

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.04.011

非饱和重塑黄土固结特性试验研究

扈胜霞^{1,2}, 张 栋³, 杨 瑞², 姚志华⁴

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000;
3. 延安大学 物电学院, 陕西 延安 716000; 4. 空军工程大学 机场建筑工程系, 陕西 西安 710038)

摘 要: 以延安新区工程建设中填方区的重塑黄土为研究对象, 以准确计算填方区黄土地基的沉降为主要目标, 以工程实际中填方区黄土的岩土工程设计参数为参照, 室内制取了 Q3 重塑黄土固结样。开展了 4 组控制吸力的非饱和土固结试验, 得到了非饱和重塑黄土的压缩曲线, 分析了吸力对重塑黄土固结特性的影响。研究表明: 初始状态相同的重塑黄土土样, 压缩系数随吸力的增大而减小; 非饱和重塑黄土试样的压缩指数除了受竖向压力影响外, 也受吸力作用的影响, 压缩指数随着吸力的增大而减小; 在 2 MPa 的竖向应力下, 重塑黄土土样总的竖向应变较小, 最大的竖向应变为 0.7%。

关键词: 重塑黄土; 基质吸力; 压缩系数; 压缩指数; 竖向应变

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)04-0055-04

Experimental Study on Consolidation Characters of Unsaturated and Disturbed Loess

HU Shengxia^{1,2}, ZHANG Dong³, YANG Rui², YAO Zhihua⁴

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Architectural and Civil Engineering Institute, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China;

3. College of Physics and Electronic Information, Yanan University, Yan'an, Shaanxi 716000, China;

4. Department of Airdrome Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: Taking disturbed loess of filled project in Yan'an new district engineering construction as the research object, this research calculated the accurate settlement of loess foundation in filled area, based on the geotechnical engineering design parameters of filled project loess, indoor Q3 disturbed loess samples were made for consolidation test. Four groups of unsaturated consolidation tests with different controlling matric suction were carried out. Compressive curve of the unsaturated and undisturbed loess sample were obtained. The influence of matric suction to consolidation characteristics of disturbed loess was analyzed. The results show that: For same initial state disturbed loess soil samples, compressibility coefficient reduces when the matric suction increases; Compression index of unsaturated and disturbed loess sample was influenced not only by vertical pressure but also by matric suction. Compressibility index reduces when the matric suction increases; The total vertical strain of disturbed loess sample which control parameters referred to the actual geotechnical engineering design plan was small under the 2 MPa vertical stress. The biggest vertical strain was 0.7%.

Keywords: disturbed loess; matric suction; compressibility coefficient; compressibility index; vertical strain

随着我国十二五规划纲要中“在中西部有条件的地区培育壮大若干城市群”的提出, 新城市建设在西部地区迅速发展。延安新区建设是延安市平山造地、上山建城, 拓展城市发展空间, 实施“中疏外扩”

城市发展战略的重大举措^[1]。对于延安新区建设工程来说, 填筑体基本都是重塑非饱和的黄土。为了准确计算填方区黄土地基的沉降, 有必要用现代非饱和土力学的理论和试验方法对重塑黄土的压缩固

收稿日期: 2016-03-12

修稿日期: 2016-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309199, 51509257); 国家科技支撑计划项目(2013BAJ06B00); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2014KTDZ03-01)

作者简介: 扈胜霞(1974—), 女, 甘肃临夏人, 讲师, 主要从事软弱土地基处理方面的教学及科研工作。E-mail: sxhu06@163.com。

结特性进行研究。

非饱和土和饱和土的本质区别在于吸力,非饱和土力学的发展是围绕吸力这一基本概念而开展的。随着 Fredlund《非饱和土力学》^[2] 专著的出版及大量的研究工作,确立了吸力是控制非饱和土的强度、变形和渗流过程的一个关键因素的概念^[3]。许多专家学者基于吸力的概念,研究了非饱和土的特性,取得了大量成果^[4-10]。对延安新区工程建设中填方区重塑黄土来说,基于非饱和土理论开展的试验研究在文献中还不多见。

本文采用非饱和固结试验仪对延安新区 Q₃ 黄土参照延安新区实际工程建设中非饱和黄土填土的压实控制参数,制得了重塑非饱和黄土样。开展了控制吸力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 500 kPa 的重塑非饱和土固结试验,分析了吸力对重塑黄土固结特性的影响。

1 试验土样与试验方法

1.1 试验土样

本文所用土样取自延安新区工程建设现场,即重塑 Q₃ 土样取自从挖方区运到填方区的 Q₃ 散土。重塑土样的控制参数参照了实际的岩土工程设计方案。土粒相对密度为 2.72,最大干密度为 1.91 g/cm³,压实度为 93%。重塑土样的制取过程是:测得从工程建设现场取得原散状黄土的含水率是 6% (运输和保存的过程中可能会有部分水量流失);由控制参数最大干密度和压实度计算得土样干密度为 1.78 g/cm³,孔隙比 e 为 0.53,参照工程实际的设计方案,饱和度控制在 85%,按 $S_r = \frac{G_s W}{e}$ 进一步计算得出控制含水率为 16.56%,配水按 17% 计算。由含水率 17% 和原散状土的重量算出应加的水量。散状土碾碎、过 5 mm 细筛后置于盆内,将应加的水用细喷壶分层加到土里面,密闭放置。每隔 24 h 均匀搅拌一次,过 72 h 即可认为水分均匀,17% 含水率的重塑土已拌好。之后用重塑土制样器制取高度 20 mm,面积 30 cm² 的重塑固结样。

1.2 试验仪器

本文所用试验仪器为 FGJ—ZO 型非饱和土固结仪。该仪器由压缩部件、容器和容器罩子部件、加荷部件、台架部件和数据采集系统五部分部件所组成。该非饱和土仪器具有如下特点:(1) 高进气值陶土板:非饱和土固结仪压力室座底部装有高进气值陶土板^[11],进气值为 500 kPa,以量测和控制吸

力;(2) 容器和容器罩部件:起密封作用及用来传递荷重力;(3) 数据采集系统:该仪器设有三个数据采集通道,由土工试验数据微机采集系统统一进行试验数据采集;(4) 高精度气压调压阀和阀门:可根据试验的需要而对试样施加气压和对陶土板进行冲水排气;(5) 排水量测装置:采用内径 4 mm 的尼龙管量测排水体积。

1.3 试验方法

本文做了分别控制吸力为 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 500 kPa 竖向应力逐级增大的重塑黄土的非饱和土固结试验。具体试验方法是:将用重塑土制样器制的黄土固结样装入非饱和土固结仪,对吸力控制为 100 kPa 的第一组非饱和土固结样,先加 100 kPa 的吸力和相应的用于平衡气压力的砝码,确保数据采集系统采集软件的各窗口数据显示正常后,再加 12.5 kPa 的竖向压力直至稳定。一般非饱和土的试验历时比较长,在一级竖向压力下需时 2 d 以上。以此类推,逐级加竖向压力 25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa、1.6 MPa 直至 2.0 MPa。在试验过程中,数据采集系统会自动记录试样高度变化等。吸力控制为 200 kPa、300 kPa 和 500 kPa 的重塑黄土的非饱和土固结试验的方法与上述类似。

2 试验结果分析

2.1 $e-p$ 曲线

非饱和和重塑黄土的固结压缩特性研究并在其基础上的沉降量计算是填方区工程建设中十分关注的问题。土体的压缩特性可从孔隙比、竖向应变与竖向压力的变化关系来研究。文献[12]开展了在最优含水率情况下控制压实度分别为 70%、80%、85% 和 90% 的一维高压固结试验,通过绘制 $e-p$ 和 $e-\lg p$ 曲线分析了延安新区压实黄土的压缩变形特性,得出了压实黄土在侧限条件下的应力-应变关系可以用 Gunary 模型拟合,压实黄土压实度越高,总变形量越小等结论。本文开展了控制吸力的非饱和土固结试验,得到了不同吸力作用下重塑黄土的 $e-p$ 曲线,结果如图 1 所示。从图 1 可见, $e-p$ 曲线总的趋势是随着竖向压力 p 的增大,孔隙比 e 越来越小。但对于初始干密度、压实度和孔隙比都相同的重塑黄土试样来说,控制吸力越大,在 2 MPa 的竖向压力下,孔隙比的变化量 Δe 就越小。目前,基于土体压缩变形特性和 $e-p$ 曲线而建立的分层总和法仍是各种地基规范推荐的沉降量计算的基本方

法^[13-15]。由本次试验数据计算得:吸力 100 kPa 时压缩系数 a_{1-2} 为 0.151 MPa^{-1} ;吸力 300 kPa 时压缩系数 a_{1-2} 为 0.135 MPa^{-1} ;吸力 500 kPa 时,压缩系数 a_{1-2} 为 0.095 MPa^{-1} 。说明初始状态相同的重塑黄土土样,吸力越大,压缩系数越小。填方区压实黄土是一种典型的非饱和土,随季节变换,土体的含水率和吸力都在变化。用目前各种地基规范推荐的基于土体压缩变形特性和 $e-p$ 曲线计算压缩系数基础上的沉降量计算方法不能反映填方区重塑非饱和黄土真实的沉降变形影响因素,需考虑吸力的影响。

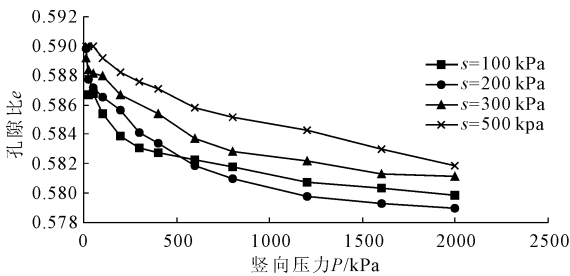


图 1 $e-p$ 曲线

2.2 $e-\lg p$ 曲线

不同吸力作用下非饱和和重塑黄土的 $e-\lg p$ 曲线如图 2 所示。从图 2 可见,重塑压实黄土的 $e-\lg p$ 曲线没有明显的拐点,但也不是一条直线,说明压缩指数 $C_c = \Delta e / \Delta \lg p$ 不是一个常数,而是随着竖向压力的增加而减小。在图 2 中,吸力为 500 kPa 的土样 $e-\lg p$ 曲线在最上面,吸力为 300 kPa、200 kPa 和 100 kPa 土样 $e-\lg p$ 曲线依次在下。其中吸力 100 kPa 和 200 kPa 的 $e-\lg p$ 曲线有交叉现象。说明非饱和和重塑黄土的压缩指数除了受竖向压力影响外,也随着吸力的增大而减小。

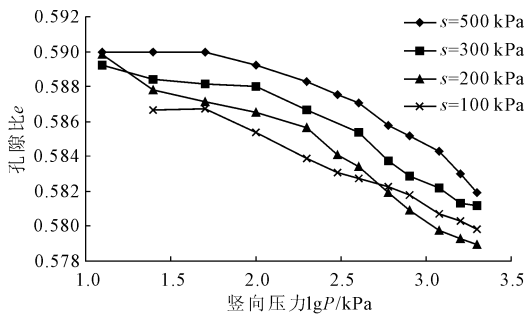


图 2 $e-\lg p$ 曲线

2.3 应力-应变曲线

应力-应变关系是土体本构关系之一,是理论和实践上都很关注的课题。对于侧向受限制的固结压缩土样来说,用竖向应变和竖向应力之间的关系来反映其应力-应变关系。竖向应变 ϵ_s 定义为:

$\epsilon_s = \frac{\Delta h_i}{H_0}$, 其中 H_0 表示试样的初始高度, Δh_i 表示某级压力下试样固结稳定后的总变形量。本次试验结果的竖向应力和竖向应变之间的关系曲线如图 3 所示。从图 3 可见,参照了实际的岩土工程设计方案控制参数的重塑黄土土样在 2 MPa 的竖向应力下,总的竖向变形量比较小,最大的竖向应变为 0.7%,不到 1%。就不同控制吸力来说,吸力为 500 kPa 时,土样的竖向应变最小为 0.51%;吸力为 200 kPa 时,土样的竖向应变值最大为 0.7%。为了进一步分析吸力对非饱和和重塑黄土应力-应变关系的影响,绘制了吸力与竖向应变之间的关系曲线,如图 4 所示。从图 4 可见,当竖向应力小于 800 kPa 时,竖向应变随着吸力的增大而减小。当竖向应力大于 800 kPa 时,吸力从 100 kPa 增大到 200 kPa 时,竖向应变也增大,吸力大于 200 kPa 后,竖向应变随着吸力的增大而减小。这种现象可能是因为在非饱和土体中,作用于土体骨架上的“净法向应力”和作用于收缩膜的基质吸力都能够引起体积应变,但这两种力在作用位置、作用面积以及作用机理上均不相同,因而不能像饱和土中的“净法向应力”与“孔隙水压力”那样,统一于有效应力,而直接叠加或合并。因此竖向应变并没有随着吸力的增大在低竖向应力和高竖向应力时都线性减小,而是在高竖向应力下吸力从 100 kPa 增大到 200 kPa 时反而略有增大。

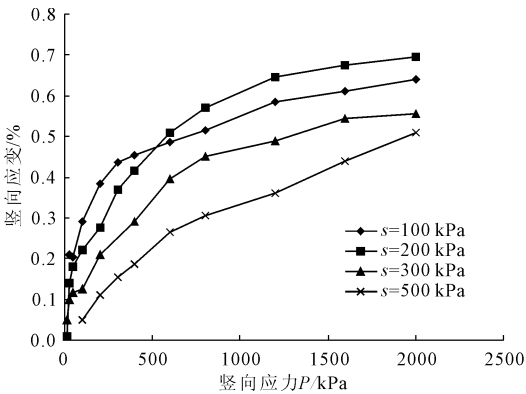


图 3 竖向应力-竖向应变曲线

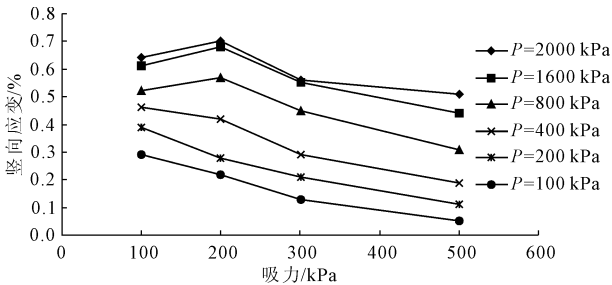


图 4 吸力-竖向应变曲线

3 结 语

延安新区工程建设中的填方区多为非饱和的重塑 Q_3 黄土,填方区的沉降和固结变形特性是实际工程和理论上都关注的问题。本文基于非饱和土试验和理论,参照工程实际的岩土工程设计参数,开展了重塑 Q_3 黄土控制吸力和竖向应力的非饱和土固结试验,分析了吸力对重塑黄土固结特性的影响,得到如下结论:

(1) 初始状态相同的重塑黄土土样,吸力越大,压缩系数越小。基于 $e-p$ 曲线计算压缩系数基础上的沉降量计算方法不能反映填方区重塑非饱和黄土真实的沉降变形影响因素,需考虑吸力的影响。

(2) 重塑非饱和黄土的压缩指数 $C_c = \Delta e / \Delta \lg p$ 不是一个常数,而是随着竖向压力的增加而减小。重塑非饱和黄土的压缩指数除了受竖向压力影响外,也随着吸力的增大而减小。

(3) 参照了实际岩土工程设计参数的重塑黄土土样在 2 MPa 的竖向应力下,总的竖向应变比较小,不到 1%。竖向应力和吸力都能够引起重塑非饱和黄土的竖向应变,但二者的作用机理不同,作用效果具有非线性。

参考文献:

- [1] 王衍汇,倪万魁,石博溢,等.延安新区黄土高填方边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(5):52-56.
- [2] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M].陈仲颐译.北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3] 沈珠江.非饱和土力学实用化之路探索[J].岩土工程学报,2006,28(2):256-259.

- [4] 陈正汉.非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J].岩土工程学报,2014,36(2):201-272.
- [5] 姚仰平,牛 雷,韩黎明,等.超固结非饱和土的试验研究[J].岩土力学,2011,32(6):1601-1606.
- [6] 韦 锋,姚志华,陈正汉,等.结构性对非饱和 Q_3 黄土强度和屈服特性的影响[J].岩土力学,2015,36(9):2551-2559.
- [7] 褚 峰,邵生俊,陈存礼.干密度对非饱和黄土基质吸力的影响[J].地下空间与工程学报,2015,11(6):1431-1436.
- [8] 戚国庆,黄润秋.基质吸力变化引起的体积应变研究[J].工程地质学报,2015,23(3):491-497.
- [9] 袁志辉,倪万魁,刘 茹,等.基于吸应力的非饱和黄土抗剪强度研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(5):648-653.
- [10] 李春海,方祥位,申春妮,等.Q2 黄土调整吸力的非饱和和三轴压缩试验研究[J].后勤工程学院学报,2015,31(1):7-10.
- [11] 陈正汉,扈胜霞,文 君,等.非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用[J].岩土工程学报,2004,26(2):161-166.
- [12] 黄雪峰,孔 洋,李旭东,等.压实黄土变形特性研究与应用[J].岩土力学,2014,35(S2):37-44.
- [13] 彭长学,杨光华.软土 $e-p$ 曲线确定的简化方法及在非线形沉降计算中的应用[J].岩土力学,2008,9(6):1706-1710.
- [14] 曹文贵,邓湘君,张 超.基于 Duncan - Chang 模型的地基沉降分层总和和分析方法探讨[J].岩土工程学报,2013,35(4):643-649.
- [15] 杨 晶,白晓红.压实黄土非线性压缩应力 - 应变关系在地基沉降计算中的应用[J].岩土力学,2015,36(4):1002-1008.