酸雨侵蚀下膨胀土膨胀性能的增强机制研究

刘伟峰[1]，黄金坤[2]，项国圣[1]，宋绍辉[1]

(1.安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2.中国十七冶集团有限公司,安徽 马鞍山 243002)

摘 要: 【**目的**】探究酸雨作用下膨胀土的膨胀变形规律及微观演化特征，为酸雨地区路基工程的设计与安全性评估提供理论依据。【**方法**】以酸雨为污染源，对膨胀土开展浸泡试验，测定其膨胀变形规律；结合扫描电镜（SEM）和 X 射线衍射（XRD）测试，分析酸雨作用前后土体微观结构与矿物成分的演化特征。【**结果**】①酸性环境会提高膨胀土的膨胀率，且酸雨浓度越高，膨胀率越大。②酸性环境中，游离氧化物等胶结物质发生溶蚀和淋滤，削弱了叠聚体之间的联结，使面-面叠聚结构趋于分散，微孔隙体积与数量增加。③可采用 *e-p* 分形关系计算酸雨作用后膨胀土的膨胀变形，拟合结果表明酸雨主要通过降低胶结物含量、增大膨胀系数κ来增强其膨胀性能。【**结论**】酸雨通过溶蚀胶结物质和改变微观结构，显著强化膨胀土的膨胀能力，其力学性能劣化与酸雨浓度密切相关。结果可为酸雨环境下膨胀土地区路基工程的设计参数选取、灾害防控及长期安全评价提供重要参考。

关键词: 膨胀土；酸雨；膨胀变形；微观结构；分形

中图分类号:TU411.7　　**文献标识码**:A

膨胀土因在堑、堤、沟等工程地形中易发生坍塌滑坡，被岩土工程界视为灾害隐患多、处理难度大的特殊土体。其边坡常在降雨期间或雨后因胀缩变形引发浅层坍滑，是膨胀土地区路基最常见且危害严重的地质灾害[1]。随着我国工业化快速发展，酸雨影响持续存在；目前其主要分布于长江以南至云贵高原以东地区，虽经治理面积已较历史峰值显著缩小，但下降趋势放缓，治理进入瓶颈期。这些区域也是我国膨胀土主要分布区域[2-3]。酸雨会与膨胀土中的黏土矿物发生化学反应，导致矿物溶蚀与盐基离子淋失，进而影响其力学性能，尤其是膨胀变形特性，严重威胁路基的安全稳定[4-5]。因此，揭示酸雨对膨胀土膨胀变形特性与微观结构的作用机理，建立合理可靠的膨胀变形预测模型，既是酸雨环境下工程安全性评价的迫切需求，也是相关地区路基工程建设的重要依据。

据现有研究，酸性溶液对膨胀土的影响主要体现在矿物组成、微观结构及其工程性质方面。酸性环境会通过溶蚀、离子交换与矿物转化等化学反应，导致膨胀土中蒙脱石等黏土矿物含量减少或促使伊利石向蒙脱石转化，同时引起铁、铝等胶结物离子的流失、微观孔隙增多及比表面积增大[6-8]。这些变化进一步导致其工程性质发生显著改变：膨胀特性方面，酸性溶液浓度升高会使膨胀土膨胀变形率增大、稳定时间延长，也可能通过阳离子交换与矿物溶解增强蒙脱类土的膨胀性，而在硫酸侵蚀下膨涨土的膨胀性则可能降低[9-12]；力学性质上，酸性环境会造成土体黏聚力下降、软化特性更显著，并使变形更不易稳定[13-17]。此外，酸雨还会加速钙离子析出，提高土体渗透性。上述矿物与结构的劣化最终导致膨胀土边坡、地基等工程的变形与破坏风险显著加剧[18]。研究还表明，酸性环境与干湿循环共同作用会进一步加剧胶结物溶蚀、孔隙发育和化学反应，从而使膨胀变形更为显著。

综上所述，酸性环境下膨胀土膨胀性能研究已取得一定进展，但由于不同区域膨胀土的矿物

收稿日期/Received: 2026-04-08　　**修回日期**/Revised:2026-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目（42577533）。

第一作者: 刘伟峰(2003—), 男, 硕士研究生, 从事复杂环境中膨胀性黏土岩土工程等方面的研究。E-mail:19810761490@163.com。

通信作者: 项国圣(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事复杂环境中膨胀性黏土岩土工程等方面的研究。E-mail:xianggsh2011@163.com。

组成与微观结构存在差异，其与酸雨的反应机理及膨胀性能变化规律亦不相同，相关机制仍需深入探讨。为此，本文以我国广西酸雨重灾区防城港地区的膨胀土为研究对象，通过开展不同硫酸浓度浸泡下的膨胀试验，分析膨胀性能随酸浓度的变化规律；结合 XRD（X-ray Diffraction）、SEM（Scanning Electron Microscope）等测试手段，研究酸雨侵蚀对膨胀土矿物组成、胶结物成分与微观孔隙结构的影响，揭示酸雨影响膨胀性能的微观机理。在此基础上，结合多孔介质表面分形理论，构建适用于酸雨环境的膨胀分形预测模型，以期为酸雨区膨胀土地质灾害防治与路基工程建设提供理论依据与技术支撑。

1 试验概况与方法

1.1 材料

土样取自防城港上思县那板水库灌区，取样深度约 6 m，属中强膨胀土，土体呈灰白色，基本土性指标见表 1。

根据防城港地区相关资料，该区近年降雨 pH 值范围为 3.9~7.5，平均约为 4.8，以硫酸型和硝酸型酸雨为主。因此，依据近年中国酸雨成分构成特点，实验选用稀硫酸和稀硝酸，按 SO_4^{2-}与 NO_3^-物质的量比 3:1 配制 pH=3 和 pH=5 的酸性溶液，并以 pH=7 的蒸馏水作为对照进行对比分析[19]。

表 1　膨胀土物性参数及矿物组成

Tab.1　Physical property parameters and mineral composition of expansive soil

含水率	密度ρ/	相对密	塑限	液限	自由膨胀	矿物成分及含量/%				
w/%	（g/cm³）	度 Gs	w_P/%	w_L/%	率δ_{ef}/%	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	石英
27.5	2.12	2.75	32.4	78.4	85.9	56.1	21.9	11.2	7.6	2.2

1.2 膨胀试验

将现场取回的原状膨胀土切削成环刀样（直径 61.8 mm，高 20.0 mm），试样上、下两面依次放置滤纸和透水石。安装百分表并记录初始读数后，施加预定荷载。基于膨胀土埋深一般较浅且膨胀力通常低于 100 kPa，试验选用 6.25、12.5、25、50、100 kPa 5 种荷载，以模拟不同深度土体的受力状态。荷载一次性施加并在试验过程中保持恒定。随后，向固结仪内注入蒸馏水或酸性溶液，保持液面高于试样顶部约 1 cm，记录百分表读数随时间的变化。当 12 h 内百分表指针变化小于 0.01 mm 时，视为膨胀变形稳定。

1.3 表征测试

膨胀试验结束后，取出经酸溶液饱和的试样并切为两半。一半试样置于盛有液氮的铝盒中迅速冷冻，随后转移至冷冻干燥机（-50 ℃）中真空干燥 24 h 以去除水分，用于扫描电镜（SEM）观察。另一半试样于 50 ℃恒温烘箱中烘干，研磨后过 2 mm 筛，采用 X 射线衍射仪（XRD）测定其矿物组成与化学成分。

1.4 胶结物含量的测试

膨胀土中的胶结物主要为游离氧化物，但部分游离氧化物包裹于硅酸盐矿物表面或填充于孔隙中，难以直接分离。测试游离氧化物时需选用合适溶液，使其完全溶解，同时避免对硅酸盐矿物造成影响。已有研究表明，柠檬酸钠-连二亚硫酸钠（$C_6H_5Na_3O_7$-$Na_2S_2O_4$）对游离氧化物的选择性溶解效果较好，因此本研究采用该方法测定胶结物含量。具体步骤为：称取预处理后的土样约2.0 g，置于100 mL离心管中，加入40 mL 0.3 mol/L 柠檬酸钠溶液和6 mL 1.0 mol/L $NaHCO_3$溶液，于80 ℃水浴中加热。再加入1.0 g固体连二亚硫酸钠，持续搅拌至土样全部变为灰白色。随后加入10 mL饱和NaCl溶液以促进黏粒絮凝。冷却后离心进行固液分离，用1.0 mol/L NaCl溶液洗涤残渣2次，蒸馏水洗涤3次，过滤后称取残渣质量。胶结物含量C_c可按以下公式计算：

$$C_c = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \qquad (1)$$

式中：C_c为酸化膨胀土胶结物的含量；m_1为未经$C_6H_5Na_3O_7$-$Na_2S_2O_4$处理的膨胀土土体质量；m_2为处理后土体残渣的质量。

2 结果分析

2.1 膨胀变形试验

图 1 显示了在 6.25 kPa 荷载下，不同酸雨环境中膨胀土膨胀率随时间的变化曲线。可以看出，不同酸雨条件下试样的膨胀趋势基本一致，均经历缓慢增长、快速增长直至最终稳定 3 个阶段。试验结果显示，蒸馏水中的膨胀率最低，最大膨胀率为 38.09%；而在 pH=5 和 pH=3 的酸雨作用下，最大膨胀率分别达到 58.33%和 78.41%。这表明，酸雨环境会显著增强膨胀土的膨胀性能，

且酸性越强，增强效果越明显。

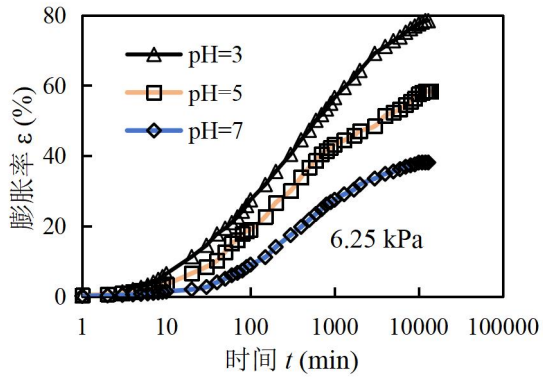


图 1　6.25 kPa 下膨涨土膨胀率与时间之间的关系

Fig.1　The relationship between expansion rate and time for expansive soil under 6.25 kPa

图 2 显示了膨胀土最大膨胀变形与上覆压应力之间的关系。结果表明，在溶液条件不变的情况下，膨胀率随荷载增加而逐渐降低。例如，在蒸馏水中，当荷载从 6.25 kPa 增加到 100 kPa 时，膨胀土的最大膨胀率从 58.33%下降至-2.84%，即从膨胀变形转变为负膨胀（表现为压缩变形）。在 pH=5 的酸雨中，膨胀土的变形趋势与蒸馏水中一致，且在 100 kPa 时同样出现-2.84%的负膨胀。当荷载保持不变时，随着酸雨浓度增加（pH 降低），膨胀土的膨胀率曲线整体上移，说明酸性环境增强了膨胀土的膨胀性能。尤其在 pH=3 的酸雨中，即使在 100 kPa 荷载下，膨胀土仍发生 1.01%的膨胀变形。此外，在较低荷载条件下，酸雨对膨胀变形的增强作用更为显著。例如，在 6.25 kPa 时，pH=3 的酸雨使膨胀土的膨胀率从蒸馏水中的 38.09%大幅提高至 78.41%，增幅达 40 个百分点；而在 50 kPa 时，膨胀率仅从 1.52%增加到 13.53%，增幅约为 12 个百分点。

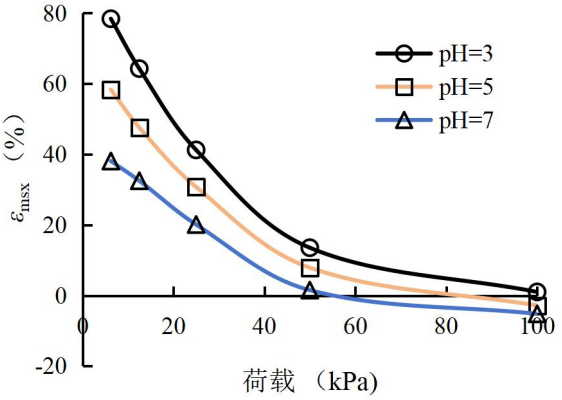


图 2　最大膨胀变形随荷载变化关系

Fig.2　Relationship between maximum expansion deformation and load variatio

上述结果表明，地表附近的膨胀土受酸雨影响更为明显，可能引发更剧烈的膨胀变形，从而对基础设施造成较大危害。关于酸雨增强膨胀土膨胀性能的作用机理，后续将通过成分分析与微观结构测试进一步阐明。

2.2 化学成分变化

对 XRD 结果进行整理，绘制了中性与酸性环境下膨胀土的衍射对比图谱（图 3）。图中 M 代表蒙脱石，I 为伊利石，K 为高岭石，Q 为石英，P 为叶腊石。结果显示，当环境由中性转为酸性时，各矿物特征峰强度普遍减弱，且酸性越强，衰减越明显，说明酸侵蚀导致黏土矿物的结晶程度下降，有序晶体结构逐渐破坏。采用 X'Pert HighScore Plus 软件计算矿物组成，结果列于表 2。可见酸雨浸泡后，膨胀土的矿物成分整体变化不大，其中蒙脱石含量略有上升，伊利石含量小幅下降，可能与伊利石发生脱钾反应并向蒙脱石转化有关，该现象与常锦等的研究结果一致[20]。总体上，矿物成分的亲水性变化较小，对膨胀性能影响不显著。

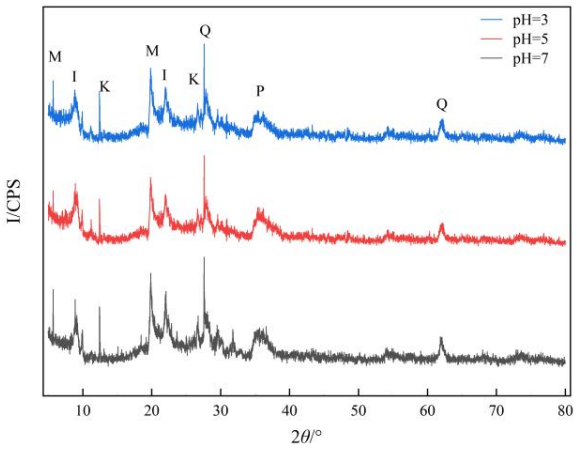


图 3　不同 pH 酸雨中膨胀土的 XRD 衍射图

Fig.3　XRD diffraction patterns of expanded clay in acid rain with different pH values

表 2　酸雨浸泡下膨胀土的矿物成分

Tab.2　Mineral composition of expansive soil

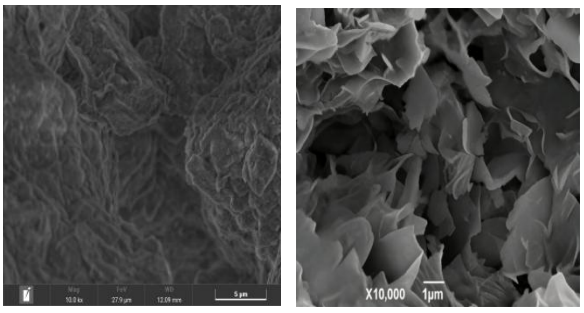
pH	蒙脱石	伊利石	高岭石	叶腊石	石英
7	56.1	21.9	11.2	5.6	4.2
5	58.6	17.7	10.6	4.7	7.6
3	61.3	14.4	9.9	4.1	9.2

天然膨胀土中含有一定量的胶结物，主要为游离氧化物，多呈无定形形态。这些胶结物对黏土颗粒具有联结作用，在吸水过程中限制颗粒间距的扩大，从而抑制了膨胀性。但在图 3 中 XRD

衍射图谱中难以确定氧化物（横坐标为衍射角，纵坐标为衍射强度）。因此，采用了柠檬酸钠-连二亚硫酸钠法（$C_6H_5Na_3O_7$-$Na_2S_2O_4$）进行测定。结果显示，原状土中游离氧化物含量为 8.8%，而经 pH=5 和 pH=3 的酸雨浸泡后，其含量分别降至 6.3%和 4.8%。这表明酸雨对游离氧化物具有较强的溶蚀作用。胶结物含量的降低削弱了颗粒间的黏结强度，使土体孔隙更易随水分进入而扩张，从而增强了膨胀土的膨胀性能。

2.3 微观结构

通过 SEM 图像可以进一步观察胶结物含量变化对膨胀土膨胀性能的影响。膨胀土的微观结构呈片状单元，并以叠片状排列，原状土 SEM 图像如图 4（a）所示；与图 4（b）相比，经酸雨浸泡的土样微观结构更加分散、无序，土中孔隙的数量和尺寸均有所增加，且溶液 pH 越低，这一趋势越明显，如图 4（c）和图 4（d）所示。



(a)原状土　　(b)pH=7

(c)pH=5　　(d)pH=3

图 4　原状土与不同 pH 酸雨中膨胀土 SEM 图像

Fig.4　Scanning Electron Microscope (SEM) Images of Undisturbed Soil and Expansive Soil Exposed to Acid Rain of Different pH Values

同时可见，受酸雨侵蚀的土样中面-面叠聚结构的边缘逐渐打开，且随 pH 降低，边缘扩展程度增大，促进了微孔隙的发育。在酸雨环境中，溶液中的 H^+对膨胀土的侵蚀起主导作用。H^+与膨胀土中的游离氧化物（如 CaO、Fe_2O_3、Al_2O_3等）发生反应，使其含量减少，显著削弱了各叠聚体之间的联结力，进而引起片状结构的剥离、尺寸减小及酸性溶蚀现象。最终导致矿物片层间的堆叠结构趋于无序化，从而影响土体的宏观物理力学性能。

3　酸雨作用下膨胀土膨胀变形分形计算模型

类似于多层吸附模型，饱和时单位体积的土粒所能吸附的水的体积为：

$$\frac{V_w}{V_s}=k\left[\ln\left(\frac{\overline{p}}{p_0}\right)\right]^{D-3} \qquad (1)$$

式中：V_w为吸附水的体积；V_s为土颗粒的体积；D为膨润土的表面分维；$\overline{p}/\overline{p}_0$为相对湿度。而 Kelvin 方程定义了吸力与相对湿度之间关系为：

$$\Psi=-\frac{\rho_w RT}{M_w}\ln\left(\frac{\overline{p}}{p_0}\right) \qquad (2)$$

式中：Ψ为吸力；M_w为水的摩尔质量。

由于在荷载p作用下蒙脱石颗粒未能充分水化，仍有吸水膨胀潜势。因此，此时荷载应与吸力相平衡。故可以得到

$$V_w/V_m \propto p^{D-3} \qquad (4)$$

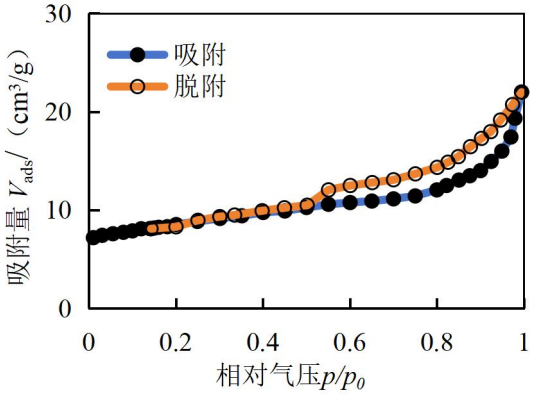
饱和时孔隙比为$e=V_w/V_s$，则可进一步得出

$$e=\kappa p^{D-3} \qquad (5)$$

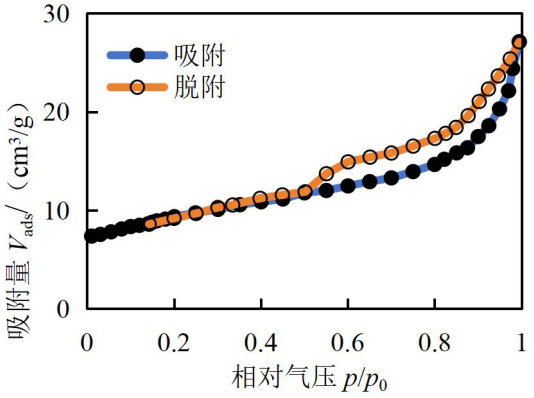
式中κ可定义为膨胀系数[21]。

膨胀土表面分维可由氮吸附试验测得，图 5 为膨胀土试样 N_2吸附-脱附等温线，呈现出在低 P/P_0区曲线向上凸；较高 P/P_0区吸附质发生毛细管凝聚，等温线迅速上升，由于发生毛细管凝聚，在这个区内可观察到滞后现象，即在脱附时得到的等温线与吸附时得到的等温线不重合，脱附等温线在吸附等温线的上方，产生滞后圈。通过 FHH 方程，根据各粉末试样的 N_2等温吸附线在双对数坐标下作出吸附量与相对气压的双对数曲线，图 6 为 $\ln V_{ads}$–$\ln[\ln(p_0/p)]$拟合曲线[22]。计算出表面分维与拟合优度结果见表 3。从表中可以发现表面分维随着酸雨 pH 降低而降低。而 SEM 图可以充分解释这一现象。由于在酸雨浓度较小时，膨胀土水化反应程度较小，表面较为粗糙（图 4（a）），表面分维较大，而随着酸雨浓度增大，水化反应程度较大，使得膨胀土表面趋

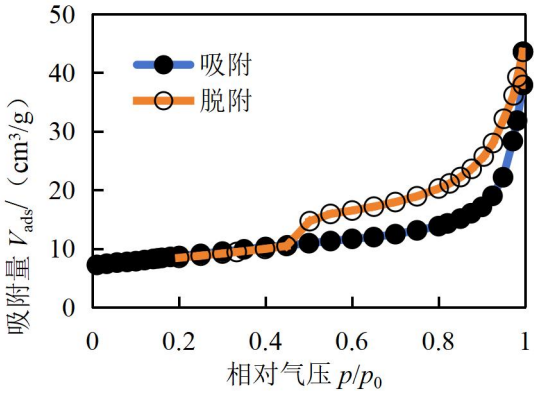
于光滑（图 4（d））， 表面分维降低。



（a）pH=7



（b）pH=5



（c）pH=3

图 5　膨胀土试样的 N_2 吸附-脱附等温线

Fig.5　N_2 adsorption-desorption isotherm curves of expanded soil samples

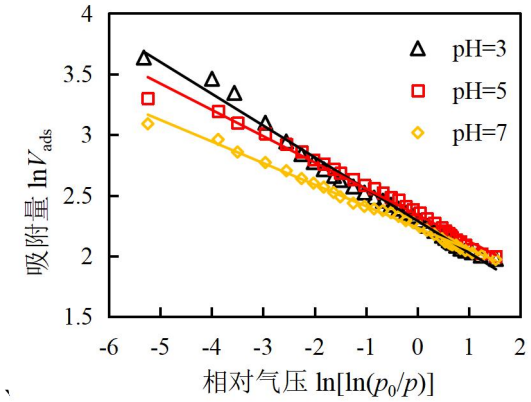


图 6　不同浓度酸雨浸泡后膨胀土试样的方程曲线

Fig.6　Equation curves for expansive soil samples after immersion in acid rain at different concentrations

表 3　氮吸附下膨胀土表面分维

Tab. 3　Surface fractal dimension of expansive soil under nitrogen adsorption

酸雨 pH	拟合关系式	拟合优度 R^2	分形维数 D
7	$\ln V_{ads}$=-0.178ln[ln(p_0/p)]+2.233	0.994	2.822
5	$\ln V_{ads}$=-0.217ln[ln(p_0/p)]+2.339	0.986	2.783
3	$\ln V_{ads}$=-0.263ln[ln(p_0/p)]+2.291	0.990	2.737

将氮吸附测得的表面分形维数 D 代入公式（5），并对试验数据进行拟合，得到不同酸雨条件下膨胀土的 e-p 关系曲线（图 7）。由图 7 可以看出，经酸雨侵蚀后的膨胀土膨胀变形符合公式（5）中的 e-p 分形关系，相应的表面分维与拟合优度列于表 4。

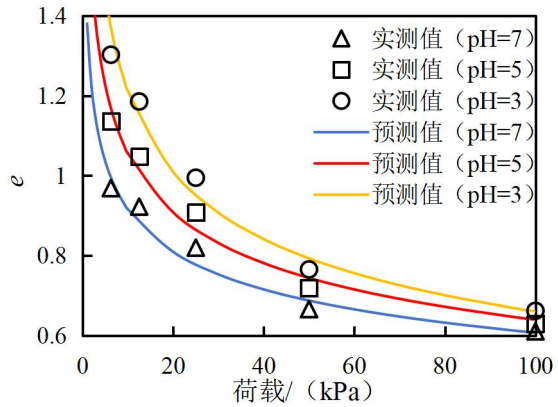


图 7　不同酸雨中膨胀土的 e-p 关系

Fig.7　The e-p relationship of expansive soil under different acid rain conditions

表 4　不同浓度酸雨下 *e-p* 关系

Tab.4　Relationship between *e-p* values under different acid rain concentrations

酸雨 pH	*e-p* 关系	膨胀系数κ	分形维数 D	拟合优度 R^2
7	$e = 1.38p^{-0.178}$	1.38	2.822	0.987
5	$e = 1.74p^{-0.217}$	1.74	2.783	0.991
3	$e = 2.22p^{-0.263}$	2.22	2.737	0.994

由表 4 可知，膨胀系数κ随酸蚀程度加剧而显著增大。这主要是由于胶结物含量降低削弱了颗粒间的黏结强度，使土体孔隙更易在水分子进入时发生扩张，从而导致膨胀变形增强。

4　结论

本文以广西防城港地区中强膨胀土为研究对象，开展了不同 pH 酸雨溶液浸泡下的膨胀试验，并结合 XRD、SEM 和氮吸附测试，分析了酸雨侵蚀对膨胀土矿物组成、胶结物含量及微观孔隙结构的影响。在此基础上，基于多孔介质表面分形理论，建立了酸雨作用下膨胀土膨胀变形的 *e-p* 分形计算模型。通过上述研究，得到如下结论：

1）酸雨浓度升高（pH 降低）显著增强了膨胀土的膨胀性能。在低荷载条件下尤为明显，pH=3 的酸雨可使膨胀率较蒸馏水工况激增约 40 个百分点。尽管荷载增大会抑制膨胀变形，但在低 pH 环境（pH=3）中，即使荷载达到 100 kPa 仍可观测到膨胀发生。表明低荷载时膨胀土对酸雨更为敏感，更易发生剧烈膨胀，对基础设施危害较大。

2）XRD 与 SEM 分析表明，经酸雨处理后，膨胀土中除蒙脱石含量略有上升外，其余矿物成分均有所减少。蒙脱石的增加可能与伊利石发生脱钾转化有关。随着酸雨浓度增加，游离氧化物与 H^+发生反应，导致胶结物含量降低，削弱了颗粒间的黏结作用，使土体孔隙增大、渗流通道扩展，从而加剧了膨胀变形。

3）酸雨侵蚀后膨胀土的膨胀变形仍符合 *e-p* 分形模型，可用该模型进行计算。随着酸雨浓度升高，胶结物含量减少，膨胀系数κ显著增大，进一步说明酸雨增强膨胀性能的机理主要源于游离氧化物的溶解及胶结作用的减弱。

参 考 文 献

[1] 罗晓倩, 孔令伟, 鄢俊彪, 等. 不同饱和度下膨胀土原位孔内剪切试验及强度响应特征[J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 153-163. [Luo Xiaoqian, Kong Lingwei, Yan Junbiao, et al. In-situ borehole shear tests and strength response characteristics of expansive soil under different saturation degrees[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(1): 153-163.]

[2] 徐影, 于镇华, 李彦生, 等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 562-572. [Xu Ying, Yu Zhenhua, Li Yansheng, et al. Causes of soil acidification and its effects on farmland soil-microorganism-crop system: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 562-572.]

[3] 中华人民共和国生态环境部. 2023 中国生态环境状况公报[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2024 (2024-06-05) [2026-04-08]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2023 China Ecological Environment Status Bulletin[EB/OL]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2024 (2024-06-05) [2026-04-08]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/.]

[4] Feng Meimei, Cao Xiaoxiao, Yuan Kangsheng, et al. Influence of acidic environment on damage mechanism of sandstone under different climatic temperatures[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(10): 452.

[5] Lei Huayang, Bo Yu, Zhang Weidi, et al. Effects of acidity and magnesium ions on the self-weight consolidation settlement of Tianjin dredged fill[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 4035-4047.

[6] 汪时机, 王晓琪, 李达, 等. 膨胀土干湿循环裂隙演化及其土-水特征曲线研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 58-63. [Wang Shiji, Wang Xiaoqi, Li Da, et al. Crack evolution and soil-water characteristic curve of expansive soil under dry-wet cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 58-63.]

[7] 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. [Chang Jin, Yang Heping, Xiao Jie, et al. Expansive characteristics and microscopic mechanism analysis of expansive soil under acidic environment and dry-wet cycle conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3): 34-43.]

[8] Bakhshipour Z, Asadi A, Huat B B K, et al. Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils[J]. Soils and Foundations, 2016, 56(6): 1008-1020.

[9] Tang Hao, Liu Chiyang, Wang Nianqin, et al. Influence of acidic substances on compression deformation characteristics of loess[J]. Advances in Civil Engineering, 2021(1): 6614391.

[10] Gowthaman S, Nakashima K, Kawasaki S. Durability analysis of bio-cemented slope soil under the exposure of acid rain[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021,21(4): 2831-2844.

[11] Prasad C R V, Reddy P H P, Murthy V R, et al. Swelling characteristics of soils subjected to acid contamination[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(1): 110-121.

[12] Chavali R V P, Ponnapureddy H P R. Swelling and compressibility characteristics of bentonite and kaolin clay subjected to inorganic acid contamination[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 12(5): 1-7.

[13] Sun Shaorui, Wang Wuchao, Wei Jihong, et al. The physical-mechanical properties degradation mechanism and microstructure response of acid-alkali-contaminated Xiashu loess[J]. Natural Hazards, 2021(6): 2845-2861.

[14] 张重远, 窦子豪, 周伦仕, 等. 酸蚀作用对岩石裂隙剪切行为的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊 1): 3256-3265. [Zhang Chongyuan, Dou Zihao, Zhou Lunshi, Li Jinjin, Zhao Zhihong, Li Jianfeng, Chen Jinfan, Zhang Shian, Zhao Xingguang. Influence of acid erosion on shear behavior of rock fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3256-3265.]

[15] Ghosh D, Banerjee A. Microscale and macroscale characterization of biopolymer-stabilized sulfate-rich expansive soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2025, 37(5): 04025080.

[16] 钱建固, 林志强. 双孔隙结构重塑非饱和膨胀土的抗剪强度特性[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 486-494. [Qian Jiangu, Lin Zhiqiang. Shear strength characteristics of remolded unsaturated expansive soil with double-pore structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 486-494.]

[17] 孙德安. 非饱和土力学特性及本构模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 1-23. [Sun De'an. Mechanical properties and constitutive models of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(1): 1-23.]

[18] Sivapullaiah P V, Prasad B G, Allam M M. Effect of sulfuric acid on swelling behavior of an expansive soil[J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2009, 18(2): 121-135.

[19] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532. [Zhang Xinmin, Chai Fahe, Wang Shulan, et al. Current situation of acid rain research in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(5): 527-532.]

[20] 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. [Chang Jin, Yang Heping, Xiao Jie, et al. Water-soil chemical test and mechanism analysis of acid rain infiltration into expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(8): 1483-1492.]

[21] Xu Yongfu, Matsuoka H, Sun Dean. Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures[J]. Applied Clay Science, 2003, 22(4): 197-209.

[22] Pfeifer P, Obert M, Cole M W. Fractal BET and FHH theories of adsorption: a comparative study[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1989, 423(1864): 169-188.

Study on the Enhancement Mechanism of Swelling Performance of Expansive Soil under Acid Rain Erosion

LIU Weifeng[1], HUANG Jinkun[2], XIANG Guosheng[1], SONG Shaohui[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;2.China MCC17 Group Co., Ltd., Ma'anshan 243002, China)

Abstract: 【**Objective**】 This study aims to investigate the swelling deformation behavior and microstructural evolution characteristics of expansive soil under acid rain, so as to provide a theoretical basis for the design and safety assessment of subgrade engineering in acid rain-affected areas. 【**Methods**】 Taking acid rain as the pollution source, immersion tests were conducted on expansive soil to determine its swelling deformation behavior. Combined with scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analyses, the evolution characteristics of soil microstructure and mineral composition before and after acid rain action were examined. 【**Results**】 (1) Acidic environment increases the swelling ratio of expansive soil, and the higher the acid rain concentration, the greater the swelling ratio. (2) In acidic environment, cementing materials such as free oxides undergo dissolution and leaching, which weakens the inter-particle bonding among aggregates, leading to the dispersion of face-to-face aggregate structures and an increase in the volume and quantity of micropores. (3) An *e-p* fractal model is proposed to calculate the swelling deformation of expansive soil after acid rain action. The fitting results indicate that acid rain mainly enhances the swelling performance by reducing the content of cementing materials and increasing the swelling coefficient κ. 【**Conclusions**】 Acid rain significantly enhances the swelling capacity of expansive soil through the dissolution of cementing materials and the alteration of microstructure, and the deterioration of its mechanical properties is closely related to acid rain concentration. The findings can serve as an important reference for the selection of design parameters, disaster prevention and control, and long-term safety evaluation of subgrade engineering in expansive soil regions under acid rain environments.

Keywords: expansive soil; acid rain; swelling deformation; microstructure; fractal