

酸雨作用下红黏土渗透性影响机制及压实度控制

肖桂元^{1,2}, 陈学军², 韦昌富^{2,3}, 黄翔², 陈龙²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 桂林理工大学 广西岩土力学重点实验室, 广西 桂林 541004;
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: 酸雨会溶解红黏土中的部分物质, 是导致红黏土路基病害的重要因素。研究红黏土在酸雨环境下的渗透机制、提出红黏土路基压实度建议标准对于红黏土地区路基设计具有很强的工程实际意义。设计新型的淋溶仪器, 用不同 pH 值溶液模拟酸雨对原状红黏土进行淋溶后, 进行渗透性试验、物相分析试验及电镜微结构扫描试验, 深入分析酸雨对桂林红黏土渗透性的影响因素及影响机制; 进一步通过试验研究重塑红黏土渗透系数与压实度的变化关系。结果表明: 红黏土渗透系数随干密度增大而减小; 红黏土中的主要物质成分包括铁、硅、铝和钾 4 种金属元素的化合物均能被酸性物质溶解, 随地下水迁移而流失, 造成土体结构孔隙比增大、内部的孔隙连通性增强, 酸雨的 pH 值越小, 这些物质的溶解程度越大, 对红黏土的渗透性影响越大; 当在 pH 值 3 的酸雨地区用红黏土作为路基填料时, 控制路基压实度 95% 可有效预防酸雨对红黏土的不利作用。

关键词: 土力学; 酸雨作用; 红黏土; 渗透性; 压实度; 结构损伤

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)增1-3283-08

Mechanism of permeability and control of compaction for red clay under the influence of acid rain

XIAO Guiyuan^{1,2}, CHEN Xuejun², WEI Changfu^{2,3}, HUANG Xiang², CHEN Long²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, 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: Acid rain will dissolve some of the material of red clay, which is the important factor of red clay roadbed diseases. The research on the penetration mechanism of red clay in acid environment and recommendation of subgrade compaction standards to red clay roadbed has a strong practical significance. Use simulated acid rain of different pH value the solution leaching undisturbed of red clay by designing new leaching equipment to conducting penetration test, phase analysis test and SEM experiments, to deeply analyze the impact of acid rain on the factors and mechanisms of Guilin red clay permeability. Further research on the relationship between changes in permeability and the degree of compaction of reshape red clay by the experimental study. The results show that: Red clay permeability decreases with increasing dry density. Chemical compounds of four metal

收稿日期: 2015-01-12; **修回日期:** 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51369010, 41262011); 广西自然科学基金创新团队项目(2012GXNSFGA060001)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51369010 and 41262011) and Project of Guangxi Natural Science Foundation of China(Grant No. 2012GXNSFGA060001)

作者简介: 肖桂元(1976-), 男, 2001年毕业于桂林理工大学土木工程专业, 现任高级实验师, 主要从事特殊土成灾机制及防治方面的研究工作。E-mail: xiaoguiyuangit@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0040

elements(Fe , Si , Al , K) , which are the main compositions in laterite soil , all can be dissolved by acidic substances , and due to the dissolution caused by acid rain. The lower the pH value of acid rain , the greater the degree of dissolution of these substances , the greater the influence on permeability of laterite soil. When using red clay as roadbed filler in acid rain areas of pH value not less than 3 , the degree of compaction not less than 95% could be controlled to prevent the adversely affect of acid rain on the laterite soil subgrade effectively.

Key words : soil mechanics ; effects of acid rain ; red soil ; permeability ; compaction ; structural damage

1 引言

红黏土路基的施工压实标准与施工压实度控制问题长期困扰工程界,规范建议对于高含水量黏性土适当降低压实标准,但未提出明确的控制指标^[1-2]。红黏土的填筑往往难以达到预定的密实度。目前工程实践中,经常遇到道路填筑大范围穿越红黏土区域,换填及以桥代路代价太高,如何控制红黏土的密实度成为快速发展的工程中的一大亟待解决的难题。

红黏土不但水敏性强,红黏土在酸性条件下理化性质变化也非常显著。酸性环境对红黏土的土体损伤主要表现在破坏土体内部的团粒结构,改变土体的颗粒大小,从而改变红黏土的可密实性。因此本文通过研究红黏土酸性环境下土体渗透性机制来探索控制红黏土压实度的研究具有一定的实际意义。

汪雅各^[3]发现:酸雨对红黏土的部分金属离子产生明显的溶失,pH 值小于 3.5 的酸液对土壤中各种金属离子溶失迅速增大。朱寿增^[4]通过柳州红黏土研究得到:低酸性的酸雨长期作用下土体含水量、可塑性和压缩性增大,密实度、抗剪强度和承载力降低,且随酸雨作用时间的增加而强化。孙重初^[5]分析了室内地基红黏土土体在强酸侵蚀后含水量、液性指数、含水率增加,可溶盐增加,塑性降低,抗剪强度、压缩模量降低等。伯桐震等^[6]通过对比试验研究指出:红土的比重、液塑限与塑性指数随酸浓度的增大和养护时间的延长总体都呈减小的趋势。J. D. Coleman 和 D. M. Farrar^[7]研究得到:对于土层不同深度处 pH 值、温度、雨水及地下水条件等影响,造成红黏土性质具有剖面性。

R. H. Brooks 和 A. T. Corey^[8]建立了描述土壤溶质穿透曲线的毛管束模型,得到不同土壤溶质迁移特征间差异。孔令伟等^[9-11]通过模拟试验,认为在失水条件下,游离氧化铁的形态转化对红黏土性质的影响不显著,但在渗水条件下,由于游离氧化铁的流涎使得胶结作用减弱,对红黏土的工程性质的影响明显。程昌炳等^[12-13]的研究证实了红黏土中游离氧化铁的胶结作用对结构强度的形成具有实质性的意义。

对于红黏土微观结构及矿物成分的研究较多,目前,国内外的学者研究的问题主要集中针对在酸雨条件下土壤内部各种有机质的溶出及金属离子的释放的研究^[14-15],主要从化学的角度切入,但微观结构对红黏土压实度控制措施的研究尚未进行量化研究,定性研究多,定量研究较少,其影响机制的诠释尚有待进一步深入。

2 酸雨对红黏土渗透性的影响机制

2.1 试验概况

本试验用土取自桂林市叠彩区芦笛路帝景豪庭(原桂林市钢厂)的建筑基坑,为第四纪更新世晚期的红黏土,取土深度约 2.5 m,其基本的物理性质指标如表 1 所示。

目前,中国降水化学组成属硫酸型,但正在向硫酸——硝酸混合型转变^[16-17],SO₄²⁻和 NO₃⁻是降水中主要阴离子。试验将浓度为 98%的浓硫酸与浓度为 64%的浓硝酸按 H₂SO₄ : HNO₃ = 3 : 1 摩尔比混合后的稀释溶液作为模拟酸雨溶液。国内酸雨的 pH 值一般不小于 2.6,且大于 5.5 后其酸性对土壤的影响不显著,故本试验配制 pH = 2, 3, 4, 5 这 4 种酸性溶液供试验使用。

表 1 桂林红黏土物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical properties of the Guilin red clay

密度/ (g · cm ⁻³)	含水率/%	干密度/ (g · cm ⁻³)	相对密度	塑限/%	液限/%	塑性指数	黏聚力/kPa	内摩擦 角/(°)	压缩系数/ MPa ⁻¹	孔隙比	渗透系数/ (10 ⁻⁷ cm · s ⁻¹)
1.65 ~ 1.74	26.85 ~ 31.5	1.3 ~ 1.33	2.76 ~ 2.78	34.2 ~ 38.4	61.3 ~ 71.2	31.5 ~ 36.8	61.3 ~ 102.4	15.8 ~ 19.8	0.22	1.11 ~ 1.24	1.24 ~ 2.53

为研究酸雨对红黏土渗透性的影响，取已准备好的其中 3 种酸性溶液(pH = 3, 4, 5)和蒸馏水(pH = 7)对土样充分淋溶。淋溶试验采用如图 1 所示的自制模拟酸雨淋溶红黏土路基试验模型装置^[18]。试验模型装置由淋溶液存储器、淋溶器、土体淋溶模拟器和底液收集器组成。该自制模型结构简单，易于维护，模块化设计，每次试验土量大，可轻松更换淋溶溶液及实验土体，能够有效减少对试样的扰动，土样制备成功率高，可重复试验。

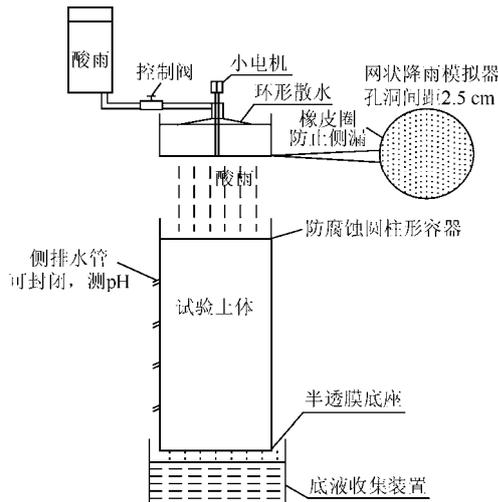


图 1 模拟酸雨淋溶红黏土路基试验模型

Fig.1 Test model of simulated acid rain eluviation on red clay

本试验按照《土工试验规程》(SL237—1999)进行，根据不同 pH 值溶液淋溶处理方法将试验分为 4 组，渗透试验仪器为 TST-55A 型渗透仪。采用室内变水头渗透试验，每组进行渗透试验 20 次，共 100 余次，试验结果见图 2。图 2 中， k 为渗透系数， ρ_d 为干密度。

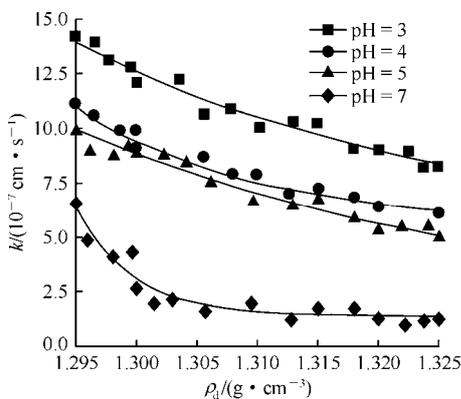


图 2 原状土酸雨淋溶前后渗透系数

Fig.2 Permeability coefficient of undisturbed soil before and after acid rain leaching

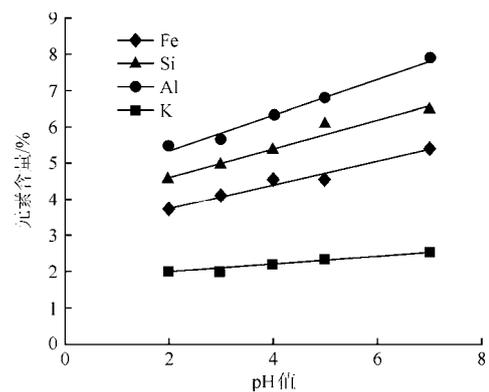
红黏土物质成分的改变是影响红黏土渗透性的一个重要因素。为研究酸雨对红黏土物质成分的影响，选取 6 组原状土样进行物相分析：取 4 组土样分别在 pH = 2, 3, 4, 5 的酸性溶液和蒸馏水饱和和浸泡 72 h，另一组土样未经浸泡处理。浸泡结束后，取土自然风干后研磨成粉，用 X 射线衍射试验测试元素百分比，计算溶液浸泡后各元素损失率。物相分析设备为 X 射线荧光光谱仪，如图 3 所示。物相分析主要测定 Al, Si, Fe, K 等主要金属元素含量，分析结果如图 4 所示。

响，选取 6 组原状土样进行物相分析：取 4 组土样分别在 pH = 2, 3, 4, 5 的酸性溶液和蒸馏水饱和和浸泡 72 h，另一组土样未经浸泡处理。浸泡结束后，取土自然风干后研磨成粉，用 X 射线衍射试验测试元素百分比，计算溶液浸泡后各元素损失率。物相分析设备为 X 射线荧光光谱仪，如图 3 所示。物相分析主要测定 Al, Si, Fe, K 等主要金属元素含量，分析结果如图 4 所示。

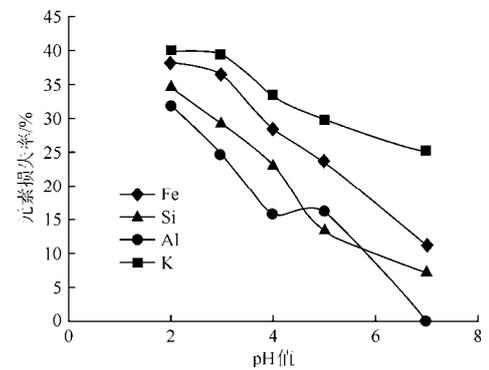


图 3 X 射线荧光光谱仪

Fig.3 X-ray fluorescence spectrometer



(a) 元素含量与 pH 值关系



(b) 元素损失率与 pH 值关系

图 4 物相分析结果

Fig.4 Results of phase analysis

红黏土内部微结构的改变也是直接影响红黏土渗透性的重要因素之一。为研究酸雨对红黏土微结构的影响，选取 4 组土样进行电镜扫描分析：每组

土样 pH 值分别在 3, 4, 5 的酸性溶液和蒸馏水(pH = 7)中真空饱和浸泡 48 h。浸泡结束后, 取土自然风干后切片制样, 放大 10^4 倍电镜扫描图如图 5 所示。

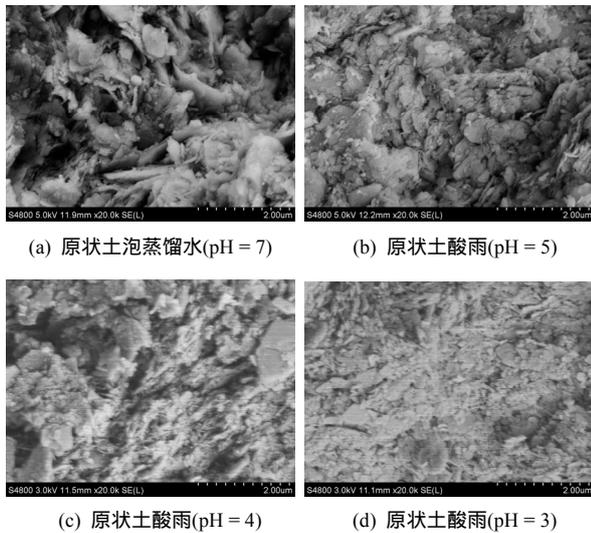


图 5 红黏土酸雨作用后微结构电镜扫描图(放大 10^4 倍)
Fig.5 Red clay microstructure electron microscope scan after the effect of acid rain(enlarge 10^4 times)

2.2 结果分析

将图 2 中的试验结果用指数函数进行拟合, 其拟合曲线见图 2, 拟合参数见表 2。拟合函数为

$$k = A \exp\left(-\frac{\rho_d}{B}\right) + C \quad (1)$$

式中: A, B, C 为拟合参数。拟合曲线的相关系数 R^2 均大于 0.97, 表明式(1)能较好地描述渗透系数与干密度的关系。

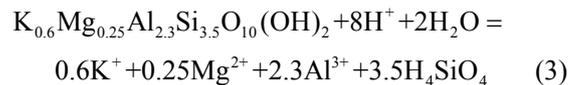
表 2 指数函数拟合原状土淋溶前后干密度与渗透关系参数
Table 2 Parameters of dry density and permeability fitting by exponential function of undisturbed soil before and after leaching

溶液	A	B	$C/10^{-7}$	R^2
蒸馏水	2.08×10^{13}	0.004 7	1.35	0.982 40
pH = 3	1.25×10^{12}	0.031 0	5.03	0.975 89
pH = 4	2.11×10^{30}	0.015 0	5.45	0.978 22
pH = 5	1.66×10^9	0.037 0	1.14	0.979 16

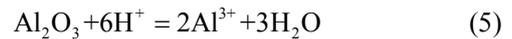
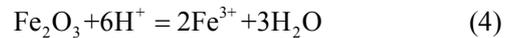
从图 2 可知: 在淋溶液 pH 值相同的情况下, 红黏土的渗透系数 k 随干密度 ρ_d 增大呈指数衰减; 在干密度 ρ_d 相同的情况下, 渗透系数 k 则随淋溶液氢离子浓度增大(pH 值减小)而增大。

酸性渗流条件下, 土壤中的交换性酸基离子将向下迁移和溶失, 使土体产生离子交换作用, 土体中土颗粒原有的双电层结构发生改变。红黏土中黏土矿物主要是高岭石 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 、伊利石

$K_{0.6}Mg_{0.25}AlSi_{3.5}O_{10}(OH)_2$ 及铁、铝氧化物 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和氢氧化物 $Al(OH)_3$ 、 $Fe(OH)_3$ 等的胶结物。钾元素是伊利石中的金属元素成分。红黏土中伊利石含量较低, 故钾元素含量较小, 方解石和白云石等矿物经红土化作用基本溶解, 故红黏土中这两种物质含量也很低。酸雨与黏土矿物作用, 发生如下反应:

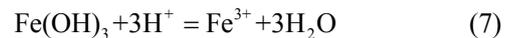
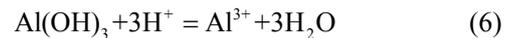


红黏土的矿物成分除了黏土矿物外, 还含有较多的铁、铝胶结物和少量非晶质 SiO_2 胶结物, 这些胶结物一般充填于土体的颗粒之间, 并将它们胶结起来, 使土粒间具有比较牢固的连接, 致使土体具有较高的抗剪强度和较低的压缩性, 铁铝氧化物与酸反应式为



由电镜扫描试验知, 桂林市的红黏土团粒是由许多小集合体聚集而成的, 具有较明显的定向性。微观上近似呈畴状结构, 团粒间主要以面面接触为主, 团粒表面有铁、铝元素的存在。这进一步说明了铁铝胶结物等的胶结作用。在正常的中性环境中, 黏土颗粒表面一般是带负电的, 它吸附阳离子达到平衡。在酸的作用下, 铁、铝的胶结物被溶蚀。

而 Fe, Al, Si 的胶体颗粒一般以胶团形式存在, 其结构式为



由图 4(a)中红黏土元素损失量与 pH 值关系曲线可知, 随着淋溶液 pH = 7 下降至 pH = 2, 铁元素含量从 7.88% 下降到 5.48%, 铝元素含量从 5.40% 下降至 4.07%, 硅元素从 6.47% 下降至 4.56%, 钾元素则从 2.50% 下降至 2.00%。这是红黏土中各种化学成分被酸溶解致使金属元素以离子形式随地下水迁移而流失的结果。

由图 4(b)对不同溶液浸泡的原状红黏土的元素损失率有如下规律: 随着溶液酸度减小(pH 值增大), 原状红黏土中 Al, Si, Fe, K 泡酸后损失率基本呈线性减小趋势, 4 种主要测试元素在酸性环境中溶失率大小关系为 $Al < Si < Fe < K$, pH = 2 的酸雨环境下红黏土各主要元素损失率均大于 33%, 说明酸对红黏土有较强的溶蚀作用; 原状土泡水后其 Si, K, Fe 的含量略有下降, 其中 K 元素含量下降

较多达 24%，Al 元素含量基本没有变化，可见 Al 的化合物基本不溶于水，而 Si, K, Fe 等均能部分溶于蒸馏水中。

由图 5 可知，酸雨淋溶作用后红黏土土体的微观形态下团粒变少，团粒与团粒之间孔隙更加连通，pH = 3 的酸性溶液作用最为突出，粒径变小，分散程度提高，土的原有结构遭到破坏且出现明显的淋溶通道。

综合物相分析结果(见图 4)和电镜扫描结果(见图 5)可知，红黏土在酸雨环境下会和酸发生系列化学作用，土颗粒的物质成分被溶解并随地下水迁移而流失，造成土体结构变疏松，孔隙比增大，且土体内部的孔隙连通性增强。这也是图 2 中红黏土渗透系数随酸性增大(pH 值减小)而增大的主要原因。

3 酸雨环境下红黏土路基压实度控制

3.1 试验概况

从节 2 分析结果可知，在酸雨 pH 值相同的情况下，红黏土的渗透系数随干密度增大呈指数衰减，因此，采用红黏土作为路基材料时，增大其施工干密度(即压实度)可有效减轻酸雨对红黏土路基的不利影响。为进一步确定合理的红黏土路基压实度，本节进一步通过试验研究红黏土在不同压实度下的物质迁移规律和渗透性的变化规律，为红黏土路基施工提供技术可行、经济合理的参考依据。

试验用土、酸雨溶液配制方法、和土样淋溶试验和渗透试验方法与前面试验相同，在淋溶液的蒸馏水改用取样场地蓄水池收集的雨水。雨水收集日期自 2012 年 4 月 2 日起至 2013 年 10 月 10 日止，共 4 次，经 pH 值测试仪测定，其 pH = 6.2 ~ 6.4，收集的雨水混合均匀，混合雨水的 pH = 6.3。另外，为更好地分析酸性物质对压实路基的溶蚀效率，增加配置了 pH = 2 的酸性溶液。

为确定最优含水率与最大干密度，采用北京路达兴业公司 YDT-I 型重型击实仪按《公路土工试验规程》(JTGE40—2007)对红黏土填料进行了重型标准击实试验。土样采用湿法击实，测得红黏土土样最优含水率为 29.7%以及对应最大干密度为 1.55 g/cm³。本试验根据路基压实标准使用重型击实仪制作压实度为 85% ~ 98%的试样，控制重塑土干密度 1.40 ~ 1.52 g/cm³。重塑土酸雨淋溶前后渗透系数如图 6 所示。

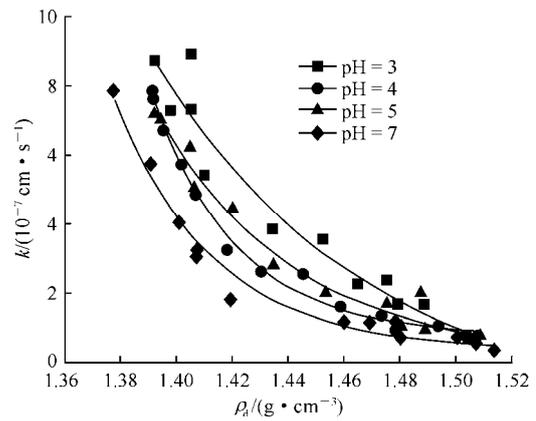


图 6 重塑土酸雨淋溶前后渗透系数

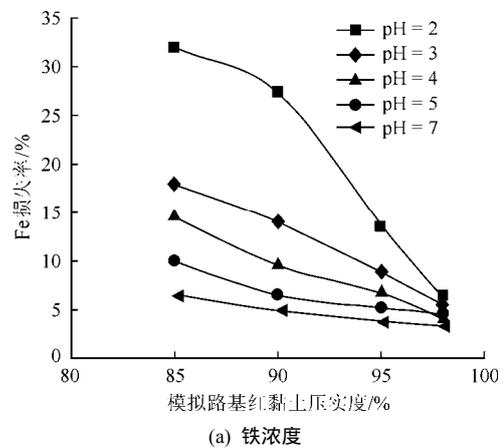
Fig.6 Permeability coefficient of reshaped soil before leaching and after acid rain leaching

根据节 2.1 物相分析结果可知，土样中含量最高的几种元素为铁、硅、铝和钾这 4 种，故本试验主要分析这 4 种元素在不同 pH 值溶液淋溶下的含量变化，试验分析结果见图 7。

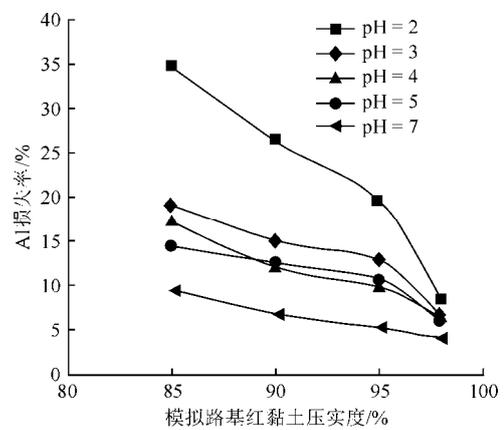
3.2 结果讨论

将图 6 中的渗透系数按式(1)的指数函数形式拟合，拟合结果见表 3。

从表 3 可知，曲线拟合相关系数 R² 均不小于 0.94，重塑红黏土的渗透系数 k 具有随酸雨溶液的



(a) 铁浓度



(b) 铝浓度

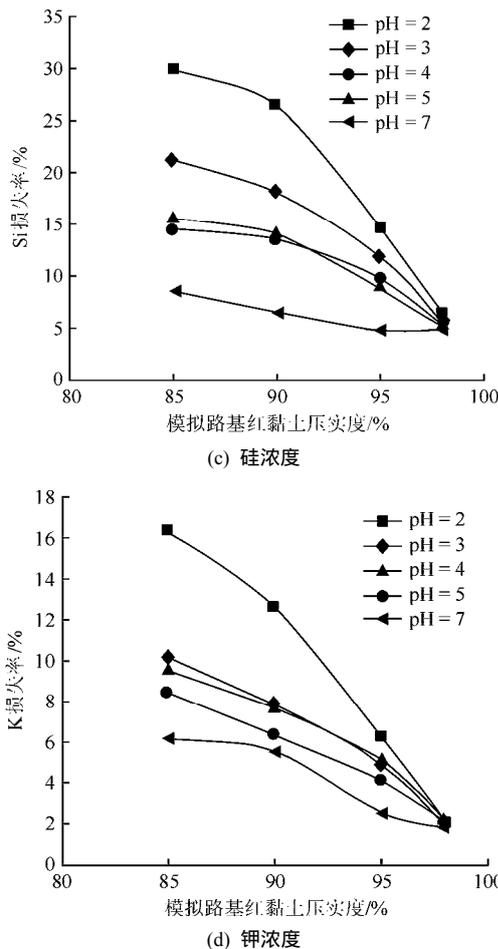


图7 浓度与pH值和压实度的相关性

Fig.7 Correlation between concentration and pH degree of compaction

表3 指数函数拟合重塑土淋溶前后干密度与渗透关系参数
Table 3 Parameters of dry density and permeability fitting by exponential function of remolded soil before and after leaching

条件	A	B	C	R ²
未经酸淋溶	7.2×10 ⁹	0.035	3.40×10 ⁻⁹	0.975 71
pH=3 酸淋溶	8.86	0.076	-1.46×10 ⁻⁸	0.942 27
pH=4 酸淋溶	4.87×10 ¹²	0.030	7.67×10 ⁻⁹	0.990 79
pH=5 酸淋溶	9.59×10 ⁴	0.050	7.30×10 ⁻¹⁰	0.974 30

pH 值增大而降低的关系,这与原状土的渗透系数变化规律是一致的。根据图6,在干密度 ρ_d 较小的情况下,pH 值越大,其渗透系数 k 也越大。可见重塑红黏土渗透性变化机制应与原状土红黏土变化机制一致。

结合节2.2红黏土渗透性变化机制分析和D. E. Daniel等^[19-20]的研究成果,酸会溶解红黏土中的物质,而溶解的物质沿着渗透路径推移过程中,会在酸锋面附近重新沉淀而淤堵孔隙,造成渗透系数降

低,只有当酸锋面推进并通过全部试样长度时才表现为渗透系数增大现象,即渗透系数的扩大受渗透过程、渗透时间的影响和控制。根据谈云志等^[21]的研究,常规压实作用只能改变土体某一较大孔隙范围内的孔隙,而对小孔隙的孔隙改变不大。故压实过程主要将红黏土中的大的团粒压碎,进而小的颗粒和压碎的颗粒进入了之前的大孔隙,填充进去,并在压实过程作用下进一步密实,直接导致红黏土中的孔隙方向性的降低、孔隙率的减小,从而导致渗透系数近似呈线性急剧降低;而在较高压实度下,由于大颗粒的压碎以及大孔隙的填充和密实,加上强度较高的红黏土中的胶结团粒(10 μm)和团粒之间强相互作用,压实作用已很难继续作用于更小粒径的土颗粒上,只能进一步作用于稍微大一点空隙和颗粒使之密实,与此同时,酸液对土内部的溶蚀作用产生的微粒物质会随着渗透的进行在酸锋面处聚集沉淀,堵塞渗流管道,进一步降低渗透性,所以此时红黏土的渗透系数变化不明显,形成“稳定”阶段。可见,采用红黏土作为路基填料时,控制红黏土的压实度可有效降低酸雨对红黏土路基的不利影响。

从图6可知,在干密度达到1.48 g/cm³左右,在不同pH值溶液淋滤后的渗透系数的差异已经较小,即此时的酸雨溶液对红黏土性质的影响不大,此时对应的压实度为95%。从图7土中铁(Fe)、硅(Si)、铝(Al)、钾(K)等在酸性溶液淋溶前后的损失率和压实度的关系中发现,4种元素的损失率均随pH值增大而减少,且其差异逐渐随压实度增大而变小,这与渗透系数的变化特征基本一致。

由图7(a),(b),(c)可知,由于铁(Fe)、硅(Si)、铝(Al)在红黏土土体中存在较多胶结结构,在一定淋溶范围时,酸雨酸度是决定红黏土硅、铝溶解释放的主要因素。在pH 5的各酸度酸雨淋溶下,硅、铝、铁均有释放,普通雨水淋溶下存在少量释放。铝在pH = 4.0~6.3范围时的释放量较少,在酸雨pH = 2时出现大量释出,强酸性条件下,可使红黏土矿物的风化作用加强。一方面红黏土胶体上的铁铝、硅铝胶结物释放并随酸雨淋失,另一方面持续的模拟强酸雨淋溶导致了红黏土中的硅铝矿物和氧化铁矿物的风化分解,又释放出一定量的铁、硅、铝离子,释放的3种元素离子随酸液的不不断淋溶被带出试验体。在压实度为85%和90%时,Fe,Al,Si的损失率差距较大,在压实度为95%和98%时,损失率差距不明显,这说明在压实度较小时酸雨的

pH 值对 Fe, Al, Si 离子的损失影响较大, 当压实度达到 95%以上时, 由于土壤的孔隙减少, 淋溶溶液通过红黏土孔隙的机会减少。酸雨的作用不明显, 压实度对损失率的影响较大。雨水由于溶解了大量的 CO₂, 而带有弱酸性, 因此也能对红黏土产生溶蚀效应, 在雨水的淋溶条件下, 损失率随压实度的增加而减少。如图 7(d)所示盐基钾(K)离子浓度与 pH 值和压实度的关系, 强酸性条件下, 一方面红黏土胶体上的可交换盐基离子与输入的 H⁺交换并随酸雨淋失, 另一方面持续的模拟强酸雨淋溶导致了土壤中可风化矿物的风化分解, 又释放出一定量的盐基离子。钾的损失率随红黏土的压实度增加损失率下降, 在 pH = 2 时损失率最大, 但在 pH = 3, 4, 5 时在不同压实度状态下钾的损失率相近, 普通雨水淋溶时也有少量钾淋失。其损失率随红黏土的压实度增加而呈下降趋势。

综上所述, 采用红黏土作为 pH 值不小于 3 的酸雨地区的路基填料时, 控制红黏土路基压实度不小于 95%可有效预防酸雨对红黏土路基的不利影响。

4 结 论

(1) 红黏土渗透系数随干密度增大而减小。相同密实度情况下, 酸性作用越强渗透系数改变越大。在酸雨淋溶作用下, 红黏土团粒中的活性元素化合物如(铁、硅、铝和钾)等会和酸发生化学作用而被溶蚀, 并随地下水迁移而流失, 造成土体结构变疏松、孔隙比增大、内部的孔隙连通性增强, 渗透系数增大。

(2) 原状土泡水后其 Si, K, Fe 的含量略有下降, 其中 K 元素含量下降较多约 24%, Al 元素含量基本没有变化, 可见 Al 的化合物基本不溶于水, 而 Si, K, Fe 等的化合物均能部分溶于普通水溶液中。

(3) 铁、硅、铝和钾 4 种金属元素的化合是红黏土中的主要物质成分, 均可能被酸性物质溶解, 原状红黏土中 Al, Si, Fe, K 泡酸后损失率基本呈线性减小趋势。pH 值越小(酸浓度越高)金属化合物的损失率越大, 普通雨水淋溶时也有少量金属化合物淋失。酸雨的 pH 值越大(酸浓度越低), 这些物质的溶解程度越小, 对红黏土的渗透性影响越大。

(4) 在压实度为 85%和 90%时, Fe, Al, Si 等化合物的损失率差距较大。在压实度为 95%和 98%

时, 损失率差距不明显。由于土体的孔隙减少, 淋溶溶液通过红黏土孔隙的机会减少。因为这时酸溶解的物质沿着渗透路径推移过程中, 会在酸锋面附近重新沉淀而淤堵孔隙, 阻止酸更深入接触内部团粒。从而导致酸雨的作用钝化。研究认为, 压实度对酸雨淋溶土体损失率的影响较大, 采用红黏土作为 pH 值不小于 3 的酸雨地区的路基填料时, 控制红黏土路基压实度不小于 95%可有效降低酸雨对红黏土路基的不利影响。

参考文献(References) :

- [1] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5) :141 - 161.(KONG Lingwei ,CHEN Zhenghan. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5) : 141 - 161.(in Chinese))
- [2] RODHE H, GREENFELT P, WISNIEWSKI J, et al. Acid reign'95 conference summary statement[J]. Water Air Soil Pollt, 1995, 85(1) : 1 - 14.
- [3] 汪雅各. 模拟酸雨对土壤金属离子的淋溶和植物有效性的影响[J]. 环境科学, 1988, 9(2) : 22 - 26.(WANG Yage. Simulated acid rain leaching on metal of soil ions and affect the effectiveness of the plant[J]. Environmental Science, 1988, 9(2) : 22 - 26.(in Chinese))
- [4] 朱寿增. 柳州市酸雨对土体物理力学性质的影响[J]. 桂林学院学报, 1996, 16(2) :143 - 149.(ZHU Shouzheng. A discussion about the effect of acid rain on soil mass physical and mechanical nature in Liuzhou city[J]. Journal of Guilin University of Technology, 1996, 16(2) : 143 - 149.(in Chinese))
- [5] 孙重初. 酸液对红黏土物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4) : 89 - 93.(SUN Zhongchu. Impact of acid on the physical and mechanical properties of red clay[J]. Journal of geotechnical engineering, 1989, 11(4) : 89 - 93.(in Chinese))
- [6] 伯桐震, 黄 英, 石崇喜, 等. 酸污染红土物理性质的变化特征[J]. 水文地质工程地质, 2012, (2) : 111 - 115.(BO Tongzhen, HUANG Ying, SHI Chongxi, et al. Variation characteristics of physical properties of Acid pollution laterite[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, (2) : 111 - 115.(in Chinese))
- [7] COLEMAN J D, FARRAR D M. The moisture characteristics composition and structural analysis of a red clay soil from Nyeri, Kenya[J]. Geotechnique, 1964, 13(4) : 262 - 276.
- [8] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[M]. Colorado : Fort Collins, 1964 : 132 - 144.
- [9] 孔令伟, 罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红黏土工程性质的影响[J]. 岩土力学, 1991, 14(4) : 25 - 39.(KONG Lingwei, LUO Hongxi.

- Effect of the conversion in form of free Iron Oxide on the engineering property of the red clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1991, 14(4): 25–39.(in Chinese)
- [10] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 红黏土有效胶结特征的初步研究[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(5): 42–47.(KONG Lingwei, LUO Hongxi, YUAN Jianxin. Preliminary study on the effective cementation characteristics of the red clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 42–47.(in Chinese))
- [11] 孔令伟, 郭爱国, 吕海波. 典型红黏土的基本特征与微观结构特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(1): 973–977.(KONG Lingwei, GUO Aiguo, LU Haibo. The basic and microstructure characteristics of the typical laterite soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 973–977.(in Chinese))
- [12] 程昌炳, 康哲良, 徐昌伟. 针铁矿与高岭土胶结本质的微观研究初探[J]. *岩土力学*, 1992, 13(2/3): 122–127.(CHENG Changbing, KANG Zheliang, XU Changwei. Study on chemical kinetics of reaction between goethite and chlorhydric acid[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1992, 13(2/3): 122–127.(in Chinese))
- [13] 程昌炳, 徐昌伟, 孔令伟, 等. 天然针铁矿胶结土与盐酸反应的化学动力学及其力学特性预报[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(3): 44–50.(CHENG Changbing, XU Changwei, KONG Lingwei, et al. Chemical kinetics for reaction of the clay samples cemented by nature goethite with ohlorhydric acid and the prediction of their mechanical properties[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(3): 44–50.(in Chinese))
- [14] 黄运湘, 廖柏寒, 王志坤. 模拟酸雨对森林红壤中铝的溶出及不同土层酸度变化的影响[J]. *生态环境*, 2005, 14(4): 478–482.(HUANG Yunxiang, LIAO Bohan, WANG Zhikun. Effects of simulated acid rains on Al release and acidity changes in different horizons in forest red soils[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 478–482.(in Chinese))
- [15] 廖柏寒, 曾敏, 郭朝晖, 等. 模拟酸雨下自然红壤与污染红壤中Cd, Cu, Zn的释放特征[J]. *环境化学*, 2009, 28(3): 343–349.(LIAO Bohan, ZENG Min, GUO Zhaohui, et al. Release characteristics of Cd, Cu and Zn from the natural and contam inated red soils under simulated acid rain[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(3): 343–349.(in Chinese))
- [16] 钟汉珍, 袁泉. 长江流域酸雨危害及对策分析[J]. *华中农业大学学报: 社会科学版*, 2002, (3): 18–21.(ZHONG Hanzhen, YUAN Quan. Acid rain damage and countermeasures on the Yangtze River basin[J]. *Huazhong Agricultural University: Social Sciences*, 2002, (3): 18–21.(in Chinese))
- [17] 吴丹, 王式功, 尚可政. 中国酸雨研究综述[J]. *干旱气象*, 2006, 24(2): 70–77.(WU Dan, WANG Shiwu, SHANG Kezheng. Progress in research of acid rain in China[J]. *Arid Mereorology*, 2006, 24(2): 70–77.(in Chinese))
- [18] 肖桂元, 虞梦泽, 陈学军, 等. 非饱和土体淋溶及渗流场模拟装置[P]. 中国: ZL201220361560.7, 2013–01–23.(XIAO Guiyuan, YU Mengze, CHEN Xuejun, et al. Simulator of unsaturated soil leaching and percolation field[P]. China: ZL201220361560.7, 2013–01–23.(in Chinese))
- [19] DANIEL D E, TRAUTWEIN S J. Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil[M]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1994: 30–78.
- [20] SCHACKELFORD C D. Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity[J]. *Symposium on Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, 1994, DOI: 10.1520/STP23887S.
- [21] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实过程对红黏土的孔隙分布影响研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1427–1430.(TAN Yunzhi, KONG Linwei, GUO Aiguo, et al. Research on effect of compaction on pore size distribution of laterite soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1427–1430.(in Chinese))