

[文章编号] 1003—4684(2022)04-0111-04

# 基于滤纸法的水泥土土—水特征曲线试验研究

王 清, 陈阳阳, 吴小康

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 以不同水泥掺量的湖南黏性土为研究对象,通过土—水特征曲线试验(滤纸法)研究水泥掺量对持水性能的影响。随着水泥掺量的增加,试样的持水性能逐步增强。基于实测水泥土土—水特征曲线数据,利用 VG 模型和 Gardner 模型对其进行拟合,比较不同模型的拟合效果。结果表明:水泥掺量在 8%~20% 范围内,随着水泥掺量的增加,在同等吸力条件下试样对应的含水率越高;与 VG 模型相比,Gardner 模型的拟合结果与实测值更为接近,拟合的效果要优于 VG 模型。

[关键词] 持水性能; 水泥掺量; 土—水特征曲线; 拟合

[中图分类号] P642.3 [文献标识码] A

水泥土是水、水泥、土颗粒均匀搅拌后形成的复合型建筑材料。水泥土施工方便、价格低廉、工期较短,力学性能上相对于原状土而言具有低渗透性和高强度等特点,因而被广泛应用于工程建设中,一般通过深层搅拌水泥土桩,以起到支护、增加土体强度改善地基的强度和耐久性的作用。但是由于水泥土这种材料本身的局限性,水泥土在工程中的应用水平有待提高,这些年较多的学者深入研究了水泥土的力学性质。白晓红等<sup>[1]</sup>探讨了在污染环境下水泥土抗压强度的影响。王军等<sup>[2]</sup>基于静三轴实验分析了水泥掺量和围压对水泥土强度的影响。

水泥土中水分的运动情况对其强度和渗透性有重要的影响,尤其是地下水、降雨等水力作用会在一定程度上改变水泥土的强度和渗透性<sup>[3]</sup>,这也间接表明了水泥土的持水性能有效改善原状土的力学和渗透特性。因此,在对水泥土力学性能研究中,持水性成为了不可忽视的一部分,但当前对水泥土的持水性能研究较少。而对于水泥土持水能力的研究,主要是通过研究其土—水特征曲线中反映的基质吸力与体积/质量含水率的关系。目前对持水性能的研究主要通过实验法,涉及压力板仪试验、滤纸法、饱和盐溶液蒸汽平衡法等。

滤纸法是一种测量土体基质吸力或总吸力的间接方法,操作简单方便,可靠,价格低廉,且能测量较大范围土体的基质吸力<sup>[3-4]</sup>。目前,国外学者多采用 Whatman No.42 和 Schleicher & Schuell No.589 两种型号滤纸进行了大量实验研究<sup>[5-8]</sup>。国内多采

用“双圈牌”滤纸<sup>[9-12]</sup>,白福青<sup>[13]</sup>等利用 NaCl 溶液确定了双圈牌“No.203”滤纸的率定曲线,并获得南阳中膨胀土的土—水特征曲线。陈东霞等<sup>[14]</sup>采用双圈牌“No.203”测得厦门残积土的土—水特征曲线,并分析干湿循环等因素对脱湿曲线的影响。

为了进一步揭示水泥含量对水泥土持水性能的影响,本文通过土—水特征试验研究水泥土持水性能随水泥掺量的变化规律,并基于实测水泥土土—水特征曲线数据,利用 VG 模型和 Gardner 模型对其进行拟合,比较不同模型的拟合效果,得出拟合效果更好地模型,能够更好地预测不同水泥掺量下湖南黏性土土—水特征曲线。相关研究成果有利于深入认识水泥增强黏性土持水性能的机理,为水泥土强度和渗透性研究提供更多的依据,并促进相关工程应用。

## 1 实验材料

实验土样为湖南黏性土,表 1 为土样的基本物理性指标。水泥采用某品牌的普通硅酸盐水泥,试验所用滤纸选取新华造纸厂生产的“双圈”牌、No.203 型,将实验土样风干碾碎,掺入水泥加水均匀拌合,利用液压千斤顶进行制样,初始制样的干密度控制为 1.5 g/cm<sup>3</sup>,按不同黏性土和水泥的比例制备 4 种不同水泥含量的水泥黏土混合样,其水泥掺量分别为 8%、12%、15%、20%。

表 1 土样的基本物理指标

天然含水率/%	土粒比重	液限/%	塑限/%	塑性指数
13.8	2.74	30.9	20.7	10.2

2 土-水特征曲线实验

2.1 实验设备

试验所需的仪器设备为:电子天平精度分别为 0.01 g 和 0.001 g;恒温恒湿养护箱;恒温箱(20℃);105±5℃的烘箱;气密性良好的密封盒;金属镊子;绝缘胶带;保鲜膜,“双圈”牌 No.203 型滤纸。

2.2 实验步骤

1)实验前,将实验用土风干碾碎过 2 mm 筛,放入烘箱烘干备用,烘干 24 h。

2)根据 4 组不同水泥掺量(分别为 8%、12%、15%和 20%),计算出不同掺量所需的干土和水泥,用电子天平(精度为 0.01 g)称取并加水均匀拌合至一定含水率,制备成干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>,高 20 mm 的环刀样,其中每组制 9 个平行试样,共 36 个试样,将其放入恒温恒湿养护箱中养护 10 d。

3)将养护好的试样抽真空饱和,利用电子天平(精度为 0.01 g)称量其饱和后的质量,并从每组饱和后的试样取 3 个放置在烘箱烘干,测得每组试样的平均干土质量  $m_s$ ,进而得出饱和质量含水率  $w_s$ 。

4)将实验所用滤纸放入铝盒内,并将铝盒盖留有缝隙后,放入烘箱中烘 8 h。

5)采用接触法测量试样在饱和含水率下的基质吸力,每 2 个为一测试样,每组制 3 个平行测试样,取 3 张烘干后的滤纸(滤纸烘干时间为 8 h),其中 2 张略大的为保护滤纸,另一张为测试滤纸。用电子天平量(精度为 0.0001 g)快速称取测试滤纸质量,并将测试滤纸夹在保护滤纸之间,放置在 2 试样之间并紧密贴合,然后用绝缘胶带密封,为保证实验的准确性,此步骤需 2 人同时操作,并在短时间快速完成。

6)将处理好的试样放置于密封盒中,并在密封盒表面再次包裹一层保鲜膜,放入恒温箱中,恒温箱温度设置为 20℃,静置 10 d。

7)待平衡以后,打开密封盒,迅速用镊子把测试滤纸取出,放到电子天平称上测其质量,这个过程要在 15 s 之内完成,以减少滤纸中的水分蒸发流失。

8)测完试样在饱和含水率下的基质吸力后,将试样放置在恒温箱中风干至一定含水率,用塑料薄膜密封 3 d,然后重复上述实验步骤,依次测量试样在 7 种不同含水率下对应的基质吸力。

2.3 实验结果分析

试验所用的滤纸为杭州新华造纸厂的“双圈”牌

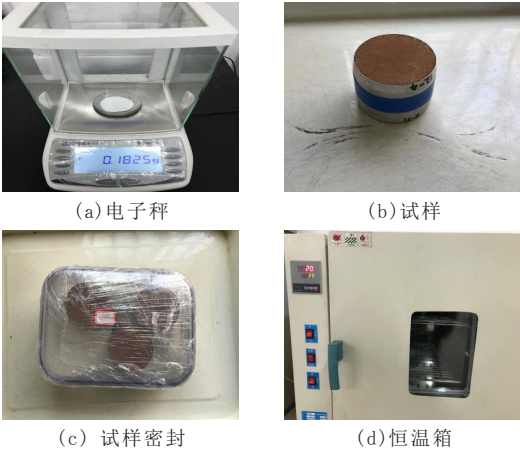


图 1 滤纸法实验步骤

No.203 型滤纸,该滤纸为直径 70 mm;灰分质量为 0.000035 g/张,灰分质量分数为 0.01%;滤速为慢速,其率定方程为:

$$\begin{cases} \lg S = 5.493 - 0.0767w_f, w_f \leq 47\% \\ \lg S = 2.470 - 0.0120w_f, w_f > 47\% \end{cases} \quad (1)$$

其中  $S$  为吸力,  $w_f$  为滤纸含水率。

通过对比滤纸实验前后的质量,不同水泥掺量下滤纸含水量具体结果如表 2 所示。

表 2 不同水泥掺量试样的滤纸含水率

	水泥掺量/%			
	8	12	15	20
滤纸含水率/%	90.07	76.42	79.09	78.88
	85.41	67.26	62	62.44
	62.62	45.91	41.18	31.18
	23.20	18.47	17.68	16.30
	16.46	14.43	11.51	11.29
	12.04	11.52	10.91	10.54
	11.57	10.48	10.36	9.11

结合表 2,基于公式(1)计算出不同含水量对应下的基质吸力,可获得不同水泥掺量下的湖南黏性土土-水特征曲线,并将不同掺量下的土-水特征曲线绘制于同一图内,如图 2 所示。

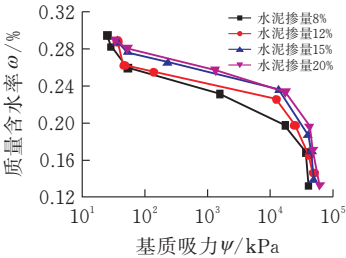


图 2 不同水泥掺量下湖南黏性土土-水特征曲线

从图 2 中不难发现,整体上水泥掺量在 8%~20%范围内,水泥掺量的增加,使得试样含水率在减小,水泥掺量越高的试样脱水速率越小,在同等吸力条件下对应的含水率越高,表明水泥掺量在 8%~20%范围内,随着水泥掺量的增加,试样的持水性能

越好。此外,基质吸力在  $10\sim10^2$  kPa 范围内,水泥掺量为 8%、12% 的试样质量含水率变化明显。基质吸力在  $50\sim1.2\times10^4$  kPa 范围内,4 种不同水泥掺量下试样整体上脱水速率较小,质量含水率  $w_s$  变化缓慢,不同的是,水泥掺量为 8% 的试样基质吸力在  $1.5\times10^3$  kPa  $\sim1.2\times10^4$  kPa 范围内,脱水速率明显高于水泥掺量为 12%、15% 和 20% 的试样。当基质吸力大于  $1.2\times10^4$  kPa 时,不同水泥掺量下试样质量含水率  $w_s$  均迅速减小。依据图 2 分析可知,随着水泥含量的增多,水泥凝固,改变了土体原来的结构,水化反应产生的结晶化合物会不断占据水泥土中的孔隙,使得孔隙数量大大减少,因此在同一个含水率下,水泥掺量越多的水泥土需要的吸力也就越大,持水性能也就越好。

### 3 不同 SWCC 模型拟合

土-水特征曲线拟合工作是非饱和土工程性质研究的基础,因此,相继有许多 SWCC 模型来描述吸力与含水率的关系,如 Gardner<sup>[15]</sup>、van Genuchten<sup>[16]</sup>等。本文将水泥土质量含水率转换为体积含水率,根据现有模型选取 Gardner 模型和 Van Genuchten 模型(VG)对水泥土实验数据进行曲线拟合,模型对应公式为(2)和(3),拟合结果如图 3 所示。

Gardner(1958)提出了 3 参数的土-水特征曲线模型,其表达式如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \lambda \psi^n}$$

(2)

式中: $\lambda$  为与进气值相关的参数, $n$  为与脱湿速率相关的参数。

Van Genuchten(1980)提出了 4 参数的土-水特征曲线模型,其表达式如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\psi)^m]^p}$$

(3)

式中: $a, m$  为模型拟合参数,其中, $a$  与土中进气值有关, $m$  与土中空隙孔径分布有关且  $p=1-1/m$ , $p$  为与残余含水率相关的参数。

表 3 表示不同水泥掺量下模型拟合相关系数,从表 3 可以发现在同一水泥掺量下,Gardner 模型拟合得到的相关系数要高于 VG 模型。图 3 表示不同模型下土-水特征曲线拟合图,从图 3 明显可以看出,对于相同水泥掺量下的湖南黏性土而言,Gardner 模型的拟合结果与实测值更为接近,拟合的效果要优于 VG 模型。结合表 3 可以进一步说明,Gardner 模型作为描述和预测不同水泥掺量下湖南黏性土的土-水特征曲线更为合理。

表 3 不同水泥掺量下模型拟合相关系数		
水泥掺量/%	相关系数 $R$	
8	VG	0.9472
	Gardner	0.9660
12	VG	0.9405
	Gardner	0.9493
15	VG	0.9543
	Gardner	0.9704
20	VG	0.9455
	Gardner	0.9643

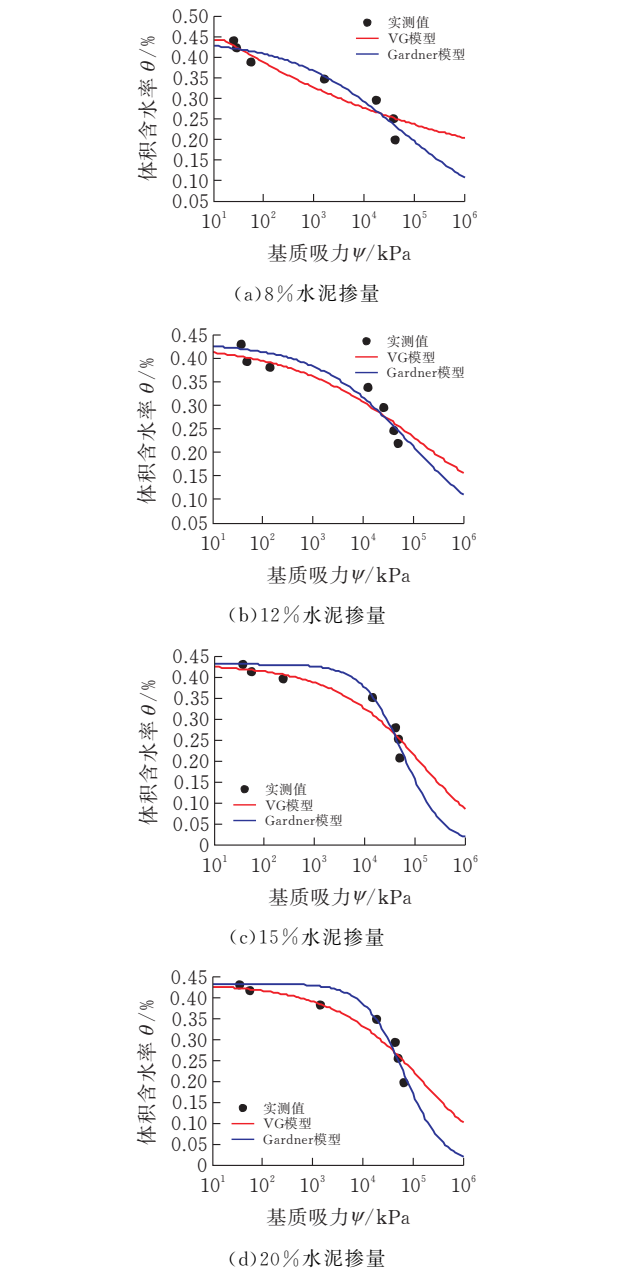


图 3 不同水泥掺量下湖南黏性土土-水特征曲线拟合

### 4 结论

本文制成 4 种不同水泥掺量水泥土,分别进行土-水特征曲线试验,研究水泥掺量对水泥土持水性能的影响。在此基础之上,分析水泥掺量对水泥

土持水性能的影响机制,得出的主要结论如下:

- 1)在相同干密度的条件下,湖南黏性土随着水泥掺量的增加持水性能越好;水泥掺量的增加使得试样的饱和含水率逐渐降低,脱水速率越小,在同等吸力条件下对应的含水率越高。
- 2)相同含水率时,水泥含量越多的水泥土孔隙数量越少,所需吸力越大,持水性能越好,说明孔隙数量对水泥土的持水性能有重要的作用。
- 3)对不同水泥掺量下湖南黏性土土-水特征曲线拟合结果表明:Gardner 模型的拟合结果与实测值更为接近,拟合的效果要优于 VG 模型,能较为合理的描述和预测不同掺量下湖南黏性土的土-水特征曲线。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 白晓红, 赵永强, 韩鹏举, 等. 污染环境对水泥土力学特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8):1260-1263.

[2] 王军, 丁光亚, 潘林有, 等. 静三轴试验中水泥土力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1407-1412.

[3] 胡孝彭, 赵仲辉. 基于压汞法的水泥固化淤泥持水特性研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(3):116-119.

[4] HOUSTON S L, HOUSTON W N, WAGNER A M. Laboratory filter paper suction measurements [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(2): 185-194.

[5] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements [J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(3): 1-12.

[6] FAWCETT R G, COLLIS GEORGE N. A filter-paper

method for determining the moisture characteristics of soil [J]. Animal Production Science, 1967, 7 (25): 162-167.

[7] MCQUEEN I S, MILLER R F. Calibration and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress [J]. SoilScience, 1968, 106(3): 225-231.

[8] AL KHAFRAF S, HANKS R J. Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential [J]. Soil Science, 1974, 117 (4): 194-199.

[9] HAMBLIN A P. Filter-paper method for routine measurement of field water potential [J]. Journal of Hydrology, 1981, 53 (3-4): 355-360.

[10] 程金茹, 沈珍瑶, 李满喜. 滤纸吸力率定曲线的研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 800-802.

[11] 蒋刚, 王钊, 邱金营. 国产滤纸吸力-含水量关系率定曲线的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 72-75.

[12] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 等. 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.

[13] 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(6): 928-933.

[14] 陈东霞, 龚晓南. 非饱和残积土的土-水特征曲线试验及模拟[J]. 岩土力学, 2014(7):1885-1891.

[15] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228-232.

[16] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.

## Experimental Study on Soil-water Characteristic Curve of Cement Soil Based on Filter Paper Method

WANG Qing, CHEN Yangyang, WU Xiaokang

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Taking Hunan clay-soil with different cement content as the research object, soil-water characteristic curve test (filter paper method) was carried out to study the effect of cement content on water holding capacity. With the increase of cement content, the water holding capacity of the samples gradually increased. In addition, based on the measured cement soil-water characteristic curve data, the VG and Gardner model are used to fit it, and then the fitting effects of different models are compared. As the studies show: The cement content is in the range of 8% ~ 20%. With the increase of the cement content, the higher the water content of the sample under the same suction condition. The fitting results of the Gardner model are closer to the measured values, and the fitting effect is better than the VG model.

**Keywords:** water holding capacity; cement content; soil-water characteristic curve; fitting