、渗透系数、自由膨胀率的工程特性指标变化率随浸泡溶液 pH 值变化的数理模型,可供设计参考。

4) 对酸溶液作用下老黏土污染程度进行评价时,应首选黏聚力、压缩模量、渗透系数作为评价指标,不宜用自由膨胀率、内摩擦角进行评价。

参 考 文 献

- [1] 郭杨,杨成斌. 硬黏土地基与地下工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [2] 刘汉龙,朱春鹏,张晓璐. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(8):1213-1217.
- [3] 朱春鹏,刘汉龙,沈扬. 酸碱污染软黏土变形性质的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(10):1559-1563.
- [4] 朱春鹏,刘汉龙,沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(7):1146-1152.
- [5] 牟春梅,韦瑜玺. 桂林地区酸、碱污染红黏土力学效应弱化试验研究[J]. 重庆大学学报,2019,42(6):109-118.
- [6] 潘泰,赵贵涛,黄英. pH 值对云南红黏土力学特性及微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报,2021,40(10):3427-3434,3441.
- [7] 陈筠,王麒,于明圆,等. 碱污染红黏土抗剪强度及破裂面微观结构特征研究[J]. 工程地质学报,2018,26(5):1300-1310.
- [8] WANG Q, CHEN J, LIU J, et al. Relationships between shear strength parameters and microstructure of alkaline-contaminated red clay[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(27):33848-33862.
- [9] 杨秀娟,汪源,樊恒辉,等. 孔隙溶液酸碱度对重塑黄土工程性质的影响研究[J]. 长江科学院院报,2018,35(9):92-97.
- [10] 杨秀娟,武雷杰,刘惹梅,等. 酸性溶液对重塑黄土工程性质的影响研究[J]. 人民黄河,2020,42(7):122-125,135.
- [11] 刘华,胡文乐,胡鹏飞,等. 酸污染黄土强度指标及电阻率评价研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(2):662-672.
- [12] 刘华,何江涛,赵茜,等. 酸污染原状黄土渗透微观特征演变规律试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(3):765-772.
- [13] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸雨湿干循环作用下百色膨胀土裂隙发育规律及其微观机制[J]. 中国公路学报,2021,34(1):47-56.
- [14] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸性环境对百色膨胀土胀缩性能的影响及其微观解释[J]. 交通运输工程学报,2019,19(1):24-32.
- [15] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸雨入渗膨胀土的水土化学试验与作用机理分析[J]. 岩土工程学报,2022,44(8):1483-1492.
- [16] 刘宽,叶万军,高海军,等. 酸碱污染黄土抗剪强度演化规律及微观机制[J]. 岩土力学,2022,43(增刊1):1-12.
- [17] 王绪民,陈善雄,程昌炳. 酸性溶液浸泡下原状黄土物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(9):1619-1626.
- [18] 常锦,杨和平,肖杰,等. 酸性环境干湿循环条件下膨胀土的膨胀特性及微观作用分析[J]. 中国公路学报,2019,32(3):34-43.
- [19] 刘宽叶,万军,高海军,等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(10):2148-2159.
- [20] 邓华锋,原先凡,李建林,等. 土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):4065-4072.
- [21] 谌文武,刘宏伟,张起勇. SH 加固酸碱污染黄土的抗压强度特性试验研究[J]. 桂林理工大学学报,2017,37(3):422-428.
- [22] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(6):587-600.
- [23] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
- [24] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:1-88.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1548 页)

- [13] 朱俊福,尹乾,张京民,等. 深部缓倾软弱夹层巷道围岩变形演化与非对称支护[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2022,4(5):47-61.
- [14] 左建平,魏旭,王军,等. 深部巷道围岩梯度破坏机理及模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(3):478-485.
- [15] 刘允秋,肖益盖,李同鹏,等. 深井高应力破碎岩体支护技术研究与应用[J]. 金属矿山,2022(6):29-34.
- [16] 张传庆,周辉,冯夏庭. 基于破坏接近度的岩土工程稳定性评价[J]. 岩土力学,2007,28(5):888-894.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017:28.
- [18] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010:42.
- [19] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路隧道设计规范:JTG 3370. 1—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018:50.
- [20] 袁海平,叶晨旭,王文辉. 不同等级岩巷力学参数赋值与素喷支护效果评价[J]. 金属矿山,2022(3):51-56.

(责任编辑 吴 亮)