

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 1-0181-04

压实度与级配对路基重塑黏土 土-水特征曲线的影响

王协群¹, 邹维列², 骆以道³, 邓卫东⁴, 王 钊²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072;
3. 深圳勘察测绘院有限公司, 广东 深圳 518024; 4. 招商局重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘 要: 对重庆路基黏土采用压力膜仪量测了不同压实度重塑土样脱湿过程的土-水特征曲线 (SWCCs)、采用体积压力板仪量测了不同压实度、不同级配重塑土样脱-吸湿过程的土-水特征曲线。试验结果表明: (1) 压实度超过 90% 以后, 不同压实度的 SWCCs 在其直线段范围相互靠近, 即在路基土基质吸力平常变化范围的 SWCCs 逐渐趋于稳定; (2) 随着压实度的增大, 脱-吸湿循环滞回圈逐渐上移, 曲线由陡变缓。表明随着压实度的增大, 土体的储水系数逐渐减小, 土中的水分更不易吸入和排出, 对路基的稳定有利; (3) 相同含水率下, 大约以压实度 85% 为界, 压实度小于 85% 的黏土样和大于 85% 的黏土样的基质吸力基本上不随压实度 (干密度) 的变化而变化; (4) 相同压实度和含水率状态下, 粗粒含量多的土吸力更小, SWCCs 的滞回圈更小, 即干湿循环的影响更小。因此, 粗粒土较细粒土更适合用作路堤填料。

关 键 词: 路基; 压实度; 级配; 基质吸力; 土-水特征曲线

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Influence of compaction degree and gradation on SWCC of compacted clay soil

WANG Xie-qun¹, ZOU Wei-lie², LUO Yi-dao³, DENG Wei-dong⁴, WANG Zhao²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Shenzhen Geotechnical Investigation and Surveying Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518028, China; 4. China Merchants Chongqing Communications Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: Under the circumstance of single-dehydration process and dry-wet cycle process, the soil-water characteristic curves (SWCCs) of Chongqing compacted clay soil samples with different compaction degrees and different gradations were respectively obtained by means of temple apparatus and pressure plate apparatus. The testing results show that: (1) After compaction degree exceeding 90%, the linear sections of SWCCs of the soil samples with different compaction degrees close each other, which indicates that the SWCCs gradually tend to stability within the common matrix suction changing scope of this compacted clay soil. (2) With the increment of compaction degree, the hysteresis loops of dry-wet cycle process gradually move upward, and the SWCCs change from steep shape to mitigative shape; this indicates that the moisture in the soil samples is more difficult to be intaken or drained out, which is beneficial to the stability of subgrade. (3) Under the same water content, there is a boundary of compaction degree of 85% for the compacted clay soil, the matrix suctions of the soil samples with less than or more than this compaction degree basically do not change with compaction degree changing. (4) Under the same compaction degree and water content, the matrix suctions of the soil samples with more coarse grained soil are more smaller; and the hysteresis loops of SWCCs are also smaller, which indicates that the influence of dry-wet cycle process on coarse grained soil is smaller. Therefore, coarse grained soil is more suitable for use as fill material of subgrade.

Key words: subgrade; compaction degree; gradation; matrix suction; SWCC

1 引 言

路基工程所关心的是稳定和沉降, 尤其是

工后沉降, 其实质是路基土的强度与变形问题。对此, 已开展的研究不少, 但从土的非饱和性质方面着手并进行分析的不多。

收稿日期: 2010-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50979080); 国家高技术研究发展计划 (863) (No. 2009AA11Z102); 交通部西部交通建设科技攻关重点项目 (No. 200531874010); 湖北省自然科学基金项目 (No. 2009CDB383)。

第一作者简介: 王协群, 女, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要从事土工合成材料应用、非饱和土特性等方面的科研。E-mail: xqscwang@126.com

通讯作者: 邹维列, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事非饱和土特性、土工合成材料应用等方面的研究。E-mail: zwilliam@126.com

填土压实效果不佳是造成路堤稳定性差和工后沉降大的主要原因之一,所以要增强路堤的稳定性、减小工后沉降,应首先保证路基土的压实质量。因此,研究压实度(密度)对路基土力学性能的影响是十分必要的。

细粒土的变形和强度是含水率的函数^[1],尤其是其膨胀变形主要取决于黏粒与水的相互作用。压实含水率越低,土体压实后的干密度越大,单位体积内黏土颗粒含量越多,遇水后土的膨胀变形就越大。印度学者 Rao^[2]用 ASTM 滤纸法在碾压黏土中测试基质吸力时发现,黏粒含量越大,土中基质吸力越大,浸湿越容易塌陷。这就需要对土的颗粒组成对路基土力学性能的影响有更深入的认识。

土-水特征曲线(soil-water characteristic curve, 简称 SWCC)描述了非饱和土中基质吸力与体积含水率 θ 或重力含水率 w 或饱和度 S_r 之间的关系。SWCC 在非饱和土力学的应用中发挥着重要的作用,比如根据 SWCC,只需要测量土的含水率即可查得相应的基质吸力,并可由 SWCC 和常规饱和土的性质,按理论和经验关系得到非饱和土的抗剪强度、渗透系数。Barbour 等人将 SWCC 比作饱和土的 $e-\lg p$ 压缩曲线。可见,SWCC 在非饱和土的研究中占有重要地位。

对路基工程而言,研究路基土受干湿循环变化的特性尤其重要。因为路基边坡常年受到蒸发、降雨的往复作用,其稳定性将发生变化。本文利用重庆绕城高速公路试验段的路堤填筑用黏土,采用压力膜仪量测和分析不同压实度重塑黏土样的脱湿过程 SWCC 特性、采用体积压力板仪测量不同压实度、不同级配重塑黏土样脱-吸湿(干湿循环)过程 SWCC 特性。研究成果将为进一步研究非饱和路基土强度和变形特性提供重要基础。

2 试验仪器与试验方案

2.1 试验仪器

采用美国土壤水份仪器公司(Soil moisture equipment corporation)生产的压力板仪量测土样的 SWCCs。整套设备包括压力膜仪(3 bar)和体积压力板仪(2 bar)两个不同的部分,见图 1。压力膜仪可测量吸力范围较大的土-水特征曲线(称为大板),体积压力板仪可用于测量 200 kPa 以内的脱湿-吸湿循环过程的土-水特征曲线(称为小板)。



1—压力膜仪 2—压力板仪

图 1 压力板仪和压力膜仪

Fig.1 Pressure plate apparatus and template apparatus

2.2 试验方案

前述路堤填筑用黏土的重型击实试验结果为:最大干密度 $\rho_{d\max} = 2.13 \text{ g/cm}^3$; 最优含水率 $\omega_{\text{opt}} = 8.25\%$, 见表 1。将填料筛分成粒径分别小于 0.5、2.0 mm 的土料备用。在 $\omega_{\text{op}} \pm 2\%$ 左右,分别制成压实度 80%、82%、85%、88%、91%和 94%的试样,共计 48 个。详细试验方案见表 2,试验历时 5 个月。

3 不同压实度土样脱湿过程 SWCC 特性

3 种压实度土样脱湿过程的 SWCCs 见图 2。

表 1 土样的物理性质指标

Table 1 Indices of physical properties of clay soils

土样	液限 ω_L / %	塑限 ω_p / %	塑性指数 I_p	土粒相对 密度 G_s	最大干密度 $\rho_{d\max}$ / (g/cm ³)	最优含水率 ω_{opt} / %
重庆重塑黏土	27	18.3	8.7	2.71	2.13	8.25

表 2 试验方案

Table 2 Testing schemes

试验编号	试验过程	仪器	土料级配	制样压实度 / %	各压实度试样数 / 个	合计 / 个
1	脱湿	压力膜仪	过筛 $d_s \leq 0.5 \text{ mm}$	88、91、94	10	30
2	脱-吸湿	压力板仪	过筛 $d_s \leq 0.5 \text{ mm}$	80、82、85	2	6
3	脱-吸湿	压力板仪	过筛 $d_s \leq 0.5 \text{ mm}$	88、91、94	2	6
4	脱-吸湿	压力板仪	过筛 $d_s \leq 2.0 \text{ mm}$	88、91、94	2	6

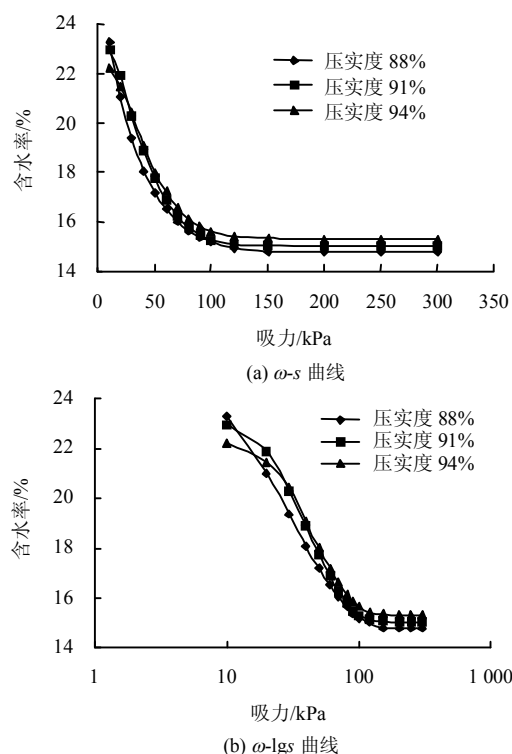


图2 不同压实度土样脱湿过程 SWCCs
Fig.2 SWCCs of single-dehydration process
under different compaction degrees

(1) 在吸力30~100 kPa范围, 该黏土压实样 ω -lg s 曲线(s 为基质吸力, 以下简称吸力)近似为直线。根据采用该黏土进行的室内路堤模型试验结果可知^[3], 此直线段的吸力范围也是该路堤受降雨入渗和蒸发的循环作用下, 吸力变化的主要范围。

(2) 相同含水率条件下, 压实度度小的土样吸力较小; 相同吸力条件下, 压实度小的土样含水率较低(这一结果与陈正汉等^[4]采用甘肃黄土所得到的结果相反); 吸力小于100 kPa时土样排水较快, 随着吸力的逐渐增大, 失水速率逐渐减小; 在吸力大于200 kPa后, 含水率变化已经很小, 并且趋于常数。

(3) 随着压实度的增大, 土的进气值增大(压实度88%、91%和94%土样对应的进气值分别约为10、20、25 kPa), 而饱和含水率随压实度的增大而减小(压实度88%、91%和94%土样对应的饱和含水率分别为26.51%、26.27%和24.99%)。这是因为随着压实度的增大, 土体更为密实, 土体孔隙减小, 空气进入土体需要的起始气压力越大, 而且在相同含水率下土的饱和度更高, 因此, 更易达到饱和; 压实度越高, 残余含水率更高, 但变化幅度不大。

(4) 压实度超过 90%以后, 不同压实度的 ω -lg s 曲线在直线段范围内相互靠近(见图 2(b)), 即该范围的 SWCCs 逐渐趋于稳定。因此, 保证路基填筑压实度在 90%以上, 对路基稳定是有利的。

4 不同压实度、级配土样脱-吸湿过程的 SWCC 特性

4.1 土样压实度的影响

土样不同压实度下脱-吸湿过程的 SWCCs 见图 3。

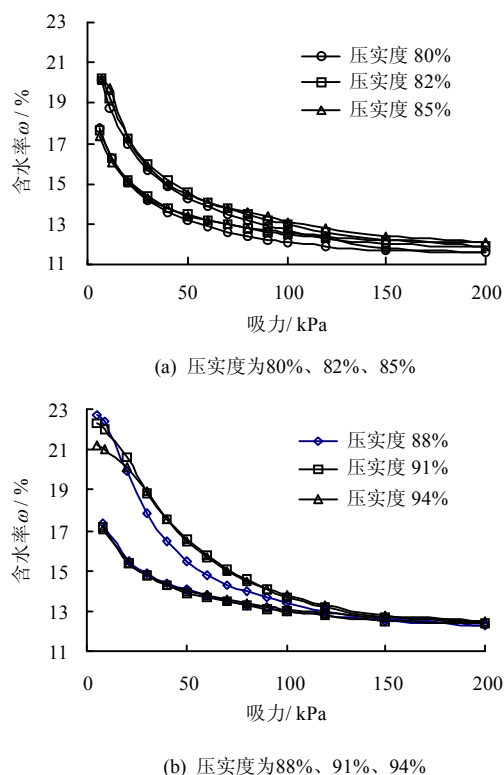


图3 不同压实度土样脱-吸湿过程的 SWCCs
Fig.3 SWCCs of dry-wet cycle process under different
compaction degrees

由图 3 可知:

(1) 不同压实度下, 该压实黏土脱-吸湿(干-湿循环)过程的 ω - s 曲线形状基本相似, 即随含水率的变化, 吸力近似呈幂指数变化。

(2) 对比图 3(a)和 3(b)可见, 随着压实度的增大, 滞回圈逐渐上移, 且曲线由陡变缓。这表明随着压实度的增大, 土体的储水系数逐渐减小。因为随着压实度的增大, 土体变得更为密实, 颗粒间结合更为紧密, 使土中的水分更不易吸入和排出。这一特点对路基的稳定是有利的。

(3) 从图 3(a)和图 3(b)还可以看出, 同一含水率下, 大约以压实度 85%为界, 压实度小于 85%的土样和大于 85%的土样, 无论是脱湿段还是吸湿段, 吸力基本上不随压实度(干密度)的变化而变化。这与文献[5]的结论是基本一致的。

4.2 土样级配的影响

采用两种筛孔直径($d_s < 0.5$ mm 和 $d_s < 2.0$ mm)所获得的级配土样脱-吸湿过程的 SWCCs, 见图 4。

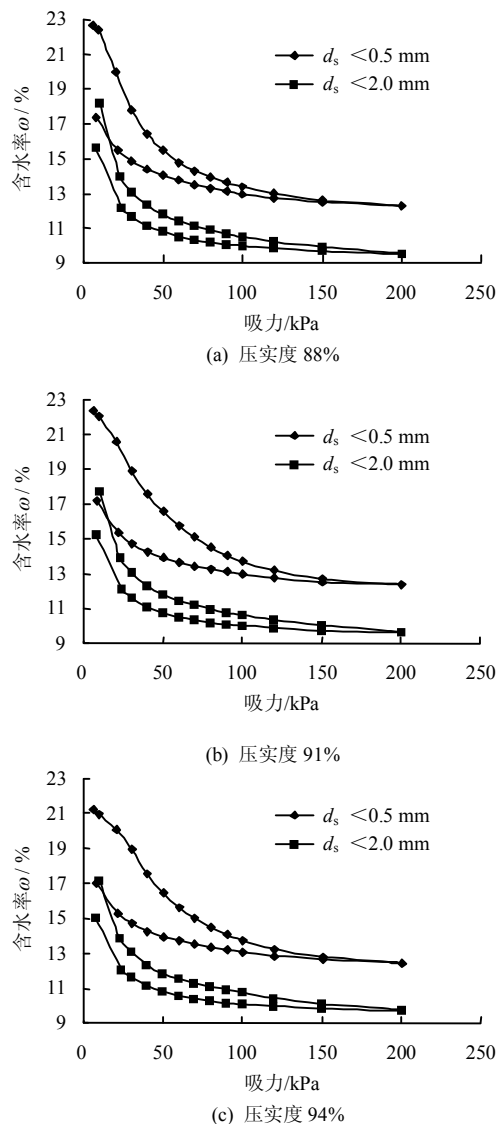


图4 不同级配土样脱-吸湿过程的 SWCCs
Fig.4 SWCCs of dry-wet cycle process
under different soil gradations

从图4可以看出:

(1) 在同一压实度下, 粗粒含量高的土样脱-吸湿 SWCCs 下移, 其饱和含水率与残余含水率更低; 相同含水率状态下, 粗粒含量少的土吸力更大。这与前述印度学者 Rao 的结论是一致的^[2]。黏粒含量越大, 压实黏土中基质吸力越大, 浸湿越容易塌陷。因此, 粗粒土较细粒土更适合用作路堤填料。

(2) 同一压实度下, 粗粒含量高的土, 其土-水特征曲线的滞回圈更小, 即干湿循环的影响更小, 通过干湿循环达到稳定的次数也要少。因此, 粗粒含量多的路基, 在干湿循环影响下趋于稳定的时间更短。

5 结 论

本文采用压力膜仪量测和分析了不同压实度下, 路基重塑黏土样脱湿过程的 SWCCs 特性; 采

用体积压力板仪量测和分析了不同压实度、不同级配的重塑黏土样脱-吸湿过程 SWCCs 特性, 可以得到如下结论:

(1) 压实度超过 90%以后, 不同压实度土样脱湿过程的 SWCCs 在其直线段范围相互靠近, 即该范围的 SWCCs 趋于稳定。因此, 保证路基压实度在 90%以上, 对路基稳定是有利的。

(2) 随着压实度的增大, 脱-吸湿循环滞回圈逐渐上移, 曲线由陡变缓。表明随着压实度的增大, 土体的储水系数逐渐减小, 即土中的水分更不易吸入和排出, 对路基的稳定更为有利。

(3) 相同含水率下, 重庆黏土样大约以压实度 85%为界, 压实度小于 85%的土样和大于 85%的土样, 其基质吸力各自都基本上不随压实度(干密度)的变化而变化;

(4) 相同压实度和含水率状态下, 粗粒含量多的土吸力更小, 土-水特征曲线的滞回圈较小, 即受干湿循环作用的影响更小。因此, 粗粒土较细粒土更适合作路堤填料。

参 考 文 献

- [1] 王协群, 邹维列. 压实含水率对路堤的影响及中美规范对其控制的比较[J]. 中外公路, 2007, 27(2): 16—19.
WANG Xie-qun, ZOU Wei-lie. Influence of compaction water content on embankment and the comparison the codes between China and USA[J]. *China and Foreign Highway*, 2007, 27(2): 16—19.
- [2] RAO S M, REVANASIDDAPPA K. Role of soil structure and matric suction in collapse of a compacted clay soil[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2003, 26(1): 1—9.
- [3] 邹维列, 李聪, 汪建峰, 等. 非饱和路堤对加载和降雨入渗响应的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1512—1519.
ZOU Wei-lie, LI Cong, WANG Jian-feng, et al. Model tests on responses of unsaturated road-embankments to loading and rainfall infiltration[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(10): 1512—1519.
- [4] 陈正汉, 邓卫东, 邹维列, 等. 公路非饱和路基土的力学特性研究报告(分报告 2)[R]. 重庆: 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 2009.
- [5] 熊承仁, 刘宝琛, 张家生. 重塑黏性土的基质吸力与土-水分及密度状态的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 321—327.
XIONG Cheng-ren, LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng. Relation of matrix suction with moisture state and density state of remolded cohesive soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 321—327.