

人工制备黄土湿陷性影响因素及微观机理研究*

刘博诗^{1,2}, 张廷杰¹, 王旭¹, 梁庆国¹, 李盛¹

(1.兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2.甘肃省道路桥梁与地下工程重点试验室, 兰州 730070)

摘要:基于模型试验相似理论和 Monte Carlo 原理, 选用石英粉、砂、膨润土、石膏和工业盐, 采用空中试验自由下落法制备人工湿陷性黄土。对不同含水量和压实度的土样进行土工试验、能谱仪元素分析和电镜扫描测试。试验结果表明: 该人工黄土的元素组成与天然湿陷性黄土具有一致性; 人工制备黄土的湿陷性随着初始含水量的增加呈先增大后减小的趋势, 随着压实度的增大线性减小, 湿陷规律与天然湿陷性黄土相似; 该人工黄土具有易受应力状态和浸水影响的结构。随着压实度和含水量的增大, 颗粒的各向异性、面积比和等效直径增大, 而扁圆度和充填比减小。土的湿陷系数与各向异性、扁圆度、面积比等微结构参数存在着良好的相关关系。从微观角度合理地解释了该人工黄土相似材料的湿陷性机理, 与天然黄土湿陷规律有较高的契合度。

关键词: 人工黄土; 压实度; 含水量; 湿陷性; 微观结构

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)02-0330-07

Research on the Collapsibility Influencing Factors and Micro-mechanism of Artificial loess

Liu Boshi^{1,2}, Zhang Yanjie¹, Wang Xu¹, Liang Qingguo¹, Li Sheng¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P.R. China;

2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, P.R. China)

Abstract: Based on the similarity theory of model test and the principle of Monte Carlo, quartz powder, sand, bentonite, gypsum and industrial salt were chosen to prepare artificial collapsible loess with air fall method. Soil samples with different water contents and compaction degrees were taken to conduct geotechnical test, EDS test and electron microscope scanning test. Test results prove that the artificial loess has a high coherence with nature collapsible loess in the view of elemental composition; with the increase of initial moisture content, collapsibility coefficient increases first and then decreases, and collapsibility coefficient decreases linearly with the increase of compaction degree, which shows that collapsible behavior is similar with that of nature collapsible loess; The artificial loess has the structure which is sensitive to be influenced by the stress state and water immersion. with the increase of compaction degree and moisture content, particle anisotropy, area ratio and equivalent diameter increase, while particle oblate degree and fill ratio decrease. There is a good relationship between coefficient of collapsibility and microstructure parameters such as anisotropy, oblate degree and area ratio. From the microscopic point of view, collapsible mechanics of the artificial collapsible loess is elaborated reasonably, which has compatible degree with the collapsible law of natural loess.

Keywords: artificial loess; compaction degree; water content; collapsibility; microstructure

* 收稿日期: 2016-05-24(修改稿)

作者简介: 刘博诗(1989-), 男, 河北石家庄人, 硕士生, 主要从事土工理论与地基基础方向的研究。

E-mail: liuboshi8866@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41402252, 41262010, 51408289); 甘肃省科技计划(1506RJYA063); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1139)

0 引言

地质力学模型试验是基于相似原理对大型岩土工程问题进行缩尺研究的一种行之有效的方[1]。在进行天然原状黄土的物理力学性质试验时,由于在采样、运输、制样过程中对原状土体结构进行了不同程度的扰动,使得试验结果具有一定差别。因此,湿陷性黄土模型试验相似材料研制一直是湿陷性黄土地区模型试验研究的关键。

在湿陷性黄土模型试验相似材料研制方面,国内外学者进行了大量的尝试。国内学者蒋明镜等[2]在天然黄土土料中加入碳酸钙,形成具有内部连接和大孔隙的结构性湿陷性黄土试样,通过单线法、双线法和三轴湿化试验,研究了试样在不同含水率、不同竖向压力和围压作用下,人工湿陷性黄土的湿陷变形规律。陈昌禄等[3]在重塑黄土中加入CaO、高岭土、CO₂、水泥、CaCl₂等黏结性材料制备了人工结构性黄土,进行了真三轴试验研究,研究表明,人工制备结构性黄土的方法合理可靠。田堪良等[4]在重塑黄土中加少量水泥制备了结构性黄土,研究了稳定结构性黄土的强度特性规律,试验结果表明,水泥结构性试样的结构强度随水泥含量及含水率的不同而变化。国外最早是Assallay等[5]经过严格的数学方法证明,使用空中自由落体法能够很好地模拟天然黄土的形成过程和沉积环境,并选用兰州黄土和石英粉混合物,配制了人工湿陷性黄土试样。Jefferson等[6]总结了国外学者制备人工湿陷性黄土的不同方法,并对不同方法所制成的黄土试样的湿陷性进行了对比分析。Zourmpakis等[7]将黏土烘干磨细后,加入一定量的石英粉,制成人工湿陷性黄土,并探讨了毛细水上升法、蒸汽法和喷雾法对干土试样增湿到一定含水率条件下的湿陷特性。

对于人工制备湿陷性黄土的研究,大多集中在宏观力学特性上,对其湿陷性影响因素以及湿陷性与微观结构间的关系方面研究的较少。笔者选用无黏结性的石英粉、砂,黏结性的膨润土、石膏、工业盐为基本材料,采用空中自由下落法[8],制备了强湿陷性人工黄土。分别控制含水量和压实度进行制样,分析不同物理状态下人工黄土湿陷性与初始含水量和压实度的关系。利用扫描电镜从微观角度分析湿陷性与微观结构的关系,并初步确定不同微结构特征参数对湿陷行为的影响规律及相应程度。

1 人工强湿陷黄土物理力学性质分析

1.1 相似材料的选取与分析

天然黄土的主要矿物成分可分为非黏性矿物和黏土矿物,非黏性矿物主要有石英、长石、方解石、云母等;黏土矿物主要有伊利石、高岭石、蒙脱石等。根据对湿陷性黄土矿物成分的分析,选用无黏结性材料石英粉、砂以及黏结性材料膨润土、石膏和工业盐,配比材料的基本性质如表1。以含水量和压实度为控制指标,采用空中自由下落法制备人工湿陷性黄土。

表1 材料基本性质

膨润土		石英粉		砂	
塑限/ 液限/ %	液限/ %	塑限/ 液限/ %	液限/ %	粒径范围/ mm	Cc Cu
27.78	73.65	19.83	27.51	0.075~1	1.03 3.47

1.2 人工强湿陷性黄土制备

通过大量配比试验,确定人工制备强湿陷性黄土的配比,在该配比下,人工制备相似材料的性能稳定,湿陷性较强。5种基本材料配比为:砂:石英粉:膨润土:石膏:工业盐=0.25:0.3:0.3:0.1:0.05(质量比)。选取材料烘干后,按质量比例称取混合,充分搅拌使材料均匀分布。

为研究初始含水量和压实度对人工制备黄土湿陷性的影响,分别控制压实度和含水量制作试样,如图1。控制压实度为0.7,初始含水量取3%、6%、9%、12%、15%制作湿陷性土体试样,记为S1-1、S1-2、S1-3、S1-4、S1-5;控制含水量为12%,压实度取0.75、0.8、0.85、0.9、0.95制作湿陷性土体试样,记为S2-1、S2-2、S2-3、S2-4、S2-5。



图1 制备完成样品

Fig.1 Completed samples

1.3 人工制备强湿陷性黄土物理性质分析

根据规范^[9]要求,对人工制备强湿陷性黄土物理状态参数进行分析,根据文献^[10],将人工制

备黄土的液限、塑限物性参数与黄河中游区域天然黄土进行比较,符合相似要求,结果如表2所示。

表2 物理参数指标

Table 2 Physical parameters

土体类别	土粒比重	液限/%	塑限/%	最优含水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)
人工制备黄土	2.67	26.02	16.25	14.38	1.96
黄河中游黄土	—	25.4~32.17	15.4~20.5	—	—

表3 人工制备强湿陷性黄土的压缩系数

Table 3 Compressive coefficient of artificial collapsible loess

编号	S1组					S2组					黄河中游黄土
	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S1-5	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S2-5	
a ₁₋₂ /MPa	0.34	0.29	0.33	0.52	0.66	0.83	0.66	0.35	0.18	0.12	0.02~0.90
E _s /MPa	5.71	6.67	5.88	3.77	2.94	2.20	2.60	4.55	8.51	12.12	—

通过EDS能谱仪对土样进行元素分析,并由X射线来获取材料中各元素的浓度,EDS能谱元素分析如图2所示,人工黄土中各元素、化合物含量如表3、表4所示。

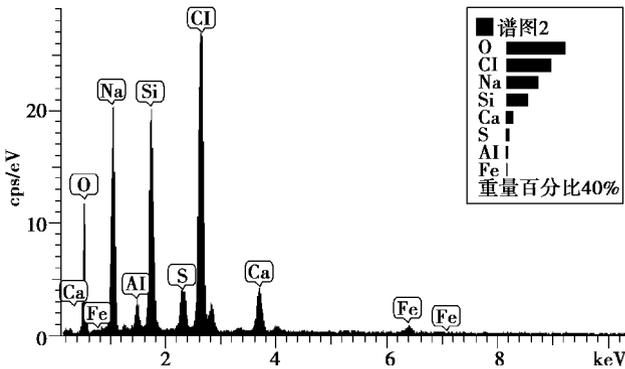


图2 能谱元素分析

Fig.2 Energy spectrum element analysis

表3 相似材料元素组成

Table 3 Composition elements of similar materials

元素	Na	Si	Ca	Al	Fe	K	O	Cl	S
含量/%	18.14	10.76	2.56	1.65	0.57	0.135	49.12	14.90	1.99

由图2可以看出,土样中富含Cl、Si、Na和O元素,同时含有少量Ca、Al和Fe元素。结合晶体生长理论^[11-12]可得:由于SiO₂和NaCl晶粒的生长

所需能量较少,因此形成的晶粒较大;元素如Ca、Al和Fe在晶粒中取代Si和Na的位置,生成新的晶粒时需要较多的能量,因此晶粒的尺寸相对较小。在大晶粒中SiO₂和NaCl占主要成分,Ca、Al、Fe等元素在SiO₂和NaCl富集区含量较少,在小晶粒中含量较多。晶界往往是空位、变形和位错的富集带,Ca、Al以及Fe元素以小晶粒形式作为胶结物质富集于晶界,与天然湿陷性黄土中元素的组成和分布相一致^[13]。

表4 相似材料化合物组成

Table 4 Compound of similar materials

含量/%	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
人工黄土	45.79	38.61	10.90	3.50	1.20	0.29
马兰黄土 ^[13]	53.54	1.76	8.72	11.11	4.16	1.81
离石-午城黄土 ^[13]	53.53	1.68	8.05	11.48	4.67	1.97

1.4 固结压缩试验

对人工制备湿陷性黄土进行标准固结试验,如表5,S1组压缩系数a₁₋₂范围为0.29~0.66 MP⁻¹,均值为0.428 MP⁻¹,S2组压缩系数a₁₋₂范围为0.12~

0.83 MP⁻¹,均值为0.426 MP⁻¹,均属于中等压缩性土。根据文献[10],将人工制备黄土的压缩性能参数与黄河中游区域天然黄土进行对比分析,符合相似要求,如表5所示。

1.5 人工制备黄土湿陷性分析

1.5.1 湿陷系数与含水量的变化规律

根据试验规范^[9],对压实度为0.7,初始含水量分别为3%、6%、9%、12%和15%的人工制备强湿陷性黄土试样S1-1、S1-2、S1-3、S1-4、S1-5,按照单线法进行湿陷试验,加载至200 kPa待稳定后进行浸水,对每种情况做多组平行试验,试验结果如表6所示。

表6 湿陷试验结果

Table 6 Result of collapsible test

编号	S1-1	S1-2	S1-3	S1-4	S1-5
湿陷系数	0.194	0.205	0.184	0.167	0.109

依据规范^[14],该人工黄土下沉稳定后浸水饱和,试样S1-1、S1-2、S1-3、S1-4、S1-5均为强湿陷性土。试样高度与固结压力的关系如图3所示,湿陷系数与含水率的关系如图4所示。

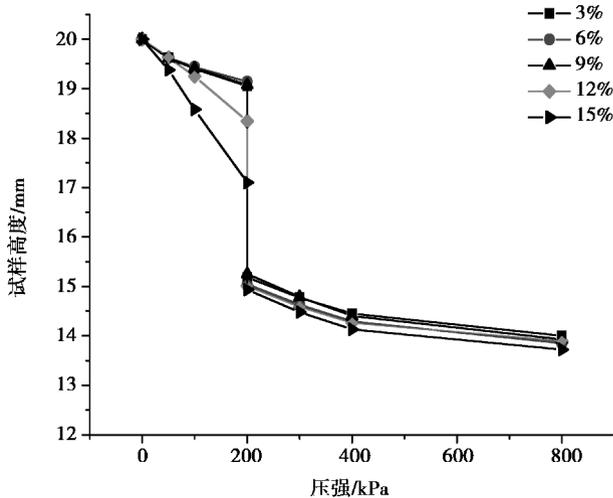


图3 不同含水量下的试样高度变化曲线

Fig. 3 Changing curves of sample height under different water contents

由图3可得,对于不同含水率的试样,土体压缩变形量随固结压力的增大而增加,土体压缩变形幅度随固结压力的持续增加而放缓;在浸水湿陷前,起始含水量较大时曲线较陡,较小时曲线平缓;浸水湿陷完成后,曲率趋于一致。说明在起始含水量较低时,湿陷性对含水量的变化较为敏感,随着

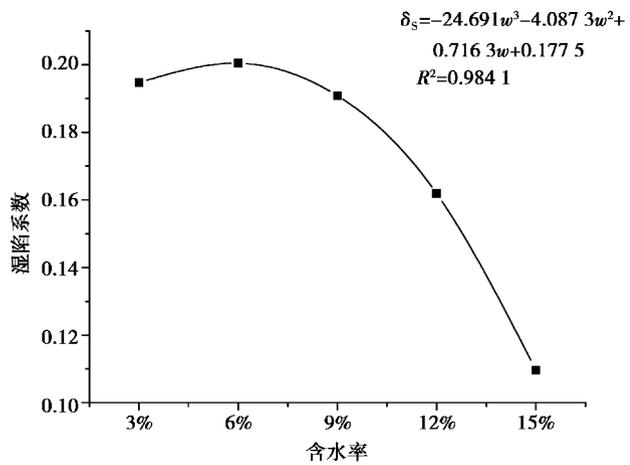


图4 湿陷系数与含水率关系曲线

Fig.4 Relation curve of collapsibility coefficient and water content

起始含水量增大,湿陷性对起始含水量的变化敏感性减弱。人工黄土在浸水湿陷后结构性遭到破坏,在压力作用下,土体颗粒进行了重新排布,对水的作用敏感性减弱。人工黄土经过压缩-湿陷-再压缩三个阶段后,试样的最终高度趋于一致,差值分别为0.15 mm、0.07 mm、0.11 mm、0.18 mm。这与谢定义先生^[15]所提出的结论相一致:土体在固结压力作用一段时间后浸水湿陷,产生的总体变形量为湿陷变形和压缩变形之和,而与初始含水率无关。初始含水率仅影响湿陷变形和压缩变形在总变形中的比例,初始含水率越大,压缩变形越大,湿陷变形越小。

分析图4可得,随着起始含水量的增大,人工制备黄土的湿陷系数先增加而后降低,曲线呈上凸趋势,拟合曲线公式为三次多项式方程。试验结果表明,含水量在3%~15%范围内该人工黄土均表现出强湿陷性,含水量为6%时湿陷系数达到峰值。从土体结构方面分析,可溶盐在粉粒接点处以微结晶状态存在,对以粉粒为主的土骨架起到了半骨架半胶结作用。当含水量为3%时,颗粒周围结合水膜较薄,产生的假黏聚力对周围颗粒有一定的吸力作用,土体处于亚稳定状态,松散结构尚未破坏,湿陷系数较小;含水量达到6%时,颗粒周围结合水膜增厚,可溶盐逐渐溶解,胶结物联结能力削弱,引起结构强度的降低,使得这种亚稳定结构发生破坏,于是土体的湿陷性明显表现出来,土体的湿陷系数显著增加;随着含水量进一步增大,可溶盐溶解程度进一步增大,胶结强度大大降低。在较

小的法向应力作用下,土体的亚稳定结构就会发生破坏,在浸水湿陷前结构强度已经大幅度降低,因此,当人工黄土的初始含水量大于 6%后,湿陷系数呈下降趋势。

1.5.2 湿陷系数与压实度的变化规律

对含水量为 12%,压实度分别为 0.75、0.8、0.85、0.9、0.95 的人工制备强湿陷性黄土试样 S2-1、S2-2、S2-3、S2-4、S2-5,按照单线法进行湿陷试验,逐级加载至 200 kPa 稳定后浸水,试验结果如表 7 所示。研究初始压实度与湿陷性的关系,如图 5 所示。

表 7 湿陷试验结果

Table 7 Results of collapsible test

编号	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S2-5
湿陷系数	0.166	0.133	0.112	0.080	0.025

分析图 5 可得,湿陷系数随着压实度的增大而线性减小。在整个变形过程中,压实度对结构状态的改变影响较大,压实度越大,土样孔隙越小,其结构状态的调整难度越大,结构的可变性随之降低。根据学者对黄土湿陷性与压实度的关系研究^[16]表明:湿陷系数与孔隙比成正比例关系,而与压实度成反比例关系,随着压实度增加,孔隙比减小,湿陷性线性递减,当压实度增大一定数值时,湿陷性基本消失。试验结果表明,该人工制备黄土湿陷性与压实度的关系与天然湿陷性黄土相一致。

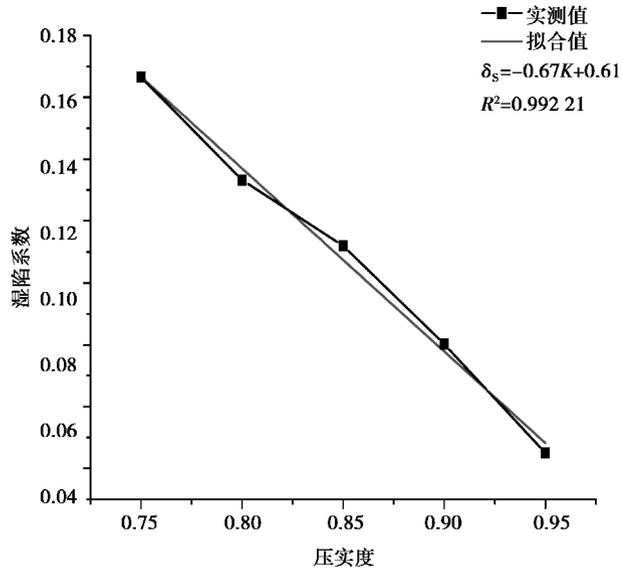


图 5 湿陷系数随压实度的变化曲线

Fig. 5 Collapsible coefficient vs. compaction degree

2 强湿陷性黄土微观结构分析

2.1 微观结构定性分析

黄土微观结构中颗粒形态、孔隙特征和胶结程度是描述黄土微结构的主要方面。采用低真空扫描电子显微镜对含水量 3%、9%、15%,压实度 0.75、0.85、0.95 的人工制备湿陷性黄土试样进行电镜扫描,SEM 照片放大倍数依次为 1 000 倍、500 倍,如图 6 和图 7 所示。

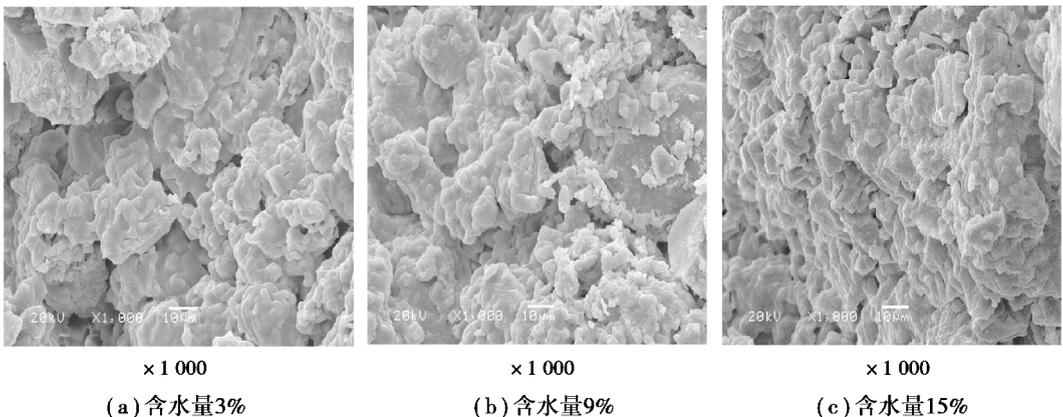


图 6 不同含水量土体微观结构照片

Fig. 6 Microstructure images with different water contents

2.1.1 微观结构随含水量变化规律

土体微结构是开放型结构,微观演变取决于结构本身对外界环境变化的灵敏度。随着初始含水

量的变化,水膜厚度的增减使结合水层粘滞性发生变化,进而引发微结构空间排布以及宏观力学特性的改变。

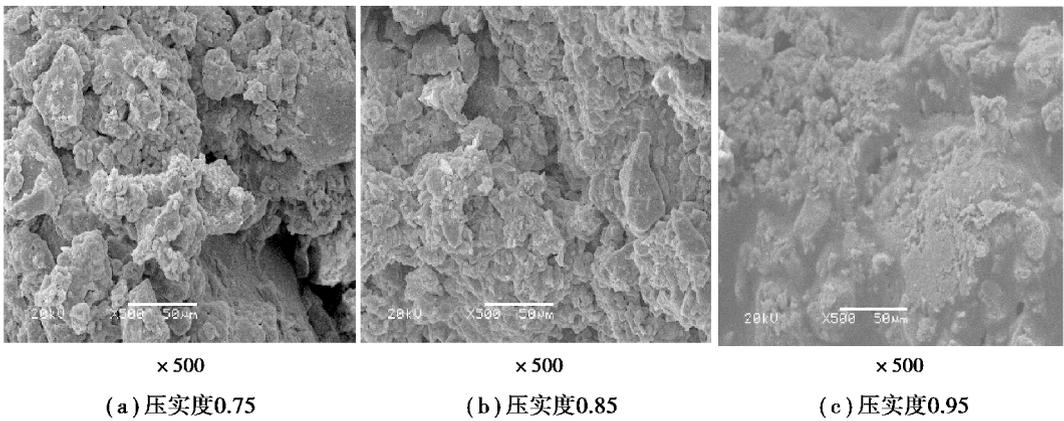


图7 不同压实度土体微观结构照片

Fig.7 Microstructure images with different compaction degrees

分析图6可得,当含水量较低时,结构孔隙大,颗粒无序分布,土体结构松散。随着含水量的增加,结构发生明显变化,颗粒间接触方式由点与点或点与面接触逐步向面与面接触转化;随着水膜厚度的增加,粒间阻力必然减小,土体颗粒容易发生移动,细小颗粒和碎屑填充到大孔隙和中等孔隙中,使大、中等孔隙显著减少,颗粒排列的方向性、有序性和整体性得到提高,各向异性降低。

2.1.2 微观结构随压实度变化规律

分析图7可得,随着压实度的增加,人工湿陷性黄土微结构主要变化为:土体骨架颗粒由单粒状颗粒为主转变为絮凝状颗粒为主,颗粒的集团化程度增大,颗粒分布的定向性和随机性受压实功的影响显著,即从不稳定的承载形式向较为稳定的承载形式过渡,在图像上反映为颗粒的密布程度提高;在压实度较低时,孔隙结构呈现以大直径架空孔隙为主,粒间孔隙并存的状态,随着压实度的增大,大孔隙崩解并重新聚合为小孔隙,土颗粒表面较多的小型单粒及碎屑产生滑移,填充到大孔隙及架空孔隙中。骨架颗粒的连接形式为由点接触与面胶结并存逐渐向面胶结为主转变,土体连接强度和牢固程度有所提高。

在湿陷过程当中,可溶盐等物质发生溶解,土颗粒间胶结状态逐渐破坏,骨架颗粒克服颗粒间胶结作用力而重新排位。压实度越大,土体密实度越高,孔隙分布越均匀,胶结程度越好,骨架颗粒脱离原粒间胶结力束缚的能力越弱,从微观角度解释了随着压实度的增大湿陷系数显著减小的原因。

2.2 微观结构参数定量分析

采用 Leica Qwin 图像分析软件,对电镜扫描得

到的 SEM 图片进行数据提取,参考学者对土体微观结构参数分析^[17],获得扁圆度、等效直径、各向异性与土颗粒相关的微观结构参数,土样的微观结构定量参数如表8。

2.2.1 力学参数与微结构参数相关性分析

对人工制备黄土的湿陷系数与微结构参数进行相关性分析。由表9可得,在各微结构参数中,面积比、各向异性和等效直径与湿陷系数呈负相关关系,湿陷系数与扁圆度、充填比呈正相关关系,其中各向异性相关性最显著。

表8 微观结构定量参数

Table 8 Quantitative parameters of microstructure

分组	编号	湿陷系数	扁圆度	等效直径	充填比	面积比	各向异性
S1	S1-1	0.194	0.557	0.663	0.825	0.503	0.934
	S1-3	0.184	0.541	0.774	0.814	0.571	0.943
	S1-5	0.109	0.501	0.858	0.810	0.657	0.981
S2	S2-1	0.166	0.574	0.670	0.854	0.504	0.942
	S2-3	0.112	0.562	0.751	0.836	0.542	0.956
	S2-5	0.025	0.556	0.856	0.821	0.678	0.977

表9 人工黄土湿陷系数与微观结构参数的单相关系数

Table 9 Relevance analysis on collapsibility coefficient and micro-structure parameters

湿陷系数	面积比	各向异性	扁圆度	等效直径	充填比
S1组	-0.939 93	-0.997 30	0.985 04	-0.879 71	0.778 23
S2组	-0.982 93	-0.999 90	0.949 39	-0.998 49	0.983 52

2.2.2 微结构参数对湿陷系数的影响分析

(1)各向异性、等效直径以及面积比对湿陷系数的影响

颗粒的各向异性、等效直径和面积比与湿陷系数呈负相关关系。随着土体含水量与压实度的增大,颗粒受力荷载和水的的作用发生新的排列和分布,孔隙体积减小,单位面积的颗粒数增加,面积比增大;小颗粒聚集向团粒化发展,颗粒的等效直径增大;随着粒间距的减小和粒径的增大,颗粒间的作用增强,土颗粒间的连接强度、咬合嵌固程度有较大提高,水稳定性胶结力和摩阻力增大。土体密度增大的同时,均匀性、结构性以及整体性得到提高,各向异性值增大,各向异性减小,土粒排列越趋于稳定,湿陷性越小。

(2)扁圆度、充填比对湿陷系数的影响

颗粒的扁圆度与充填比和湿陷性呈正相关。两者均为描述颗粒形状的微结构参数,表征目标接近圆形的程度,其值越大,形成骨架颗粒的浑圆度越高,粒间接触面积和胶结力越小,越易发生滑移,使结构发生变形和失稳的可能性越大,土体的湿陷性越强。

3 结论

(1)人工制备湿陷性黄土湿陷系数随着起始含水量的增大先增大而后减小,呈三元多项式函数关系;随压实度的增加,湿陷系数减小,近似呈线性关系。

(2)随着起始含水量和压实度的增大,微观结构改变明显:土体骨架颗粒由粒状颗粒为主转变为凝块状颗粒为主;骨架颗粒的连接形式由点接触为主逐渐转变为点接触与面胶结共存;孔隙的变化主要由架空孔隙为主转变为架空与镶嵌孔隙并存。说明随含水量和压实度的增加,土体结构的致密程度显著提高。

(3)湿陷系数与微结构参数单相关性分析中,湿陷系数与扁圆度、充填比呈正相关,与面积比、各向异性和等效直径呈负相关,各向异性对湿陷系数的影响最为明显。

参考文献 (References)

[1] 陈安敏,顾金才,沈俊,等.地质力学模型试验技术应用研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):

3785-3789.(Chen Anmin, Gu Jincai, Shen Jun, et al. Application study on the geomechanical model experiment techniques [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(22):3785-3789. (in Chinese))

[2] Jiang M J, Hu H J, Liu F. Summary of collapsible behavior of artificially structured loess in oedometer and triaxial wetting tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49:1147-1157.

[3] 陈昌禄,邵生俊,张喆.人工制备结构性黄土的真三轴试验研究[J].岩土力学,2013,34(8):2231-2237. (Chen Changlu, Shao Shengjun, Zhang Zhe. Study of artificial structural loess under true triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2231-2237. (in Chinese))

[4] 田堪良,张慧莉,张伯平,等.黄土的结构性及其结构强度特性研究[J].水力发电学报,2005,24(2):64-67.(Tian Kanliang, Zhang Huili, Zhang Boping, et al. Research on structural characteristics and strength of loess [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(2): 64 -67. (in Chinese))

[5] Assallay A M, Rogers C D F, Smalley I J. Formation and collapse of metastable particle packings and open structures in loess deposits [J]. Engineering Geology, 1997, 48(1-2): 101-115.

[6] Jefferson I, Ahmad M. Formation of artificial collapsible loess [J]. Problematic Soils and Rocks and In-situ Characterization, 2007,162: 1-10.

[7] Zourmpakis A, Boardman D I, Rogers C D F. Creation of artificial loess soils [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2005, 93:123-134

[8] 张延杰,王旭,梁庆国,等.湿陷性黄土模型试验相似材料的研制[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增2):4019-4024. (Zhang Yanjie, Wang Xu, Liang Qingguo, et al. Development of model test similar material of collapsible loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(Supp.2): 4019-4024. (in Chinese))

[9] 中华人民共和国国家标准编写组.土工试验方法标准(GB/T50123-1999) [S].北京:中国计划出版社,1999. (The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for Soil Test Method (GB/T50123-1999) [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))

(下转第343页)