

DOI: 10.11779/CJGE201804012

# 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究

张 耀, 胡再强\*, 陈 昊, 李 冰, 宋朝阳

(西安理工大学土建学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 提出了黄土结构改良的概念, 即将黄土的天然属性——湿陷性和震陷性看作不良属性, 对这种不良属性的消除实质上是对黄土固有属性的优化。在此基础上, 采用化学方法改良了黄土的结构, 即利用酸能溶解碳酸钙的特性, 迅速有效的破坏黄土内部的不良孔隙结构, 并通过电镜扫描的观察, 分析了在不同压力下, 不同浓度的乙酸溶液对湿陷性黄土的结构改良情况。试验结果表明: 低压下, 由于乙酸的作用, 黄土的结构得到了显著改善; 高压下, 由于压力已经破坏了黄土的孔隙结构, 乙酸的作用效果并不明显。又通过饱和压缩试验和固结快剪试验验证了乙酸溶液对黄土结构的改良效果: 在同等压力条件下, 经过乙酸溶液处理过的黄土发生二次湿陷或多次湿陷的可能性和危害性都较小, 并且具有较高的抗剪强度。最后, 指出了这一研究成果在现实应用中的可能: 在预浸水法中添加适量的乙酸可以显著改善处理效果; 能够为被酸性废水污染的黄土上的岩土工程建设及相关研究提供有价值的参考。

**关键词:** 不良属性; 乙酸; 碳酸钙胶结; 孔隙结构; 电镜扫描

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)04-0681-08

作者简介: 张 耀(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事黄土力学与工程方面的研究。E-mail: 75330458@qq.com。

## Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions

ZHANG Yao, HU Zai-qiang, CHEN Hao, LI Bing, SONG Zhao-yang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The concept of loess structure improvement is put forward in this study. It refers to the concept that the collapsibility and seismic subsidence are poor engineering properties for loess, and their elimination is essentially the optimization or evolution of the loess intrinsic quality. On this basis, a chemical method to improve the loess structure is proposed, i.e., using acid to dissolve calcium carbonate to destroy the pore structure quickly and effectively. The structure evolution of collapsible loess under different pressures in different concentrations of acetic acid solution is observed and analyzed by the scanning electron microscope (SEM). The tests results indicate that the structure of loess is improved due to the acetic acid under low pressures, while the effect of acetic acid is not obvious under high pressures because of the previous complete elimination of the pore structure. In addition, the saturated compression tests and consolidated quick shear tests are carried out to verify the effect of the evolution of loess structure treated with acetic acid. The results indicate that the loess treated with acetic acid has a smaller possibility and perniciousness of secondary or multiple collapse and a higher shear strength under the same pressures. Finally, two practical applications of this research are put forward. One is that, if adding some acetic acid, the construction effect of pre-soaking method can be notably improved. The other one is that the research results can provide valuable reference for the geotechnical engineering construction on the loess polluted by acidic waste water and other related special studies.

**Key words:** poor property; acetic acid; calcium carbonate cement; pore structure; scanning electron microscope

## 0 引言

黄土作为一种典型的结构性土, 在中国和世界其他国家都有着广泛的分布<sup>[1-2]</sup>。然而, 黄土特殊的结构性使其具有不同于同一时期其他沉积物的独特性质——湿陷性和震陷性<sup>[3]</sup>。这些不良特性往往给修建在黄土地基上的建筑物带来严重的危害。黄土的结构性主要在于其孔隙比大、密度低、碳酸钙含量高的特点<sup>[4]</sup>。这样的结构特点使黄土具有较大的压缩空间,

在受到特殊外力作用, 例如浸水或者地震时, 就会发生湿陷或者震陷。当黄土受水浸润的时候, 土中的可溶盐会被溶解, 盐晶胶结会被削弱, 基质吸力也同时降低, 致使黄土强度骤然降低, 土体中的微小颗粒物滑落到大孔隙内, 从而发生结构破坏, 这是湿陷发生

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程重点实验室项目(2014Szs15-Z02)

收稿日期: 2016-12-19

\*通讯作者 (E-mail: huzq@xaut.edu.cn)

的机理<sup>[5-7]</sup>。当黄土场地受到地震影响时, 地震在短时间内产生的动应力超过土体颗粒之间的连接所能承受的最大应力强度时, 土体结构也会遭到破坏从而发生垮塌, 这是震陷发生的机理<sup>[3]</sup>。由此可见, 黄土特殊的结构是其致灾的根本原因, 因此, 对其细、微结构的研究更能从本质上了解和改进它的宏观属性。

正如土力学的奠基人Terzaghi指出的“在评价岩土体的工程性质时, 应注重考虑其微结构的必要性”。如今, 这样的思想已深入人心, 国内外的岩土研究者也按照这一思想, 通过各种手段对岩土体的微结构展开了深入的研究。较典型的有: Tovey<sup>[4]</sup>首次用电子显微镜对天然黏性土的结构进行了观察和研究。Seed等对人工重塑黏性土的结构性进行了研究, 并指出土结构性的实质是土中颗粒物质的排列与组合<sup>[5]</sup>。Michell提出了土的结构性的定义, 并详细阐述了结构性的概念和结构损失的机理, 等等<sup>[6]</sup>。中国关于岩土结构性的微观研究从20世纪50年代开始也有了蓬勃的发展。林崇义用显微镜对土的连接特性和排列特性进行了研究, 提出了土受外荷作用破坏时, 本质是土结构的渐进式破坏, 是原生结构的消失和次生结构的产生的过程<sup>[7]</sup>。陈守义通过电子显微镜对黏土矿物微结构的研究指出岩土体的节理、裂隙的发育是微结构破坏在宏观上的表现<sup>[8]</sup>。高国瑞通过电子扫描照片对黄土结构的特点做了较详尽的阐述, 并按照颗粒形态、排列状况、连接形式对其微结构作了系统的划分<sup>[9-10]</sup>, 等等。但是, 这些研究成果都是对于岩土体固有结构特点(包括如何形成和破坏等)的研究, 尚未有一种方法是基于改善岩土体结构的研究。

谢定义等曾指出“土的结构对土性有着最本质的影响”, 因此“改善土的结构(加密排列和增强连接)才是改善土力学性质的根本途径”<sup>[11]</sup>。黄土作为一种典型的区域性土, 有着独特的结构特征, 而这种结构特征引起的黄土地基的湿陷、震陷及液化现象严重的威胁着人民的经济及生命安全。所以, 将黄土的这种天然结构属性看作一种不良属性, 对这种不良属性的改良即是对黄土内在结构的优化, 进而使黄土的工程属性得到提高。中国黄土的结构性自西北至东南呈递减性的变化, 外在原因是受到物质来源、搬运动力、地形地貌、气候条件等因素的影响和选择<sup>[12]</sup>, 但实质

是其内部含水量和外部压力的作用(物理作用)不同程度的破坏了土体中的碳酸钙颗粒及微晶体, 导致土体的架空结构不同程度的瓦解, 最终使得其结构性的表现不同。本文以破坏黄土中由碳酸钙等盐晶颗粒造成的孔隙结构, 从而使得黄土的结构得到重组和增强这一理论为基础<sup>[11, 13-14]</sup>, 借助化学方法更有效的改善了黄土的结构。本文利用酸性溶液能迅速溶解碳酸钙等盐晶胶结, 从而使黄土的不良结构——大孔隙结构能更容易的破坏这一特性, 研究了酸性溶液对黄土结构的改良效果。本文对在不同压力, 用不同浓度的乙酸溶液处理过的湿陷性黄土作了电镜扫描试验, 从细、微观角度观察了不同应力条件下黄土的结构变化情况, 分析了其机理, 并通过室内试验(饱和压缩试验和固结快剪试验)验证了改良效果, 最后指出了这一研究成果在实际应用中的可能。

## 1 试验材料及试验方法

### 1.1 试验材料

#### (1) 土样

试验所用土样取自西安北郊某基坑黄土, 取土深度为3.8~4.5 m。该黄土系马兰黄土, 呈黄色, 湿陷系数为0.062, 湿陷性属中等。其他物理参数指标, 详见表1。

#### (2) 溶液

处于对安全和环保问题的考虑, 本文选择了乙酸作为溶液添加剂。乙酸是一种有机酸, 系食用醋的主要原料。本文配制了1 mol/L和2 mol/L的乙酸溶液, 将土样用1 mol/L和2 mol/L的乙酸溶液浸泡3 d后取出, 然后按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)30.0.5制备土壤浸出液, 用pH计测试试验前溶液及试验后土壤浸出液的pH值。1 mol/L和2 mol/L的乙酸溶液的pH测试值分别为2.68和2.44, 被处理过的土样浸出液的pH测试值分别为5.05和4.65, 均在可以接受的范围内(食用醋的pH值为3左右, 地下水的pH值一般为5~8)。

### 1.2 试验方法

本文对该湿陷性黄土做了在不同压力下, 用不同溶液浸入的湿陷试验, 并用扫描电子显微镜(SEM)观察了其结构变化情况, 具体步骤如下:

表1 黄土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of loess

相对密度	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	孔隙比/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	碳酸钙含量/%	颗粒含量/%		
								>0.05	0.05~0.005	<0.005
2.71	1.31	15.1	1.08	29.9	19.7	10.3	11.22	35.49	60.88	3.63

(1) 取12个湿陷性黄土样, 分为4组, 每组3个试样分别在固结仪上施加50, 200, 800 kPa的荷载。

(2) 待上述试样加压稳定后(每小时变形量不大于0.01 mm), 再在固结仪的注水槽中对其中3组试样分别浸入蒸馏水、1 mol/L和2 mol/L的乙酸溶液。

(3) 待上述试样变形稳定后(每小时变形量不大于0.01 mm), 取出土样, 连同一个原状土样风干。

(4) 将这些风干的土样削成直径小于8 mm, 高度在8~13 mm的SEM试样, 将其镀金后用电子显微镜观察试样在不同应力条件(不同压力、不同酸性溶液)下的细、微观结构情况。

## 2 试验结果与分析

图1(a)~(c)为土样在风干后, SEM试样的放大图片。从图1(a)、(b)中可以明显看出, 原状湿陷性黄土的孔隙比较大, 随着作用压力从50 kPa逐步增大到800 kPa, 土中的大孔隙逐渐减少, 土样被逐步的压密。本文分析如下: 在较低的压力下, 黄土自身的结构强度能够抵抗上部的荷载, 黄土得不到压密。但是当上覆荷载增大到黄土的屈服强度以上时, 黄土的结构强度就不能再抵抗上部荷载, 土样就会得到较充分的压密。图2(a)~(c)为原状土样、50 kPa和800 kPa压缩土样的50倍放大图像, 图中可以看到原状土样颗粒粒径较大, 颗粒间孔隙也较多, 压实性欠佳。50 kPa压缩土样的压实性也无明显改善, 但是800 kPa压缩土样则明显不同, 颗粒细小且密实, 几乎观测不到大孔隙的存在, 说明土样得到了较充分的压密。这一现象证明了黄土是一种结构性较强的土, 土体中以碳酸钙为主要成分的盐晶胶结具有一定的强度, 但是足够大的压力可以破坏这种盐晶胶结连接, 使得土中的大、中孔隙结构破坏, 大、中孔隙周围的颗粒填充至孔隙中去, 孔隙被填实, 架空孔隙结构逐步变为镶嵌结构。同时, 粒径较大的团粒也被挤压成粒径更细小的颗粒, 填充到更小的孔隙中, 从而使得土样被充分压密。但是图2(d)800 kPa压缩土样的1000倍放大图像中可以看到土样中还存在不少约10  $\mu\text{m}$ 左右的小孔隙, 这也就意味着土样还有进一步压缩的空间。这一结论与沈珠江和Vilar1 and Rodrigues等认为的足够大的压力可以破坏黄土的大孔隙结构的观点一致<sup>[15-16]</sup>。

图1(b)中可以看到50 kPa下, 浸入不同的溶液后, 土样的压密情况。50 kPa下, 浸入水溶液后, 土样的大孔隙没有明显减少, 但是在1 mol/L的乙酸溶液中, 土样的大孔隙减少的较多, 2 mol/L的乙酸溶液中,

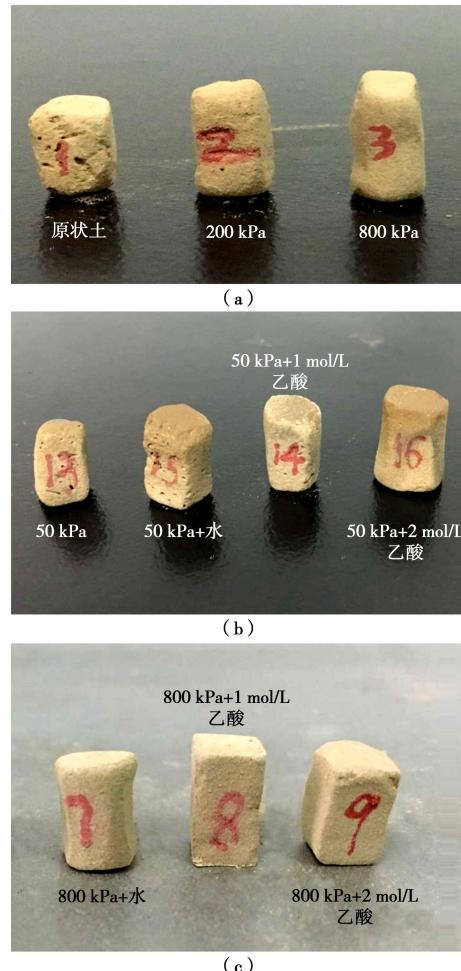
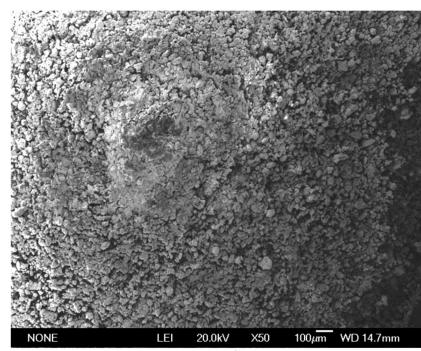
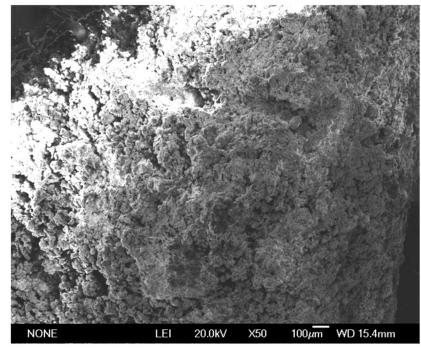


图1 部分SEM试样的照片

Fig. 1 Some samples for SEM tests



(a) 原状土



(b) 50 kPa

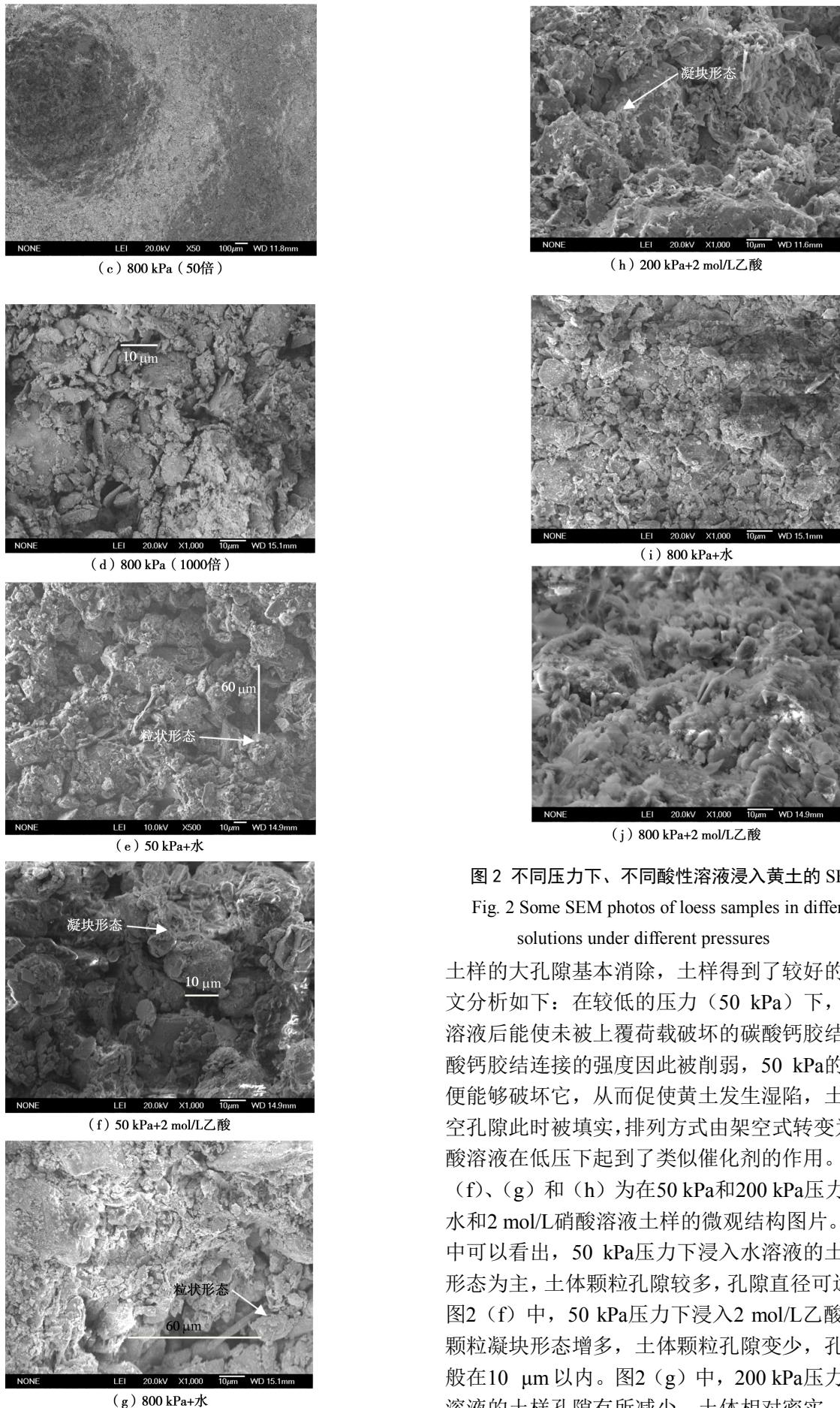


图 2 不同压力下、不同酸性溶液浸入黄土的 SEM 图片

Fig. 2 Some SEM photos of loess samples in different acid solutions under different pressures

土样的大孔隙基本消除，土样得到了较好的压密。本文分析如下：在较低的压力（50 kPa）下，加入乙酸溶液后能使未被上覆荷载破坏的碳酸钙胶结溶解，碳酸钙胶结连接的强度因此被削弱，50 kPa的压力此时便能够破坏它，从而促使黄土发生湿陷，土体内的架空孔隙此时被填实，排列方式由架空式转变为镶嵌式。酸溶液在低压下起到了类似催化剂的作用。图2 (e)、(f)、(g) 和 (h) 为在50 kPa和200 kPa压力下，浸入水和2 mol/L硝酸溶液土样的微观结构图片。图2 (e) 中可以看出，50 kPa压力下浸入水溶液的土样以粒状形态为主，土体颗粒孔隙较多，孔隙直径可达60 μm。图2 (f) 中，50 kPa压力下浸入2 mol/L乙酸溶液土样颗粒凝块形态增多，土体颗粒孔隙变少，孔隙粒径一般在10 μm以内。图2 (g) 中，200 kPa压力下浸入水溶液的土样孔隙有所减少，土体相对密实，但仍有大

孔隙存在, 图中的孔隙直径为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 。图2 (h) 中, 200 kPa压力下浸入2 mol/L乙酸溶液的土样凝块形态较多, 土体排列方式为镶嵌式, 几乎看不到孔隙的存在。由此, 可以看出在较低的压力下, 加入乙酸溶液可以使黄土的结构形式得到显著的改善, 从而使得土样发生湿陷或者震陷的可能性和危害性都降低。

图1 (c) 中可以看到800 kPa下, 浸入不同的溶液后土样的压密情况。800 kPa下, 浸入3种溶液的风干土样都看不到明显的大孔隙, 土样的压实情况都很好。本文分析如下: 在高压下, 黄土中的碳酸钙胶结在浸水前已经被破坏, 土样中的大孔隙在高荷载下被较彻底的消除, 而这时土的含水率没变, 基质吸力仍然存在, 浸水后, 基质吸力的迅速消失造成了土体结构强度的迅速减弱, 土体在上覆高荷载下被进一步压密, 较大孔隙便得到了进一步的消除<sup>[17-20]</sup>。因此, 乙酸能使碳酸钙迅速溶解的“催化”优势在高压力下无法显现。图2 (i) 和 (j) 为800 kPa压力下, 浸入蒸馏水和2 mol/L乙酸溶液土样放大1000倍的图片。图中浸入蒸馏水的土样虽然没有凝块形态的物质, 但是它的压密效果和浸入2 mol/L乙酸溶液的土样效果一样, 都不存在架空孔隙结构。高国瑞指出, 架空孔隙结构是造成黄土湿陷和震陷的前提条件<sup>[9-10]</sup>, 由此可以判断这两种条件处理过的土样都具备良好的工程性质, 不会再发生湿陷或者震陷。

### 3 黄土结构改良效果的检验

#### 3.1 饱和变形试验

较早前, 人们一直以为黄土一旦浸水发生湿陷, 就不会再湿陷了。但如今, 二次湿陷或者多次湿陷的概念已经被众多学者所接受。二次湿陷或者多次湿陷指的是在增湿和增压的条件下, 黄土再次发生湿陷的状况<sup>[21]</sup>。沈珠江指出, 易溶盐和难溶盐的彻底溶解需要较长时间, 如果不能将其彻底溶解, 多次浸水后仍会有一定的湿陷变形。另外, 如果外加荷载很小, 不足以破坏土里的盐晶胶结, 即使浸水饱和, 也很难让其发生湿陷<sup>[16, 22-23]</sup>。其实这就是发生二次湿陷或者多次湿陷的机理。只有当外界荷载足够大, 饱和浸水的条件下黄土才能发生彻底的湿陷, 否则湿陷潜能不能完全释放, 多次浸水或者加压就会发生二次湿陷或者多次湿陷。如图2 (g) 所示, 在200 kPa压力下(相当于约10 m厚的饱和黄土的重度), 浸入蒸馏水溶液的土样还有较大孔隙的存在, 这就意味着如果在这样的土层上建筑房屋或其他建筑物, 因为荷载增大, 浅层黄土层还有架空孔隙的存在, 再次受雨水浸入时, 还会发生湿陷。中国的《湿陷性黄土地区建筑技术规范》

(GB50025—2004) 上指出常规预浸水法不能完全消除6 m以上土层的湿陷性。

为了验证经过乙酸溶液处理过的土样具有更好的压密性, 发生二次湿陷或多次湿陷的可能性和危害性都较小, 本文做了在不同压力下, 用3种溶液浸入后土样的饱和变形试验。试验步骤如下: 取9个湿陷性黄土土样, 平均分为3组, 重复SEM试验(1)和(2)的步骤。待试样变形稳定后, 再将土样按照100, 200, 400, 800, 1600 kPa的顺序逐级加压。每级加压稳定后(每小时变形量不大于0.01 mm), 记录饱和变形量。试验结果如图3所示。

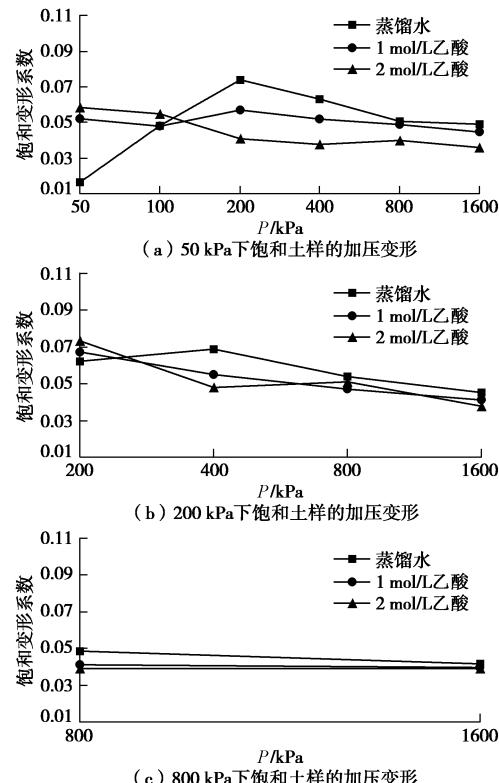


图3 不同压力下、不同酸性溶液浸入土样的饱和变形系数

Fig. 3 Comparison of saturation deformation coefficient under different pressures in different acid solutions

图3 (a)、(b) 为在50 kPa和200 kPa压力下, 土样浸入3种溶液发生湿陷后, 再次增加压力变形的数据图。图中, 初始注入3种溶液时, 湿陷变形系数都是2 mol/L乙酸>1 mol/L乙酸>蒸馏水。但是在土样饱和后再加压的情况下, 土的饱和变形(剩余湿陷变形+压缩变形)的结果是加入蒸馏水的大于加入乙酸溶液的。出现这样的情况的主要原因是: 相比较浸入蒸馏水的土样, 浸入乙酸的土样, 在水力耦合及乙酸的“催化”作用下, 已将土中较多的盐晶胶结破坏, 土样得到了更充分的压密, 如图2 (e)、(f)、(g)、(h) 所示, 所以再次施加压力时, 土样的变形就相对较小。这也就

证明了同等压力条件下被乙酸处理过的黄土再次发生湿陷的可能性和危害性都较小。图3(c)中800 kPa下的湿陷变形为,蒸馏水>1 mol/L乙酸>2 mol/L乙酸,其原因主要是在给土样施加800 kPa压力的时候,黄土中的碳酸钙胶结在(浸水前的)高压力下已发生了彻底的破坏,土样已经得到了充分压缩,预浸2 mol/L乙酸的土样压缩变形系数为0.245,远高于预浸水和1 mol/L乙酸的土样的0.2和0.225,从而致使预浸2 mol/L乙酸的土样后期浸入溶液发生湿陷时,变形较小。当压力增大到1600 kPa时,三者的饱和变形系数又几乎相等。这与前面分析的乙酸在高压下的“催化”效果不明显相一致。

### 3.2 固结快剪试验

土的抗剪强度对于修建在土体上的建筑物的稳定性是至关重要的,为了探究乙酸处理过的土样是否具有更好的抗剪强度,本文又做了不同压力、不同溶液条件下的固结快剪试验。试验步骤如下:取12个土样,平均分为3组,装入直剪仪,在直剪仪的水槽中分别注入蒸馏水、1 mol/L和2 mol/L的乙酸溶液。浸泡3 d后,待土样充分饱和后,对土样分别施加50,100,200,400 kPa的压力。当饱和变形稳定后(每小时变形量不大于0.01 mm),对土样以1.2 mm/min的速率进行剪切,并记录测试数据。试验结果如图4所示。

图4是浸入蒸馏水土样的固结快剪试验的强度曲线的结果,其结果与其他一些研究者的一致<sup>[24-25]</sup>。但是本次用1 mol/L乙酸和2 mol/L乙酸做的土样的强度曲线略高于蒸馏水条件下的强度曲线。由库仑强度抗剪公式 $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ 可知,在同等压力下,土的抗剪强度由土的黏聚力和内摩擦角决定,而此次试验抗剪强度的提高主要是因为黏聚力的提高,如图4所示,土的黏聚力由水的0 kPa增长到了1 mol/L乙酸溶液的3.7 kPa和2 mol/L乙酸溶液的4.5 kPa,而内摩擦角变化不大,分别为26.5°,26.2°和26.4°。土的黏聚力可分为原始黏聚力和固化黏聚力,原始黏聚力来源于颗粒间的静电力和范德华力<sup>[26]</sup>。因此,同一种土,密度越大,原始黏聚力就越大。如图1(b)及图2(e)、(f)、(g)、(h)所示,在较低的压力作用下,被乙酸处理过的土样的密度是要显著高于用蒸馏水处理过土样的密度的。当乙酸使得土样中的易溶盐、中溶盐及接近溶解状态的难溶盐得到迅速溶解时,由这些薄弱连接构成的孔隙结构先遭到破坏,在上覆压力相等的情况下土样更容易压缩,孔隙减少,密度增大,原始黏聚力得到提高。而固化黏聚力的强弱取决于存在于颗粒之间的胶结作用的强弱。如图2(e)、(f)、(g)、(h)所示,在乙酸的作用下,黄土中的碳酸钙胶结得

到迅速溶解,致使土中的粒状形态的黏土集粒或者团粒分散,成为凝块形态,填充到大孔隙内,黏粒赋存状态的改变发挥了黏粒表面的活性作用,使其更好的发挥着黏胶结的作用。土的连接状态由接触连接更多的变为胶结连接,且土中颗粒物质变的更细小,这些都有助于固化黏聚力的提高<sup>[4, 10]</sup>,所以总的黏聚力表现为提高。如图4所示,蒸馏水条件下拟合的曲线较低,主要是因为在100 kPa时(较低的压力下),土样的抗剪强度明显低于酸溶液处理过的土样的强度,而在其他压力下,土样的抗剪强度相差不大。由此,可以得到结论,经过乙酸处理过的土样在低压力下有较高的强度,各级压力下的总强度略高于蒸馏水处理过的土样。这一试验结果也印证了谢定义的观点“土的结构在外部干扰下发生变化,这种变化是软化还是强化,取决于原生结构的破坏和次生结构的生长哪个占据优势。当土体颗粒靠近变密,颗粒间的胶结增强时,表现为土体得到了强化<sup>[11]</sup>。”

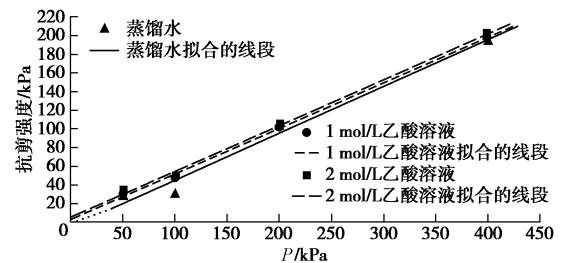


图4 不同溶液土的抗剪强度与垂直压力的关系图

Fig. 4 Comparison of CQ strength in different solutions at different vertical pressures

## 4 应用前景

通过以上的分析,可以看出酸性环境有利于破坏黄土的固有不良结构,这对改善黄土的工程属性是有益的,但是这一研究成果如何在生产实践中应用呢?首先,如果在预浸水法(一种黄土地基的处理方法)的浸水中添加适量的乙酸,因为乙酸能更容易的溶解碳酸钙等盐晶胶结,黄土中的孔隙结构能被更容易的瓦解,从而使得预浸水法能更有效的去除黄土的湿陷性并缩短施工时间。此外,因为乙酸的“催化作用”黄土发生湿陷时对压力的要求降低,从而使得该方法可以推广应用于非自重湿陷性黄土。其次,随着现代社会经济的迅速发展,人类赖以生存的地质环境却遭受着人类工业废水的威胁,其中有些工业废水的酸性很强,会对岩土体造成严重的腐蚀。学术界对于岩体遭受各种化学腐蚀的研究较多,但是关于黄土受化学损伤的研究(包括试验研究、理论分析和数值模拟计算等)却少有报道,而黄土独特的结构性恰是由于黄土

中碳酸钙的含量很高造成的。因此,研究酸性溶液对黄土性质的改变对受酸性废水侵蚀的黄土上的岩土工程建设来说有着重要的意义,本文的研究成果可以为相关研究提供有价值的参考。

## 5 结 论

本文提出了黄土结构改良的概念,并用化学方法改善了黄土的结构。为此,本文对在不同压力下,用不同浓度的乙酸溶液处理过的土样做了电镜扫描,从细、微观角度观察和分析了其结构的变化情况,并通过室内试验验证了其改良效果。现将主要研究成果总结如下:

(1) 由于乙酸的作用,低压下黄土的结构得到了显著改善,颗粒形态由粒状逐步转变为凝块状,颗粒粒径变的更细小。排列方式由架空结构逐步变为镶嵌结构,孔隙减少,密度增大。高压下,乙酸溶液的“催化”效果并不明显,主要是因为较高的压力已超过黄土的屈服强度,土样的架空结构在高压下被较彻底的破坏并转变为镶嵌结构,土样在浸入溶液前已经得到了充分的压密,致使浸入溶液后,湿陷变形相差不大。

(2) 通过饱和变形试验证明了被乙酸溶液处理过的土样饱和变形较小。主要是因为前期发生湿陷变形的时候,黄土的大孔隙被更有效的去除,土样被更充分的压密,从而使得后期饱和变形变小。这也证明了被乙酸溶液处理过的土样发生二次湿陷或者多次湿陷的可能性和危害性都较小。

(3) 通过固结快剪试验证明了被乙酸处理过的黄土抗剪强度较大。主要是因为在较低的压力下,黄土得到了充分的压密,导致其原始黏聚力得到了提高,碳酸钙的迅速溶解,致使集粒中的黏土物质变软,填充至孔隙内,更好的发挥了黏胶结的作用,从而使其固化黏聚力得到了提高。于此同时,内摩擦角的变化不大,最终抗剪强度在低压下有所提高。这一试验结果证明了被乙酸溶液处理过的黄土应当具有更好的工程性质,这就有利于未来的工程建设。

(4) 指出了这一研究成果在实际应用中的可能。首先,在预浸水法中添加适量的乙酸,不仅可以更有效的去除黄土的湿陷性,缩短施工时间,还可以将这一方法应用到非自重湿陷性黄土中去。其次,研究酸性环境下黄土性质的变化可以为受酸性废水污染的黄土体上的岩土工程建设及其相关研究提供有价值的参考。

## 参 考 文 献:

[1] GAO G R. The distribution and geotechnical properties of

- loess soils, lateritic soils and clayey soils in China[J]. Engineering Geology, 1996, **42**(1): 95 - 104.
- [2] NOUAOURIA M S, GUENFOUD M, LAFIFI B. Engineering properties of loess in Aleeria[J]. Engineering Geology, 2008, **99**(1): 85 - 90.
- [3] YUAN Z X, WANG L M. Collapsibility and seismic settlement of loess[J]. Engineering Geology, 2010, **105**(S1/2): 119 - 123.
- [4] TOVEY N K. Quantitative analysis of electron micrographs of soil microstructure[Z]. Proceeding of the International Symposium on Soil Structure, 1973.
- [5] SEED H B, CHEN C K. Structure and strength characteristics of compacted clays[J]. J SMFD, ASCE, 1960, **85**: 87 - 128.
- [6] MICHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1993.
- [7] 林崇义. 黄土的结构特性[C]// 中国科学院哈尔滨土建研究所黄土基本性质研究论文集. 北京: 科学出版社, 1962: 42 - 44. (LIN Chong-yi. Structural characteristics of loess[C]// Research Papers on Basic Properties of Loess in Harbin Institute of Civil Engineering of the Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1962: 42 - 44. (in Chinese))
- [8] 陈守义. 某些黏土岩的各向异性在亚微观结构上的表现[J]. 水文地质工程地质, 1980, **5**: 17 - 19. (CHEN Shou-yi. The anisotropy of some clay rocks in submicrostructure[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1980, **5**: 17 - 19. (in Chinese))
- [9] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(4): 1 - 10. (GAO Guo-rui. Structural theory of collapsible deformation of Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(4): 1 - 10. (in Chinese))
- [10] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980, **23**(12): 81 - 86, 115 - 118. (GAO Guo-rui. Microstructure classification and wet subsidence of loess[J]. Science China, 1980, **23**(12): 81 - 86, 115 - 118. (in Chinese))
- [11] 谢定义, 姚仰平, 党发宁. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (XIE Ding-yi, YAO Yang-ping, DANG Fa-ning. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [12] 高国瑞. 论中国区域性土的分布和岩土性质的形成[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 511 - 515. (GAO Guo-rui. Distribution of regional soils in China and formation of their special geotechnical properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 511 - 515. (in Chinese))

- [13] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4142 – 4146. (HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. Deformation properties of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4142 – 4146. (in Chinese))
- [14] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 775 – 779. (HU Zai-qiang, SHEN Zhu-jiang, XIE Ding-yi. The structure of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 775 – 779. (in Chinese))
- [15] VILAR1 O M, RODRIGUES R A. Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by a rising water table[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(2): 226 – 233.
- [16] 沈珠江, 胡再强. 黄土的二元介质模型[J]. 水利学报, 2003, 34(7): 1 – 6. (SHEN Zhu-jiang, HU Zai-qiang. Two element medium model of Loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(7): 1 – 6. (in Chinese))
- [17] SIVAKUMAR V, WHEELER S J. Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay, Part 1: Wetting and isotropic compression[J]. Géotechnique, 2000, 50(4): 359 – 368.
- [18] CASINI F. Deformation induced by wetting: a simple model[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012(49): 954 – 960.
- [19] MIHALACHE C, BUSCARNERA G. Is wetting collapse an unstable compaction process[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(2): 04014098.
- [20] HAERI S M, GARAKANI A A, KHOSRAVI A, et al. Assessing the hydro-mechanical behavior of collapsible soils using a modified triaxial test device[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(2): 565 – 570.
- [21] 孙建中, 刘建民. 黄土的未饱和湿陷、剩余湿陷和多次湿陷[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 365 – 367. (SUN Jian-zhong, LIU Jian-min. On unsaturated collapse, remnant collapse and multiple collapse of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 365 – 367. (in Chinese))
- [22] 张爱军, 邢义川, 胡新丽, 等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 117 – 122. (ZHANG Ai-jun, XING Yi-chuan, HU Xin-li, et al. Influence factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 117 – 122. (in Chinese))
- [23] 邵生俊, 李骏, 邵将, 等. 大厚度湿陷性黄土地层的现场砂井浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1549 – 1558. (SHAO Sheng-jun, LI Jun, SHAO Jiang, et al. In-situ sand well immersion tests on self-weight collapsible loess site with large depth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1549 – 1558. (in Chinese))
- [24] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HUANG Wen-xi. Engineering properties of soil[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983. (in Chinese))
- [25] WHEELER S J, SIVAKUMAR V. Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay, Part 2: Shearing and constitutive modeling[J]. Géotechnique, 2000, 50(4): 369 – 376.
- [26] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992. (CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese))