

Study on the Soil-Water Characteristic Curve of Fly Ash Soil Modified by Crumb Rubber

Dongxue Li¹, Qiuqi He², Haibin Wei², Zhao Chen³, Leilei Han^{2*}

¹Jilin Provincial Transport Scientific Research Institute, Changchun Jilin

²College of Transportation, Jilin University, Changchun Jilin

³Jilin Provincial High Class Highway Construction Bureau, Changchun Jilin

Email: dongxuebest@163.com, *1552153146@qq.com

Received: Aug. 6th, 2018; accepted: Aug. 23rd, 2018; published: Aug. 30th, 2018

Abstract

With the rapid development of China's highway construction and the improvement of highway grade, more and more engineering problems of unsaturated soils have emerged. Studying the matrix suction can predict the shear strength, permeability coefficient and moisture holding capacity of unsaturated soil, which is of great significance for engineering practice. In particular, the frost damage of the subgrade soil will cause great harm to the performance of highways, so the study of the subgrade soil under freeze-thaw cycles in seasonally frozen area is also important and the research on the prevention and control of frost damage has been carried out in our country. In this paper, the matrix suction of the modified soil and silty clay is measured by filter paper method and Fredlund model is used to simulate the soil-water characteristic curve. Furthermore, the matrix suction of the two soils under freeze-thaw cycles is measured and the relationship between the number of freeze-thaw cycles and the matrix suction is analyzed. The results show that the matrix suction of the two soils decreases as the dry density decreases. The stability of fly ash soil modified by crumb rubber is much better than that of silty clay under freeze-thaw cycles.

Keywords

Fly Ash Soil Modified by Rubber Particle, Matrix Suction, Filter Paper Method, Soil-Water Characteristic Curve, Freeze-Thaw Cycle

橡胶颗粒改良粉煤灰土的土水特征曲线研究

李冬雪¹, 何秋奇², 魏海斌², 陈昭³, 韩雷雷^{2*}

¹吉林省交通科学研究所, 吉林 长春

²吉林大学交通学院, 吉林 长春

³吉林省高等级公路建设局, 吉林 长春

*通讯作者。

摘要

随着我国公路建设的快速发展和公路等级的提高, 涌现出越来越多的非饱和土的工程问题, 研究基质吸力可以对非饱和土的抗剪强度、渗透系数、持水系数等做出预测, 具有重要的工程实践意义。季冻区路基冻害对道路的使用性能造成了较大的影响, 在我国路基冻害防治的研究也在一直进行, 路基土在冻融循环作用下的研究也具有重要意义。本文通过滤纸法测定了橡胶颗粒改良粉煤灰土与粉质黏土的基质吸力, 用Fredlund模型对两种土进行了土水特征曲线的拟合, 并进一步测定了冻融循环下两种土的基质吸力, 分析了冻融循环次数与基质吸力之间的关系。试验结果表明: 两种土的基质吸力均随着干密度的减小而减小。冻融循环作用下, 橡胶颗粒改良粉煤灰土的稳定性好于粉质黏土。

关键词

橡胶颗粒改良粉煤灰土, 基质吸力, 滤纸法, 土-水特征曲线, 冻融循环

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

路基填土多为非饱和土, 非饱和土分布广、应用广, 但在工程中应用非饱和土理论成功解决实际问题的实例仍不多见, 对其特性研究还不够充足。在非饱和土力学的性质研究中, 土水特征曲线(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)扮演着非常重要的角色, 土水特征曲线反映了土壤水分能量和数量之间的关系, 通常表示为基质吸力与含水量(质量含水量、体积含水量或者饱和度)之间的关系[1]。

基质吸力为土中水自由能的毛细部分——它是通过量测与土中水处于平衡的部分蒸气压(相对于溶液(具有与土中水相同成分)处于平衡的部分蒸气压)而确定的等值吸力[2]。基质吸力的大小通常与水的表面张力引起的毛细现象有关, 它可以看做是土基质对水的吸持潜能。土基质吸力从零到几百兆帕变化不等, 如何精确测定基质吸力是研究土水特征曲线的关键。目前常用的基质吸力测定方法主要为张力计法、体积压力板仪、盐溶液测试法和滤纸法等测试方法[3] [4], 其中滤纸法由于操作简单, 对试验设备要求较低得到了最为广泛的使用。Whatman 42 是最常用的试验滤纸, 由于其土水特征曲线的滞留线已经被提前测定, 通过测定不同滤纸上对应的吸水量即可获取相应的基质吸力[5]。此外, 一些其他定量分析的滤纸也用于基质吸力的测定如 Schleicher 或 Schuell No. 589 等。我国生产的“双圈”牌滤纸也被我国科研人员标定后用于测定基质吸力[6] [7] [8], 王钊[6]等人以“双圈”牌 203 型滤纸为试验对象, 采用压力板仪进行率定, 并以张力计法测定的基质吸力进行对比, 详细探究了“双圈”203 滤纸用于测定基质吸力的可行性, 为滤纸法现场基质吸力的测定提供了宝贵的经验。

土水特征曲线是土体物理特性的体现, 不同的土水特征形式可以反映土体不同的水分吸附性和持水特征。掌握土水特征曲线的数学模型对于探究诸如土体塑性、应力历史、孔隙比、矿物含量等多种因素对土水特征曲线的影响至关重要。Gardner (1922)最早提出了幂指数形式的土水特征曲线, 随后又被国外学者进一步加以改善[9] [10]。目前, Van Genuchten [11]模型、Fredlund & Xing [12]模型较为常用。我国

徐永福[13]根据土孔隙分布的分形模型,提出了水分特征曲线的通用表达式,结果表明用分形模型描述土体质量分布、孔隙表面和孔隙体积分布是可行的,通用表达式不仅能很好地预测近饱和状态和干土状态时的水分特征曲线,也能用相同的分维估算水分特征曲线的脱水曲线和吸水曲线。

季冻区高等级公路存在严重的冻害现象。随着季节的交替,土基中水会发生冻结与融化,极易发生冻胀和融沉两种典型路基灾害。基于土壤加固技术,本课题组提出了粉煤灰和橡胶颗粒改良粉质粘土[14],其冻融循环后稳定的力学表现和路用性能表明该类改良土是一种良好的道路路基填土[15][16]。作为一种新型的路基填土,掌握它的基质吸力,尤其是在冻融循环的气候条件作用下的变化规律对于评价其水稳性能是十分重要的。

本文研究了季冻区常用的路基填土粉质黏土与橡胶颗粒改良粉煤灰土(后简称改良土)这两种非饱和土的基质吸力,通过 Fredlund & Xing 模型对两种土的土水特征曲线进行了拟合,分析了两种土基质吸力与密度的关系,并且对比了两种土的基质吸力变化情况。本文还展示了冻融循环作用下的两种土基质吸力的试验结果,分析了冻融循环次数对基质吸力的影响,通过对比两种土在冻融循环作用下基质吸力变化情况来研究两种土的冻融稳定性。

2. 材料及试验方法

2.1. 试验材料的基本物理指标

试验用的粉质黏土取自长春市某大型建筑施工场地 10 m 深的基坑底部均质土层。采用的粉煤灰为硅铝型粉煤灰,具有火山灰性质,干燥时呈细粉状,其成分含量和烧失量测得如表 1 所示。

试验中采用的橡胶颗粒粒径在 1~1.5 mm 之间,表观密度为 1.29 g/cm³。

按照干质量比为土:粉煤灰:橡胶颗粒 = 65.3:32.7:2 的比例进行混合[14],测得改良土的物理参数如表 2 所示。

2.2. 试验原理

滤纸法是建立在滤纸能够同具有一定吸力的土达到平衡(在水分流动意义上)的假设基础上的。土与滤纸之间的水分或水蒸气交换可以达到平衡。当干的滤纸放在土样上,与土样直接接触时,水分便从土流入滤纸,并达到平衡。当干的滤纸置于土样上方(即不直接接触土),水蒸气将从土进入滤纸,并达到平衡。然后量测达到平衡时滤纸的含水量[1]。滤纸中的含水量与吸力值有一定的关系,即滤纸的率定曲线。不同滤纸的率定曲线不相同,本文采用滤纸法来测量两种土的基质吸力,选用 Whatman's NO.42 型号的滤纸。基质吸力的率定曲线如式(1)和(2)所示[17]:

$$\lg S = 5.327 - 0.0779w_f \quad (w_f \leq 47\%) \quad (1)$$

$$\lg S = 2.412 - 0.0135w_f \quad (w_f > 47\%) \quad (2)$$

Table 1. Ingredient and loss on ignition of fly ash

表 1. 粉煤灰成分及烧失量

SiO ₂ + Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)	烧失量(%)
78.13~88.64	4.12~7.02	0.1~0.72	1.0~5.26

Table 2. Basic physical parameters of the modified soil

表 2. 改良土的基本物理参数

液限	塑限	塑性指数	最佳含水率	最大干密度
38.33%	24.88%	13.45%	15.38%	1.73g/cm ³

2.3. 试验方案

根据规范对路基压实度的要求, 选用路基压实度为 100%, 95%, 93% (即 1.73 g/cm³, 1.6435 g/cm³ 与 1.6089 g/cm³ 三个干密度), 根据最佳含水率分别设计质量含水率为 11.38%, 13.38%, 15.38%, 17.38%, 19.38% 五个不同的含水率进行基质吸力的测定。

在进行冻融循环的试验中, 冻结过程中取冻结温度为 -15℃ [18], 融化过程中置于室温下融化, 冻融过程持续 24 小时以保证试件冻结完全, 融化过程持续 24 小时, 试件经过 24 小时冻结后经过 24 小时融化为一个冻融循环。通过滤纸法, 对质量含水率为 11.38%, 15.38%, 19.38%, 压实度分别为 100%, 95%, 93% 的经历 5 种冻融循环次数 (1, 3, 5, 7, 9) 的改良土与粉质黏土测量基质吸力。

3. 试验结果与分析

3.1. 土水特征曲线的拟合

很多学者提出了关于 SWCC 的经验公式, 其中应用比较多的是 Fredlund & Xing 模型和 VG Genuchten 提出的模型。

由于在土水特征曲线试验中, 残余含水率的测量方法没有统一标准, 各种方法所测得的值不同, 是个难以确定的值, 所以本文采用 Fredlund & Xing 提出的拟合公式, 用 Microsoft Origin 软件对改良土与粉质黏土进行土水特征曲线的拟合。

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (3)$$

式中: θ 为土体体积含水率; θ_s 为饱和含水率; ψ 为土体基质吸力; 参数 a 与空气进气值有关且略大于空气进气值; 参数 n 控制着土水特征曲线的斜率, 与土体脱水速率有关; 参数 m 为与残余状态相关参数 [19]。

其中含水率有三种表达方式质量含水率, 体积含水率和饱和度。其中质量含水率与体积含水率之间的转换关系如式(4):

$$\theta_w = \frac{\rho_d \cdot \omega}{\rho_w} \quad (4)$$

式中: θ_w 为体积含水率; ρ_d 为土的干密度; ρ_w 为土的湿密度; ω 为质量含水率。

拟合所得的结果如表 3~表 4。

从拟合的土水特征曲线中可以看出, 拟合的结果能够较好反应土水特征曲线的规律, 拟合所得到的相关系数也表明拟合的参数结果是可用的。

从图 1 中可以看: 1) 对于改良土与粉质黏土来说, 在同一体积含水率的情况下, 随着干密度的增大,

Table 3. Fitting results of the modified soil

表 3. 改良土的拟合结果

试样干密度 g/cm ³	曲线拟合参数				
	a	n	m	θ_s	R ²
1.73	724.438	1.340	0.691	37.677	0.99156
1.6435	700.492	2.469	0.422	33.838	0.96837
1.6089	674.395	2.879	0.370	31.178	0.96406

Table 4. Fitting results of silty clay
表 4. 粉质黏土的拟合结果

试样干密度 g/cm^3	曲线拟合参数				
	a	b	c	θ_s	R^2
1.73	4007.812	1.048	1.450	34.373	0.98245
1.6435	1815.092	1.236	1.1627	33.0216	0.97971
1.6089	505.997	1.348	0.639	31.66828	0.99838

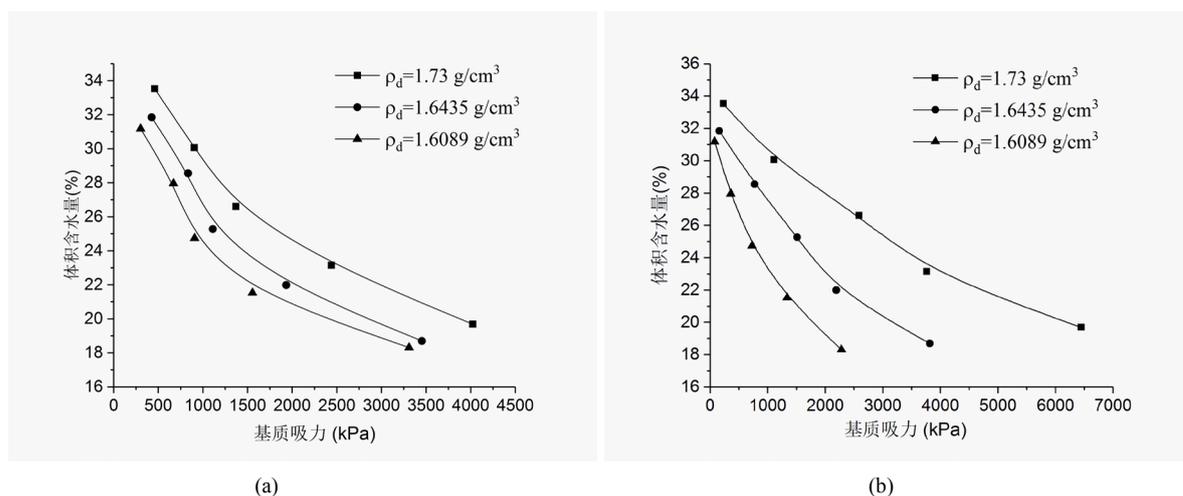


Figure 1. Soil-water characteristic curves of the modified soil and silty clay (a: Modified Soil; b: Silty Clay)

图 1. 改良土和粉质黏土的土水特征曲线(a: 改良土; b: 粉质黏土)

基质吸力随之增大。因为在土体从疏松状态变密的过程中，土体间的颗粒逐渐趋于紧密排列，颗粒间的接触增多，导致颗粒间的空隙增多，每个空隙之间的水量减小，所以吸力增大；干密度增大使得孔隙比减小，空气难以进去土体内，使得排水变得困难，所以干密度较大的试样，进气值比较高，曲线的斜率也比较小。2) 在小于最佳含水率时，粉质黏土的基质吸力较大，在大于最佳含水率时，改良土的基质吸力较大。

3.2. 冻融循环作用下的试验结果

土水特征曲线可以很直观的反映出基质吸力与含水率之间的关系，在非饱和土力学发展的过程中，有很多学者提出了关于 SWCC 的经验公式，其中应用比较多的是 Fredlund & Xing 模型和 VG Genuchten 提出的模型。

以冻融循环次数为 Y 轴，基质吸力为 X 轴来研究冻融循环次数对不同干密度的改良土与粉质黏土的基质吸力的影响。

从图 2 中可以看出，总的来说，对于改良土和粉质黏土，随着冻融循环次数增加，基质吸力的值先减小，后趋于稳定。但是改良土五次冻融循环后，基质吸力基本不再变化；对于粉质黏土，经过七次冻融循环过后，基质吸力基本上趋于稳定。从图中可以看出，随着干密度的减小，在冻融循环的过程中，基质吸力也是随着减小的。因为基质吸力与吸附作用和毛细作用有关，随着冻融循环过程的进行，土体之间的孔隙随之增大，土颗粒之间的范德华力与电荷力变小，减弱了吸附作用和毛细作用，因此随着冻融循环次数的增加，基质吸力随之减小，经过一定次数的冻融循环过后，土体之间达到一种平衡状态，土颗粒之间的距离基本保持不变，基质吸力达到一种稳定的状态。

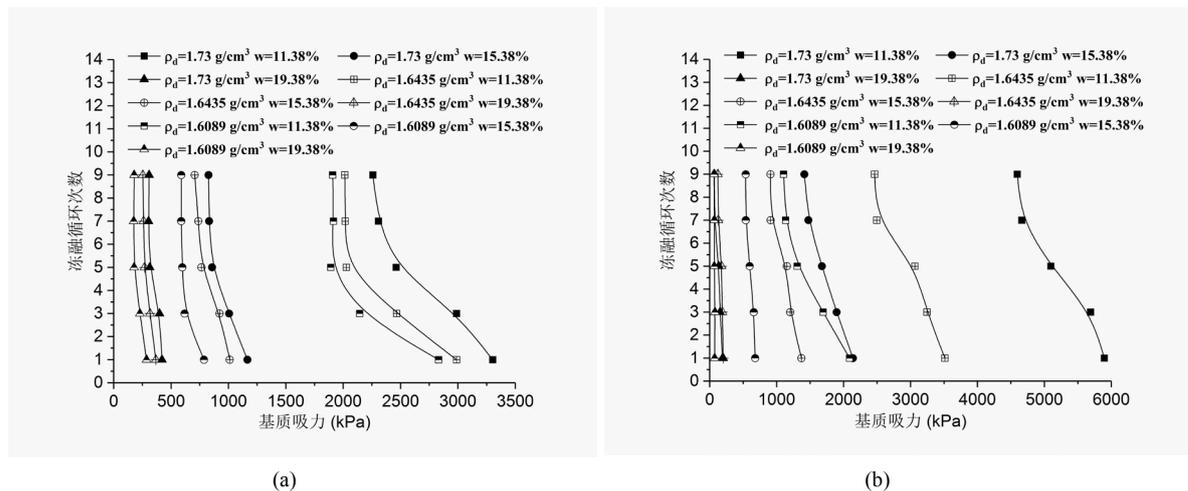


Figure 2. Relationship curves of freeze-thaw cycle times and matrix suction of the modified soil and silty clay (a: Modified Soil; b: Silty Clay)

图 2. 冻融循环次数与两种土基质吸力的关系曲线(a: 改良土; b: 粉质黏土)

Gan 和 Fredlund 的研究结果表明[20]: 抗剪强度随着基质吸力增加而增加。当质量含水率为 19.38% 时, 经冻融循环稳定后, 改良土的基质吸力大于粉质黏土, 说明改良粉土的抗剪强度更大, 也说明在高含水率时, 改良土的抗冻稳定性好于粉质黏土, 当压实度为 93% 时, 各个含水率试件的抗剪强度均大于粉质黏土, 所以在工程实际应用当中, 改良土的抗冻稳定性是好于粉质黏土的。

4. 结论

1) 橡胶颗粒改良粉煤灰土与粉质黏土, 同一干密度的情况下, 基质吸力随着含水率的增加减小, 在同一含水率下, 基质吸力随着干密度的增加而增大。这与前人的研究成果是一致的。

2) Fredlund & Xing 模型拟合土水特征曲线的参数表明, 随着干密度增加, 进气值增大; 土体脱水速率减小, 土水特征曲线的斜率减小。

3) 在冻融循环的作用下, 橡胶颗粒改良粉煤灰土和粉质黏土的基质吸力随着冻融循环次数的增加而减小, 橡胶颗粒改良粉煤灰土五次冻融循环过后的基质吸力基本上趋于稳定, 粉质黏土的基质吸力七次冻融循环过后, 基质吸力基本上趋于稳定。

4) 冻融循环作用下两种土的比较表明, 橡胶颗粒改良粉煤灰土的稳定性较好于粉质黏土。

基金项目

国家自然科学基金: 季节冻土区道路设置冷阻层治理路基病害机理研究(51578263)。

参考文献

- [1] 钱弗雷德隆德. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [2] 毛雪松, 马磊. 基于水热耦合效应的冻土路基稳定性研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [3] 赵雅琼. 非饱和带土壤水分特征曲线的测定与预测[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [4] 李志清, 李涛, 胡瑞林, 李熊, 李壮举. 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): 700-707.
- [5] Fawcett, R.G. and Collisgeorge, N. (1967) A Filter-Paper Method for Determining the Moisture Characteristics of Soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 7, 162-167. <https://doi.org/10.1071/EA9670162>
- [6] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 安骏勇, 骆以道. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4):

405-408.

- [7] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928-933.
- [8] 唐东旗, 彭建兵, 孙伟青. 非饱和黄土基质吸力的滤纸法测试[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(5): 37-41.
- [9] 梅岭, 姜朋明, 李鹏, 周爱兆. 非饱和土的土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 124-128.
- [10] 李志清, 李涛, 胡瑞林, 李熊, 李壮举. 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): 700-707.
- [11] Genuchten, M.T.V. (1980) A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- [12] Fredlund, D.G. and Xing, A.Q. (1994) Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Revue Canadienne De Géotechnique*, **31**, 521-532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
- [13] 徐永福, 董平. 非饱和土的水分特征曲线的分形模型[J]. 岩土力学, 2002(4): 400-405.
- [14] 李长雨, 刘寒冰, 魏海斌. 橡胶颗粒改良粉煤灰土的动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2025-2028, 2033.
- [15] 李长雨. 冻融循环下橡胶颗粒改良粉煤灰土力学效应试验研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [16] 张仰鹏. 季冻区新型路基冷阻层抗冻性及温度场模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [17] ASTM International (2010) D5298-10 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Papers, ASTM International, S. West Conshohocken.
- [18] 邴文山. 道路冻害与防治译文集[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1992.
- [19] Fredlund, D.G. and Xing, A.Q. (1994) Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, 521-532. <https://doi.org/10.1139/t94-061>
- [20] Gan, J.K.M., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1988) Determination of the Shear Strength Parameters of an Unsaturated Soil Using the Direct Shear Test. *Canadian Geotechnical Journal*, **25**, 500-510. <https://doi.org/10.1139/t88-055>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org