

文章编号:1671-8879(2006)04-0001-04

压实黄土的湿陷性与微观结构的关系

沙爱民¹, 陈开圣²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 贵州大学 土木与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要:由于黄土特殊的工程性质和内部结构的复杂性,黄土地区高等级公路出现了一些湿陷破坏事故。采用扫描电镜、图像处理系统和能谱仪,对压实黄土在湿陷前后的孔隙特征、化学组成等微观结构进行研究,得出压实黄土的湿陷性与微观结构的关系。结果表明:大、中孔隙含量是黄土产生湿陷的主要原因,其与黄土湿陷系数具有定量关系,湿陷后黄土的主要化学元素含量发生了变化。

关键词:道路工程;黄土;压实;微观结构;湿陷性;扫描电镜

中图分类号:U416.169; TU432 **文献标识码:**A

Relationship between collapsibility and microstructure of compacted loess

SHA Ai-min¹, CHEN Kai-sheng²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Guizhou University, Guiyang 550003, Guizhou, China)

Abstract: The loess has special engineering properties, its internal structure is very complex. So the high-grade roads in loess are happen to be destroyed due to the collapsibility. The loess microstructure is studied with the instruments of scanning electron microscope, energy spectrometer and image analysis system to reveal the void characteristics and chemical element components in the compacted loess. The relationship between collapsibility and microstructure of compacted loess can be obtained. The results show that the contents of big and middle voids are the key parameters to describe the loess collapsibility, there is a quantitative relation between collapsibility coefficients and the contents of big and middle voids. When the loess is collapsed, the contents of main chemical elements is also changed. 5 tabs, 5 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; loess; compaction; microstructure; collapsibility; scanning electron microscope

0 引言

随着公路交通事业的快速发展和西部大开发战

略的实施,在黄土地区修建高等级公路已成必然。不少工程在实际过程中出现了不同程度的湿陷破坏事故^[1-2],其根本原因是由于黄土特殊的工程性质和

收稿日期:2005-06-14

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200131881212)

作者简介:沙爱民(1964-),男,安徽宣城人,教授,博士研究生导师。

内部结构的复杂性,在宏观上表现为土体物理力学性状的不均匀性和各向异性,而在微观上表现为介质结构的非连续性和不确定性^[3]。土体宏观物理力学性质变化的根本原因在于土体结构性的变化,因此,研究土的微观结构对评价土的工程性质、估算和预测土的某些性质的变化范围和趋势,从而为寻找改善土的工程性质的方法提供依据具有非常重要的意义。正如沈珠江院士 1996 年指出的:21 世纪将是结构力学的世纪,土体本构模型的建立将成为核心问题^[4]。关于对黄土湿陷性的微观结构研究,众多学者都只集中在原状黄土上,对扰动黄土的湿陷性的微观结构特征并未做深入的研究。研究表明,压实黄土仍具有湿陷性,这已经从黄土地区公路路基的病害中得到证实^[5]。鉴于此,本文以扫描电镜和图像处理系统为工具,对压实黄土的微观结构及其与湿陷性的关系进行了定量分析。

1 试验方案

试验用土取自 312 国道兰州市连搭乡 K2175+600 处左侧土料场,土料所属地层为马兰黄土,原状黄土深度距地表 5.0 m,扰动土在最佳含水量下采用静力压实方法分别配置压实度为 80%、85%、90%和 93%的 4 组试样。在做微观试验前,做了 200 kPa 压力下黄土的湿陷试验,结果见表 1。

表 1 200 kPa 压力下不同压实度下黄土的湿陷系数

压实度/%	原状	80	85	90	93
湿陷系数 δ_s	0.041	0.019	0.017	0.009	0.005

由表 1 可知,重塑黄土在压实度比较低的情况下仍具有湿陷性。为了研究黄土的湿陷性与微观结构的关系,对做完湿陷试验的土样进行微观结构试样的制备,在扫描电镜和图像处理系统下进行微观结构定量的分析。微观试验采用中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室 1999 年引进日本的 JSM-5 600LV 扫描电镜,分辨率为 3.5

nm,最大放大倍数为 10 万倍。图像处理是该电镜所带的美国 Kevex 公司(现已被美国热电公司收购)的 Mirage 图像处理系统。该系统可提供孔隙长轴、短轴、平均直径、方向角、周长、面积、等面积圆直径、形状系数等 30 多个指标^[6]。需要说明的是,该系统是针对颗粒而设计的,如需要提取孔隙的参数,需要对颗粒进行反相。

2 压实黄土湿陷前后的微观结构

目前对土体微观结构的定量分析,以土颗粒或孔隙作为研究对象。经过压实后的黄土,土颗粒排列比较紧密,嵌挤连接现象比较明显,在图像处理时难以分割。而黄土的湿陷性又和土体孔隙的形态、大小有非常紧密的联系,所以在定量分析时以对孔隙的统计计算为主。孔隙大小的分类参照雷祥义^[7]的分类方案,即大孔隙半径大于 16 μm ,中孔隙半径为 4~16 μm ,小孔隙半径为 1~4 μm ,微孔隙半径小于 1 μm 。SEM 只能测量平面上的孔隙分布情况,无法测定孔隙的体积。因此在统计时,孔隙含量只能统计孔隙个数百分含量和面积百分含量^[8]。在图像处理过程中,由于设定测量范围的需要,可能统计了数量很多、孔隙半径非常小的微孔隙,然而这部分孔隙并不影响黄土的工程性质。因此在统计孔隙含量时,本文是指孔隙的面积含量。

2.1 压实黄土湿陷前后孔隙要素的变化

2.1.1 孔隙大小在湿陷前后的变化

为了探讨压实黄土湿陷前后结构的变化,对不同压实度下黄土湿陷前后进行了扫描电镜和图像处理,结果见表 2。

从 SEM 照片(图 1)、表 2 和图 2~图 4 可以明显看出,黄土湿陷前后孔隙的要素均发生了变化,平均孔隙直径、平均孔隙面积和平均形状系数在湿陷后均变小,产生这一现象的原因是当黄土浸水受压后,削弱了颗粒连接点间的结合力,支架结构迅速瓦解,颗粒重新组合,紧密排列,使土体趋于稳定。湿陷

表 2 200 kPa 压力下黄土湿陷前后孔隙结构参数的变化

压实度/%	原状		80		85		90		93	
孔隙参数	湿陷前	湿陷后	湿陷前	湿陷后	湿陷前	湿陷后	湿陷前	湿陷后	湿陷前	湿陷后
大、中孔隙含量	0.742	0.198	0.634	0.143	0.602	0.105	0.397	0.0942	0.278	0.088
微、小孔隙含量	0.258	0.802	0.366	0.857	0.398	0.895	0.603	0.9058	0.722	0.912
平均孔隙直径/ μm	7.8234	6.3458	6.9698	5.898	5.7589	4.9872	5.1235	4.2358	4.8956	3.9864
平均空隙面积/ μm^2	32.426	30.479	27.459	24.790	26.548	22.975	23.986	21.106	21.463	20.688
平均形状系数	0.311	0.304	0.301	0.281	0.346	0.312	0.390	0.334	0.328	0.310

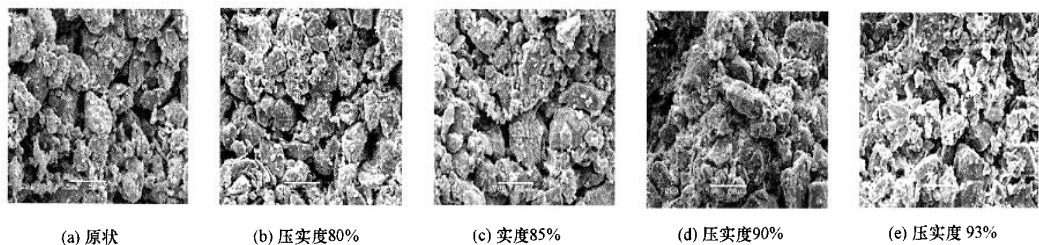


图 1 压实黄土湿陷后的 SEM 照片

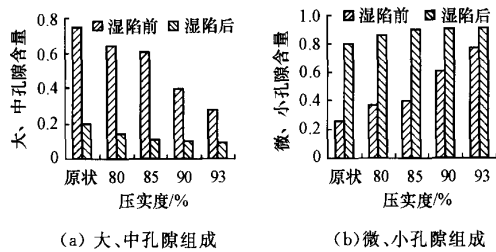


图 2 湿陷前后孔隙组成直方图

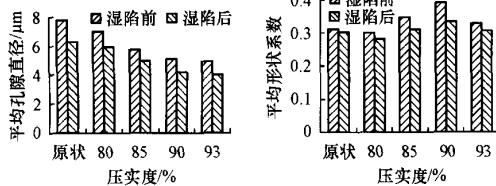


图 3 湿陷前后平均
孔隙直径直方图

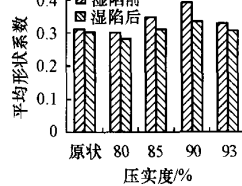


图 4 湿陷前后平均
形状系数直方图

后大、中孔隙含量显著减少,微小孔隙含量显著增多。大、中孔隙的含量是产生黄土湿陷性的主要原因,大、中孔隙含量越多,湿陷性就越大。为了建立大、中孔隙的含量与湿陷性的定量关系,结合前面的湿陷试验,统计了大、中孔隙的含量和湿陷系数的关系(表 3)。

表 3 大、中孔隙含量与湿陷系数的关系

压实度/%	原状	80	85	90	93
大、中孔隙含量	0.742	0.634	0.602	0.398	0.278
湿陷系数 δ_s	0.041	0.019	0.017	0.009	0.005

经拟合得湿陷系数与大、中孔隙含量的方程 $y=0.0016e^{4.1675x}$, $R^2=0.9706$, 由此推出扰动黄土湿陷系数 δ_s 与大、中孔隙百分比的一般关系为

$$\delta_s = Ae^{Bx}$$

式中: A 、 B 为统计参数,与土体性质、外加荷载有关; x 为大、中孔隙面积百分比。从公式可知,压实黄土具有湿陷性的原因是大、中孔隙的含量过高。设定 $\delta_s=0.015$, 即 $0.015=Ae^{Bx}$, 两边取对数 $\ln 0.015=\ln A+Bx$, $x=(-4.1997-\ln A)/B$, 所以 $x \geq (-4.1997-\ln A)/B$ 。结合上述公式,将 $A=0.0016$ 、 $B=4.1675$, 代入公式。当 $x \geq (-4.1997-\ln 0.0016)/4.1675 \geq$

53.7%, 即大、中孔隙面积的含量大于 53.7% 时,黄土具有湿陷性。结合湿陷试验,当压实度小于 85% 时,大、中孔隙含量大于临界大、中孔隙含量 53.7%, 因此黄土具有湿陷性。这说明低压实度下黄土具有湿陷性的原因是大、中孔隙的含量过高所致。这一结论能否广泛应用还有待更多的工程实践去检验。

2.1.2 孔隙的方向性

参照文献[8],统计湿陷后黄土孔隙的方向角分布(图 5),进而计算黄土的各向异性率,结果见表 4。



图 5 黄土湿陷后不同压实度下的方向角分布

表 4 湿陷后黄土的各向异性率与压实度的关系

压实度/%	原状	80	85	90	93
各向异性率	0.384 324	0.401 878	0.412 584	0.430 756	0.441 894

从各向异性率和方向角分布图可知,扰动黄土的湿陷过程中土体的各向异性明显增强。其原因为黄土的湿陷性本质是土体骨架颗粒克服粒间的胶结力而重新排布的过程(或易溶于水的胶结物质发生溶解),随着粒间胶结物质渐次破坏,胶结力降低,骨架颗粒渐渐脱离原粒间胶结力的束缚,向着最优方向排列,土体方向性孔隙度各向异性也越来越明显[9]。

2.2 黄土湿陷前后化学成分的变化

为了进一步研究黄土湿陷前后的化学成分的变化情况,用能谱仪对不同状态的黄土进行了元素分析,结果见表 5。

由表 5 可知,湿陷前黄土 Si 含量为 19.8%, Fe 含量为 6.47%, O 含量为 10.07%, Ca 含量为 6.72%; 湿陷后则分别为 16.362%、12.27%、8.246% 和 5.676%。其他元素含量仅有一些微小的变化。黄土中粘土矿物的化学组成说明,黄土浸水后,蒙脱石中的一部分 SiO_2 、 $CaCO_3$ 被溶滤析出

表 5 黄土的化学成分分析

试验 状态	化学成分含量/%								
	O	Mg	Al	Si	Na	K	Ca	Ti	Fe
湿陷前	10.07	0.68	4.41	19.80	49.70	1.84	6.72	0.30	6.47
湿陷 后不 同压 实度 /%	原状	7.66	0.40	4.78	18.67	49.71	2.10	6.17	10.51
	80	9.15	0.67	4.90	16.37	49.71	2.33	6.08	10.43
	85	8.71	0.69	4.73	14.10	49.71	2.08	5.49	14.02
	90	7.75	0.63	4.74	15.35	49.71	1.85	5.62	14.02
	93	7.96	0.80	4.64	17.32	49.71	2.18	5.02	12.37

而转变为伊里石、高岭石和其他粘土矿物,并且粘土矿物分子中的一部分 Si 被 Fe 置换,并伴随其他一些复杂的化学反应和变化,使非稳定的粘粒胶结发生破坏。

3 结 语

(1) 扰动黄土湿陷后,平均孔隙直径、面积、周长、形状系数变小。微小孔隙含量增大,大、中孔隙含量减少。其中大、中孔隙的含量是影响黄土湿陷性的主要原因。

(2) 黄土湿陷系数与大、中孔隙面积百分比的关系为 $\delta_s = Ae^{Bx}$, 当 $x \geq (-4.1997 - \ln A)/B$, 即大、中孔隙含量大于该值时,扰动黄土仍具有湿陷性。这一结论能否广泛应用还有待更多的工程实践检验。

(3) 扰动黄土的湿陷过程中土体的各向异性明显增强,颗粒排列向有序性方向发展。

(4) 黄土湿陷后, Si、Ca、O 的含量减少, Fe 的含量增加,其他元素含量仅有微小变化,说明黄土浸水后,蒙脱石中的一部分 SiO_2 、 $CaCO_3$ 被溶滤析出而转变为伊里石、高岭石和其他粘土矿物,并且粘土矿物分子中的一部分 Si 被 Fe 置换,并伴随其他一些复杂的化学反应和变化,使非稳定的粘粒胶结发生破坏。

参考文献:

References:

[1] 刘保健,支喜兰,谢永利,等. 公路工程中黄土湿陷性问题分析[J]. 中国公路学报,2005,18(4):27-31.
LIU Bao-jian, ZHI Xi-lan, XIE Yong-li, et al. Analysis of problems on loess hydrocompaction in highway engineering[J]. China Journal of Highway and Trans-

port, 2005, 18(4): 27-31.

[2] 景宏君,张 斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报,2004,4(2):14-18.
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Loess subgrade strength law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 14-18.

[3] 顾成权,孙 艳. 土体内聚力随含水量、粘粒含量及干密度变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质,2005,(1):34-36.
GU Cheng-quan, SUN Yan. Discussion on the cohesion of soil changing with water content, cohesive soil content and dry density[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (1): 34-36.

[4] 沈珠江. 土体结构性的数学模型: 21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报,1996,18(1):95-97.
SHEN Zhu-jiang. Mathematics model of soil structure-kernel problems of soil mechanic for 21th century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95-97.

[5] 景宏君,张 斌. 黄土地区公路路基冲击压实试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):25-29.
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Experiments of highway subgrade impact compaction in loess region[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 25-29.

[6] Kevex Instruments. Kevex SIGMA ultrascan process, mirage and mirage professional user's manual[Z]. New York: Kevex Corporation, 1994: 237-240.

[7] 雷祥义,王书法. 黄土的孔隙大小与湿陷性[J]. 水文地质工程地质,1987,(5):15-18.
LEI Xiang-yi, WANG Shu-fa. Size of loess pores in relation to collapsibility[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987, (5): 15-18.

[8] 施 斌,李生林. 粘性土微观结构 SEM 图像的定量研究[J]. 中国科学:A 辑,1995,25(6):666-672.
SHI Bin, LI Sheng-lin. Quantitative study of SEM image for clay microstructure[J]. Science in Chinese: Series A, 1995, 25(6): 666-672.

[9] 顾成权,孙 艳. 黄土湿陷起始压力判断探讨[J]. 水文地质工程地质,2004,(2):1-3.
GU Cheng-quan, SUN Yan. A discussion of original pressure of loess collapsibility[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, (2): 1-3.