

酸性环境对污染土力学性质的影响

陈宇龙¹, 张宇宁², 戴张俊³, 陈 行⁴

(1. 东京大学 土木工程系, 日本 东京 113 - 8656 ; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030 ;
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 ;
4. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要 : 为研究水 - 土化学作用的物理力学效应, 人工方法制备经硫酸长期浸泡后造成的 3 种不同 pH 环境下的土样试件, 通过压缩变形性质、界限含水率和三轴固结不排水试验研究了不同酸性环境对污染土的力学性质和变形特性的影响。结果表明: 硫酸浸泡过的土的压缩变形包括土体中孔隙水排出带来的弹性变形, 还包括土体结构链接发生破坏和变位引起的塑性变形, 导致其压缩量较原状土的压缩量大, pH 值越低, 硫酸溶液浓度越大, 发生溶蚀破坏越剧烈, 孔隙比越大, 压缩系数越大, 压缩模量越小; 随着 pH 值的降低, 扩散双电层被稀释, 土的可塑性变弱, 液限和塑性指数都减小; 3 种 pH 环境下土体均表现出应变硬化现象, pH = 6.0 时土体强度增高, 而 pH = 4.0 的土体强度低于蒸馏水浸泡过的土体, 这与土壤黏粒部分所含的矿物成分密切相关; 随着 pH 值的降低, 土的有效应力路径都向左发生偏转, 说明土体中的孔隙水压力的上升值和上升速度越大。

关 键 词 : 污染土; 土 - 水化学作用; 酸性环境; 力学性质; pH

中图分类号: TU 441 文献标志码: A 文章编号: 1005 - 3026(2016)09 - 1343 - 06

Effects of Acidic Geoenvironmental on the Mechanical Properties of Polluted Soil

CHEN Yu-long¹, ZHANG Yu-ning², DAI Zhang-jun³, CHEN Hang⁴

(1. Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan ; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China ; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China ; 4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan 610031, China. Corresponding author : CHEN Yu-long, E-mail : 673054399@qq.com)

Abstract : In order to reveal the physical mechanics of soil-chemicals-water interaction, soil samples were artificially made in three different pH environments induced by immersed in sulfuric acid solution for a long term to carry out experiments on the compressible and deformable properties, consolidated undrained triaxial test and limit moisture content. Results showed that : the compressive deformation for soils immersed in sulfuric acid solution became greater, including the elastic deformation brought about by the remove of pore water and the plastic deformation resulting from the destruction of the soil structure and the conjugation ; the lower the pH, the more the sulfuric acid contents, the severer the chemical corrosion, the greater the void ratio of soil, the greater the compression coefficient, the smaller the compression modulus ; the pH reduction led to thinner diffuse double layer, so the plasticity became weaker and liquid limit and plasticity index were smaller ; all the soils exhibited strain-hardening in the three different pH environments ; the strength slightly increased when the pH of pore fluids decreased to 6.0 but significantly decreased at low pH conditions (pH = 4.0), which is related with the mineral composition of the clay fraction ; as the pH decreased, effective stress path deflected towards the left due to greater increment rate of pore water pressure.

Key words : polluted soil ; soil-chemicals-water interaction ; acidic geo-environment ; mechanical properties ; pH

随着岩土工程和工业化的进展 ,大量以前被认为不适合居住和其他工程的土地也逐渐被开发和利用 ,导致空气和水以及土地遭遇污染. 在各种环境条件下 ,如今用于分析土性的土力学原理和方法已经面临着质疑 ,适用性受到挑战. 所以 ,环境岩土工程应运而生^[1]. 其中 ,地基土污染问题就是较为严重的环境岩土工程问题^[2].

国内外学者在孔隙流体化学对土力学性质的影响方面进行了一些研究^[3-7]. 大多数是有关有机流体和无机流体的 ,且浸泡试件较短 ,均不超过 7 d ,同时溶液反应量约为溶液起始量的 10% 左右^[8] ,说明酸碱溶液并未完全参与反应 ,且不曾有文献说明浸泡后试样处于何种 pH 环境 ,鲜有报道关于 pH 环境的研究. 所以研究不同 pH 环境下土的工程特性 ,分析酸性污染土的勘察评价和污染机理 ,因地制宜地提出整治措施 ,对保证工程建设质量与环境保护具有重大意义.

1 试验方法

本试验的目的是通过土在酸性溶液中进行化学反应后 ,测定污染土的物理力学性质的劣化趋势 ,研究地基土在受到污染腐蚀后的物理力学特性的改变状况. 试验用土取自于某工地地下 2 m 处 ,属于黏土 ,土粒相对密度 $\rho_s = 2.73 \text{ g/cm}^3$,液限 57.9% ,塑性指数 21.1 ,细粒质量分数 42% ,黏粒质量分数(粒径小于 0.002 mm)17% ,含少量高岭石和绿泥石. 酸性溶液选择 pH = 4.0 的稀硫酸. 试验采用常温常压静止浸泡的方法 ,从上部注入稀硫酸溶液 ,盖上盖子 ,使其充分反应. 每天记录溶液 pH 的变化. 溶液的 pH 值缓慢降低然后趋于稳定 ,化学反应的平衡过程约为一周. 一周后 ,更换溶液 ,直到溶液的 pH 值达到目标值 ,即 pH = 6.0(浸泡 43 周)和 pH = 4.0(浸泡 14 周)时 ,将土样取出 ,进行下面操作.

1) 用 $30 \text{ cm}^2 \times 2 \text{ cm}$ 规格的环刀将浸泡后的土样切割成样后 ,在环刀两端放上滤纸和透水板 ,再放入固结仪 ,通过标准的固结试验测定压缩性指标. 选用荷重序列为 25 ,50 ,75 ,100 ,150 ,200 ,300 ,400 ,600 ,800 ,1 000 ,1 400 和 1 600 kPa 进行分级加载.

2) 加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体试件 ,立即用塑料袋密封 ,再放入土样养护缸中养护

24 h 后进行三轴剪切试验(CU). 对于含水量较大、饱和度较高的非饱和土试样 ,试验中要求试样的含水量保持不变 ,即不排水. 另外 ,在工程施工期间 ,孔隙气压是能够迅速消散的 ,而水压的消散却比较缓慢. 对于大部分非饱和土体 ,气压消散几乎是瞬时完成的^[9]. 为模拟施工期间的这一工程实际特点 ,试验中还要求气压消散. 因此 ,试验中要控制含水量不变 ,同时还要保证气压消散. 施加 0.01 mm/min 的应变控制荷载. 在这种稳定加载条件下 ,可保证水不排出且孔隙水压分布均匀 ,同时气压也能消散.

溶液 pH 值的变化历程如图 1 所示. 此外 ,本文添加蒸馏水浸泡一周的土样作为对比 ,发现一周后水的 pH 值为 7.6.

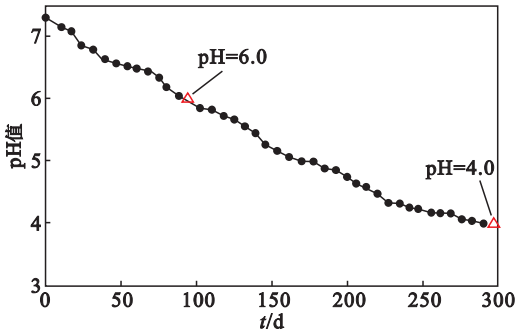


图 1 溶液 pH 值随时间的变化
Fig. 1 Changes of liquid's pH with time for the soil

2 结果与讨论

试样在硫酸溶液浸泡前后外观发生了显著的变化. 硫酸溶液浸泡前土样呈灰色 ,表面平整 ,有光泽. 浸泡后颜色变为灰黄色 ,表面粗糙 ,有凹陷 ,体积明显膨胀和软化. 而且浸泡时间越长 ,软化和膨胀现象越明显.

土压缩曲线的变化趋势与土的物质成分、结构状态和受载荷历史有关. 不同 pH 值条件下的压缩曲线如图 2 所示. 从图中可见 ,在第一级载荷 25 kPa 下 ,土经硫酸溶液浸泡后 ,压缩量明显增大 ,在图中表现为压缩曲线斜率更陡 ,且随着 pH 值的下降 ,曲线斜率增大. 这是因为 :蒸馏水浸泡的土样在受到第一级较小的载荷的作用 ,土体的压缩变形主要是由于土体内的孔隙体积被压缩所致 ,土体结构链接并未受到破坏 ,土体结构主要产生弹性变形 ,此时的压缩变形主要为弹性变形^[10].

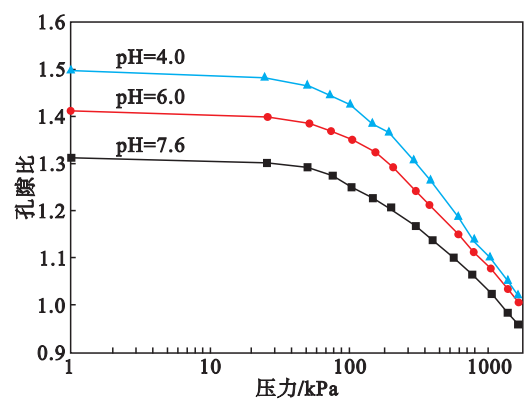


图 2 固结压力随孔隙比的变化关系
Fig. 2 Relationship between consolidation pressure and void ratio

土被污染通常未考虑原生矿物包括辉石、长石、云母等(除原生碳酸岩矿物以外)与溶液的相互作用,也未考虑溶液与黏土矿物的相互作用,因为次生矿物中的黏土矿物常常比较稳定,不易参与强烈的化学反应,因此主要考虑土中的各种胶结体、游离氧化物和可溶性盐与外界发生的反应,使得土结构链接减弱,造成土中的一些团聚结构发生破坏,使得土的粒度成分发生改变,特别是硫酸腐蚀后的土壤,其黏粒含量发生较显著的变化^[11]。

对于硫酸浸泡过的土样,由于在受到第一级载荷作用前土已经被污染,造成土体成分发生改变,土中的胶结体受到腐蚀,土结构链接被削弱甚至丧失,因此在第一级较小载荷作用下的压缩变形包括土体中孔隙水排出带来的弹性变形,还包括土体结构链接发生破坏和变位引起的塑性变形,这与用蒸馏水浸泡的土样的压缩变形截然不同^[12]。

此外,硫酸浸泡的土的初始孔隙比大于蒸馏水浸泡的土样的孔隙比,且 pH 值越低,初始空隙比越大。图 3 列出了各级载荷下的孔隙比随 pH 值的变化曲线。从图中可以看出,各级载荷下的孔隙比随 pH 值的变化趋势一致,说明 pH 值越低,硫酸溶液浓度增大,发生溶蚀破坏越剧烈,孔隙比越大。

压缩系数是表示土体压缩性大小的主要指标。土样在不同 pH 值条件下的压缩系数如图 4 所示,由蒸馏水浸泡的土压缩系数为 $0.468\ 51\ \text{MPa}^{-1}$,当 pH 值降低至 6.0 时,压缩系数增大非常显著,提高了 34%,达到 $0.627\ 84\ \text{MPa}^{-1}$,进一步降低 pH 值,压缩系数增加幅度较小,为 $0.648\ 19\ \text{MPa}^{-1}$ 。

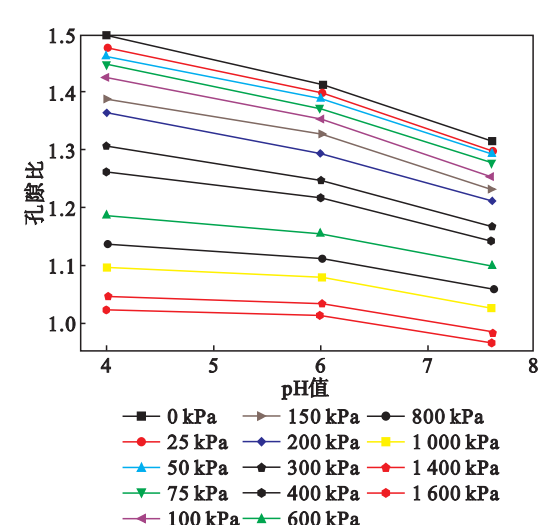


图 3 pH 值随孔隙比的变化关系
Fig. 3 Relationship between pH value and void ratio

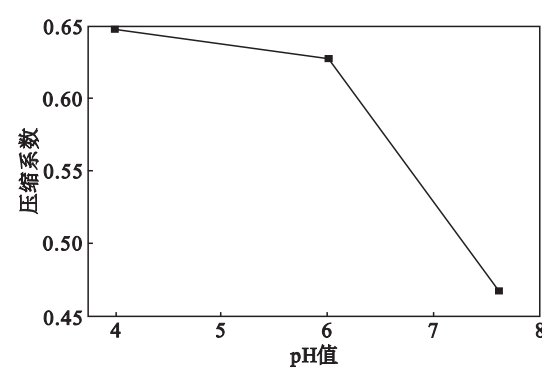


图 4 压缩系数随 pH 值的变化关系
Fig. 4 Relationship between the compression coefficient and the pH value

土壤受到硫酸溶液浸泡后,土的结构链接被削弱甚至破坏,原本已经固化的结构链接强度被减弱,弱化的颗粒间的链接强度包括物理压密过程中产生的,还包括在化学作用和环境作用下产生的,土粒间的结构链接在这两方面作用下得到了更大程度的削弱,使得土颗粒在外力作用下较容易发生位移,孔隙体积被压缩得更快,所以硫酸浸泡过的土样表现出更强的压缩性。朱春鹏等^[13]通过 SEM 观察到随着酸浓度越高,颗粒定向度越低,酸性污染土的压缩系数随着颗粒定向度的减少而增加。

图 5 为土样的压缩系数随 pH 值的变化关系。压缩模量的大小不仅与初始孔隙度有关,还与压缩系数密切相关。由图可知,硫酸溶液浸泡后压缩模量显著减小,pH=4.0 和 6.0 条件下的压缩模量基本不变,pH 值从 7.6 分别减小到 6.0 和 4.0,压缩模量从 $4.94\ \text{MPa}$ 分别减小到 3.85 、 $3.86\ \text{MPa}$,降幅分别为 22.1%、21.9%。

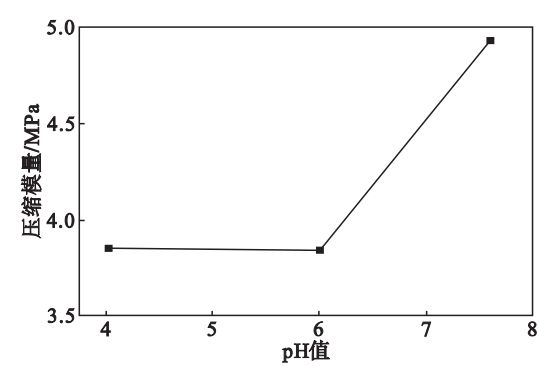


图 5 压缩模量随 pH 值的变化关系
Fig. 5 Relationship between the compression modulus and the pH value

在工程实践中,不同的液限和塑性指数在一定程度上反映了土的矿物成分和粒度成分^[14].土被硫酸溶液浸泡后,其矿物成分和粒度成分均产生了变化,必然导致土的液限随之产生改变,也导致土的塑性指数发生变化.如图 6 所示,被硫酸溶液浸泡后,土的液限和塑性指数都减小,均随着 pH 值的降低而降低.

随着 pH 值的降低,黏粒的热力学电位增大,电动电位也随之增大,黏粒表面负电荷也增大^[15].因为硫酸溶液呈酸性,导致部分黏土颗粒表面带有正电荷,部分黏土颗粒表面带有负电荷.在带负电荷颗粒的表面的扩散层中聚集着较多的 H^+ 离子,而带有正电荷的颗粒表面的扩散层中聚集着较多的 SO_4^{2-} 离子,它们均能导致扩散层变薄^[16],土的可塑性被减弱,所以土的液限和塑性指数均变小.对于液限,由于土中含有大量水分,此时的胶结体离子不会被析出,也就不会对土的液限产生影响.

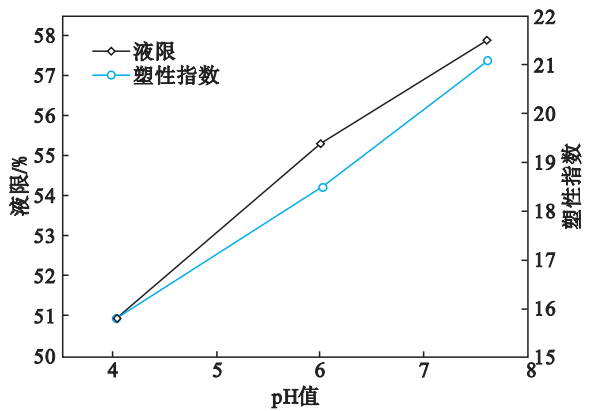


图 6 液限和塑性指数随 pH 值的变化关系
Fig. 6 Relationship between the liquid limit, plasticity index and the pH value

值得注意的是,受硫酸溶液作用,塑性指数发生变化,若在场地勘察评价中仍然采用塑性指数

对污染土进行分类,将可能造成对土壤分类的误判.所以,在进行对污染土的场地勘察评价时,应谨慎考虑土的分类指标,笔者建议结合该土的颗粒分析试验结果与场地附近未受污染的土体的塑性指数及其他相关指标进行综合考虑.

图 7 为围压为 100 kPa 时的应力应变曲线,可以看出,三种条件下土体均表现出应变硬化现象. pH = 6.0 的土体强度高于蒸馏水浸泡过的土体,而 pH = 4.0 的土体强度低于蒸馏水浸泡过的土体.

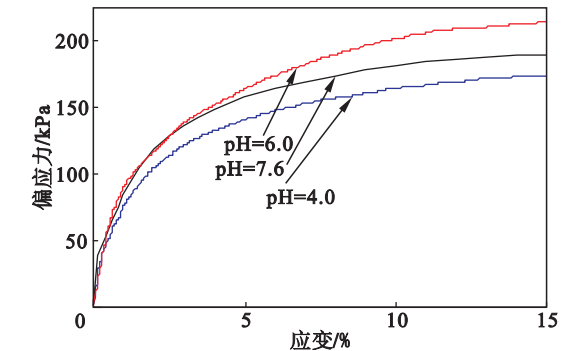


图 7 土样应力应变试验曲线
Fig. 7 Stress-strain curves for different soils

由于酸溶液的长期浸泡,使得土结构发生改变,因此在三轴固结不排水剪切试验过程中,孔隙水压力的上升各不相同,导致不同有效应力路径曲线也不同.在一定的围压条件下,酸溶液的 pH 值与土的有效应力路径曲线具有相关性,如图 8 所示.随围压的增大,土的峰值强度随之提高,不同围压下的有效应力路径形态具有明显相似性,即在试验初期有效平均正应力 p' 略有增加,之后逐渐减小.而试验后期有效平均正应力 p' 增加显著,反映了土的剪胀特性.

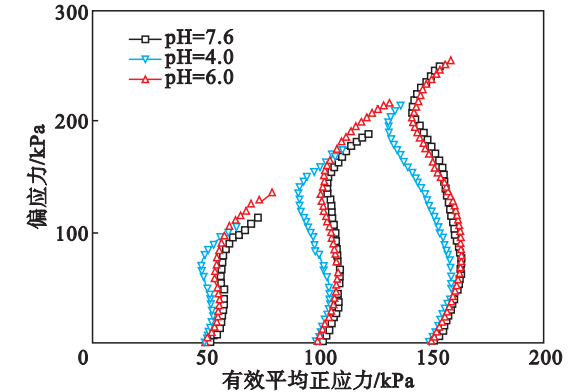


图 8 土样有效应力路径
Fig. 8 Effective stress path for different soils

对于 pH = 6.0 和 7.6 的土样,土体表现出明显的剪胀特性.而对于 pH = 4.0 的土样,在剪切

初期仅呈现出一段很短的剪胀阶段,随后转变为对应的剪缩阶段,但是随着持续的加载,将再次转变为剪胀阶段,且这种现象 pH 值越低,表现得越明显.这种状态的转变将伴随着轴向应力的升高,即应变硬化现象.

随着溶液酸性的增加,pH 值的降低,土的有效应力路径都向左发生偏转,而且 pH 值越低,偏转的程度越大,说明土体中的孔隙水压力的上升值和上升速度越大.此外,土样的破坏点也与图 7 的结论一致,随着 pH 值的降低而先增大后减小.

3 讨 论

土壤所处环境的改变,pH 的改变,可造成土体强度的变化,这与黏粒部分所含的矿物成分密切相关^[17-19].若含有高岭石,pH 环境的改变将影响黏土颗粒周围电荷的分布;若含有蒙脱石,pH 环境的改变将作用于扩散双电层^[20-21].扩散双电层的基本结构见图 9.土颗粒表面带有负电荷,其原因归纳如下:1) 离解作用:晶体表面的某些黏土矿物颗粒在水介质作用下产生离解,离解后的阳离子扩散于水中,而阴离子依旧留在颗粒表面;2) 吸附作用:晶体表面的某些黏土矿物颗粒把水介质中的一些带电荷的离子吸附到颗粒的表面;3) 同晶置换:黏土矿物中八面体的晶型保持不变,但矿物晶格中高价阳离子被低价的离子置换,因而在晶体表面产生过剩的未饱和的负电荷;4) 边缘断裂:理想晶体内部是平衡的,若颗粒边缘处产生断裂,晶体连续性被破坏,导致电荷不平衡.

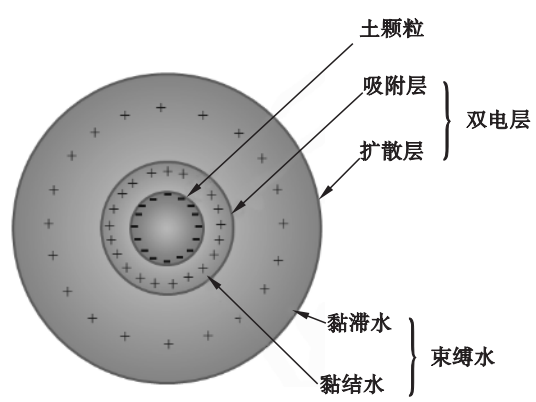


图 9 扩散双电层结构

Fig. 9 Structure of diffuse electric double layer

因为黏土颗粒表面带有电荷,所以在黏土颗粒周围形成一个电场.在电场的作用下,黏土颗粒的外围将吸附一层高电荷密度的阳离子和极性分子的水分子,并参杂少数阴离子,此层称为吸附

层.吸附层以外,随着远离颗粒表面,电场作用力迅速衰减,阳离子将逐渐减少,阴离子则持续增加,直到阴阳离子两者所构成的净电位为零,作为极性分子的水分子在电场中发生定向排列,这个区域称为扩散层,此二层称为扩散双电层.扩散双电层的厚度随溶液中离子浓度和电荷数而不同.古依-查普曼(Guoy-Chapman)结合波尔兹曼(Boltzmann)公式,得出了扩散层厚度的计算公式^[22]:

$$a = \frac{1}{E_0 \nu} \sqrt{\frac{\lambda T k_0}{8 \pi n_0}} \quad (1)$$

式中: a 为扩散层最大厚度(μm); ν 为电荷离子价(± 1); E_0 为电荷的静电单位(4.8×10^{-10} esu); T 为绝对温度(293 K ($20\text{ }^\circ\text{C}$)); λ 为扩散层介质的介电常数(80.0); k_0 为波尔兹曼常数($1.380\,648\,8 \times 10^{-23}\text{ J/K}$); n_0 为零电位时的离子浓度.

从式(1)可以看出:扩散层厚度与溶液中离子浓度成反比,即 pH 值越低,黏土颗粒周围电位就会变小,扩散层厚度也随之减小.

pH 值越低,电解质浓度越高,扩散双电层越薄,颗粒间的排斥力越小,引力越大^[23],颗粒间的合力可视为吸引力,因而增加了凝聚的速度,逐渐凝聚成复粒或团聚体.更加紧密的结构增强了土壤的强度,所以 pH = 6.0 条件下的土体强度高于 pH = 7.6 的土体.当 pH 值降低至 4.0 时,土体强度反而降低,这是由于黏土微结构的改变.当 pH 值小于 5.5 时,高岭土颗粒表面的电荷变得异常活跃,形成更加开放的絮凝结构^[24].絮凝结构将包裹更大的空间^[18],土体变得松散,孔隙比增大,强度随之降低.絮凝结构还造成压缩性的增强和孔隙水压的升高.

4 结 论

1) 硫酸浸泡过的土的压缩变形包括土体中孔隙水排出带来的弹性变形,还包括土体结构链接发生破坏和变位引起的塑性变形,导致其压缩量较原状土的压缩量大. pH 值越低,硫酸溶液的浓度增大,发生溶蚀破坏越剧烈,孔隙比越大,压缩系数越大,压缩模量越小.

2) 随着 pH 值的降低,扩散双电层被稀释,土的可塑性变弱,液限和塑性指数都减小.

3) 三种 pH 环境下土体均表现出应变硬化现象. pH = 6.0 时土体强度增高,而 pH = 4.0 的土体强度低于蒸馏水浸泡过的土体.这与土壤黏

粒部分所含的矿物成分密切相关. 较低的 pH 值环境刺激了高岭土颗粒表面的电荷, 形成更加开放的絮凝结构, 使得土体变得松散, 孔隙比增大, 强度随之降低. 絮凝结构还造成压缩性的增强和孔隙水压力的升高.

4) 随着溶液酸性的增加, pH 值的降低, 土的有效应力路径都向左发生偏转, 而且 pH 值越低, 偏转的程度越大, 说明土体中的孔隙水压力的上升值和上升速度越大.

参考文献：

[1] 方晓阳. 21 世纪环境岩土工程展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 1 – 11.
(Fang Xiao-yang. Environmental geotechnology -perspective in the 21st century [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2000, 22(1): 1 – 11.)

[2] 贾永刚, 李相然, 韩德亮, 等. 环境工程地质学[M]. 山东: 中国海洋大学出版社, 2003.
(Jia Yong-gang, Li Xiang-ran, Han De-liang, et al. Environmental engineering geology[M]. Shandong :Ocean University of China Press 2003.)

[3] Di M C, Fenelli G B. Residual strength of kaolin and bentonite the influence of their constituent pore fluid[J]. *Géotechnique* ,1994, 44(2): 217 – 226.

[4] O’kelly B C. Effects of aluminum sulfate and polyelectrolyte solutions on the geotechnical properties of organic clay[J]. *Soils and Foundations* 2011, 51(2): 359 – 367.

[5] Ratnaweera P, Meegoda J N. Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils[J]. *Geotechnical Testing Journal* 2006, 29(2): 133 – 140.

[6] Spagnoli G, Fernandez-Steeger T, Feinendegen M, et al. The influence of dielectric constant and electrolyte concentration of the pore fluids on the undrained shear strength of smectite [J]. *Soils and Foundations* 2010, 50(5): 757 – 763.

[7] Sridharan A, Nagaraj T S, Sivapullaiah P V. Heaving of soil due to acid contamination[J]. *Géotechnique* ,1980, 2(5): 258 – 267.

[8] 王栋. 碱性环境污染土的试验研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2009.
(Wang Dong. Experimental study on soil polluted by alkali [D]. Shanxi :Taiyuan University of Technology 2009.)

[9] Rahardjo H. The study of undrained and drained behavior of unsaturated soils [D]. Saskatoon : University of Saskatchewan ,1990.

[10] Olson R E, Mesri G. Mechanisms controlling the compressibility of clay[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE* ,1970, 96(6): 1863 – 1878.

[11] 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.
(Liu Han-long, Zhu Chun-peng, Zhang Xiao-lu. Fundamental physical properties of soils polluted by acid and alkali in laboratory[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* , 2008, 30(8): 1213 – 1217.)

[12] 李相然, 姚志祥, 曹振斌. 济南典型地区地基土污染腐蚀性质变异研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1229 – 1233.
(Li Xiang-ran, Yao Zhi-xiang, Cao Zhen-bin. Study on physical and mechanical property variation of pollution erosive foundation soils in typical district of Jinan [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2004, 25(8): 1229 – 1233.)

[13] 朱春鹏, 刘汉龙, 张晓璐. 酸碱污染土压缩特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1477 – 1483.
(Zhu Chun-peng, Liu Han-long, Zhang Xiao-lu. Laboratory tests on compression characteristics of soil polluted by acid and alkali[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* , 2008, 30(10): 1477 – 1483.)

[14] Cotecchia F, Chandler R J. A general framework for the mechanical behaviour of clays[J]. *Géotechnique* ,2000, 50(4): 431 – 447.

[15] Sposito G. The chemistry of soils[M]. New York :Oxford University Press ,1989, 114 – 116.

[16] 唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 等. 工程岩土学[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 2005.
(Tang Da-xiong, Liu You-rong, Zhang Wen-shu, et al. Rock and soils engineering[M]. 2nd ed. Beijing : Geological Publishing House 2005.)

[17] Gajo A, Maines M. Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on a natural active clay[J]. *Géotechnique* 2007, 57(8): 687 – 699.

[18] Wang Y, Siu W. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. effects of structure on mechanical properties[J]. *Canadian Geotechnical Journal* , 2006, 43(6): 601 – 617.

[19] Kashir M, Yanful E K. Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage [J]. *Canadian Geotechnical Journal* 2001, 38(5): 1034 – 1048.

[20] Van Olphen H. An introduction to clay colloid chemistry [M]. [S. l.] :Krieger Publishing Company ,1991.

[21] Soga K, Mitchell J K. Fundamentals of soil behavior[M]. 3rd ed. New York :Wiley 2005.

[22] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
(Li Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing : Tsinghua University Press 2004.)

[23] Anandarajah A, Zhao D. Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2000, 126(2): 148 – 156.

[24] Sridharan A, Rao S M, Murthy N S. Liquid limit of kaolinitic soils[J]. *Géotechnique* ,1988, 38(2): 191 – 198.