

一种新型测量非饱和土吸力的方法

劳海洋¹, 吴天龙², 向伟明²

¹甘肃宏强工程检测有限公司, 甘肃 兰州

²广州大学, 广东 广州

Email: 27286483@qq.com, tianlongwu@e.gzhu.edu.cn, huajiankeji@21cn.com

收稿日期: 2020年9月17日; 录用日期: 2020年12月23日; 发布日期: 2020年12月30日

摘要

本文主要通过冷镜露点水势仪、离心机法和滤纸法对非饱和粘土及其与砂的土壤混合物的吸力进行测试研究, 提出了一种新测量非饱和土的吸力的方法, 并把新型方法与本文涉及到的三个传统方法做对比, 通过理论分析、数据梳理、总结归纳出创新渗透技术测量非饱和土吸力的正确性、可靠程度与局限性。主要的研究内容和成果如下: 1) 在利用WP4C冷镜露点水势仪对不同配比高岭土、膨润土及砂(文中分别用K、B、S表示)的土壤混合物吸力测定中, 实验表明在脱水路径和吸湿路径之间存在滞后现象。吸力的增强或减弱不全是与掺入土壤的颗粒大小有关, 而是与掺入土颗粒的持水能力和性质有关。2) 通过离心技术得到的土壤混合物吸力与冷镜露点水势仪得到的结果比较吻合。3) 在滤纸实验中采用高岭土作为研究对象, 滤纸法测定的吸力与WP4C偏差为10%~16%。4) 在创新渗透技术实验中, 创新渗透技术需要3~5天测量吸力, 这种新技术测定克服了大吸力测定的局限性。利用该技术与WP4C得到的数据对比, 结果显示吻合较好。

关键词

吸力, 非饱和土, 土水特征曲线, 创新渗透技术

A New Method for Measuring the Suction of Unsaturated Soil

Haiyang Lao¹, Tianlong Wu², Weiming Xiang²

¹Gansu Hongqiang Engineering Testing Co., Ltd., Lanzhou Gansu

²Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

Email: 27286483@qq.com, tianlongwu@e.gzhu.edu.cn, huajiankeji@21cn.com

Received: Sep. 17th, 2020; accepted: Dec. 23rd, 2020; published: Dec. 30th, 2020

Abstract

In this paper, through the dew point potentiometer instrument, centrifuge method and filter paper method to measure the suction of unsaturated clay and sand soil mixture, a new method to measure the suction of unsaturated soil is proposed, and the new method is compared with the three traditional methods involved in this paper. Through theoretical analysis, data sorting and summary, the correctness, reliability and limitation of the innovative infiltration technology for measuring the suction of unsaturated soil are summarized. The main research contents and results are as follows: 1) The dew point water potentiometer was used to measure the suction of soil mixtures with different ratios of kaolin, bentonite and sand (They are expressed by K, B and S respectively) in the process of dehydration and moisture absorption. The experimental results show that there is a lag between the dehydration path and the moisture absorption path. The increase or decrease of suction is not entirely related to the size of soil particles, but to the water holding capacity and properties of soil particles. 2) The suction of soil mixture obtained by centrifugal technique is in good agreement with that obtained by cold mirror dew point water potential meter. 3) In the filter paper experiment, kaolin was used as the research object, and the deviation between the suction measured by filter paper method and wp4c was 10% ~ 16%. 4) In the experiment of innovative penetration technology, it takes 3 ~ 5 days to measure the suction, which overcomes the limitation of large suction measurement. Compared with wp4c data, the results show good agreement.

Keywords

Unsaturated Soil, Soil-Water Characteristic Curve, Innovative Penetration Technology

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

吸力是影响非饱和土强度和体积变化特性的重要应力状态变量之一。因此，土壤吸力的测量是了解非饱和土机理的先决条件。吸力是土壤结构和土壤含水量的函数，土壤吸力(总吸力、基质吸力或渗透吸力)与含水量(饱和度或体积含水量)之间的关系称为土水特征曲线，它是推测和解释非饱和土各种力学现象和特征响应的重要工具。土壤吸力可采用直接或间接测量技术来确定，尽管目前有很多种技术可以在实验室中测量和控制土壤的基质吸力和总吸力。然而，几乎所有的吸力测量方法都存在可靠性、成本、适用范围、实用性等方面的不足。因此，这些土壤吸力测量技术还有待改进。

吸力一个重要的影响因素就是含水量的变化，自然界中随着一年四季的气候变化，伴随着降雨和干燥天气的影响，地下水位也随之变化，通常情况下自然界中土的空隙是无法完全被填满的，非饱和土是生活中最常见的状态。由于天气等影响含水量的变化常常导致非饱和土在力学性质上发生了巨大改变，其中吸力也是变化最大的性质之一。自然界中也存在许多现象可以借助吸力去解释，如降雨引起的滑坡现象、湿润的土相对于干燥的土更容易被拉裂甚至拉断。不同地区的环境因素必然存在差异，因此不同因素下土的微观结构和力学性质自然会存在差异，由于降雨原因致使基坑边坡等工程事故频频发生，导致的伤亡和经济损失也随之而来，各地区的降雨必然造成填土含水量的变化，含水量的变化对土壤吸力有何影响？

非饱和土研究是当今时代岩土工程界的重点与难题，在吸力研究方面虽有了很大的发展，但却不够成熟，充分的了解吸力的变化规律是非饱和土的一项重要内容。考虑到非饱和土的三相复杂性，很难准确地测量吸力与各影响因素之间的关系，因此研究理想模型和吸力测量方法对于揭示非饱和土的物理力学性质具有重要意义。吸力对土的渗透性、结构性、强度都有着密不可分的联系，进一步了解非饱和土吸力的变化规律，通过实验数据拟合出关系曲线分析并建立关系，对支护结构、基础设计的参数优化及各岩土工程施工有着重要的现实意义。

针对目前测量吸力的方法，有些测得的数据精确但却需要借助高精度仪器，这类的仪器却十分的昂贵，如冷镜露点水势仪(WP4C)运用于测定土壤吸力，该装置可以作为一种快速确定非饱和土总吸力的方法，但一台设备的造价成本就要去到几万美元，虽然是一款有效提高测量吸力效率的设备，但高昂的造价导致它并不能广泛应用于实际中去；有些操作简单但实验时间较长，人为因素影响大导致所得的数据却略显粗糙，如滤纸法测定土水特征曲线，需要花费大概一周的时间去稳定，实验需要的精确度很高，涉及 0.0001 g 的电子天平，人为操作不当容易导致实验数据不准确；有些实验条件苛刻难以实现，如运用离心法获得高吸力段需要超高转速或一定长度的夹持器，这些条件限制使得离心法吸力测量范围有限。所以研究一种简单操作、低成本也能得到理想结果的实验设备或方法，这具有重要的意义。

2. 实验材料与土样制备

2.1. 实验材料

本研究所用材料包括两种类型的粘土，一种类型的沙子和聚酸钾盐(在以下的文章中均以 PP 盐统一简称)。

PP 盐：聚钾盐吸水膨胀能力强，可作为吸附剂应用于尿布、生物医用材料、软性隐形眼镜、离子交换树脂等领域。

膨润土：其吸湿能力和膨胀能力极强，它的吸水能力是自身体积的 8~15 倍，体积膨胀能力是自身的数倍至 30 倍；膨润土的润滑能力、粘度和触变能力比大多粘土都要强。

高岭土是自然界中常见而重要的粘土，分布广泛。潮湿时具有可塑性、附着力和体积膨胀性。由于其常见性和特点，对其进行研究具有重要意义。与膨胀粘土不同，高岭土的膨胀能力不明显，接近于零。

2.2. 土样制备

碟式液限仪通过调节曲柄，以每秒 1.9 到 2.1 锤击速度震动土样，直到两半土样以 25 的锤击数后在沟槽底部靠拢到 13 毫米的距离。此时土样的含水量为土体的液限。

首先配置好一定含水量的土样，以备实验使用。在培养皿中重新混合整个土壤样品，加入蒸馏水，增加土壤含水量，减少所需的打击次数。进行至少两次额外的试验，以连续减少打击次数。其中一项试验是需要 25 到 35 次击打才能闭合。一次是在 20 到 30 次之间，一次是在 15 到 25 次之间。根据试验方法测定每次试验中土壤样品的含水量。初始质量(容器和湿土)的测定应在试验结束后立即进行，图 1 为测试高岭土液限的实验过程。

绘制含水量 ω^n 与对应锤击次数 N 之间的关系，如图 2。其中以含水量为横坐标，锤击次数为纵坐标。通过实验的三个标绘点画出了函数直线，以纵坐标为 25 的水平线与函数交点对应的含水量为高岭土的液限，取最接近的整数。以绘图观察本次实验高岭土的液限为 74%。

使用下列公式 2-1 (ASTM D4318-2010) [1]，确定每个含水量试样的液限：

$$LL^n = \omega^n \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad (2-1)$$



Figure 1. Liquid limit determination process

图 1. 液限测定过程

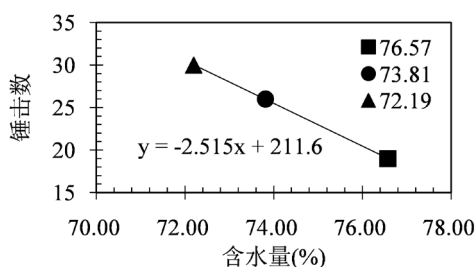


Figure 2. The relation function of hammer blow number and water content

图 2. 锤击数与含水量的关系函数

根据公式 2-1 法计算得:

$$LL^{19} = 74.07\% \quad LL^{26} = 74.16\% \quad LL^{30} = 73.80\%$$

公式法算得本次实验的高岭土的液限约为 74%，重复上述实验操作得到高岭土、膨润土与砂不同配比的液限，得到的液限如下：膨润土为 580%；90% K + 10% B 为 125%；80% K + 20% B 为 175%；70% K + 30% B 为 226%；60% K + 40% B 为 276%；90% K + 10% S 为 71%；80% K + 20% S 为 63%；70% K + 30% S 为 57%；60% K + 40% S 为 52%。

把实验所需的土样放入烤箱(105℃)至少 12 小时，以获得充分干燥的实验土样，确保配置准确的含水量。首先称量容器的净重 m_c ，再倒入适量充分干燥的土样，称量容器与土样的总重量 m_t ，所以土样的干燥质量 m_{sd} 可根据公式 2-2 计算，根据实验所需含水量 ω 由配置公式 2-3，计算所需用水量 m_w ，把称量好的水加入装有土样的容器中，用工具充分搅拌，以减少水分分布不均匀的可能性。使水充分溶解于土体中，并使水分能均匀地存在于土样中。(实验中所使用的水均为蒸馏水，为了排除水分中的杂质，如矿物成分、离子对实验的干扰)。

$$m_{sd} = m_t - m_c \quad (2-2)$$

$$m_w = m_{sd} * \omega \quad (2-3)$$

制作好的土样用 WP4C 附带的不锈钢样品杯中，尽可能地盖满杯子的底部，加大暴露的表面积，在 WP4C 中可加速测量。当把土样装入杯后，通过振击样品杯底部使土样表明更平整。样品杯为一个直径 38 mm、高 11 mm 的不锈钢环，可直接放入 WP4C 仪器中进行土水特征曲线的测定，采用不锈钢杯作为容器的另外一个好处是，可直接放入烤箱进行土壤的烘干，从而通过计算得到土样的含水量。

样品制作并装入样品杯后，盖上密封盖，以保证土样水分不流失到空气中，密封处理后静置 3~6 小时，使水分达到良好的均匀性，也为了使样品温度稳定在 25 摄氏度左右。

3. 不同配比粘土及砂的吸力研究

3.1. 冷镜露点水势仪法吸力实验

3.1.1. 背景

冷镜湿度计技术首次用于食品(如 Hand, 1994) [2]和药品(如 Ahineck 和 Zograf, 1990) [3]的相对湿度测量。冷镜露点水势仪(WP4C) 在岩土工程应用中已广泛用于测定土壤吸力(Ali 等, 2014) [4], 李娟(2010) [5]利用 WP4C 对土壤水势进行了测量, 并通过存在偏差进行了纠偏。Lu 等(2017) [6]提出运用冷镜露点水势仪(WP4C)测定土壤吸力的问题, 无法获得低于 1 MPa 吸力的可靠读数。

3.1.2. 试验过程

实验涉及的土壤类型包括高岭土、膨润土和砂, 并配置了十种不同的土壤混合物作为研究对象。并在脱水和吸湿的路径下观察不同比例地混合物的土水特征曲线, 各起始条件如下表 1 所示。

Table 1. Different soil mixture initiation conditions
表 1. 不同土壤混合物起始条件

类别	起始含水量(%)
100% K	74
100% B	580
90% K + 10% B	125
80% K + 20% B	175
70% K + 30% B	226
60% K + 40% B	276
90% K + 10% S	71
80% K + 20% S	63
70% K + 30% S	57
60% K + 40% S	52

待测的样本被放入一个样本杯, 然后放置在 WP4C 装置的外壳室中, 在密封的条件下, 与周围环境达到蒸汽平衡。该腔体包括一个红外温度计来测量样品的温度, 以及一个受控的冷却镜子(冷镜), 在镜面开始冷凝时使用光学传感器仔细检测温度(露点)。

制作好起始含水率后, 把土样放入烤箱几分钟, 使土样的含水量降低, 重复吸力测定, 通过数次重复后, 土样趋于干燥, 通过冷镜露点水势仪(图 3)确定样品从而得到脱水路径下的吸力数据。重复加水和测量吸力, 直至含水量趋近于起始配置的含水量为止。得到吸湿路径下的吸力数据。

3.1.3. 数据分析与讨论

根据图 4~图 7 显示了高岭土与膨润土、高岭土和砂在脱水和吸湿路径下的吸力关系, 根据上述的土水特征曲线可以看出不管是高岭土和膨润土, 或是它们之间与砂的土壤混合物, 在脱水路径和吸湿路径之间存在滞后现象, 这也说明土水特征曲线是不稳定的, 吸力值与脱水和吸湿路径有关。

土壤在脱水或者吸湿路径下, 高含水量段吸力曲线相对于低含水量段较陡对应的斜率较大, 说明了土壤的吸力在高含水量段变化不太明显。相反在低含水量段吸力曲线较缓对应斜率较小, 在土壤比较干

燥时一点点的含水量的变化吸力会有巨大的变化。这些现象体现了吸力在高含水量段的不敏感性和低含水量的敏感性。

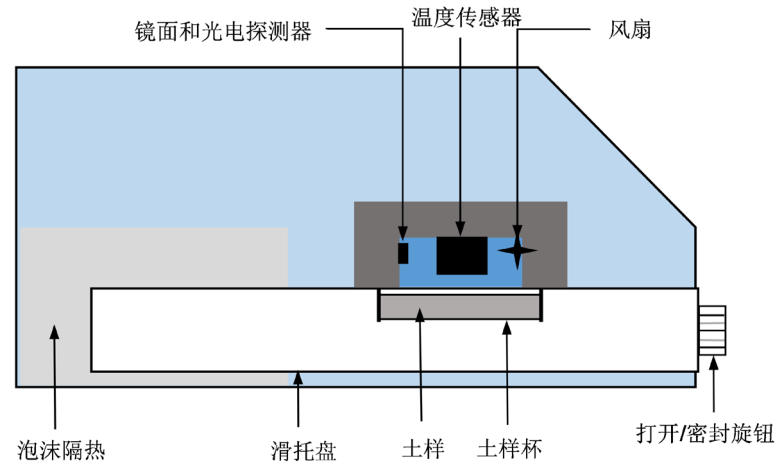


Figure 3. Dew point potentiometer
图 3. 冷镜露点水势仪

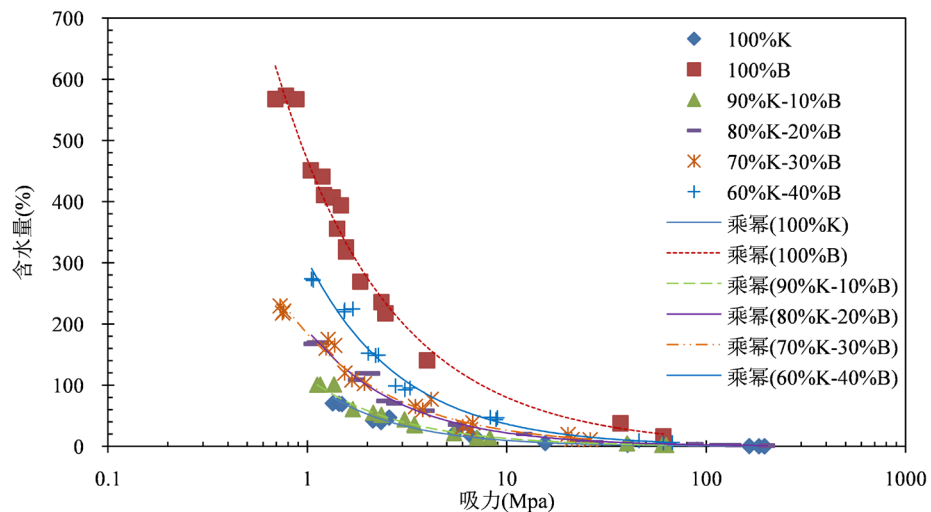


Figure 4. The suction relationship between different mixtures of kaolin and bentonite under the dehydration path
图 4. 高岭土和膨润土不同混合物在脱水路径下的吸力关系

砂的粒径最大，其次是膨润土，最小是高岭土。在相同条件下，膨润土的吸力值比高岭土的要大，这说明膨润土的持水能力要比高岭土强，相同条件下较小颗粒的高岭土吸力比较大颗粒的膨润土，这也说明并不是所有的较大颗粒吸力都比较小颗粒要小，这与土的性质有关。

3.1.4. 小结

本节主要利用 WP4C 冷镜露点水势仪对不同配比粘土(高岭土、膨润土)及砂的土壤混合物在脱水和吸湿过程进行吸力测定，并研究土壤在脱水和吸湿下的土水特征曲线的相关规律。工作内容及结果如下：

1) 利用 WP4C 得到的土水特征曲线，以幂函数可作为反映各条件下含水量和吸力的关系，其相关系数在 0.9 以上，双参数的幂函数形式的数学模型可以作为本次研究土壤的土水特征曲线模型。

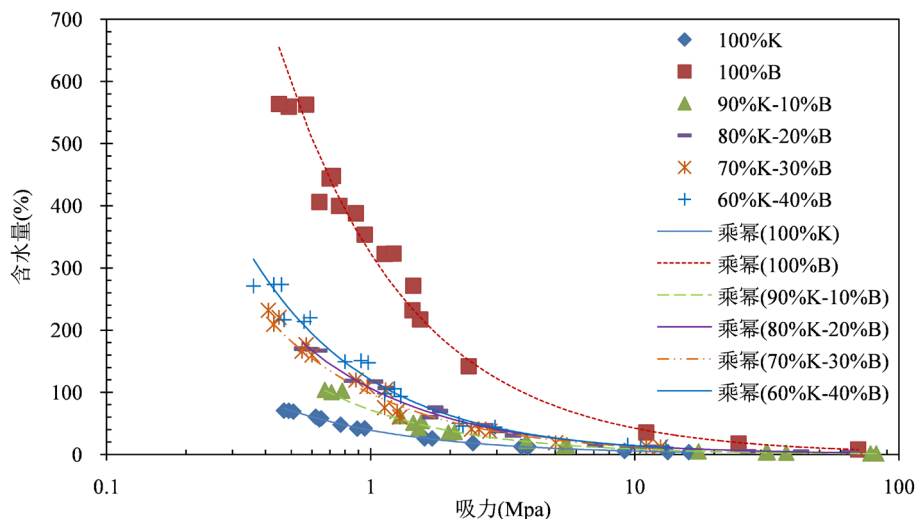


Figure 5. Suction relationship between different mixtures of kaolin and bentonite under hygroscopic path

图 5. 高岭土和膨润土不同混合物在吸湿路径下的吸力关系

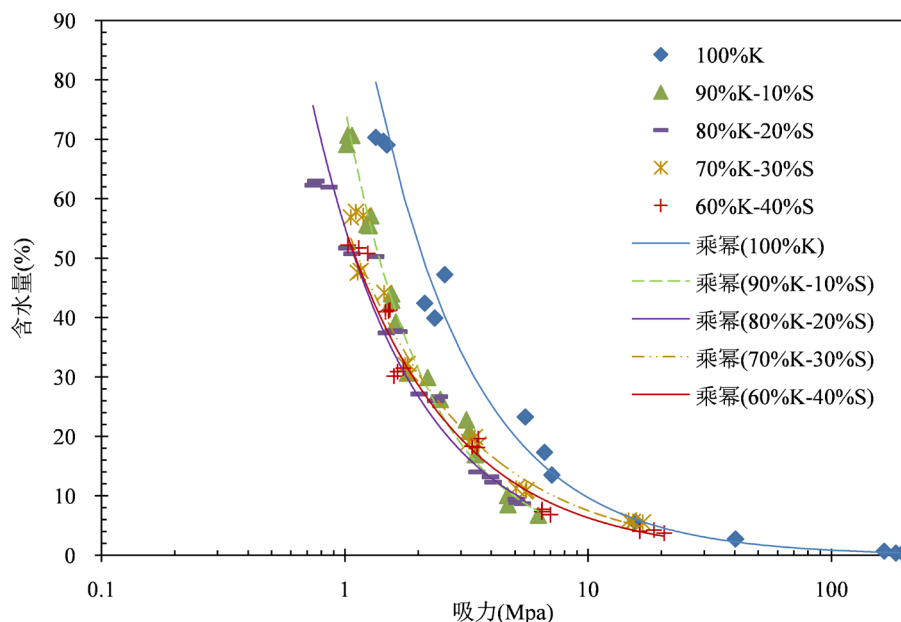


Figure 6. The suction relationship between different mixtures of kaolin and sand under the dehydration path

图 6. 高岭土和砂不同混合物在脱水路径下的吸力关系

2) 在不同配比粘土及砂的土壤混合物在脱水和吸湿过程进行吸力测定实验中,发现吸湿下的路径吸力都要比脱水要偏小,可以认为土水特征曲线是不稳定的,吸力值与脱水和吸湿路径有关,在脱水路径和吸湿路径之间存在滞后现象。

3) 实验体现了土壤吸力在高含水量段的不敏感性和低含水量的敏感性,相同土壤在不同路径下,或者相同路径下不同土壤,变化速率不是一致的。

4) 膨润土的持水能力要比高岭土强,并且在相同含水量下,不是大颗粒的土壤比小颗粒的土壤吸力要强。另外在土壤混合物中,以高岭土作为基础,膨润土的掺入吸力的变强,砂的掺入吸力变弱,吸力

的增强或减弱不全是与掺入土壤的颗粒大小有关，而是与掺入土颗粒的持水能力和性质有关。

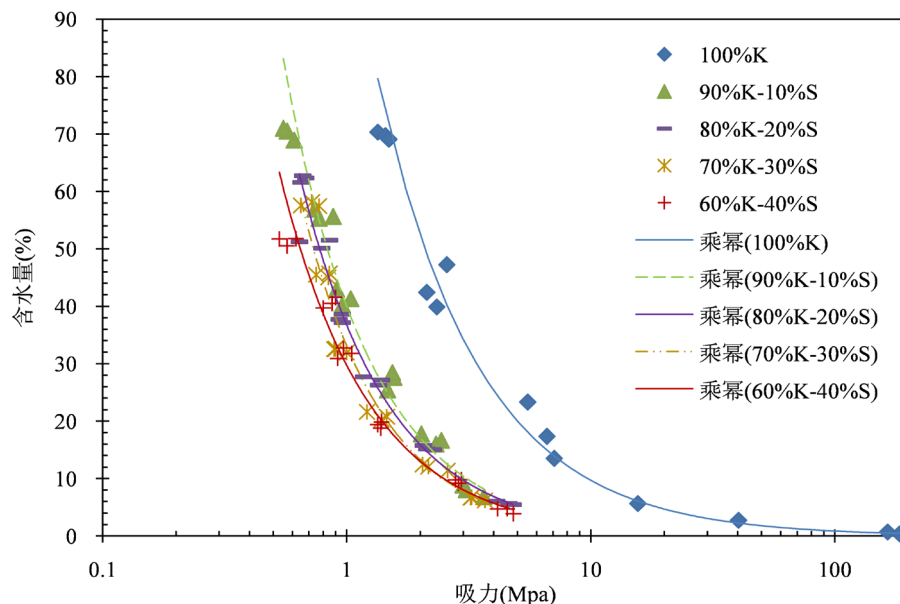


Figure 7. The suction relationship of different mixtures of kaolin and sand under hygroscopic path

图 7. 高岭土和砂不同混合物在吸湿路径下的吸力关系

3.2. 离心机法吸力实验

3.2.1. 背景

Briggs 和 McLane (1907) [7]似乎是第一个使用离心技术测量土壤吸力和土壤含水量之间关系的研究者。Anderson (2015) [8]和 Emidio (2012) [9]使用台式离心机来研究非饱和土的水力特性。Caicedo 和 Thorel (2014) [10]发现，在更高的重力作用下，自重离心试验中的固结作用可以忽略不计。

3.2.2. 试验过程

本实验配置了三种土样，分别为 100% K；90% K-10% S；80% K-20% S 的土壤混合物，每种类型的土样分别作了 3 个样品。通过离心机在 4000 rpm 的转速下，在 25℃ 温度下的离心机装置内，分别在 60 分钟、120 分钟和 1 天、2 天、3 天、4 天内对样品的重量进行了测定。

3.2.3. 数据分析与讨论

图 8~图 10 为土壤样品的净重量在离心机作用下随时间变化情况，可以看出土壤在前 60 分钟内，在高速离心作用下，排出了大量的水分，在 120 分钟后土壤趋于稳定，在离心机 4000 RPM 作用下不到一天，土壤就稳定下来趋近于平衡状态。

在后续的几天内，土样的质量几乎保持不变，只有微小量的减少，考虑到离心机夹持器未达到完全密封状态，水分从夹持器中流失到外界，而且在每次测量土样重量时，会暴露在空气中存在水分的流失，其微小的变化量可以认为土壤与夹持器中的水压已经处于平衡状态。

土样都是以超饱和状态的含水量去配置，目的是为了寻找在离心作用下，土壤含水量的变化规律。

正如本节前面所解释的，原理是当试样处于吸力平衡时，用离心机(公式 3-2)计算的高岭土试样吸力与用 WP4C 测量的吸力应该是相似的。图 11~图 13 比较了 WP4C 测定的土样吸力与离心机(公式 3-2)计算的吸力的差异。

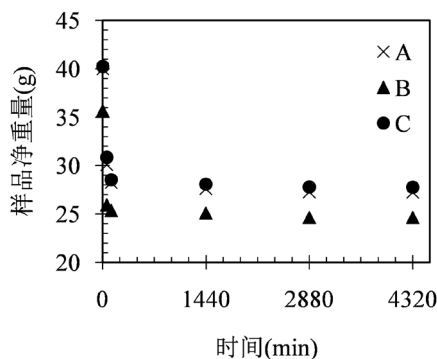


Figure 8. The net weight of 100% K sample varies over time under centrifuge operation

图 8. 100% K 样品净重量在离心机作用下随时间变化

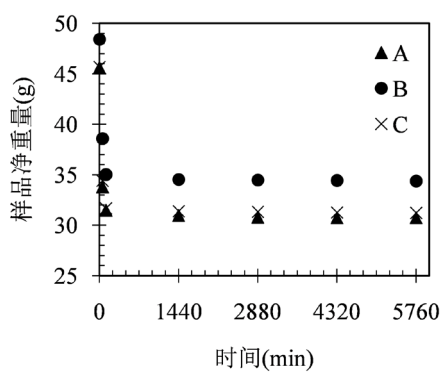


Figure 9. The net weight of 90% K-10% S sample varies over time under centrifuge operation

图 9. 90% K-10% S 样品净重量在离心机作用下随时间变化

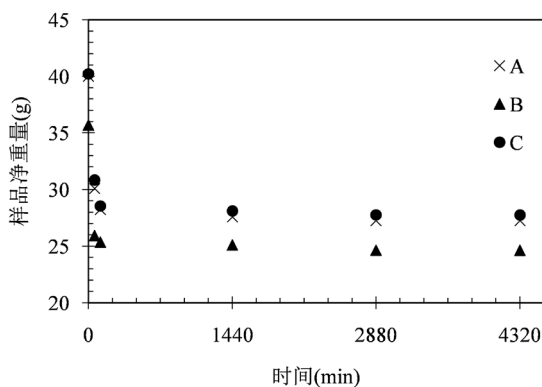


Figure 10. The net weight of 80% K-20% S sample varies over time under centrifuge operation

图 10. 80% K-20% S 样品的净重量在离心机作用下随时间变化

实验发现在 100% K 的土样中，最终平衡后吸力十分相似的，高岭土的吸力值的测定采用离心机和 WP4C 的两种技术几乎相同。但在 90% K-10% S 与 80% K-20% S 中，虽然两种技术测定的吸力值相近，但发现与其对应的土水特征曲线相比，二者都要偏小。在离心实验中，发现高岭土、高岭土与砂的土样

混合物中，在离心最后平衡后二者的状态是不一样的。离心试验后发现高岭土试样是非常均匀的，而高岭土与砂的混合物在离心后二者分离了，因此高岭土与砂的混合物是不均匀的，在离心条件下砂都沉积在土样底部，这可能是导致了 90% K-10% S 与 80% K-20% S 吸力值的测定比其对应的土水特征曲线的值要偏小。高岭土与砂的混合物在离心作用下砂会往下移动的原因，可能是离心的转速过高，也可能是初始的含水量过高导致的。

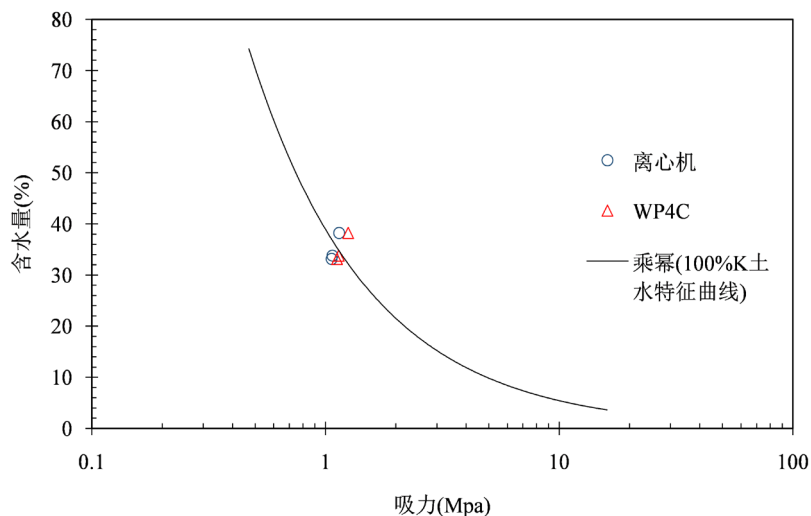


Figure 11. The difference of suction measurement between centrifuge and WP4C (100% K)

图 11. 100% K 离心机与 WP4C 吸力测定差异

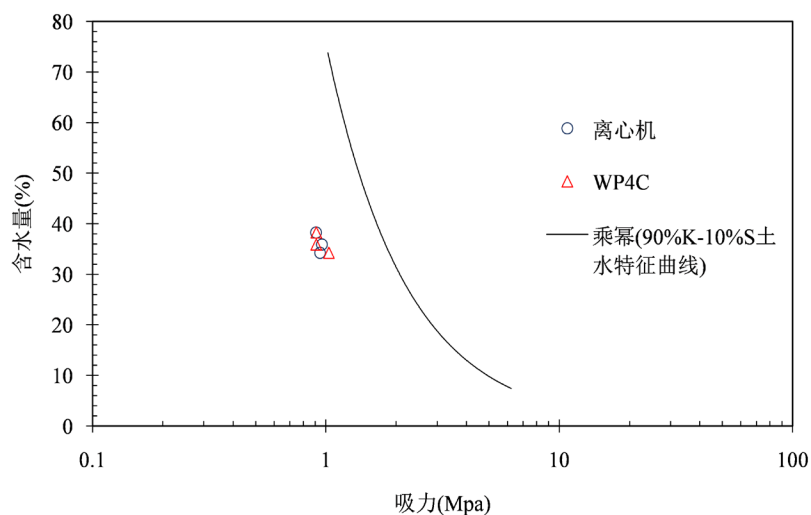


Figure 12. The difference of suction measurement between centrifuge and WP4C (90% K-10% S)

图 12. 90% K-10% S 离心机与 WP4C 吸力测定差异

3.2.4. 小结

本节主要利用离心技术对实验所研究土壤的土 - 水特征曲线进行了测定，并与 WP4C 技术做对比，分析其差异性。工作内容及结果如下：

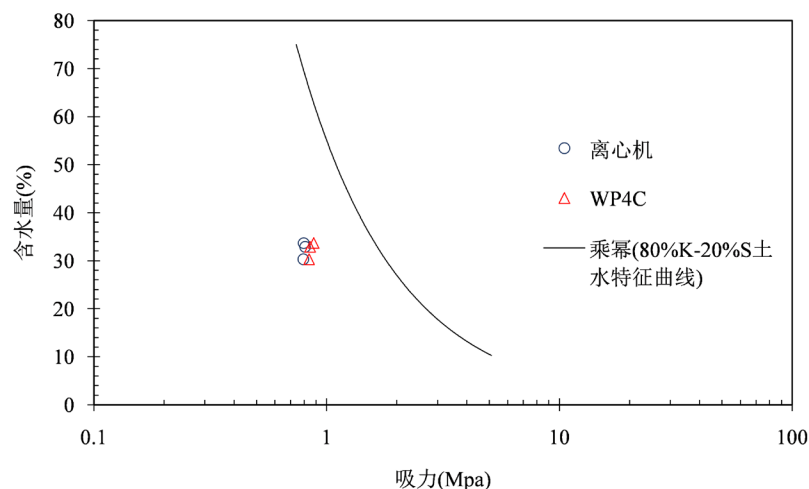


Figure 13. The difference of suction measurement between centrifuge and WP4C (80% K-20% S)

图 13. 80% K-20% S 离心机与 WP4C 吸力测定差异

1) 在 100% K; 90% K-10% S; 80% K-20% S 三组离心测定吸力的实验中, 在 4000 rpm、25℃的条件下, 在前 120 分钟土壤在离心作用下排出大量的水分, 在接下来的 1、2、3、4 天内土样的质量几乎保持不变, 说明了土样不再失水(即含水量不变), 土样对应的吸力也不再变化, 可以认为离心技术大约 1 天就使土样稳定达到吸力平衡状态。

2) 在 WP4C 测定的土样吸力与离心机实验测得的吸力的差异比较中, 离心机实验得到的数据与 WP4C 测量的数据基本吻合, 达到了预期的效果, 这也说明了 WP4C 作为分析土壤吸力的工具, 其准确程度是可靠的。

3) 实验中也发现离心机对于土壤的混合物在高起始含水量条件下, 吸力值会有偏差。在 90% K-10% S; 80% K-20% S 的实验中, 吸力值的测定比其对应的土水特征曲线的值要偏小, 这是由于高含水量在离心作用下不同大小颗粒的土会分离, 使土样不均匀(高岭土与砂分离, 高岭土在上部, 砂沉积在下部)。

4) 高吸力段的测量要求离心机更高的转速或者具有一定长度的夹持器, 这些条件限制了离心机使得高吸力的测量很难实现, 所以离心技术较适合低吸力段的测量。

3.3. 滤纸法吸力实验

3.3.1. 背景及原理

滤纸技术可以用“接触法”测量基质吸力, 用“非接触法”测量总吸力。两种方法都基于基质吸力和总吸力与滤纸含水量之间关系的校准曲线(ASTM D5298, 1992) [11]。白福青(2011) [12]指出滤纸法是一种低成本、高精度、易操作, 能够测量非饱和土全范围吸力测试方法。许海楠(2017) [13]采用国产双圈 No.203 型滤纸, 对土壤进行了总吸力和基质吸力的测定, 并指出人为因素影响较大数据较离散。

3.3.2. 试验过程

本次试验所需的实验设备与材料包括高精度 0.001 g 电子天平、Whatman NO.42 定量滤纸、蒸馏机、烤箱(105℃)、一次性塑胶手套。

图 14 为本次滤纸法的实验装置, 主要部分由一个直径为 50 mm 的密闭容器构成, 其中制备好的土样被分切为两半, 在土样之间放置三张滤纸, 并用胶带把两个土样固定好, 最中间层的滤纸要比上下两张滤纸稍小, 其作用是保护最中间的滤纸防止其被土壤污染, 影响吸力测定; 在顶层土样上方放置一个

塑料圆环，在圆环上部放置一张滤纸，使滤纸悬置于土壤上空。最终平衡后，测量上方和中间层的滤纸含水量，并通过校准曲线分别计算得出总吸力和基质吸力。

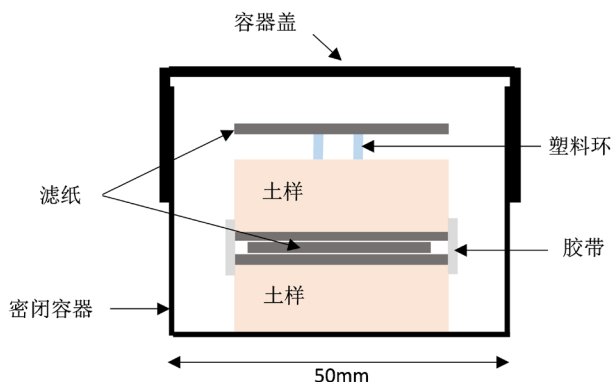


Figure 14. The experimental device
图 14. 实验装置

3.3.3. 数据分析与讨论

图 15 显示滤纸法测的吸力要比 WP4C 测定的吸力要小，这可能是由于 WP4C 仪器自身精确程度导致的数据偏差；也有可能是在滤纸实验中容器不是完全密封，或转移滤纸过程中，较为干燥的滤纸吸收了空气的水分，因为在滤纸率定曲线中，在含水量低于 45.26% 时，含水量微小的改变会使吸力有更大的变化。

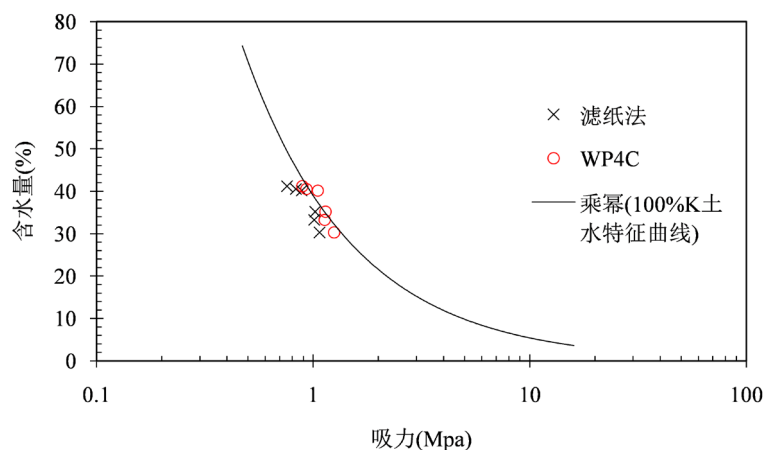


Figure 15. The difference of suction measurement between filter paper method and WP4C (100% K)

图 15. 100% K 滤纸法与 WP4C 吸力测定差异

实验表明土壤的吸力测定采用的滤纸法与 WP4C 技术几乎相同。在 100% K 的滤纸实验中，可以发现效果是较理想的。根据已有的实验数据分析与 WP4C 相比差异很小，WP4C 的误差在允许范围内，可以满足吸力测定需要，通过 WP4C 测定的土壤吸力是可靠的。

3.3.4. 小结

本节采用高岭土作为研究对象，使用 Whatman NO.42 定量滤纸，在 25℃ 条件下密封保存至少 7 天后，利用滤纸率定曲线对吸力进行了计算，并与 WP4C 技术做对比，分析其差异性。

1) 在 100% K 的实验中, 41.21%、40.52%、40.14%、33.23%、30.28%、35.19% 对应的 6 个土样中, 与 WP4C 测定的吸力作对比, 偏差分别为 15.09%、10.66%、15.83%、10.62%、14.40%、10.53%。

2) 滤纸法测的吸力要比 WP4C 测定的吸力要小, 这可能是由于 WP4C 仪器自身精确程度导致的数据偏差; 也有可能是在滤纸实验中容器不是完全密封, 或转移滤纸过程中, 较为干燥的滤纸吸收了空气的水分。

3) 滤纸法测定的吸力与 WP4C 作对比, 偏差为 10%~16%。以滤纸法作为检验 WP4C 作为一种测量非饱和土吸力的方法的实验中, 得出 WP4C 偏差不大基本满足吸力测量的要求。

4. 一种新型试验方法

4.1. 试验过程

图 16 为实验的装置的概念设计, 主要部分就是由密闭容器、土样、滤纸和 PP 盐组成。图 17 是局部的放大示意, 而其中的结构支架是为了提高 PP 盐的稳定性, 并使 PP 盐表面保持平整, 提高接触的良好性。

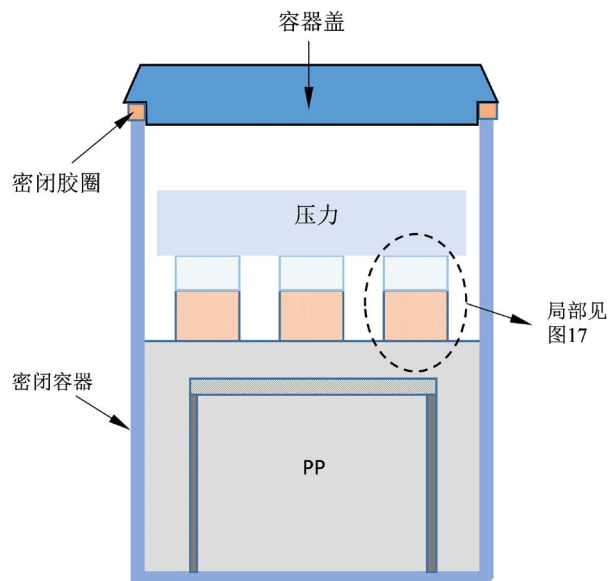


Figure 16. Conceptual design of experimental apparatus
图 16. 实验装置概念设计

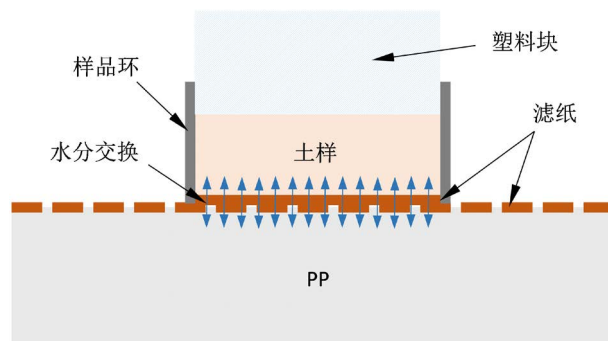


Figure 17. Local magnification diagram
图 17. 局部放大示意

该方法的机理与传统的渗透法相似，同样需要施加吸力条件。考虑到传统渗透吸力控制技术的局限性，本研究的目的是引入一种改进的渗透技术，分别使用滤纸和聚钾盐(PP)代替半透膜和聚乙二醇溶液(图 17)。使用 PP 盐的优点是它的颗粒尺寸比滤纸的孔径大，所以滤纸阻止了 PP 的透过，持水能力强的 PP 缩短了吸力测量的实验周期。吴宏伟(2008) [14]等人通过渗透试验也提到，水分子和离子能透过半透膜，大分子溶质和土颗粒则能透过。同时，由于滤纸的渗透性大于纤维素膜的渗透性，可以减少平衡时间。土样顶部施加的压力是为了土样、滤纸和 PP 盐三者之间始终保持接触状态(因为在实验过程中发现在水分交换过程中，由于 PP 盐顶部不平整或者土样失水收缩后，接触面积会减少，实验周期会变长。但压力不宜过大，在保证不破坏土壤结构和水分自由交换条件，使其接触良好即可)。

PP 盐的制备——把实验使用的 PP 盐放入 105 摄氏度的烤箱中至少 12 小时，以确保 PP 盐水分完全脱去，完全干燥后使用容器配置一定含水量的 PP 盐，PP 盐的吸水能力非常强，并且在吸水湿润可以发现体积膨胀了很多，本次实验所配置的含水量如下，100% K 为 50%、75%、150%、250%、350%；90% K-10% S 与 80% K-20% S 均为 75%。

将配置好的 PP 盐装入预先准备好的密闭容器中，通过控制大量的 PP 盐，即使在土样与 PP 盐发生水分交换，PP 盐的含水量变化很少，因为交换的水分质量与 PP 盐相比只占了很小一部分。直到平衡后由于 PP 盐的含水量几乎不变，可以认为 PP 盐的吸力也保持不变。最后装好 PP 盐后顶部压实压平，顶部放置一张滤纸。

制备特定含水量的土样后，置于 4000 RPM 转速下和温度为 25℃的离心机 30 min，在离心机的帮助下，土样变得表面很平整，目的是为了土样的水分更均匀。

土样准备好后，将样本转移到 0.0001 g 电子天平上测量质量，然后放置到事先准备好的 PP 容器中，土样顶部放置塑料块，再加一定质量的重物，让土样、滤纸和 PP 更好地接触，最后关上容器盖，整个过程如图 18 所示。



Figure 18. Soil sample placement and top loading

图 18. 土样放置与顶部加载

在密封容器后，用标准砝码对 0.001 g 天平进行校准，并用天平测量容器的总重量，用以观察容器的密封性能，确保没有水分跑到外界或吸收外界的水分。

在接下来的几天，每天测量土样的总重量，当容器被打开时，用镊子夹起土壤样本，然后将样本转移到 0.0001 g 精度的天平上测量土样总质量。转移过程应尽快完成，以尽量减少水分流失。在这次测试中，样品被取出并重新密封在容器中的时间大约是 30 秒。当至少两个连续质量读数几乎不变时，这时可以认为已经平衡。在一定的吸力水平下，测定试样的含水量，可以得到土水特征曲线的一个点。整个土水特征曲线可以通过重复相同的过程，对相同条件的土壤样本进行不同含水量的 PP 盐实验。

4.2. 数据分析与讨论

图 19 为 PP 盐在不同温度(即 20℃、25℃和 30℃)下，通过 WP4C 测量的含水量与吸力关系曲线。结

果表明随着温度的升高，PP 盐的持水能力下降。温度对 PP 吸力的影响可以看出不可忽略，所以在实验过程中温度控制也尤为重要。

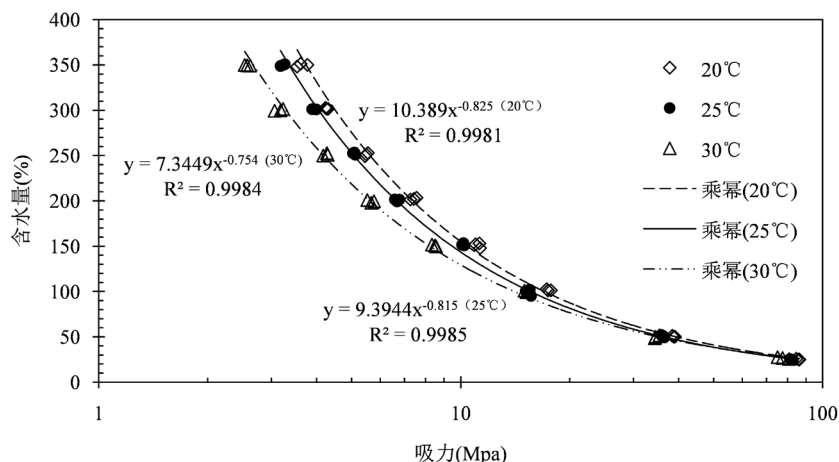


Figure 19. The relationship between PP moisture content and suction at different temperatures

图 19. 不同温度下的 PP 含水量与吸力关系

实验数据结果显示 PP 盐用双参数的幂函数形式的数学模型 $\omega = a\psi^b$ 来模拟吸力曲线，能较好地呈现出含水量与吸力的关系曲线，其中 ω 为含水量，%； ψ 为吸力，MPa。通过拟合的吸力曲线中，可以看出用幂函数得出的关于系数 a、系数 b 的方程，相关系数都在 0.99 以上，拟合效果是非常好的，本实验拟合的幂函数可作为反映不同温度下 PP 盐含水量和吸力的关系方程。

在密封的 WP4C 样品杯中制备特定含水量的 PP 试样，并在 25°C 环境下将其保存至总吸力平衡状态，并定期监测 PP 试样的杯重和利用 WP4C 得到的总吸力。表 2 为 PP 含水量与吸力在 4 天内每天的监测数据。

Table 2. Daily variation of moisture content and suction in PP

表 2. PP 含水量与吸力每天的变化情况

天数	含水量	吸力
0	152.25	8.33
1	151.79	8.52
2	151.71	8.56
3	151.63	8.59
4	151.62	8.61

图 20 的试验结果表明，第一天总吸力和含水量有变化，之后几乎没有变化。在测量阶段虽然提供了良好的密封，水分仍有一小部分的流失(因为在每天测量 PP 重量和吸力过程中，在转移过程中不能避免的会有水分流失到外界)。但由平衡图中，后期含水量和吸力几乎稳定，可以得出测定 PP 的吸力平衡时间大概是 1 天。

本实验配置了三种土样, 分别为 100% K; 90% K-10% S; 80% K-20% S 的土壤混合物, 在每组实验中分别作了 3 个样品(A、B、C), 提高了实验的可靠性。在 100% K 的实验中, 分别研究了在 50%、75%、100%、150%、250%、350% 含水量下的 PP 吸力实验测试; 90% K-10% S 与 80% K-20% S 研究了在 75% 含水量下的 PP 吸力实验测试。

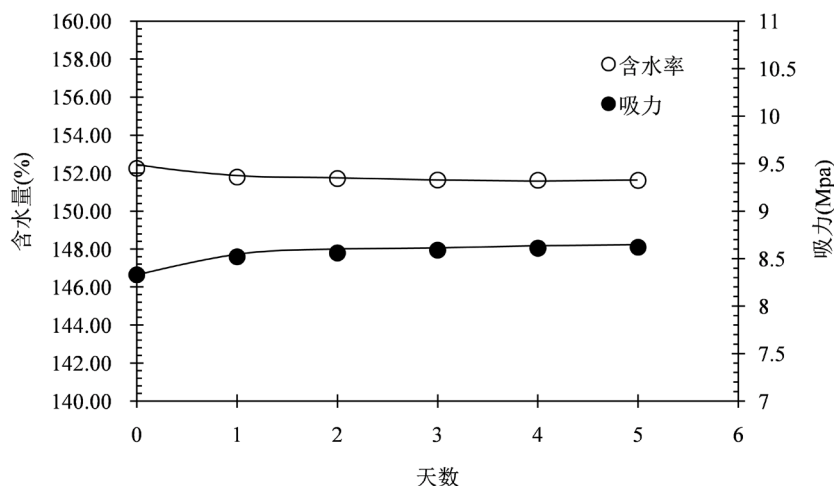


Figure 20. Relationship between moisture content and suction equilibrium time of PP
图 20. PP 含水量与吸力平衡时间关系

在 PP 实验测试每组实验中, 把 3 个试样放在了同一个容器内, 保证了 3 个试样所处的环境条件都是相同的, 每天监测土样的质量, 分析计算其含水量变化, 在未达到平衡之前, PP 和土样发生水分交换, 土样的质量在变化, 在最终平衡后二者吸力相等, 土样不再脱水或者吸水。总密闭容器的质量每天的测定确保容器的密封性, 排除外界空气等水分干扰。

4.3. 小结

本章介绍了一种新颖的土壤吸力测量方法。聚钾盐(PP)和滤纸被用来代替聚乙二醇溶液和密封容器中的半透膜。这种方法的优点是克服了传统渗透技术中分子传输到土壤中进行大吸力测定的局限性。主要的工作和结论如下:

1) 在 PP 不同温度下的吸力实验中, 通过 WP4C 得到了 20℃、25℃ 和 30℃ 下 PP 的吸力曲线, 用双参数的幂函数模拟吸力的数学模型, 其拟合效果较好。并得出温度对 PP 吸力的影响可以看出不可忽略, 并且随着温度的升高, PP 盐的持水能力下降, 所以在实验过程中需要控制温度。

2) 在 PP 吸力平衡时间测试中, 通过 4 天内每天对 PP 的重量和总吸力的监测数据发现, PP 的自身稳定和平衡时间大约是 1 天。

5. 新型试验结果的验证

以下曲线图显示了不同土样在不同起始 PP 含水量下, 土样的含水量和吸力随时间的变化情况。

图 21~26 为 100% K 土壤样品在 PP 实验下, 二者水分交换过程中含水量和吸力随时间的变化情况, 图 27 与图 28 分别为 90% K-10% S 和 80% K-20% S 在 PP 实验下含水量和吸力随时间的变化情况。在保持容器密封状态下, 每天测量土样的总质量, 当至少两个连续质量读数(或者计算后的含水量)几乎不变时, 这时可以认为已经平衡。

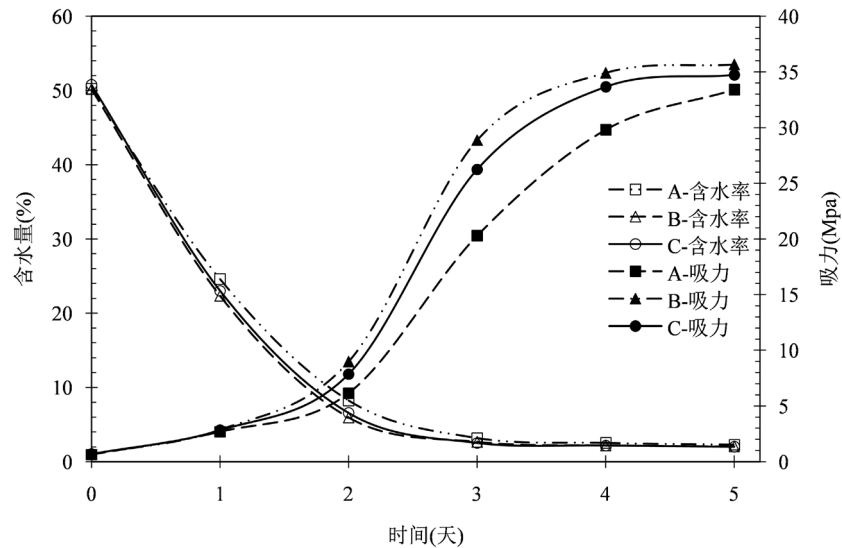


Figure 21. The relationship between water content and suction equilibrium time under the condition of 50% PP water content (100% K)

图 21. 50% PP 含水量条件下 100% K 含水量与吸力平衡时间关系

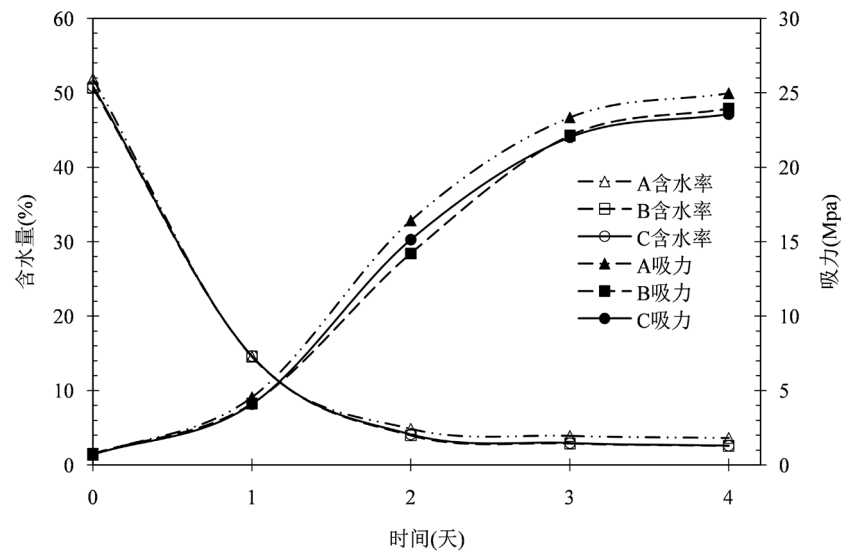


Figure 22. The relationship between water content and suction equilibrium time under the condition of 75% PP water content (100% K)

图 22. 75% PP 含水量条件下 100% K 含水量与吸力平衡时间关系

可以看出在 50%、75%、100%、150% 含水量的 PP 实验中，土壤大约 3 天就稳定下来，而 250% 和 350% 含水量的 PP 实验中需要大约 5 天稳定时间。在 50%、75%、100%、150% 含水量的 PP 实验中，在第一天土样含水量就下降了将近 30%，第二天将近 10%；250% 和 350% 含水量的 PP 实验中，在第一天土样含水量就下降了将近 20%，第二天将近 10%，后续几天慢慢发生水分交换。在低含水量的 PP 实验中，实验效果很好，因为低含水量下的 PP 具有很高的吸力，使水分交换速率更快，而高含水量最终也可以稳定下来，但所需要的时间会更长。根据 PP 实验数据分析可知高吸力段大约耗时 3 天稳定，低吸力段耗时 5 天，综上所述可以认为创新渗透技术需要 3~5 天测量吸力。

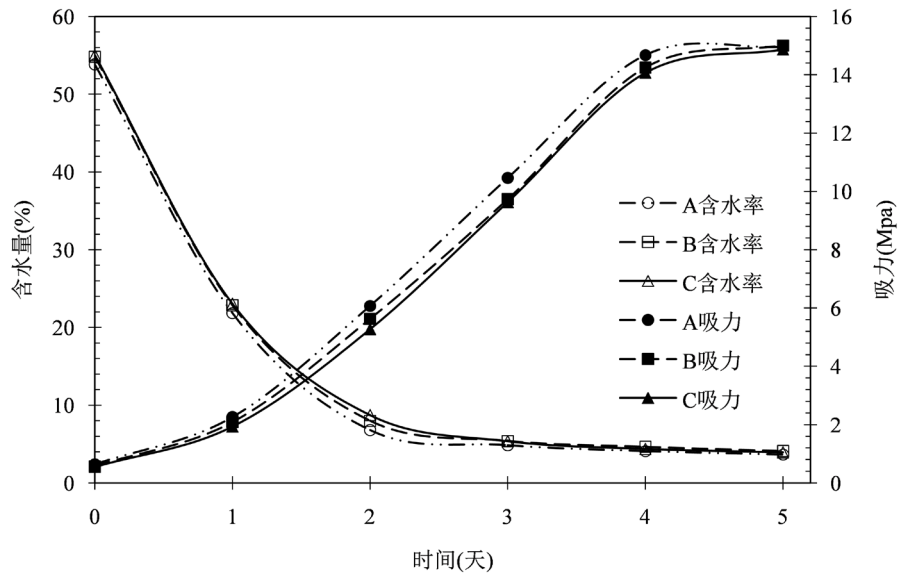


Figure 23. The relationship between water content and suction equilibrium time under the condition of 100% PP water content (100% K)

图 23. 100% PP 含水量条件下 100% K 含水量与吸力平衡时间关系

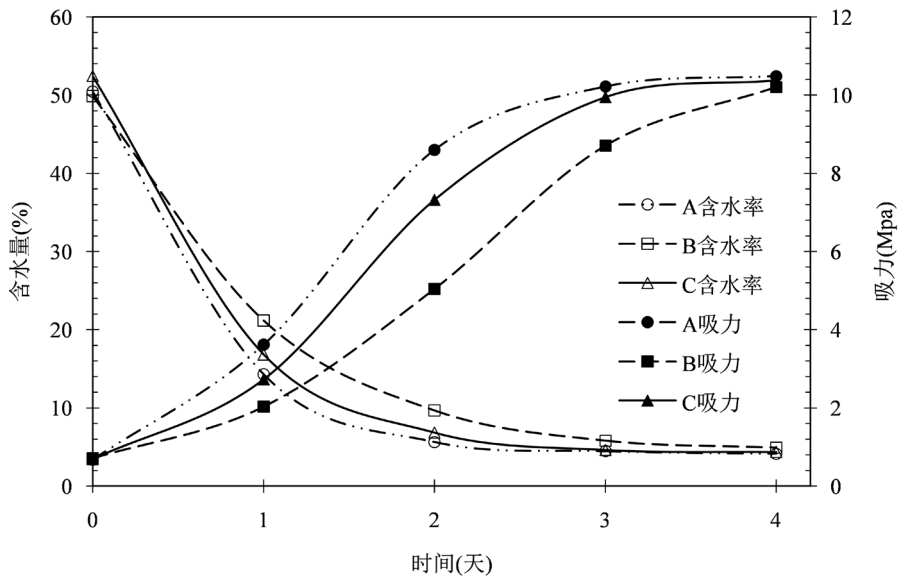


Figure 24. The relationship between water content and suction equilibrium time under the condition of 150% PP water content (100% K)

图 24. 150% PP 含水量条件下 100% K 含水量与吸力平衡时间关系

图 29 比较了 WP4C 测定的高岭土的吸力与 WP4C 测定的 PP 的吸力和 PP 公式计算的吸力三者之间的差异。图 30 和图 31 分别比较了 90% K-10% S 和 80% K-20% S 上述三者之间的差异。

实验表明土壤的吸力测定采用的创新渗透技术与 WP4C 技术几乎相同。在 100% K 的 PP 实验中，可以发现效果是较理想的。其次 90% K-10% S 和 80% K-20% S 实验结果也达到预期的效果，但由于时间有限，实验的数据较少。但根据已有的实验数据分析可以认为创新渗透技术可以作为一种新型的测量非饱和土吸力的方法，与 WP4C 相比差异很小，可以满足吸力测定需求。

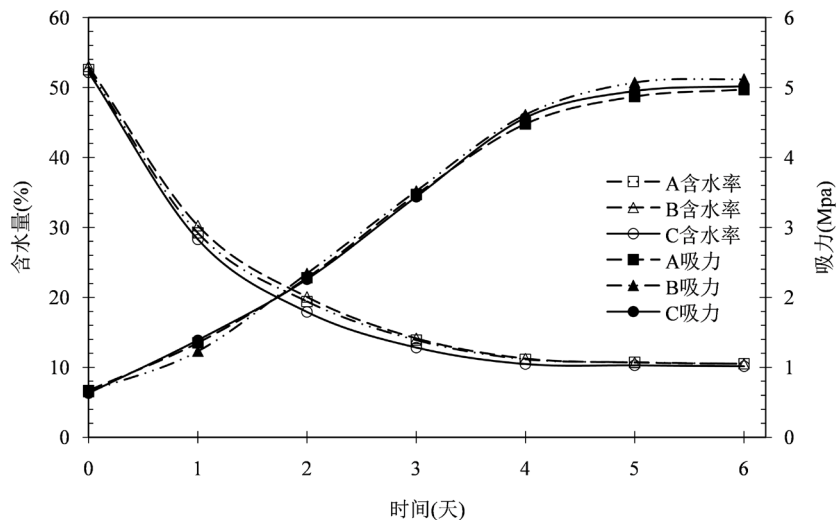


Figure 25. The relationship between water content and suction equilibrium time under the condition of 250% PP water content (100% K)

图 25. 250% PP 含水量条件下 100% K 含水量与吸力平衡时间关系

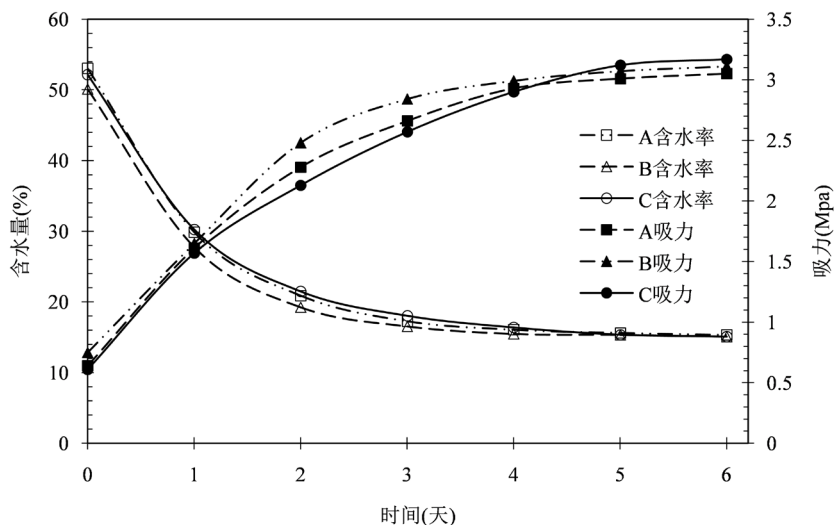


Figure 26. The relationship between water content and suction equilibrium time under the condition of 350% PP water content (100% K)

图 26. 350% PP 含水量条件下 100% K 含水量与吸力平衡时间关系

6. 结论及展望

6.1. 结论

本文以非饱和粘土及其与砂的土壤混合物的吸力测试研究作为课题，综合考虑冷镜露点水势仪、离心机法和滤纸法的吸力测试方法，与创新渗透技术对比分析试验数据，主要的研究结论如下：

1) 在利用 WP4C 冷镜露点水势仪对十种不同的高岭土 - 膨润土和砂混合物对土壤脱水和吸湿吸力测定的实验中，使用双参数幂函数拟合的土水特征曲线相关系数都在 0.9 以上。实验发现不管是高岭土和膨润土，或是它们之间与砂的土壤混合物，在脱水路径和吸湿路径之间存在滞后现象，在土水特征曲线中脱水路径总在吸湿路径的上方。在脱水和吸湿路径下都发现了土壤吸力在高含水量段的不敏感性和

低含水量的敏感性。膨润土的持水能力要比高岭土强，砂几乎没有持水能力，在高岭土中掺入膨润土会使持水能力变强，掺入砂会使持水能力减弱，并且吸力增加和减少不是随着掺入比例的增加而等比例的增加或减少，当中存在一定的折减关系。

2) 利用离心技术，在 4000 rpm、25℃的条件下把 100% K；90% K-10% S；80% K-20% S 三组土壤混合物作为研究对象测量土样的吸力值。实验发现在前 2 个小时，土壤在高速离心作用下排出大量的水分，在接下来的 1、2、3、4 天内土样几乎不排水，质量保持不变。在 90% K-10% S 和 80% K-20% S 的实验中，吸力值的测定比其对应的土水特征曲线的值要偏小，实验发现高含水量的高岭土与砂混合物，在离心作用下高岭土与砂会分离，使土样不均匀，高岭土在上部，砂沉积在下部。在 WP4C 测定的土样吸力与离心机实验测得的吸力的差异比较中，离心机实验得到的数据与 WP4C 测量的数据基本吻合，达到了预期的效果，这也说明了 WP4C 作为分析土壤吸力的工具是可靠的。

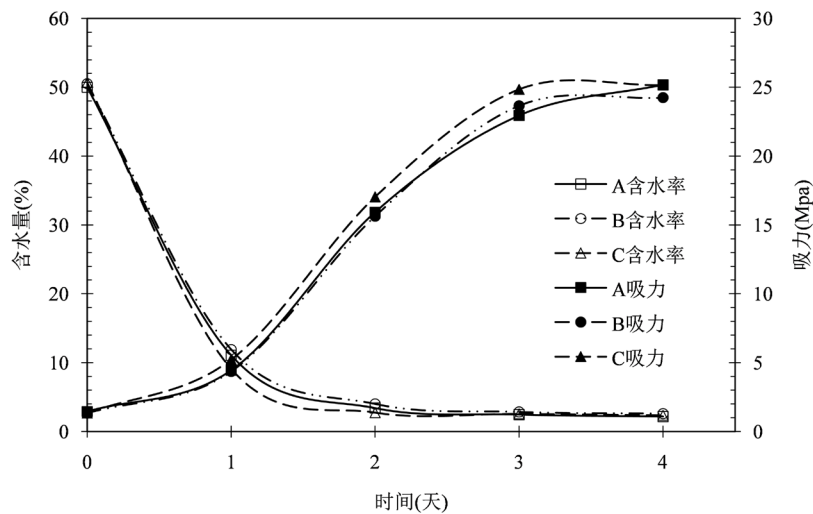


Figure 27. The relationship between water content and suction equilibrium time under the condition of 75% PP water content (90% K-10% S)

图 27. 75% PP 含水量条件下 90% K-10% S 含水量与吸力平衡时间关系

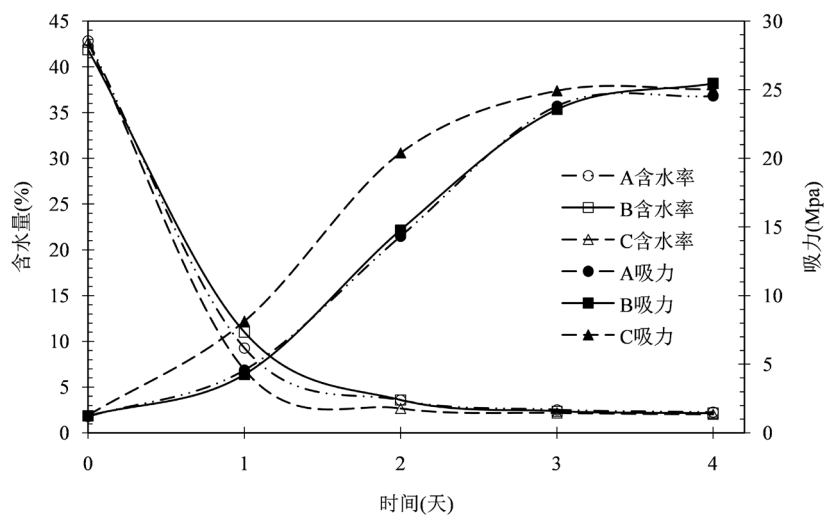


Figure 28. The relationship between water content and suction equilibrium time under the condition of 75% PP water content (80% K-20% S)

图 28. 75% PP 含水量条件下 80% K-20% S 含水量与吸力平衡时间关系

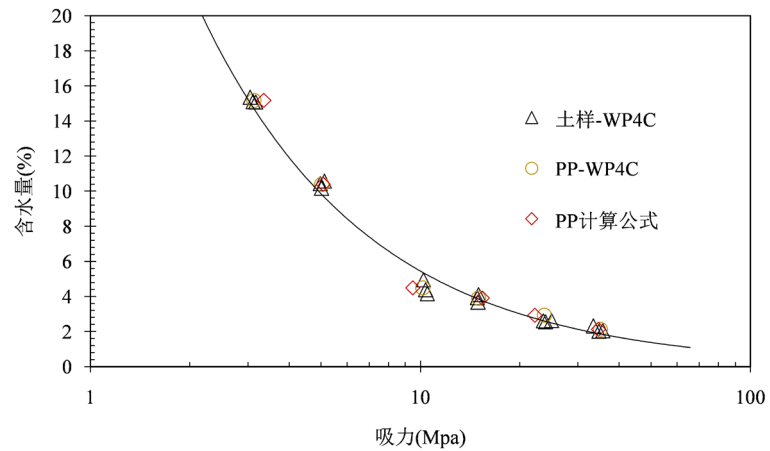


Figure 29. The relationship between moisture content and suction force in PP experiment (100% K)

图 29. 100% K 在 PP 实验下含水量与吸力关系

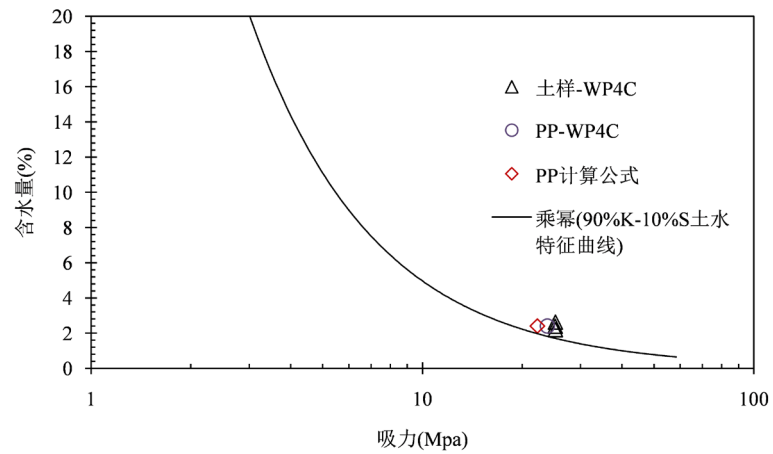


Figure 30. The relationship between moisture content and suction force in PP experiment (90% K-10% S)

图 30. 90% K-10% S 在 PP 实验下含水量与吸力关系

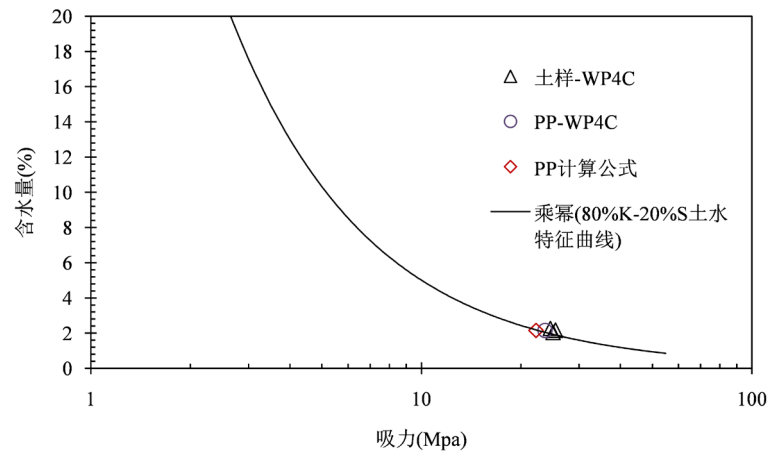


Figure 31. The relationship between moisture content and suction force in PP experiment (80% K-20% S)

图 31. 80% K-20% S 在 PP 实验下含水量与吸力关系

3) 通过滤纸法原理, 使用 Whatman NO.42 定量滤纸对 100% K 进行了实验, 在 7 天后利用滤纸率定曲线计算吸力值, 实验发现了滤纸法测的吸力要比 WP4C 测定的吸力要小, 这可能是由于 WP4C 仪器自身精确程度导致的数据偏差; 也有可能是在滤纸实验中容器不是完全密封, 或转移滤纸过程中, 较为干燥的滤纸吸收了空气的水分。滤纸法测定的吸力与 WP4C 作对比, 偏差为 10%~16%。以滤纸法作为检验 WP4C 作为一种测量非饱和土吸力的方法的实验中, 得出 WP4C 偏差不大基本满足吸力测量的要求。

4) 研发了一种创新的渗透吸引技术, 使用滤纸和聚钾盐代替半透膜和聚乙二醇溶液。实验发现, PP 材料随着温度的升高, 持水能力下降, 自身稳定的时间大概是一天。利用该技术对 100% K; 90% K-10% S; 80% K-20% S 的土壤混合物进行了实验研究, 在 50%、75%、100%、150% 含水量的 PP 实验中, 土壤大约 3 天就稳定下来, 而 250% 和 350% 含水量的 PP 实验中需要大约 5 天稳定时间, 创新渗透技术需要 3~5 天测量吸力, 这种新技术测定克服了大吸力测定的局限性。利用该技术与 WP4C 得到的数据对比, 数据吻合较好, 达到预期的效果。通过分析可知创新吸力测量技术在实验室中测量高吸力段是一种较好的方法, 但低吸力段耗时较长, 该技术运用到现场测量还需要另外设计。

6.2. 展望

本文针对非饱和土吸力进行了理论分析和实验研究, 通过 WP4C、离心技术和滤纸法对粘土和砂及其混合物进行了吸力测试, 设计了一种用于测量非饱和土吸力的方法, 并与以往方法做对比验证了其可行性。因为非饱和土的各种复杂力学性质, 研究一个新的吸力的测定方法是非常耗时和艰难的过程。又由于笔者水平有限和时间等因素, 对实验结果分析未能更全面和系统地描述, 本研究还存在许多考虑不周和不足之处, 为进一步深化和改进该研究提出以下建议:

1) 实验发现 WP4C 在运用到土壤吸力的研究当中, 存在一定的偏差, 直接使用 WP4C 测量的数据进行分析并不够严谨。笔者认为应针对 WP4C 的特殊结构, 基于土体的三相特性, 对其进行修正, 使其分析结果更加准确。

2) 在离心技术和滤纸法实验中, 只研究了高含水量低吸力段的吸力测试, 对于低含水量高吸力段是否也与 WP4C 和新技术吻合缺乏说服力, 应多加实验组加以证实。

3) 在离心法实验中, 由于时间关系只通过单一的转速而得出的结论, 并不能通过离心技术准确反映土样完整的土水特征曲线, 应通过改变转速来观察吸力变化规律。对于高岭土与砂混合物的吸力测试中, 出现了砂土分离现象, 笔者认为应减少土样的起始含水量来观察实验现象。

4) 本文采用的都是工厂提供的实验土壤, 应该在工程实践中, 加以现场采集的土样进行实验分析, 进一步地研究新技术在实际土壤中运用的效果。

参考文献

- [1] Astm International West-Conshohocken-PA. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils: ASTM D4318-2010 [S]. US: ASTM, 2010.
- [2] Hand, L. (1994) Controlling Water Activity and Ph in Snack Sticks. *Meat Marketing and Technology*, 55-56.
- [3] Ahlneck, C. and Zograf, G. (1990) The Molecular Basis of Moisture Effects on the Physical and Chemical Stability of Drugs in the Solid State. *International Journal of Pharmaceutics*, **62**, 87-95. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(90\)90221-0](https://doi.org/10.1016/0378-5173(90)90221-0)
- [4] Ali, M., Singh, R., Bouazza, A., et al. (2014) Variation of Total Suction of a Clayey Soil with Temperature. In: Khalili, N., Russell, A. and Khoshghalb, A., Eds., *Unsaturated Soils: Research & Applications*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 849-855. <https://doi.org/10.1201/b17034-121>
- [5] 李娟. 校正露点水势仪土壤探头的试验分析[J]. 河北水利, 2010(10): 33.
- [6] Bouazza, A. (2017) Water Retention Curve of GCLs Using a Modified Sample Holder in a Chilled-Mirror Dew-Point

- Device. *Geotextiles & Geomembranes*, **45**, 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.08.003>
- [7] Mclane, J.W. (1907) Moisture Equivalents of Soils. Department of Agriculture, Bureau of Soils Bulletin, Washington DC, 1-23.
- [8] Anderson, C., Sivakumar, V. and Black, J.A. (2015) Measurement of Permeability Using a Bench-Top Centrifuge. *Géotechnique*, **65**, 12-22. <https://doi.org/10.1680/geot.13.P.112>
- [9] Emidio, G., Peiffer, H., Malengier, B., Kison, P. and Bezuijen, A. (2012) Bench-Scale Centrifuge Testing to Determine the Hydraulic Conductivity of Clayey Soils. *2nd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics (EUROFUGE-2012)*, Ghent University (Department of Civil Engineering), 2012, 1-10.
- [10] Caicedo, B. and Thorel, L. (2014) Centrifuge Modelling of Unsaturated Soils. *Journal of Geo-Engineering Sciences*, **2**, 83-103. <https://doi.org/10.3233/JGS-130013>
- [11] American Society of Testing and Materials. Annual Book of Astm Standards Philadelphia. Standard Test Method For Measurement Of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper: ASTM D5298 (1992) [S]. US: ASTM, 1992.
- [12] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸总吸力吸湿曲线的率定试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 100-104. <https://doi.org/10.7312/li--16274-033>
- [13] 许海楠. 非饱和土吸力测量方法的对比试验研究[D]: [硕士学位论文]. 四川: 西南交通大学, 2017.
- [14] 张敏, 吴宏伟, 陈锐. 一种能直接量测高吸力的新型吸力传感器[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1191-1195.