

# 酸碱污染对 Q<sub>3</sub>黄土湿陷表征影响的试验研究

刘 华<sup>1,2</sup>, 张硕成<sup>1</sup>, 鲁 洁<sup>1,2</sup>, 牛泽林<sup>1,2</sup>, 冯志焱<sup>1,2</sup>, 刘 刚<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 中铁北京工程局集团第一工程有限责任公司, 陕西 渭南 714000)

**摘要:** 随着我国黄土地区城镇化和工业化的快速发展, 生活污水、工业废水中的酸碱溶液对土体的污染问题以及大气环境演变导致的雨水 pH 值发生的改变对土壤的污染问题也日渐突出。黄土的湿陷性及相应的湿陷敏感性是其特有的水敏特征, 对岩土工程的长期稳定性至关重要。颗粒间的胶结及组构特征对 Q<sub>3</sub>黄土的应力状态和工程性质起到了重要的作用, 但酸、碱溶液的侵入在一定程度上改变及重组了微观结构。为研究孔隙水酸碱度对 Q<sub>3</sub>黄土的湿陷性及湿陷敏感性的影响, 本试验设计了重塑和原状两种土样污染前后的湿陷性试验。实验结果表明: 酸性污染液与碱性污染液都会增加黄土的湿陷系数, 增大湿陷稳定时间及速率, 改变黄土的湿陷敏感性, 不同浓度的酸碱污染液对土体的影响随浓度增加呈规律性变化; 不同种类的酸溶液对土体的湿陷性及实现敏感性的影响也有差异。在此基础上对酸碱污染土样进行湿陷敏感性分析, 得出了在实际工程中需要考虑黄土受酸碱污染后湿陷性改变所带来的额外影响。

**关键词:** Q<sub>3</sub>黄土; 酸碱污染; 湿陷性; 湿陷敏感性

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0525-07

## Laboratory tests on the collapsibility characteristics of Q<sub>3</sub> contaminated loess by acid and alkali solutions

LIU Hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuocheng<sup>1</sup>, LU Jie<sup>1,2</sup>, NIU Zelin<sup>1,2</sup>, FENG Zhiyan<sup>1,2</sup>, LIU Gang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering,  
Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. The No. 1 Engineering Co. Ltd of China Railway Beijing Engineering Group, Weinan 714000, China)

**Abstract:** With gradual development of urbanization and industrialization in china's loess plateau, the problem of soil pollution caused by acid and alkali solution in industrial wastewater and domestic sewage has become increasingly prominent. Meanwhile, the change of pH value from rain water caused by the evolution of atmospheric environment also results in the problem of soil pollution. The collapsibility of loess and the sensitivity of collapse are its unique properties, which have great influence on the engineering stability. The formation and occurrence of Q<sub>3</sub> loess have played an important role, but the intrusion of acid and alkali solution has a certain degree of change and recombination of loess cementation and structure. In order to study the effect of pore water pH on the collapsibility and sensitivity of Q<sub>3</sub> loess, the intact and remodeled loess samples were tested for collapsibility. The experimental results showed that the pollution of acid and alkaline solution will increase the collapsibility coefficient of loess, extend the settling time and rate of collapsing, and change the sensitivity of collapse. Furthermore, the effects of different concentrations of acid and alkali pollutants on the soil increased regularly as the concentration increased. Besides, the influence of different kinds of acid solution on the collapsibility and the sensitivity of the soil were also different. Based on this analysis, it is concluded that the influence of the collapsible change of loess polluted by acid and alkali should be considered in the engineering.

**Key words:** Q<sub>3</sub> loess; acid and alkali pollution; collapsibility; collapse sensitivity

黄土和黄土状土广泛地分布于世界各地。其中我国黄土高原所覆盖的黄土因其独特的地质成因和所表征的古气候环境学意义, 其空间分布特

征和工程影响都极具代表性。从岩土工程的长期稳定性角度出发, 由于黄土特殊的组构特点使得部分黄土具有增湿而产生的额外变形, 从而以湿

陷系数大小作为稳定性评价指标之一;另一方面,黄土的湿陷敏感性一般可认为是黄土浸水后发生湿陷的难易、快慢及大小的程度<sup>[1]</sup>,它与黄土的湿陷系数既有联系又有区别。因此对于黄土的湿陷性及其所引发的工程问题,专家学者进行了大量针对性的室内外试验<sup>[2-3]</sup>,理论分析<sup>[4-5]</sup>并且做出了相关的评价讨论<sup>[6]</sup>。同时,黄土的水敏演变结果也会产生其他相关的岩土工程问题,如:滑坡,地表开裂、地面沉降等。杜文举<sup>[7]</sup>就陕西新寨村滑坡进行了细致分析,得出了湿陷性黄土产生滑坡的工程地质条件和滑坡成因。张茂省<sup>[8]</sup>也对陕西吴起庙沟乡大岔村的大台滑坡的产生原因进行了分析,得出降水与黄土特殊的组构是造成滑坡的主要原因。Wu<sup>[9]</sup>通过室内试验进一步验证了雨水浸入与黄土边坡的稳定性之间的关系。因此,湿陷性不仅是黄土内在结构变化的外观体现,也是黄土地区地质灾害、工程灾害发生和整治的关键性因素。

随着近些年我国城市化进程和工业化的快速发展,黄土地区的环境污染现象尤其是对土地的污染问题变得越来越不容忽视。工厂排放的气体如果未经处置排入空气,将会直接改变大气降水的pH值<sup>[10]</sup>。若工业废水和生活污水直接排放到土壤当中,这些酸碱溶液进入土体与黄土中的物质发生物理化学反应,使得黄土的组构和成分都发生了变化,改变了黄土的物理力学性能、湿陷性及湿陷敏感性,进而放大了实际工程稳定性的不确定性。已有学者对该问题表现了极大的关注,并针对酸、碱污染土的压缩性质做过一些相关的试验研究,李琦等<sup>[11]</sup>和李相然等<sup>[12]</sup>通过室内试验分析了酸、碱污染对土体压缩性变化的影响,研究表明,酸、碱污染后土体压缩系数均产生变大的趋势。谌文武等<sup>[13]</sup>则利用SH技术加固污染黄土取得了较为满意的结果。Fan等<sup>[14]</sup>从孔隙水化学与力学的视角分析并讨论了黑方台地区的黄土滑坡事件。因此,分析该类污染黄土的工程性质以及探明其演变过程和发生机理,对于工程应急灾害处置,判明岩土工程失效原因有着重要的实际意义。

基于此,本文试验分别采用重塑黄土和原状黄土为测试土样,就酸碱溶液浓度和污染物种类对于黄土湿陷性影响进行分析研究,并对酸碱污染土样的湿陷性及湿陷敏感性变化规律进行对比分析,得出了酸碱溶液对黄土湿陷特征的影响规律,为水环境污染对黄土工程性质的影响提供数据资料和有益的参考。

## 1 试样制备及试验方法

### 1.1 试样的制备

试样用土分为两组:第一组为重塑黄土。取样点和制样过程见图1。

(1)黄土碾碎,烘干后过2 mm的标准筛。

(2)把质量浓度为5%、10%、15%的HNO<sub>3</sub>和NaOH加入到等质量的土体中,控制含水率均为20%,并做一组含水量相同的无污染土样作为对比。

(3)用保鲜膜将重塑污染土体封存静置7 d。采用标准击实方法,依据GB/T50123-1999土工试验方法,环刀制样。

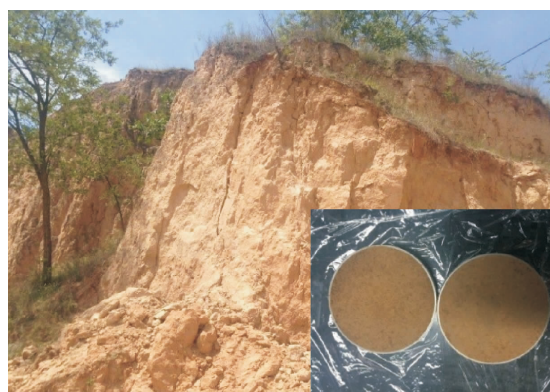


图1 试样取样与制备:庆阳取样点现场

Fig. 1 Remodeled soil samples

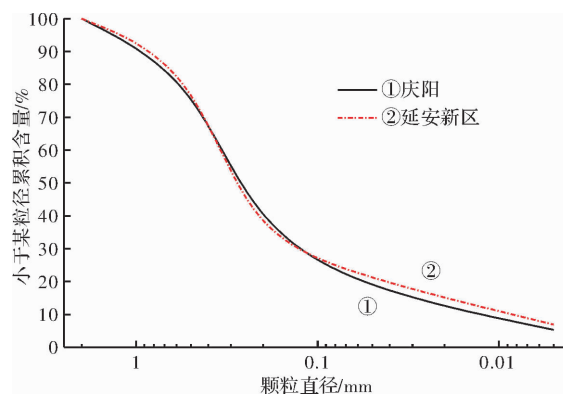


图2 原状黄土颗粒分曲线

Fig. 2 Particle size curve

第二组为原状黄土,分别取自甘肃省庆阳市和陕西省延安新区的某2个施工开挖现场,取土深度分别为3.8 m和4.5 m,如图1所示。

(1)现场取样后,用环刀制备试样土样。在土样表面均匀布点,每点注入等量污染液。控制污染液的质量浓度为10%,污染土样含水率为20%。

(2)用保鲜膜将土样放置入密封缸内,静置7天后进行湿陷系数测试试验。其中原状土天然含水率和黄土物理特性见表1。

表 1 Q<sub>3</sub> 黄土的基本物理指标  
Tab. 1 Physical properties of Q<sub>3</sub> loess

定名	天然孔隙比 $e_0$	天然含水率 $w/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	天然重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
粉质黄土	1.02~1.12	10.8~18.2	17~27.1	8.7~19.7	15.1~16.3

1.2 试验方法和设备

试验在室内常温下进行. 根据 GB/T 50123-1999 和 GB 50025-2004 推荐的土工试验方法标准.

(1) 第一组重塑黄土湿陷性系数测试试验采用单线法, 土样编号分组为无污染土、浓度为 5% 酸污染土、10% 酸污染土、15% 酸污染土、5% 碱污染土、10% 碱污染土和 15% 碱污染土. 每小组 5 个土样, 分别加压 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa. 每 30 min 读数 1 次, 直至表盘读数稳定(即每小时下沉量不大于 0.01 mm).

(2) 第二组原状黄土湿陷性系数测试试验采用双线法. 每个地区用浓度为 10% 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、HCL 和 NaOH 污染, 为避免含水率对实验数据造成影响, 保留一组天然含水率土样并做一组含水率为 20% 的增湿原状土样作实验对比进行湿陷性试验. 庆阳地区保留一组同浓度 HNO<sub>3</sub> 污染土样.

试验设备采用南京土壤仪器厂生产的 WG 型系列固结仪, 如图 3 所示. 湿陷系数由式(1)得出.

$$\delta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_0} \quad (1)$$

式中:  $\delta_s$  为湿陷系数( $\delta_s = 0.015$  是湿陷与否的评价标准);  $h_0$  为试样初始高度, mm;  $h_1$  为某级压力下试样稳定高度, mm;  $h_2$  为该级压力下浸水后试样稳定高度, mm.



图 3 室内湿陷系数测定试验  
Fig. 3 Collapsibility test

2 试验结果分析

2.1 污染重塑黄土湿陷系数特征

由图 4 可知, 受 HNO<sub>3</sub> 污染的土样在浸水前后湿陷系数变化明显, 呈“强软化型”趋势; 而受 NaOH 污染的土样浸水前后湿陷系数变化较平缓, 呈“弱软化型”趋势. 考虑到黄土的部分湿陷性是由于其大孔隙架空结构及土粒间胶结物质的破坏产生的, 结合已有试验结果和工程实例发现, 碱溶液对土体的腐蚀破坏力要比酸溶液小些<sup>[15-16]</sup>.

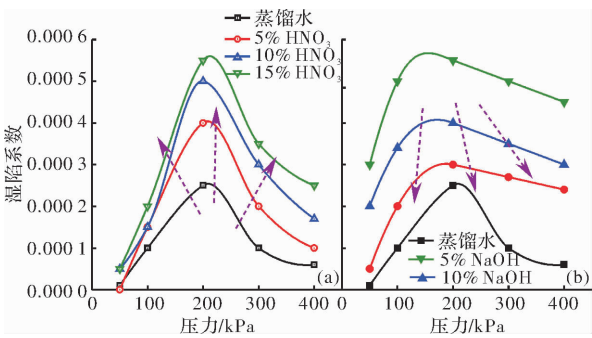


图 4 不同浓度污染重塑黄土湿陷系数与压力的关系

Fig. 4 Relationship between pressure and collapsibility coefficient of contaminated soil by different concentration

同时可见, 重塑条件下黄土的湿陷系数在受到酸碱溶液侵蚀下, 总体上在一个非常小的湿陷性系数范围内变化, 这是由于重塑作用挤密了黄土土样使其具有较小的孔隙比所导致. 污染土体的湿陷系数随着压力的增加都呈现出先增后减的趋势. 受到 HNO<sub>3</sub> 污染的土样随着溶液浓度的增加湿陷系数变大, 但是受到 NaOH 污染的土体却随着溶液浓度的增加反而逐渐变小. 重塑黄土受到 HNO<sub>3</sub> 腐蚀后, 虽然在制作土样过程中土体受到压实, 但随着盐分溶于水中, 形成了很多新的孔隙, 且随着酸的浓度增加, 盐量增加, 新孔隙会更大, 从而增大了湿陷系数. 与酸溶液污染相反, 受到 NaOH 溶液污染的土体随着碱浓度的增加湿陷系数逐渐变小. 唐大雄等<sup>[17]</sup> 指出碱污染土浸水后土体会发生膨胀, 且随着碱浓度的增加, 土体积膨胀的增加. 土样湿陷系数随着碱的浓度增加而减小可能是由于 NaOH 在腐蚀完胶结物质后与土中的物质反应生成新的盐类, 这些盐类可溶性较低. 随着溶液浓度的增加, 这些盐类填充进入被腐蚀

的孔隙中,土样趋于密实的程度呈增长趋势,表明高浓度对土样的密实作用要强于低浓度<sup>[18]</sup>。

重塑土在制样过程中通过人工击实,已基本失去湿陷性,但是仍可以得出湿陷系数受酸碱溶液污染发生改变的结论。为进一步研究酸碱污染对原状黄土湿陷性的危害及影响,课题组选取陕北和陇东的原状黄土进行湿陷性试验。

## 2.2 污染原状黄土湿陷系数特征

如图5所示,原状黄土经过湿陷性试验得出的湿陷系数随压力增加而变化的曲线图。未经预处理的原状土样、含水率与污染土一样为20%的增湿原状土样湿陷曲线基本重合且湿陷性系数均未达到湿陷界限值0.015,而受到酸碱污染的土样随着压力的增长都先后突破了0.015,发生了湿陷变形,使得原状黄土的湿陷性判定结果从不湿陷性转向中等湿陷性。进一步的,酸碱溶液对粉质黄土的侵蚀,使得黄土的湿陷起始压力也大幅度减小,在图5中显示为与 $\delta_s = 0.015$ 直线的交点左移。

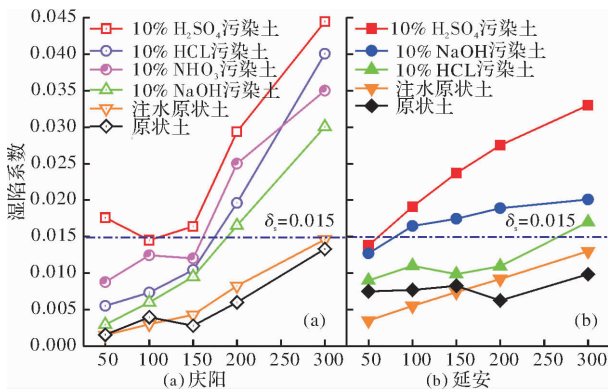


图5 不同污染源下的湿陷系数与压力关系示意图

Fig. 5 Relationship between pressure and collapsibility coefficient of different concentrations solutions

## 2.3 污染黄土的湿陷敏感性特征

如图6所示,试验结束后烘干土样。随着污染溶液浓度的增加,土样的颜色也随之加深呈棕红色。未经过污染土样烘干后,依然保持土样原色,对比分析有助于我们肉眼观察土体的污染情况。同时结合式(2)和式(3)对试验后的土样孔隙比进行分析,得出图7为受酸碱污染后土样孔隙比在各级压力下与初始孔隙比之间的关系曲线。受到酸碱溶液污染的土样孔隙比与初始孔隙比的比值在压力作用下随着压力的增加而减小。随着酸浓度的增加孔隙比变大,随着碱浓度的增加孔隙比变小。这一结果与湿陷系数随酸碱浓度变化规律一致。

$$e_0 = \frac{d_s(1 + w_0)\gamma_w}{\gamma_0} - 1 \quad (2)$$

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0}(1 + e_0) \quad (3)$$

式中: $e_0$ 为初始孔隙比; $d_s$ 为颗粒的相对比重,文中取2.71; $w_0$ 为初始含水率; $\gamma_w$ 为水的重度; $\gamma_0$ 为土体重度; $e_i$ 为该级压力下的孔隙比; $\Delta H$ 为试样压缩量; $H_0$ 为试样初始高度。



图6 室内湿陷性系数试验后土样烘干表面

Fig. 6 The indoor collapsibility of loess samples after drying

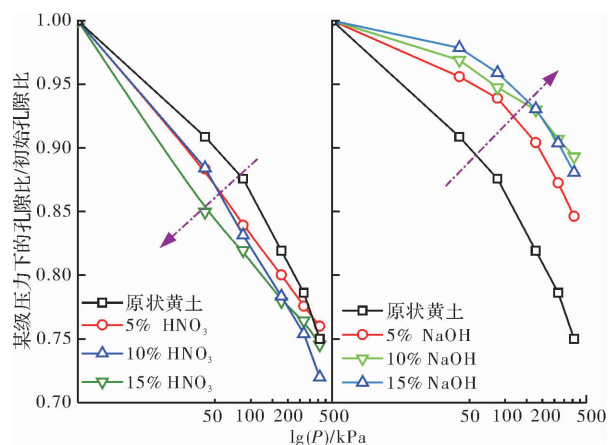


图7 各级压力下孔隙比与初始孔隙比的比值变化示意图

Fig. 7 The relationship of ratio between void ratio at different pressure and initial void ratio

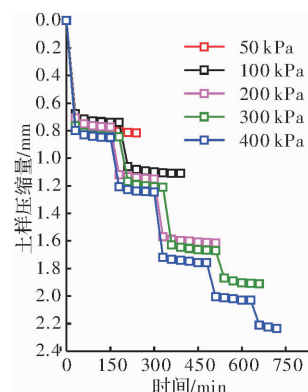


图8 无污染重塑土压缩稳定高度与时间的关系曲线

Fig. 8 Relationship between compression and time of non-contaminated remodeled loess

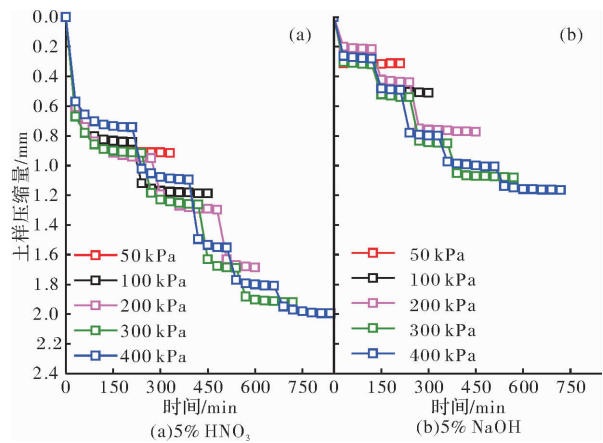


图 9 5%浓度的 HNO<sub>3</sub>和 NaOH 溶液重塑土压缩稳定高度与时间的关系曲线

Fig. 9 Relationship between compression and time of 5% HNO<sub>3</sub> and NaOH contaminated remodeled loess

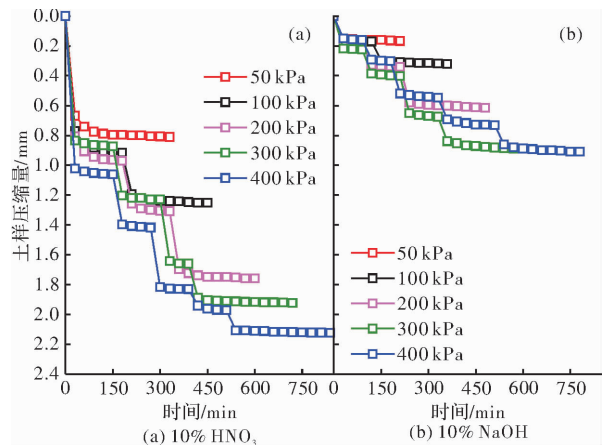


图 10 10%浓度的 HNO<sub>3</sub>和 NaOH 溶液重塑土压缩稳定高度与时间的关系曲线

Fig. 10 Relationship between compression and time of 10% HNO<sub>3</sub> and NaOH contaminated remodeled loess

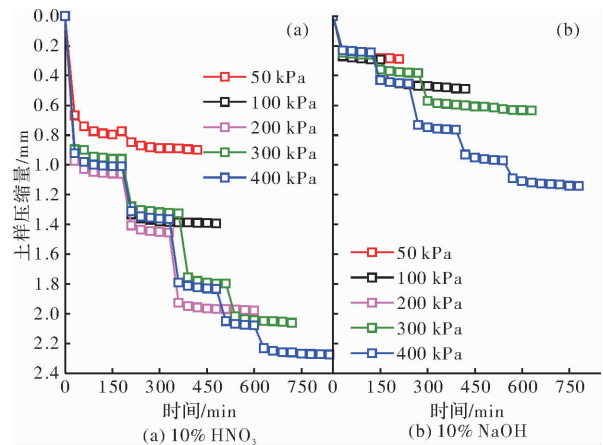


图 11 15%浓度的 HNO<sub>3</sub>和 NaOH 溶液重塑土压缩稳定高度与时间的关系曲线

Fig. 11 Relationship between compression and time of 15% HNO<sub>3</sub> and NaOH contaminated remodeled loess

表 2 各级压力下酸污染土样稳定时间  
Tab. 2 Steady time of soil samples contaminated with acid under different pressure

时间 /min	无污染	5% HNO <sub>3</sub>	10% HNO <sub>3</sub>	15% HNO <sub>3</sub>	5% NaOH	10% NaOH	15% NaOH
50 kPa	240	330	330	420	210	210	210
100 kPa	390	450	450	480	300	360	420
200 kPa	510	600	600	600	480	480	630
300 kPa	660	720	720	720	570	600	660
400 kPa	720	840	840	840	720	780	780

由图 8~11 中可以看出, 重塑土样在各级压力下的稳定过程及稳定量随时间的变化关系, 随着 HNO<sub>3</sub> 和 NaOH 溶液质量浓度的增加, 各级压力作用下的土样湿陷稳定时间大多都表现出延滞的趋势, 从表 2 中可以进一步看出酸污染土稳定时间始终比无污染土长, 而碱污染土在低浓度时湿陷稳定时间要短于无污染土样, 随着溶液浓度的增加稳定时间才逐渐接近无污染土样。

图 12 为原状 Q<sub>3</sub> 黄土在各级压力下受到不同污染液的湿陷稳定时间与土样压缩高度的变化图。可见 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液对原状土样的稳定时间影响最大, 而 NaOH 溶液反向减小了稳定时间。对比表 3 可知, 对比原状土样和增湿后的原状土样, 增湿会使稳定时间增长; 对比原状土样和碱液污染, 碱液减小了稳定时间; 对比原状土样和酸液污染, 酸液则增加了稳定时间。

表 3 各地原状土样稳定时间  
Tab. 3 Steady time of undisturbed soil samples from different places

时间 /min	原状土	增湿 原状土	NaOH	HCL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HNO <sub>3</sub>
庆阳	690	690	600	780	810	720
延安	630	660	570	660	1080	—

### 3 讨论

出于工程安全的角度, 工业厂房或民用建筑需修建在完全消除(或部分消除)湿陷性的黄土地基上<sup>[19]</sup>, 但如果遇到酸雨或者酸碱废液渗漏至已经消除湿陷性的黄土地基中, 尽管在本试验中黄土的湿陷性系数变化不大, 但稳定时间会发生明显的变化。结合水溶液的化学成分变化的不确定性, 这对黄土场地的工程质量可能会造成一定的损伤, 尤其是在高压力段的长期稳定性判定中,

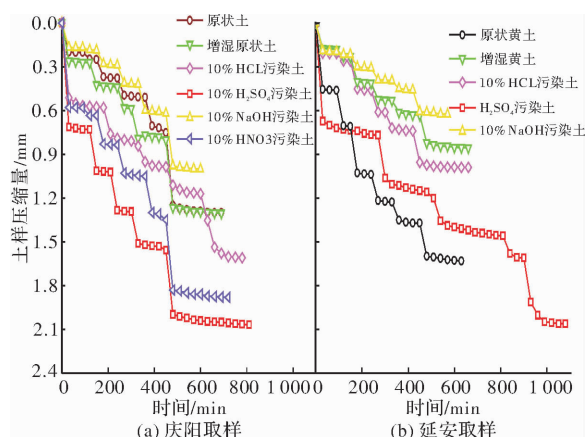


图 12 污染原状土样压缩稳定高度与时间的关系曲线

Fig. 12 Relationship between compression and time of contaminated intact loess

仍需进行下一步针对性的研究。其次,在边坡工程和黄土斜坡地质灾害整治中,宜把此类污染黄土的湿陷性造成的危害作为影响斜坡稳定的重要条件考虑。从原先判定的不湿陷性黄土越级成为湿陷性土层,湿陷起始压力也逐渐减小。原状黄土的初始结构性对孔隙水化学溶液的敏感,会使得斜坡土层内部的应力重分布和结构重组,甚至在较小的自重应力作用下产生湿陷变形,从而诱发斜坡的长期演变致灾和支挡结构的受力重分布。

## 4 结论

本文通过对重塑与原状两种不同状态的  $Q_3$  黄土进行室内湿陷性系数测定试验,得到以下几点结论:

(1) 对于标准击实下的重塑黄土而言,受  $HNO_3$  污染的土样在加压后湿陷系数变化明显,而受  $NaOH$  污染过的土体加压后湿陷系数变化较平缓。污染土体的湿陷系数随着压力的增加都呈现出先增后减的趋势。受到  $HNO_3$  污染的土样随着酸浓度的增加湿陷系数呈现“强软化型”趋势,而受到  $NaOH$  污染的土体随着碱浓度的增加湿陷系数呈现“弱软化型”趋势;

(2) 原状  $Q_3$  粉质黄土的孔隙水酸碱污染,会产生湿陷性系数增大的结果,使得原先评价结果为不湿陷的黄土变为湿陷性。同时,也使湿陷起始压力减小;

(3) 污染黄土在各级压力下的稳定时长及稳定量,随着酸溶液浓度的增加而增加,随着碱溶液浓度的增加而减小。各级压力作用下土样的湿陷速率随着浓度的增大而增大。

(4)  $H_2SO_4$  污染的土样湿陷系数在各级压力下都是最大的,湿陷系数在各级压力下最小的为注

水及原状土样。 $H_2SO_4$  污染的土样在浸水后稳定时间基本最长。

## 参考文献 References

- [1] 胡再强,张耀,岳温青,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 Zaiqiang, ZHANG Yao, YUE Wenqing, 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.
- [2] 黄雪峰,杨校辉.湿陷性黄土现场浸水试验研究进展[J].岩土力学,2013,34(S2):222-228.  
HUANG Xuefeng, YANG Xiaohui. A study progress on in-situ soaking test on collapsible loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 222-228.
- [3] 方祥位,申春妮,李春海,等.陕西蒲城  $Q_2$  黄土湿陷变形特性研究[J].岩土力学,2013,34(S2):115-120.  
FANG Xiangwei, SHEN Chunni, LI Chunhai, et al. Collapsible deformation properties of  $Q_2$  loess in Pucheng of Shaanxi province [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 115-121.
- [4] 高国瑞.黄土显微结构分类与湿陷性[J].中国科学,1980,23(12):1203-1208.  
GAO Guorui. Microstructure classification and collapsibility of loess [J]. China Science, 1980, 23(12): 1203-1208.
- [5] 雷祥义.中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J].中国科学(B辑),1987,17(12):1309-1318.  
LEI Xiangyi. The pore type and collapsibility of the Loess in China [J]. China Science (B), 1987, 17(12): 309-1318.
- [6] 姚志华,黄雪峰,陈正汉,等.关于黄土湿陷性评价和剩余湿陷量的新认识[J].岩土力学,2014,35(4):998-1006.  
YAO Zhihua, HUANG Xuefeng, CHEN Zhenhan, et al. New recognition of collapsibility evaluation and remnant collapse of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 998-1006.
- [7] 杜文举,景淑媛.陕西新寨村湿陷性黄土滑坡的治理分析[J].西华大学学报(自然科学版),2012,31(5):91-96.  
DU Wenju, JING Shuyuan. Analysis of the governance for collapsible loess landslides in Xinzhai of Shaanxi Province [J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2012, 31(5): 91-96.
- [8] 张茂省,李同录.黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J].工程地质学报,2011,19(4):530-540.

- ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess land-slides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540.
- [9] WU L Z. Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure [J]. Catena, 2017, 150: 1-8.
- [10] 王位泰, 黄斌, 姚玉璧, 等. 陇东黄土高原城市酸雨特征监测统计分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 44-49.
- WANG Weitai, HUANG Bin, YAO Yubi, et al. Statistic analysis of arid rain character in loess plateau city of Longdong [J]. Arid Meteorology, 2005, 23(2): 44-49.
- [11] 李琦, 施斌, 王有诚. 造纸厂废碱液污染土的环境岩土工程研究 [J]. 环境污染与防治, 1999, 19(5): 16-18.
- LI Qi, SHI Bin, WANG Youcheng. Environmental-geotechnical properties of soils contaminated by waste alkaline liquor from paper mills [J]. Environmental Contamination and Prevention, 1997, 19(5): 16-18.
- [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 Xiangran, YAO Zhixiang, CAO Zhenbin. 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] 湛文武, 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.
- CHEN Wenwu, LIU Hongwei, ZHANG Qiyong. Compressive strength properties of soil polluted by acid and alkali consolidated by SH [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(3): 422-428.
- [14] FAN X, XU Q, SCARINGI G, et al. A chemo-mechanical insight into the failure mechanism of frequently occurred landslides in the loess plateau, Gansu province, China [J]. Engineering Geology, 2017, 228: 337-345.
- [15] 张信贵, 易念平, 吴恒, 等. 不同 pH 水环境下土体变形特性的试验研究[J]. 高校地质学报, 2006, 12(2): 242-248.
- ZHANG Xingui, YI Nianping, WU Heng, et al. Laboratory test for soil deformation properties in solutions with various pH values [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(2): 242-248.
- [16] 朱春鹏, 刘汉龙. 酸碱污染软黏土变形性质的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 31(10): 1559-1563.
- ZHU Chunpeng, LIU Hanlong. Triaxial tests on deformation characteristics of soft soils polluted by acid and alkali [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 31(10): 1559-1563.
- [17] 唐大雄, 刘佑荣. 工程岩土学[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 1999: 36.
- TANG Daxiong, LIN Yourong. Rocks and soils engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 36.
- [18] 王栋. 碱环境污染土的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学. 2009.
- WANG Dong. Experimental study on alkali polluted soil [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology. 2009.
- [19] 崔月娥. 关于黄土湿陷敏感性问题探讨[J]. 煤炭工程, 2010(8): 76-78.
- CUI Yue'e. Discussion on the issue of sensitivity of loess collapse [J]. Coal Engineering, 2010(8): 76-78.

(编辑 桂智刚)