

三门峡黄土结构性对土水特征曲线的影响

宋陈雨¹, 霍继炜², 高宇甲², 刘江江², 姜彤¹, 吴琦^{1*}, 张俊然¹

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 中建七局第四建筑有限公司)

摘要:用压力板仪对国道 G310 三门峡西至豫陕界段相同干密度的原状和重塑黄土进行土水特征曲线试验,采用扫描电镜试验观察两者的微观结构,探讨结构性对其土水特征曲线的影响。试验结果表明:原状和重塑土的土水特征曲线、饱和度和含水率均随吸力的增大而减小,重塑土的土水特征曲线位于原状土的右上方。原状土的胶结状态完好,骨架稳定,孔隙较大,重塑土胶结状态已破坏,孔隙大小较均匀,颗粒堆积构成土体骨架。原状土土水特征曲线前期变化速率较大,排水速率大于重塑土,到达残余饱和度的时间较短,Fredlund & Xing 模型拟合试验数据显示,原状土土水特征曲线的进气值拟合参数 α 较小,主要因为原状土的大孔隙是排水的天然通道,而重塑土的孔隙较均匀。

关键词:微观结构; 压力板仪法; 土水特征曲线; 扫描电镜

1 前言

黄土的结构疏松,垂直节理发育,多处于非饱和状态,是一种典型的结构性土,结构性是其发生湿陷的重要原因。土的结构性是指构成土体的颗粒大小,形态以及分布特征,胶结物的胶结形式,孔隙的分布、形态、大小以及数量。

近年来,黄土高原地区的基础建设大规模开展,由于地形条件的限制,出现人工切坡现象,形成大量的工程黄土边坡,坡率直接影响黄土边坡的稳定性。工程建设过程中的黄土常处于非饱和状态,在降雨、蒸发等条件下,黄土的结构会发生改变,黄土地区的建筑物及路基会受到严重影响,建筑墙体开裂、错动甚至塌方,路基不均匀沉降、内部空腔等,产生的危害极为严重;张宏博等研究得出透水性混凝土桩能显著提高黄泛区粉性土复合地基承载力;潘明等对不同含水率的重塑黄土进行三轴试验研究其强度特性;李明针对黄土地区公路路基沉陷,采用铝粉水泥浆注浆对其处治;房建宏等研究青海黄土的工程特性提出相应的公路修筑对策;马林等研究了交通重载作用下黄土路基变形特性。

土水特征曲线(简称 SWCC)是表示非饱和土的吸力(基质吸力、总吸力)与含水率(重力含水率、体积

含水率或饱和度)之间关系的曲线。在非饱和土的研究中,土体的渗透系数、孔隙水分布特征和土体强度均可以通过土水特征曲线反映。影响黄土的工程性质以及相关力学性质的主要因素就是水,土水特征曲线是衡量非饱和黄土土壤和水分之间相关关系以及两者之间特征的重要曲线。因此系统研究三门峡黄土结构性对土水特征曲线的影响显得非常重要。

目前已有大量学者针对黄土的结构性进行了系统研究。崔靖俞采用扫描电镜和颗粒及裂隙图像分析系统研究原状黄土湿陷性与微观结构的关系;关于黄土土水特征曲线的研究,侯晓坤等研究了不同深度处原状黄土的土水特征曲线;伊盼盼等设计了流动试验,利用模型快速地反演出土水特征曲线;李萍等采用原状黄土以及重塑黄土,设计单点法试验预测出土水特征曲线;范珊等分析了边坡稳定性与土水特征曲线之间的关系,得出不同地区的黄土基质吸力与抗滑力之间的联系;许建研究了西安地区原状黄土和重塑黄土在冻融过程中强度的变化;梁燕等研究了含水率和渗水方向对原状黄土土水特征曲线的影响;郭鸿等采用 Soil Vision 软件建模分析,预测出原状黄土的土水特征曲线;刘奉银等控制密度和干湿循环次数研究黄土的土水特征曲线。

综上所述,目前针对黄土地区基础建设中人工边

收稿日期:2020-04-19(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41602295)

作者简介:宋陈雨,男,硕士。E-mail:songchenyu1996@126.com

* 通信作者:吴琦,男,教授。E-mail:495426367@qq.com

坡和公路路基的研究较多,工程中边坡失稳、建筑物墙体开裂、路基沉陷等问题亟待解决。非饱和黄土微观结构和土水特征曲线的独立研究相对较多,但结合微观试验研究土体结构对土水特征曲线的影响鲜有报道。该文结合国道 G310 三门峡西至豫陕界段新建工程实际,现场采取原状黄土试样,采用压力板仪量测相同干密度的原状土和重塑土的土水特征曲线,并用扫描电镜观察两者的微观结构,系统研究三门峡黄土结构性对其土水特征曲线的影响。

2 试验基本情况

试验黄土土样取自国道 G310 三门峡西至豫陕界段南移新建工程灵宝市东上村桥。土样的物理力学性质指标如表 1 所示。其中原状土的干密度为 1.33 g/cm³,含水率为 5.1%。

表 1 土样基本物理性质指标

液限 (17 mm)/%	液限 (10 mm)/%	塑限 (2 mm)/ %	塑性 指数	相对 密度	最优 含水 率/%	最大干密 度/(g • cm ⁻³)
31.61	27.79	18.82	12.79	2.61	17.5	1.65

为研究黄土中各颗粒组分的相对含量以及土体颗粒组成情况,对试验土样进行颗粒分析试验,试验反映出土体中各组分的相对含量,根据曲线变化趋势,判断出颗粒均匀性(图 1)。由图 1 可知:试验采用的黄土颗粒粒径分布为 0.005~0.075 mm,主要为粉粒。

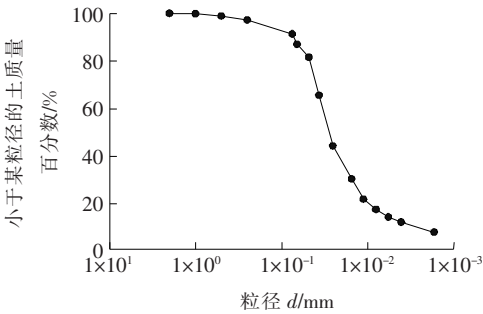


图 1 黄土颗分曲线

3 土水特征曲线试验

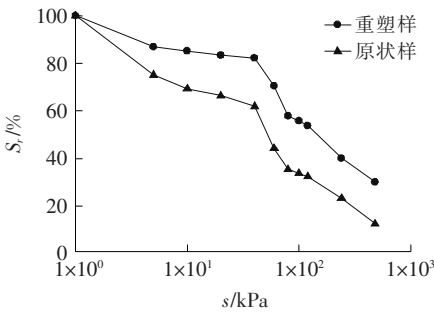
3.1 试验介绍

采用压力板仪法进行相关土水特征曲线试验。首先制备原状土和重塑土环刀试样(直径 61.8

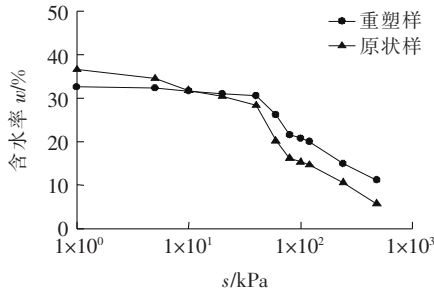
mm,高度 20 mm),控制重塑土的含水率和干密度与原状土相同。将两者放入真空饱和容器中进行饱和。安装压力板仪的陶土板和压力室,将陶土板进行饱和并排净气泡,取出饱和后的试样,按照试验设定的吸力路径(0→5→10→120→40→60→80→100→120→240→480 kPa)进行逐级加压。通过压力板仪排水管刻度,判断试验的吸力平衡,天平测量试样的质量,计算含水率和饱和度。试验需定时排气,以便加速吸力平衡,试验历时 45 d 左右。

3.2 试验结果

如图 2(a)所示,用吸力 s 和饱和度 S_r 表示土水特征曲线。由图 2(a)可知:原状样和重塑样饱和度随着吸力的增大而减小。原状样前期变化速率较快,其曲线位于重塑样左下方。



(a) S_r-s



(b) $w-s$

图 2 土水特征曲线

如图 2(b)所示,用吸力和含水率表示土水特征曲线。由图 2(b)可知:原状样和重塑样的含水率均随着吸力的增大而减小。原状样前期变化速率较快且曲线在重塑样上方,随着吸力持续增大,原状样曲线位于重塑样左下方。原状样和重塑样土水特征曲线,饱和度/含水率均随着吸力增大而减小。

图 3 为孔隙比随吸力的变化曲线。由图 3 可知:原状样曲线与重塑样曲线基本一致,随着吸力的增大其变化范围较小,体积没有收缩。对比膨胀土孔隙比随吸力的变化曲线,黄土由于矿物成分与膨胀土不同,其试验过程中孔隙比变化曲线也存在差异。

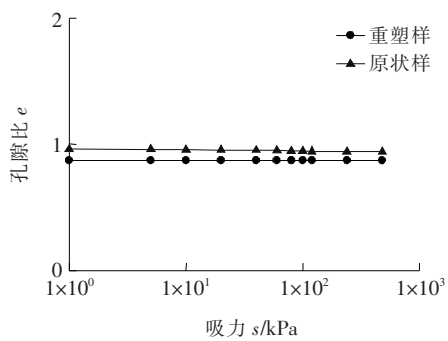


图 3 $e-s$ 关系曲线

4 土体微观试验

土体的微观结构主要指土颗粒之间的接触方式、大小形状、空间分布特征及其表面的光学特性。试验采用扫描电镜观察原状及重塑土样的微观结构。

4.1 试验前期准备

SEM 试验土样的干密度和含水率与压力板仪法试验一致,利用液氮和 FD-1 型冷冻干燥机对其脱湿。先用液氮将试样冷冻,将处理过的试样放到冷凝干燥机进行干燥试验。试验采用的冷冻干燥机,能够调节温度和气压,整个干燥过程试样的原生结构不会破坏。

4.2 试验结果

图 4 为土样的微观图片。

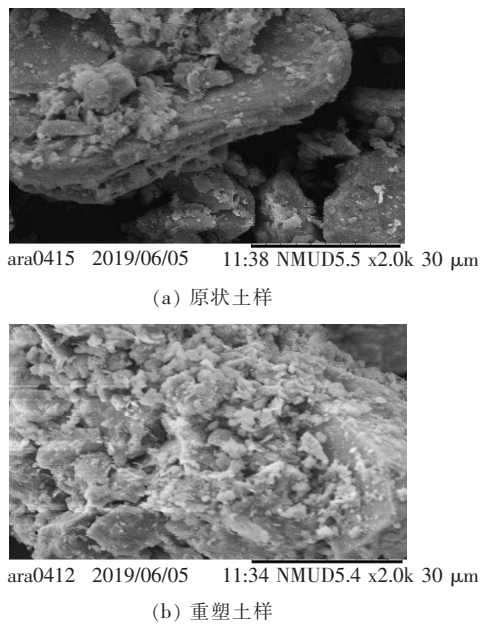


图 4 SEM 图像

由图 4 可知:原状土样颗粒完整,颗粒之间的孔隙

没有破坏,土体内颗粒间的胶结状态完好,可以明显地看到颗粒的形态,结构性特征更为显著;重塑土内部颗粒间的胶结状态遭受到破坏,内部以单一的颗粒为主,微观孔隙减少,骨架结构为密实颗粒堆叠状态。原状土具备原生结构,重塑土由于压实丧失土体原生结构。

5 试验结果分析

5.1 曲线拟合

采用 Fredlund & Xing 模型,拟合效果较好,应用范围比较广泛。针对该文,利用原来的模型表达式很难对其他参数进行定量化,在此将 Fredlund & Xing 模型进行相应的变换,得到 FX 模型用饱和度和基质吸力表达的一种形式,如式(1)所示:

$$S_r = 100 \times \frac{[1 - \ln(1 + s/s_{re}) / \ln(1 + 10^6/s_{re})]}{[\ln(2.718\ 28 + (s/a)^m)]^n} \quad (1)$$

式中: S_r 为饱和度; s 为吸力; s_{re} 为残余吸力; a 、 m 、 n 为与进气值相关的拟合参数。

试验得到的土水特征曲线是由一个个离散的点连接而成的曲线,模型拟合可得出连续曲线,计算出任意吸力对应的饱和度和含水率。利用 Origin 软件将试验测定的土水特征曲线通过模型拟合,得出拟合曲线。拟合参数如表 2 所示。

土样	拟合参数			拟合度 R^2
	a	m	n	
重塑土	256.353 3	0.700 2	3.346 8	0.957 0
原状土	198.858 0	0.594 8	5.166 6	0.955 2

土水特征曲线拟合结果如图 5 所示。

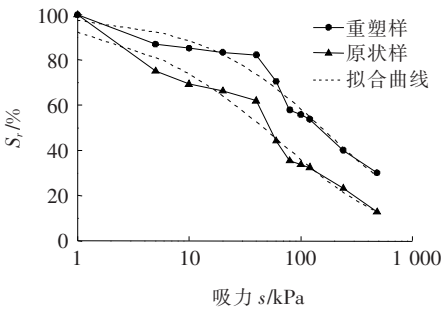


图 5 土水特征曲线拟合结果

由图 5 可知:两种土样拟合度均大于 95%,拟合度越高,模型对试验土体越适用,其拟合曲线的变化趋势与实测数据得到的曲线变化特征一致。原状土的土

水特征曲线进气值拟合参数 a 明显低于重塑土。

5.2 土体结构对曲线的影响

根据相同干密度和含水率原状和重塑土样的 SEM 试验图片可以发现两者之间存在明显的差异。由 SEM 试验可知,重塑后土样结构遭受到破坏,孔隙减少甚至消失。

原状土扫描图片中的孔隙明显要比重塑土大,原状土经历过多次干湿循环次数,颗粒间的胶结牢固,形成大量可供孔隙水流动的天然通道。而重塑土样,原来的结构已被破坏,孔隙分布均匀,颗粒大小较均匀,颗粒间呈现出堆积状态。并且原状土土水特征曲线前期变化速率较快,重塑土曲线位于原状土右上方。原状土的进气值小于重塑土,如与进气值相关的拟合参数 a 为:原状土为 198.858 0,重塑土为 256.353 3。主要原因为原状土的大孔隙是排水的天然通道,而重塑土的孔隙较均匀。

6 结论

对三门峡原状黄土和重塑黄土进行了土水特征曲线试验和扫描电镜试验,系统分析了结构性对其土水特征曲线的影响,主要结论如下:

(1) 原状和重塑土的饱和度和含水率均随着吸力的增大而逐渐减小。重塑土的土水特征曲线位于原状土右上方。原状土和重塑土的孔隙比随着吸力增大均基本不变。

(2) 原状土的大孔隙较多,颗粒胶结状态没有被破坏,骨架结构完整。而重塑土孔隙少且大小均匀,颗粒间的胶结状态破坏,颗粒间呈现出明显的堆叠状态。

(3) 由 Fredlund & Xing 模型拟合结果可知,原状土进气值较小,主要因为原状土大孔隙是排水的天然通道,而重塑土的孔隙较均匀。

参考文献:

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [2] 田堪良,王沛,张慧莉. 黄土结构性分析及新认识[J]. 人民黄河,2012(4).
- [3] 叶万军,李晓,杨更社,等. 黄土路堑边坡最佳综合坡率的研究[J]. 中外公路,2016(1).
- [4] 张宏博,刘源,陈晓光,等. 透水性混凝土桩在黄泛区粉性土地基中的加固机理及效果研究[J]. 中外公路,2019(3).
- [5] 潘明,全飞. 基于不同含水率下重塑黄土强度特性试验研究[J]. 中外公路,2019(3).
- [6] 李明. 铝粉水泥浆在黄土路基沉陷注浆处治工程中的应用[J]. 中外公路,2019(3).
- [7] 房建宏,王振,徐安花,等. 青海黄土工程特性及公路修筑对策研究[J]. 中外公路,2017(6).
- [8] 马林,张军,赵建斌,等. 重载作用下黄土路基变形特性研究[J]. 中外公路,2016(6).
- [9] 李志清,李涛,胡瑞林,等. 非饱和土土水特征曲线(SWCC)测试与预测[J]. 工程地质学报,2007(5).
- [10] 刘熙媛,刘永前,周建彪,等. 非饱和原状土与重塑土土一水特征曲线对比研究[J]. 工业建筑,2017(7).
- [11] 崔靖俞,张吾渝,解邦龙,等. 西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究[J]. 岩土工程学报,2019(S2).
- [12] 安亮,邓津,郭鹏,等. 黄土微观参数指标与动弹性模量关联度研究[J]. 岩土工程学报,2019(S2).
- [13] 侯晓坤,李同录,谢萧,等. 甘肃 Q_3 原状黄土的微观结构对其土一水特征曲线的影响[J]. 水利学报,2016(10).
- [14] 伊盼盼,牛圣宽,柳燕子. 非饱和土的土水特征曲线测试方法研究[J]. 中国农村水利水电,2016(1).
- [15] LI P, LI T. L, Vanapalli S. K. Prediction of Soil-Water Characteristic Curve for Malan Loess in Loess Plateau of China [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 432-447.
- [16] 范珊,张晓超,裴向军,等. 不同地区原状黄土土水特征曲线试验研究及其在边坡稳定性评价中的应用[J]. 水利水电技术,2019(1).
- [17] 许健,王掌权,任建威,等. 原状与重塑黄土冻融劣化机理对比试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2018(3).
- [18] 梁燕,杜鑫,黄富斌,等. 含水率与土样异向对原状非饱和黄土土一水特征影响试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016(6).
- [19] 郭鸿,李军,王鹏程,等. 原状黄土土水特征曲线预测方法研究[J]. 中国科技论文,2018(1).
- [20] 刘奉银,张昭,周冬,等. 密度和干湿循环对黄土土一水特征曲线的影响[J]. 岩土力学,2011(S2).
- [21] 孙德安,张俊然,吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土一水特征曲线[J]. 岩土力学,2013(7).
- [22] Feng M, Fredlund D G. Hysteretic Influence Associated with Thermal Conductivity Sensor Measurements. Proceedings from Theory to the Practice of Unsaturated Soil Mechanics in Association with the 52nd Canadian Geotechnical Conference and Unsaturated Soil Group [R]. Regina Sask, 1999: 651-657.