

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.015

## 酸性环境下 $Q_2$ 黄土压缩特性试验研究\*

刘驰洋, 唐皓, 王念秦, 李华华, 吴冠男

(西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对酸性污染土物理力学性质恶化的现象, 采用室内人工模拟受酸液污染土样的方法, 开展土常规试验、压缩试验探究  $Q_2$  黄土在酸液浸泡时间和酸液浓度双因素作用下, 试样孔隙比、含水率等基本物理及压缩系数、压缩模量等指标和压缩  $e-p$  曲线的变化规律, 以及水-酸耦合作用对黄土压缩性的影响规律。结果表明: 浸泡时间一定时, 随酸液浓度增大, 含水率、孔隙比、压缩系数在逐渐增大, 压缩模量在减小。浸泡 12 d 时, 酸液浓度 0.1 mol/L 增加至 3 mol/L, 压缩系数  $a_{1-2}$  由 0.355  $\text{MPa}^{-1}$  增大到 1.275  $\text{MPa}^{-1}$ , 压缩模量  $E_{s1-2}$  由 5.580 MPa 减小至 1.855 MPa; 酸液浓度一定时, 随浸泡时间延长, 含水率、孔隙比、压缩系数在逐渐增大, 压缩模量在减小。酸液浓度 3 mol/L 时, 浸泡时间从 1 d 至 12 d, 压缩系数  $a_{1-2}$  由 0.308  $\text{MPa}^{-1}$  增大到 1.275  $\text{MPa}^{-1}$ , 压缩模量  $E_{s1-2}$  由 6.301 MPa 减小至 1.855 MPa; 水-酸耦合作用提高了黄土压缩性, 且在充分浸泡条件下, 酸液对黄土压缩性的影响远大于水的影响。研究结果可为酸蚀黄土区工程建设提供相关参考。

**关键词:**  $Q_2$  黄土; 压缩系数; 压缩模量; 酸液浸泡; 水-酸耦合作用

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0125-08

## Experimental Study on Compression Characteristics of $Q_2$ Loess in Acidic Environment

LIU Chiyang, TANG Hao, WANG Nianqin, LI Huahua, WU Guannan

(College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In view of the deterioration of physical and mechanical properties of soil due to acidic pollution, laboratory routine and compression tests have been conducted on artificial acid samples of  $Q_2$  loess soil to investigate double factors of acid soaking time and acid concentration on the void ratio, moisture content and other basic physical parameters, as well as the variation of compression coefficient, compression modulus and the compression curve of  $e-p$ . Meanwhile, the water-acid coupling effect on the compressibility of loess is studied. The results show that under the same acid soaking time, the moisture content, void ratio, and compression coefficient gradually increased with the increase of acid concentration, while the compressibility modulus reduced. After soaking for 12 days, the acid concentration increased from 0.1 mol/L to 3 mol/L, and the compression coefficient  $a_{1-2}$  increased from 0.355  $\text{MPa}^{-1}$  to 1.275  $\text{MPa}^{-1}$ , accompanied with the decrease of compression modulus  $E_{s1-2}$  from 5.580 MPa to 1.855 MPa. When the acid concentration is constant, with the extension of soaking time, the moisture content, void ratio and compression coefficient increased gradually, and the com-

\* 收稿日期: 2019-03-24; 修回日期: 2019-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602305)资助

作者简介: 刘驰洋(1997—), 男, 硕士生。主要从事岩土体稳定性评价的研究工作。E-mail: 18992062678@163.com

通讯作者: 唐皓(1985—), 男, 讲师, 硕士生导师, 博士后。主要从事岩土体稳定性评价的研究。E-mail: 329689614@qq.com

pression modulus decreased. At the acid concentration of 3 mol/L, with the increase of the soaking time from 1 d to 12 d, the compression coefficient  $a_{1-2}$  increased from 0.308 MPa<sup>-1</sup> to 1.275 MPa<sup>-1</sup>, and the compression modulus  $E_{s1-2}$  decreased from 6.301 MPa to 1.855 MPa. The coupling effect of water and acid improves the loess compressibility, and the effect of acid solution on the loess compressibility is much greater than that of water under the condition of full immersion. The results can be used as a reference for construction activities in acid etched loess areas.

**Keywords:** Q<sub>2</sub> loess; compression coefficient; compression modulus; acid soaking; water-acid coupling effect

## 引言

黄土是一种广泛分布的第四纪沉积物,富含钙质,大孔隙且垂直节理发育<sup>[1-2]</sup>。近年来随着西部大开发战略的实施,“一带一路”倡议的提出,黄土区工程建设的项目数量、规模与日俱增,在黄土地区分布着大量的矿山,矿山废液中含有酸性物质,大量排放对土地造成污染。这些含有一定腐蚀性的液体侵蚀土体后,改变了原有土体的结构及压缩等力学特性,造成了地基土的沉降,进而影响了相应工程的稳定性<sup>[3]</sup>。

目前,已有众多国内外学者对各种污染土物理力学特性展开研究,查甫生等<sup>[4]</sup>得出重金属污染能引起土体无侧限抗压强度降低;张志红等<sup>[5]</sup>对重金属二价铜离子污染土,在围压和渗透液浓度两个变量下,研究渗透系数随着CuCl<sub>2</sub>溶液浓度的变化规律;姬凤玲等<sup>[6]</sup>研究了硫酸溶液浓度、溶蚀时间对花岗岩残积土试样物理、力学特性的影响;以及锌、钠铵盐、石油、铅污染土的性质研究,取得了一系列成果<sup>[7-9]</sup>,V.S.Rajput等<sup>[10]</sup>从胶结物角度对污染土力学性质进行了研究。

酸性环境下黄土物理力学性质研究,也有众多研究成果:胡再强等<sup>[11]</sup>对酸性环境下黄土湿陷敏感性进行探究,得出在水溶液和酸性溶液中,黄土有着不同的湿陷敏感压力区间;张耀等<sup>[12]</sup>利用酸能溶解碳酸钙的性质,快速破坏黄土内部劣势孔隙结构,实现对黄土结构进行改造;王绪民等<sup>[13]</sup>从酸泡黄土试验后的孔隙及溶液钙离子浓度,细颗粒、粗颗粒含量的变化阐释酸蚀黄土作用机理,浸泡液酸性越强,黏聚力减少越多,研究了土的应力应变关系变化情况。

虽然前人对酸性污染土的研究取得了一定进展,但酸液侵蚀土体的腐蚀机制复杂,且酸性环境下Q<sub>2</sub>黄土的压缩特性系统研究还很少。

因此,在前人学者的研究基础上,综合考虑矿

山酸性废液(AMD)的模拟特性及酸液的挥发性质的多因素影响,配制盐酸浓度0.1、0.5、1、2、3 mol/L及等体积的蒸馏水对照组溶液,为研究在浸泡初期酸液对土体的影响效应,浸泡时间设定为近似为等间隔的1、3、6、9、12 d,同一浸泡时间点同一浓度下两件标准规格环刀试件,一件用于测定基本物理性质变化,另一件用于进行压缩试验,共计60余件环刀试件,绘制压缩 $e-p$ 曲线,分析曲线特征变化趋势,并计算压缩系数 $a_{1-2}$ 、压缩模量 $E_{s1-2}$ 等压缩性指标。探究水-化学盐酸耦合作用对黄土压缩性的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试样采取

本次试验试样取自西安市临潼区骊山脚下某山坡坡脚处(图1),位于西安市东约25 km<sup>2</sup>处,关中平原之东,取土深度为6~8 m,于褐红色古土壤层之下,为中更新世离石黄土(Q<sub>2</sub>),呈浅红黄色,以粉砂为主,不显宏观层理,虫孔发育,土质疏松且多有钙质结核。采取Q<sub>2</sub>黄土环刀样(Φ79.8 mm×20 mm)及大块原状黄土样,其中标准环刀试件采取60余个,大块原状黄土样取2个,妥善处理保存后将其运往实验室备用。根据《土工试验规程》<sup>[14]</sup>测得Q<sub>2</sub>黄土的基本物理性质见表1。

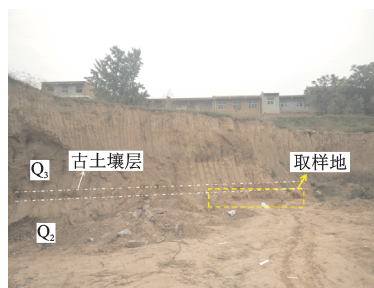


图1 取样地示意

Fig.1 Photograph of the sampling ground

表1 Q<sub>2</sub>黄土基本物理性质指标

Table1 Basic physical parameters of Q<sub>2</sub> loess

比重 $G_s$	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	天然含水率 $W/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 $I_P$	液性指数 $I_L$	稠度状态
2.68	1.65	17.6	31.3	19.4	12	-0.15	坚硬

## 1.2 试验方法

(1)用内壁涂抹硅脂的 $\Phi 79.8\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的环刀切取原状Q<sub>2</sub>黄土试样,将试样称重后,环刀外缠绕一圈防腐胶带,上下加两片滤纸,再用防腐蚀土工布(短纤丙纶)包裹严实,扎上0.5 m细绳,细绳外端贴标签标记,酸泡前试样处理设计如图2所示、实物如图3所示。

(2)综合考虑矿山酸性排泄水(AMD)的模拟特性选择工业用盐酸试剂配制不同浓度的浸泡溶液,浸泡液配制方案设计见表2。

(3)取出酸液浸泡后的土样,测定各土样的含水率、质量及计算出各土样的孔隙比,用快速压缩法进行压缩试验,加荷等级采用50、100、200、300、400 kPa,绘制 $e-p$ 曲线,计算压缩系数等。

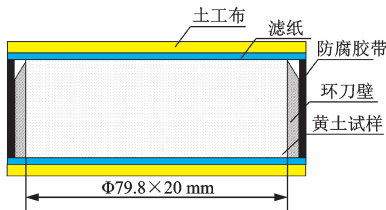


图2 试样处理设计

Fig.2 Design diagram of sample Handling

表2 浸泡溶液配制及浸泡时间设计方案

Table2 Design scheme of preparation and soaking time of the soaking solution

成分	浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	浸泡时间/d
盐酸	0.1	1、3、6、9、12
盐酸	0.5	1、3、6、9、12
盐酸	1	1、3、6、9、12
盐酸	2	1、3、6、9、12
盐酸	3	1、3、6、9、12
蒸馏水	—	1、3、6、9、12

注:蒸馏水溶液设为对照组

## 2 试验结果与分析

### 2.1 含水率变化

在设定浸泡时间点,取出各酸液浸泡试样后,

于试样中心挖取少部分土样,在104℃恒温烘干8 h,浸泡试样后含水率的测定均为平行测定,两次平行试验结果差值小于1%,再取两者的平均值作为最终含水率值,通过测定土体在浸泡不同浓度、不同时间试样的含水率值,其一是为压缩试验计算试验前初始孔隙比 $e_0$ 服务;其二可以用于探究试样压缩特性变化的原因,为压缩试验的得出的压缩指标等变化规律的研究提供参考依据。

由图4中试样含水率变化曲线可以看出,浸泡时间越长,含水率变化曲线的位置越靠上方,含水率的数值也越大;酸泡同一天,试样的含水率,随着酸液浓度的增大,含水率也在增大,如浸泡1 d时,试样的含水率由27.9%增加至35.6%,在浸泡12 d时,试样的含水率由32.2%增加至52.7%;综上所述,试样不管是随着酸液浓度的增大,还是浸泡时间的增加,试样的含水率都在增大。刘汉龙等<sup>[15-16]</sup>对酸蚀土样后的盐类、游离氧化物的测定,结果表明:酸泡试样后,土体中Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>含量增多,游离氧化物Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量减少。由此可间接推测O<sup>2+</sup>与酸液中H<sup>+</sup>结合形成水分子,故酸液浸泡试样后,试样含水率增加的原因可能是酸液与土体中的盐类、游离氧化物等物质反应会生成水分子不断累积,导致含水率增大,与此同时,试样孔隙比增大,土颗粒外侧结合水膜的增厚等原因共同作用,导致含水率的增大。



图3 试样处理实物

Fig.3 Photograph of sample preparation

### 2.2 孔隙比变化

通过酸液浸泡试样后的含水率、密度等数据,计算出酸泡试样的孔隙比。孔隙比的大小,可以反映出酸液侵蚀土体,与土样发生化学反应的深浅程度,土样在不同时间段经不同浓度酸液浸泡后,酸

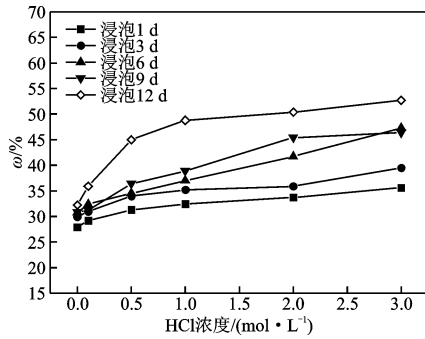


图4 含水率变化曲线

Fig.4 Curves of moisture content variation

泡试样后孔隙比的变化曲线如图5所示。

通过图5可以得出,浸泡同一天,随着盐酸酸液浓度的升高,试样的孔隙比在逐渐变大,伴随浸泡天数的增加,试样的孔隙比也在增大,酸液浓度越大,孔隙比的增大幅度也越大,这一规律尤其是在浸泡9 d、12 d后,盐酸浓度在1~3 mol/L浸泡的试样体现越明显,但在浸泡1 d时,由于浸泡时间相对较短,酸液渗透土样深度浅且不均匀,土体来不及与酸液充分反应,试样的孔隙比变化规律不明显。

综上所述,随着浸泡酸液浓度的增加,浸泡时间的延长,试样的孔隙比均在逐渐增大。

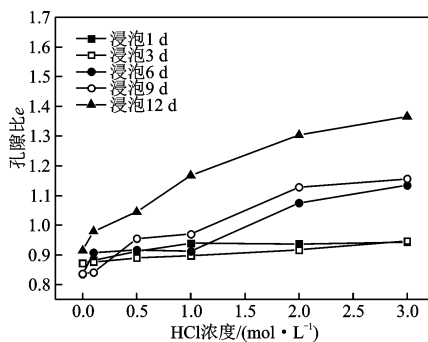


图5 孔隙比变化曲线

Fig.5 Curves of void ratio variation

### 2.3 酸泡试样 $e-p$ 曲线的特征

酸液浸泡后  $Q_2$  黄土的压缩特性是根据土的压缩试验获得的,处理各浓度不同时间段的压缩试验数据,绘制压缩  $e-p$  曲线如图6~10所示。

土体的压缩本质即土孔隙体积的不断减小,孔隙中的气体和水排出土体之外,土颗粒和水自身的压缩变形导致的体积减小很微小,可以忽略;故测定压力对土的体积的变化量就可以通过孔隙比的变化来表示。

由图6~10试样的  $e-p$  曲线可以看出,土样在不同浓度盐酸溶液和等体积蒸馏水溶液浸泡1 d后,在压力为零时,即压缩试验之前,土的初始孔隙比  $e_0$  是随着酸性浸泡液浓度的增加而增大的,在压力逐渐增加的情况下,土的孔隙比随压力的增加而逐渐减小。压缩曲线整体呈上凹的形状,蒸馏水浸泡试样的压缩曲线位于最下方,不同盐酸浓度浸泡的土样的压缩曲线也有一定规律,呈现出盐酸浓度越高,曲线越高,孔隙比整体较大;随着压力的增大,各浓度浸泡试样的压缩曲线由高变低,有趋于稳定的趋势,孔隙比也随曲线依次减少。

不同浓度酸液浸泡试样3 d后的压缩试验数据,试样的初始孔隙比  $e_0$  同浸泡试样1 d的数据变化规律相近,随着盐酸浓度的增大,试样的初始孔隙比也在逐步增大,且在压力逐渐增加的情况下,土的孔隙比随压力的增加也在逐渐减小。在每一级荷载下,不同浓度盐酸浸泡试样的孔隙比,都随着酸液浓度的升高而增大;浸泡3 d和浸泡1 d的压缩曲线,随着压力的增大,不同浓度的压缩曲线变得紧密,逐步趋近。不同浓度酸液浸泡试样6 d后的压缩试验数据,试样的初始孔隙比  $e_0$  同浸泡试样1 d、3 d的数据变化规律相近,随着盐酸浓度的增大,试样的初始孔隙比也在逐步增大,从0.835增大至1.134,孔隙比的增大范围相比1 d、3 d更广,最大值大于1,且在压力逐渐增加的情况下,土的孔隙比随压力的增加也在逐渐减小,规律与1 d、3 d孔隙比变化规律相吻合。在每一级荷载下,各浓度盐酸浸泡试样的孔隙比,均随着酸浓度升高而增大;相较于1 d、3 d的压缩曲线图而言,6 d的压缩曲线浓度较大浸泡的试样之间的曲线较为稀疏,这是由于酸液充分进入试样中发生溶蚀,使得试样结构连结破坏,孔隙比增大所致的,在浓度较小的0.1、0.5、1 mol/L的曲线相对比较紧密,更好的起到了对比说明的作用。

图6(c)中0.1 mol/L酸液浸泡试样6 d的压缩曲线位于0.5 mol/L的上方,这可能是由于试样土体的非均质性导致的。

不同浓度盐酸浸泡试样9 d后进行压缩试验的试验数据,试样的初始孔隙比变化同1、3、6 d类似,表现为较高盐酸浓度浸泡的试样,试样的初始孔隙比相对较大,随着压力的增大,各浓度的孔隙比均在逐渐减小,最终趋于稳定。在图6(d)所示的压缩曲线中,压缩曲线整体呈上凹状,但曲线相较酸液

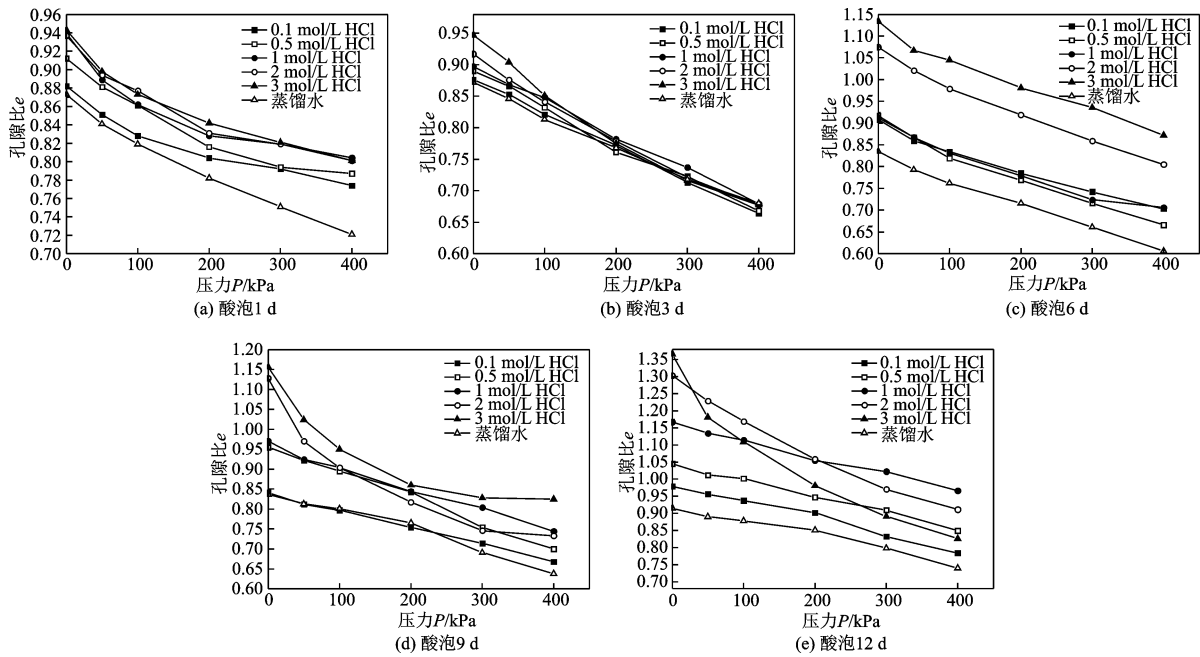


图6 酸泡试样  $e-p$  曲线  
Fig.6 Acid bubble sample  $e-p$  graph

浸泡6 d试样的压缩曲线而言,在0~50 kPa压力段,曲线更加陡,换言之,在前几级压力作用下,土样的压缩量比较大;酸泡液浓度越大,曲线越高,孔隙比越大,但是不难发现,在200~400 kPa压力段,高浓度的孔隙比减小的非常快,甚至跌落至低浓度之下,尤其是2 mol/L浸泡的试样最为明显,其原因推测是由于高浓度酸液浸泡且时间较长,酸液充分进入试样中,使得土体结构破坏较为严重,再加上较高的压力垂直作用,土中的水分排出充分,此时试样相较于低浓度酸泡试样趋于密实的速率增大,造成了在高压段孔隙比骤降的现象,在400 kPa时,土体的孔隙比又恢复了高浓度孔隙比大于低浓度孔隙比的变化规律,这与1、3、6 d浸泡试样的压缩曲线得出的孔隙比随酸液浓度的升高而增大的变化规律是一致的。

不同浓度酸液浸泡试样12 d的压缩试验数据可知,随着试样的初始孔隙比随着酸泡液的浓度的增大而增大,且比浸泡天数相对较短的1、3、6、9 d试样的初始孔隙比的增大幅度还要大,最大值可达到1.366,其对应的酸泡液浓度为3 mol/L。浸泡12 d的压缩曲线,在浓度较低的0.1、0.5、1 mol/L的盐酸溶液和等体积蒸馏水浸泡的试样的压缩曲线,随着酸的浓度越高,曲线位置越高,孔隙比越大;而在浓度相对较高的2、3 mol/L盐酸浸泡的试样压缩曲线,出现了和浸泡9 d时浓度为2 mol/L浸泡试样压

缩曲线同样的效果,曲线在高压段发生了“跌落”,这种“跌落”在最后一级荷载对应位置并没有像浸泡9 d试样压缩曲线一样发生恢复,这就说明了在试样浸泡12 d时,土体的内部结构联结比浸泡9 d破坏的更加剧烈,酸液浸泡试样9 d时,土体只是少部分结构联结发生破坏,而在试样浸泡12 d土体的结构破坏程度更深,造成了土体的压缩变形量迅速增大。

#### 2.4 酸泡试样后压缩系数的变化特征

为了更清楚、更直观的反映酸泡 $Q_c$ 黄土试样在酸液浓度和浸泡时间两个变量下的压缩特性,计算上文中各压缩曲线在0.1~0.2 MPa时各试样的压缩系数 $a_{1-2}$ 的变化情况如图7所示。

由图7可以看出,在酸液浸泡1 d时,试样的压缩曲线呈现波动状态,变化规律不明显,而在之后的浸泡3 d、6 d、9 d、12 d,同一浸泡时间,随着酸液浓度的增大,压缩系数越大;同一酸性条件下,浸泡时间越长,压缩系数亦越大,这一规律在较低浓度酸液(0.1~1 mol/L HCl)浸泡曲线段体现不明显,在较高浓度酸液浸泡段,较为明显。

#### 2.5 酸泡试样后压缩模量的变化特征

通过计算得出的各浸泡时间段压缩系数的变化关系,反求出各试样的压缩模量值,绘制曲线图

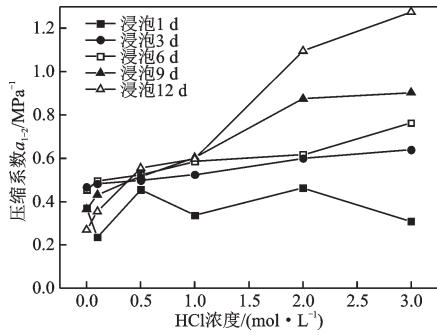


图7 酸泡试样后压缩系数  $a_{1-2}$  变化曲线

Fig.7 Curves of compression coefficient  $a_{1-2}$  variation of the samples after acid soaking

如图8所示。浸泡试样1 d后试样的压缩模量的变化曲线呈现波动状态,这是因为,浸泡时间短酸液进入土样只是一部分,与土体发生化学腐蚀作用刚刚开始,压缩模量的变化规律不明显,随着浸泡酸液浓度的提升,土体试样的压缩模量在逐渐减小,浸泡时间越长,见效的幅度也越大,黄土的压缩性也在逐步增强。

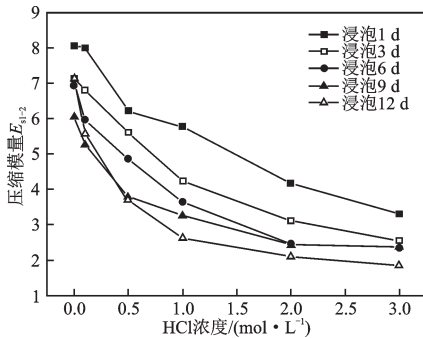


图8 酸泡试样后压缩模量  $E_{s1-2}$  变化曲线

Fig.8 Curves of compression modulus  $E_{s1-2}$  variation of the samples after acid soaking

## 2.6 水-酸耦合作用对 $Q_2$ 黄土压缩特性的影响

上文中研究了不同浓度酸液对  $Q_2$  黄土压缩特

性的影响,得出了压缩指标的变化规律,那么到底是酸性物质起的作用,还是水分子起的作用,两者对黄土压缩特性到底是如何影响的呢?

为了探究这一问题,将原状  $Q_2$  黄土、蒸馏水浸泡试样、3 mol/L HCl 盐酸浸泡试样的 12 d 压缩试验数据和部分物理性质指标提取出来对比分析,并且计算了蒸馏水浸泡和酸泡试样后各指标相对于原状试样的变化率(浸泡后的指标减去原状土指标的差值与原状黄土的指标值的百分比(%)),其对比结果见表3,水-化学盐酸耦合作用影响效应分析柱状图如图9所示。

由表3及图9中可以看出,蒸馏水浸泡试样12 d后,试样的含水率达到32.2%,相比原状黄土试样的变化率为82.95%,但是在3 mol/L HCl 盐酸浸泡试样12 d后,试样的含水率为52.7%,相比原状黄土的含水率变化率为199.43%,可见酸液浸泡对含水率的影响远远大于蒸馏水浸泡的作用;同样,在孔隙比的变化率中,可以看出酸浸泡试样后的孔隙比变化率为59.58%,蒸馏水为6.89%,也可以得出酸泡影响大于蒸馏水浸泡的作用;在压缩性指标中,压缩系数  $a_{1-2}$  的变化幅度较大,蒸馏水浸泡试样对压缩系数的变化率为81.76%,酸泡试样的变化率达到761.49%,试样的压缩性等级也从中等压缩性提高到高压压缩性;对压缩模量的减小率而言,酸泡后试样为蒸馏水浸泡试样的2倍左右,这样的变化规律与我们上文所述酸泡黄土后试样宏观变化的结果是吻合的。

通过分析可以得出,蒸馏水浸泡试样对原状  $Q_2$  黄土的压缩特性有一定影响,蒸馏水的浸泡试样提高了试样的含水率、孔隙比、密度、压缩系数,减小了压缩模量,但是相比酸液浸泡试样后各指标的变化,无论是压缩性指标还是基本物理指标,都相对较少。

表3 水-酸耦合作用各参数变化

Table 3 Comparisons of the parameters of water-acid coupling effect

试样类别	含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙比 $e$	压缩系数 $a_{1-2}/MPa^{-1}$	压缩模量 $E_{s1-2}/MPa^{-1}$	压缩性等级
原状黄土试样	17.6	1.65	0.856	0.148	12.538	中压缩性
蒸馏水浸泡试样	32.2	1.85	0.915	0.269	7.116	中压缩性
3 mol/L HCl 浸泡试样	52.7	1.73	1.366	1.275	1.855	高压压缩性
蒸馏水浸泡试样变化率/%	82.95%	12.12%	6.89%	81.76%	-43.24%	不变
3 mol/L HCl 浸泡试样变化率/%	199.43%	4.85%	59.58%	761.49%	-85.20%	升高

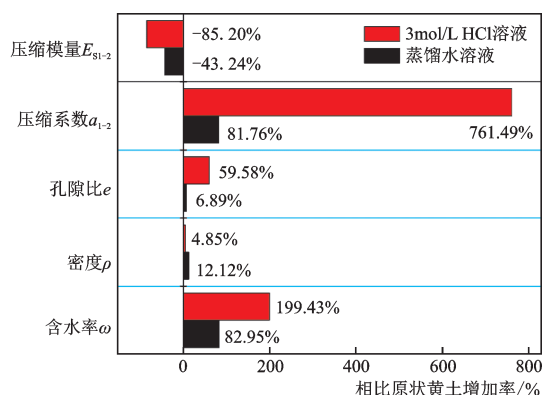


图9 水-酸耦合作用影响效应分析柱状图

Fig.9 Bar graph of influence analysis of water-acid coupling effect

综上所述,蒸馏水和盐酸溶液浸泡  $Q_2$  黄土,均会对黄土的压缩特性造成影响,孔隙比变大、压缩系数增大、压缩模量减小等,但是酸性物质的影响远远大于水的影响。在水-酸耦合作用下,  $Q_2$  黄土的压缩性得到了提高。

### 3 结 论

根据室内人工模拟受酸液污染土样的方法,开展土常规试验、压缩试验,探究  $Q_2$  黄土在酸液浸泡时间和酸液浓度双因素作用下压缩特性的变化规律,得到了以下主要结论:

(1)  $Q_2$  黄土经酸液浸泡后,浸泡时间一定时,随酸液浓度增大,含水率、孔隙比、压缩系数在逐渐增大,压缩模量在减小。

(2)  $Q_2$  黄土经酸液浸泡后,酸液浓度一定时,随浸泡时间延长,含水率、孔隙比、压缩系数在逐渐增大,压缩模量在减小。

(3)  $Q_2$  黄土酸蚀后压缩特性的增强是水-盐酸耦合作用的结果,水-酸耦合作用提高了黄土压缩性,且在充分浸泡条件下,酸液对黄土压缩性的影响远大于水的影响,盐酸为主控因素。

### 参考文献:

[1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.  
Xie D Y. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13. (in Chi-

nese)  
[2] 郭玉文, 宋菲, 加藤诚. 黄土中碳酸钙分布的能谱分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1004-1007.  
Guo Y W, Song F, Jia T Ch. EDX of  $CaCO_3$  distribution in loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1004-1007. (in Chinese)  
[3] 马尧, 胡宝群, 孙占学. 矿山废水处理的研究综述[J]. 铀矿冶, 2006, 25(4): 199-203.  
Ma Y, Hu B Q, Sun Zh X. A summary of studies on mine wastewater treatment [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006, 25(4): 199-203. (in Chinese)  
[4] 查甫生, 刘晶晶, 夏磊, 等. 重金属污染土的工程性质试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增2): 1982-1985.  
Zha P Sh, Liu J J, Xia L, et al. Engineering properties of heavy metal contaminated soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (Sup 2): 1982-1985. (in Chinese)  
[5] 张志红, 李红艳, 师玉敏. 重金属  $Cu^{2+}$  污染土渗透特性试验及微观结构分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 122-129.  
Zhang Zh H, Li H Y, Shi Y M. Experimental study on permeability properties and microstructure of clay contaminated by  $Cu^{2+}$  [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12): 122-129. (in Chinese)  
[6] 姬凤玲, 李强. 酸性溶液对花岗岩残积土物理力学特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1506-1510.  
Ji F L, Li Q. Effect of acid solution on physico-mechanical properties of granite residual soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6): 1506-1510. (in Chinese)  
[7] 张金利, 张林林, 谷鑫. 重金属  $Pb(II)$  在膨润土上去除特性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 117-123.  
Zhang J L, Zhang L L, Gu X. Removal behaviors of heavy metal  $Pb(II)$  by use of bentonite [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 117-123. (in Chinese)  
[8] 范日东, 杜延军, 陈左波, 等. 受铅污染的土-膨润土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 841-848.  
Fan R D, Du Y J, Chen Z B, et al. Compressibility and permeability characteristics of lead contaminated soil-bentonite vertical cutoff wall backfills [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 841-848. (in Chinese)

- [9] 高彦斌, 刘佳丹, 王雨滢. 酸碱污染重塑粉质黏土的塑性及其与力学特性的关系[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11):2103-2109.  
Gao Y B, Liu J D, Wang Y Y. Plasticity and its relationship with mechanical properties of a remolded silty clay contaminated by several acids and bases [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (11):2103-2109. (in Chinese)
- [10] Rajput V S, Higgins A J, Singley M E. Cleaning of excavated soil contaminated with hazardous organic compounds by washing [J]. Water Environment Research, 1994, 66(6):819-827.
- [11] 胡再强, 张耀, 岳文青, 等. 酸性环境下黄土湿陷性试验与湿陷敏感性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7):1748-1756.  
Hu Z Q, Zhang Y, Yue W Q, et al. Collapsible tests of loess under acid conditions and related sensitivity analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7):1748-1756. (in Chinese)
- [12] 张耀, 胡再强, 陈昊, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4):681-688.  
Zhang Y, Hu Z Q, Chen H, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (4):681-688. (in Chinese)
- [13] 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.  
Wang X M, Chen Sh X, Cheng Ch B. Experimental study on physico-mechanical characteristics of undisturbed loess soaked in acid solution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9):1619-1626. (in Chinese)
- [14] 土工试验规程: SL 237—1999 [S]. 北京: 水利水电出版社, 2000.  
Geotechnical test procedure: SL 237—1999 [S]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 2000. (in Chinese)
- [15] 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 H L, Zhu C P, Zhang X L. Fundamental physical properties of soil polluted by acid and alkali in laboratory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8):1213-1217. (in Chinese)
- [16] 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 Ch P, Liu H L, Zhang X L. Laboratory tests on compression characteristics of soil polluted by acid and alkali [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10):1477-1483. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)



(上接第 124 页)

- [12] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3):36-46.  
Feng P, Qiang H L, Ye L P. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (3):36-46. (in Chinese)
- [13] 周颖, 龚顺明. 混合非线性黏弹性阻尼器非线性特征与力学模型研究[J]. 工程力学, 2018, 35(6):132-143.  
Zhou Y, Gong Sh M. Study on nonlinear characteristics and mechanical model of hybrid nonlinear viscoelastic damper [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6):132-143. (in Chinese)
- [14] 建筑消能减震技术规程: JGJ 297—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Technical specification for seismic energy dissipation of buildings: JGJ 297—2013 [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2013. (in Chinese)