

文章编号:1672-9331(2019)01-0010-07

## 海南高液限土结合水试验研究

张锐<sup>1,2</sup>, 肖宇鹏<sup>1</sup>, 刘闯<sup>1,3</sup>

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114; 3.海南省交通运输厅, 海南 海口 570100)

**摘要:** 为了确定高液限土结合水及其合适的测试方法,为进一步开展高液限土压实机理研究提供基础,在海南万洋高速公路选取高液限土,分别采用容量瓶法和等温吸附法进行了结合水对比试验研究。试验结果表明,容量瓶法测试结果大于等温吸附法试验结果,两种方法测得结合水含量均随粒径的减小而增大,即细粒>原土>粗粒;容量瓶法测得细粒土样的强结合水含量是粗粒土的2.57倍,等温吸附法测得的细粒土样的强结合水含量是粗粒土的2.11倍;高液限土结合水的密度、水合比重均随结合水含量的增多而降低。等温吸附法自水汽中吸附结合水,因黏土堆积及其成团聚体的特点,水分子仅被吸附在黏粒表面,所以试验结果势必偏小。而容量瓶法从液体水中吸附结合水的过程更符合原状土的实际情况,因此建议采用容量瓶法测高液限土的结合水含量。

**关键词:** 高液限土; 结合水; 等温吸附法; 容量瓶法; 粒径; 相对湿度

中图分类号: U416

文献标识码: A

## Experimental study on high liquid limited soil bound water in Hainan

ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, XIAO Yu-peng<sup>1</sup>, LIU Chuang<sup>1,3</sup>

(1.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2.National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 3.Hainan Provincial Transportation and Transportation Department, Haikou 570100, China)

**Abstract:** In order to ascertain the bound water of high liquid limit soil and its proper testing method, this research provides a basis for further research on compaction mechanism of high liquid limit soil, selection of high liquid limit soil in Hainan Wan Yang Expressway, unit-weight method and isothermal adsorption method were used to study the bound water test. The results show that the unit-weight method test results are greater than the isothermal adsorption test results. The bound water content measured by two methods increases with the decrease of particle size, fine particles > original soil > coarse particles. The strong binding water content of the fine-grained soil samples measured by the unit-weight method was 2.57 times that of the coarse-grained soil, and the strong binding water content of the fine-grained soil samples measured by the isothermal adsorption method was 2.12

收稿日期: 2018-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108049, 51608053); 交通运输部公路工程行业标准制修订项目(JTG—201507)

通讯作者: 张锐(1980—), 男, 湖南株洲人, 长沙理工大学副教授, 博士, 主要从事特殊土及其路基工程方面的研究。  
E-mail: zr\_csust@163.com。

times that of the coarse-grained soil. The hydration specific gravity of the high liquid limit soil and the density of the bound water all decrease with the increase of the adsorption bound water. Adsorption of water from water vapor by isothermal adsorption, because clay is stacked and has aggregates, water molecules are only adsorbed on the surface of the clay, so the test results must be small, the process of adsorption and binding of water from liquid water by unit-weight method is more consistent with the actual situation of raw soil. It is recommended to test the bound water content of high liquid limit soil by unit-weight method.

**Key words:** high liquid limit soil; bound water; Isothermal adsorption; unit-weight method; particle size; relative humidity

我国的高液限土分布广,主要集中在占我国陆域面积 25%、气候湿润的南方地区。高液限土的天然含水率高、细粒含量多、液限高、塑性指数大,在路基施工过程中往往达不到压实度的要求<sup>[1]</sup>。但与一般砂粒土不同,高液限土中含有大量的结合水,强结合水具有固体特征且密度大,在外力的作用下很难被排出<sup>[2]</sup>。因结合水的固体性质,有部分研究者将结合水算做固体而不是水的含量进行研究,但仅根据经验方法对结合水的含量进行预估,没有定量地对土样结合水的含量进行测试<sup>[3,4]</sup>。笔者认为,在压实度计算中,强结合水的含量应算作固体质量。因此,如何测定高液限土中结合水的含量是评估其对压实性能影响中亟待解决的关键问题。

目前,关于土体吸附水测量应用最多的方法是热重分析法<sup>[5,6,8]</sup>、等温吸附法<sup>[5,7,8]</sup>和容量瓶法<sup>[9,12]</sup>。热重分析仪价格昂贵,且每次测量土样大约只能为 0.1~1 g,不符合工程精度的要求,在工程中利用和推广较为困难。容量瓶法和等温吸附法这两种测试方法试验步骤简单,试验设备较为简易,已被相关研究人员广泛运用,适合于工程中

测试土粒结合水的含量。

为此,作者选取适用于大多数实验室且易于在工程中运用的等温吸附法和容量瓶法这两种结合水测量方法进行研究。并以海南高液限土为研究对象,探讨这两种方法之间的差异、高液限土吸附结合水的机理以及土颗粒物理参数的变化,以期结合水测试的相关研究提供参考。

## 1 试验土样

试验土样取自万洋高速第九合同段 K110+180,为高液限土,土的基本物理特性如表 1 所示。由表 1 可以看出,试验土样具有高液限土的典型特点。采用 X 射线衍射分析法测定了土样的矿物成分,土样主要包含的矿物有高岭石、石英和云母,其中,高岭石含量为 71%,石英含量为 16.7%,云母含量为 12.3%。通过图 1 的电镜扫描照片可以清楚地看到大量长方形紧密层状结构的土颗粒,同时能观察到土颗粒上大量的微孔隙。这种含有大量微孔隙的土颗粒是海南万洋高速高液限土土样中的主要组成部分。

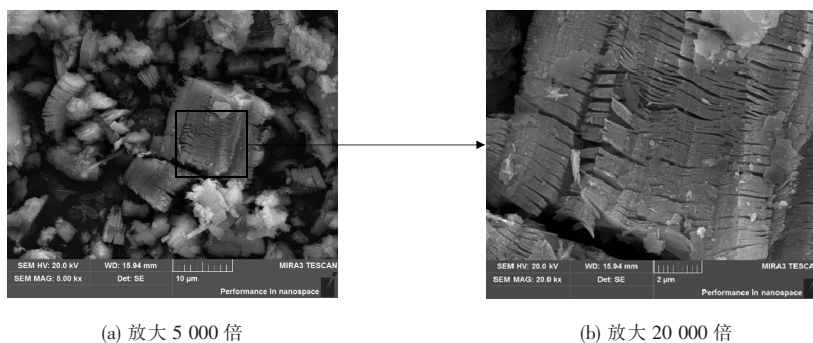


图 1 电镜扫描照片

Fig. 1 Scanning electron microscope photo

表1 海南高液限土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of high liquid limit soil in Hainan

取样位置	颗粒组成/%			液限	塑限	塑性指数	天然含水率/%	天然稠度
	粘粒	粉粒	砂粒	$W_L/\%$	$W_P/\%$	$I_P$		
K110+180	30.81	39.50	29.69	56	30	26	29.1	1.03

## 2 容量瓶法试验

### 2.1 容量瓶法测试原理

吴凤彩<sup>[7]</sup>在1984年提出容量瓶法,此方法结合众多学者研究成果,基于典型的几种黏土矿物吸附结合水即强结合水的平均密度约等于 $1.3\text{ g/cm}^3$ 这一事实,假设渗透结合水的密度接近或等于 $1.0\text{ g/cm}^3$ ,吸附结合水密度为 $1.3\text{ g/cm}^3$ ,由于土粒遇水后会瓶中的液态水吸附到土粒表面形成吸附结合水,使得瓶中水的体积减小。通过减小的水的体积便可求得吸附结合水的含量。

将质量为 $m_s$ 的干土加入容量瓶中,注入 $V_0$ 体积的蒸馏水,由于自由水转化为吸附结合水,容量瓶中液体体积缩小量为 $\Delta V$ :

$$\Delta V = \frac{\rho_{we} - \rho_{wt}}{\rho_{we}\rho_{wt}} m_s w_g \quad (1)$$

则吸附结合水含量 $w_g$ 为:

$$w_g = \frac{\rho_{we}\rho_{wt}}{\rho_{we} - \rho_{wt}} \frac{\Delta V}{m_s} \quad (2)$$

式中: $\rho_{we}$ 为吸附结合水密度,取 $1.3\text{ g/cm}^3$ ;  $\rho_{wt}$ 为自由水密度,取 $1.0\text{ g/cm}^3$ 。

$\Delta V$ 的计算公式为:

$$\Delta V = \frac{m_s}{\rho_s} + V_0 - V_t - V_1 \quad (3)$$

式中: $V_0$ 为加入蒸馏水的体积; $V_t$ 为 $t$ 时刻容量瓶液面读数; $V_1$ 为从开始到 $t$ 时刻液体蒸发损失量。

### 2.2 容量瓶法测试方案

采用容量瓶法测定试样吸附结合水的含量。特制的容量瓶容积为 $255\text{ mL}$ ,其分度值为 $0.05\text{ mL}$ 。为探讨颗粒大小对结合水含量测试结果的影响,将风干的试验土样过 $0.074\text{ mm}$ 筛,此时只有土样中的细粒,收集筛后土样为一组(细粒);再将未过筛的土样进行洗筛,洗至只有清水为止,此时筛上只有土中的粗粒,收集筛上土样为一组(粗粒);再取一份土样用研钵碾碎,收集研磨后的土样为一组(原土),共三种土样。进行容量瓶试验前先测定这三种土样的比重。为了得到工

程中测量含水率时被烘去的结合水含量,按照现行土工试验规范中测土中含水率的方法将试样烘干,即在 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 下将三种土样烘干 $8\text{ h}$ 以上,将烘干后的土样存放于相对湿度为零的干燥器中冷却,待土样冷却后称取定量的土样放入已干燥处理的容量瓶中,再将定量的蒸馏水注入瓶中,震荡摇匀使土颗粒充分分散并排出土颗粒内部的气体。由于细粒土较粗粒土内部气体更难排出,应多予以震荡摇匀,土样均震荡摇匀至液体内不再有小气泡排出。再将容量瓶放入恒温水浴中,各试样的试验条件保持一致,水浴温度设置为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。每组试验均取干土样 $20\sim 30\text{ g}$ 进行试验,每隔 $24\text{ h}$ 读一次液面读数,直至液面平衡不再发生变化。设置两组平行试验和一组容量瓶中只有蒸馏水的蒸发校正试验。

### 2.3 容量瓶法测试结果及分析

图2为试验过程中各土样吸附结合水的形成过程,最终容量瓶法试验结果见表2。

从各组试验结果可以看到,各组吸附结合水含量大小不同,但其吸附规律基本相似(见图2),结合水的形成速度逐渐变缓,其过程先快后慢再到稳定。

从表2可以看出,黏土的粒径对吸附结合水含量的大小影响较大,粗粒土样吸附结合水含量最少,平衡时间也越短,且吸附结合水的含量随着土样粒径的减小而增加,同质量的细粒土样吸附的结合水含量是粗粒的 $2.57$ 倍;根据试验结果,原土样、粗粒、细粒的吸附结合水含量分别为 $24.8\%$ 、 $11.9\%$ 、 $30.5\%$ ;原土样平均吸附结合水含量 $w_g$ 高达 $24.8\%$ ,测量结果与李文平<sup>[10]</sup>所得黏土吸附结合水含量的经验公式 $w_g = 0.885 w_p$ 较为接近,其中 $w_p$ 为土样的塑限。

原土和粗粒、细粒土样测试结果存在以下关系:

$$w_g = w_{gf} \times c_f + w_{gc} \times c_c \quad (4)$$

式中: $w_{gf}$ 为细粒土样的强结合水含量; $c_f$ 为原土细粒含量; $w_{gc}$ 为粗粒土样的强结合水含量; $c_c$ 为原土粗粒含量。

海南高液限土样细粒含量为 70.31%,粗粒含量为 29.69%,则根据式(4)计算吸附结合水含量结果为 21.44%+3.56%=25%,与原土样实测结果 24.8%基本一致。由容量瓶法结果可以看出,海南高液限土中主要是土中细粒吸附结合水,占总体的 85.8%。

表 2 容量瓶法测试结果统计

Table 2 Test result statistics of unit-weight method

试验 编号	土干重 $m_s$ / g	土比重 $G_s$ / $\text{cm}^3$	土颗粒体积 $(m_s/G_s)/$ $\text{cm}^3$	注入蒸馏 水体积/ mL	最终液 面读数/ mL	溶液体 积增量/ mL	蒸发量/ mL	溶液缩小 体积 $\Delta V$ / mL	吸附结合水 含量 $w_g$ / %	平均结合 水含量/ %
土 1	22.52	2.73	8.25	245.00	251.77	6.77	0.20	1.28	25.0	24.8
土 2	22.70		8.32	245.00	251.81	6.81	0.20	1.31	24.6	
粗 1	22.22	2.65	8.38	245.00	252.56	7.56	0.20	0.62	12.1	11.9
粗 2	23.46		8.85	245.00	253.02	8.02	0.20	0.63	11.6	
细 1	22.36	2.76	8.10	245.00	251.34	6.34	0.20	1.56	30.2	30.5
细 2	22.66		8.21	245.00	251.40	6.40	0.20	1.61	30.8	

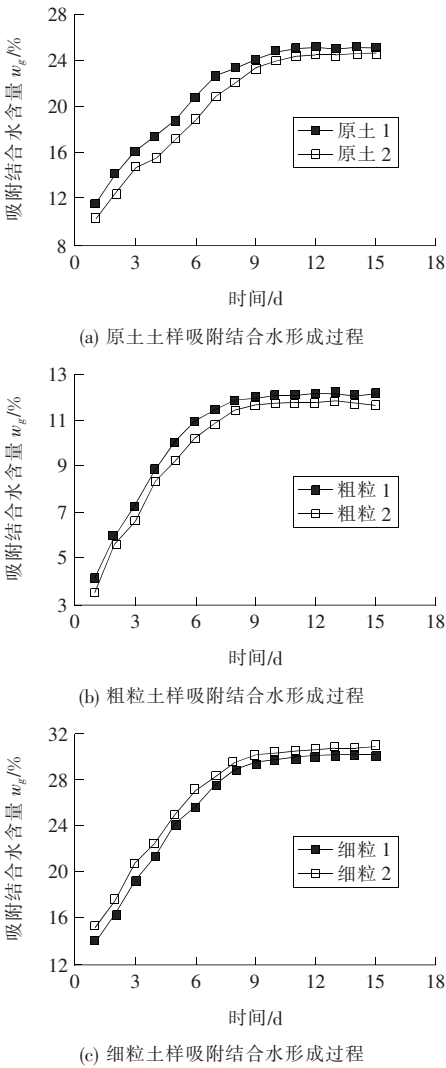


图 2 三种土样吸附结合水形成过程

Fig. 2 Three kinds of soil sample formation process of absorbed bound water

3 等温吸附法试验

3.1 等温度吸附法测试原理

等温吸附法测结合水含量是指在恒定的一个温度下,随着相对湿度的变化,单位质量的土颗粒所吸附的水汽量的变化。等温吸附法可以测定试样在不同相对湿度下达到平衡时的质量及其变化规律,从而研究分析试样水合历程。等温吸附法是土颗粒从水汽中吸附结合水,与容量瓶法从液体中吸附结合水的机理不一样,因此通过等温吸附法还可以研究强弱结合水、土样吸附结合水的过程和试样吸附结合水后的各种物理参数的变化情况。

3.2 等温吸附法测试方案

运用等温吸附法测试试样结合水的含量,同样按上述容量瓶法的制样方法进行制样,制备三种试样,将烘干后的土样存放于相对湿度为 0 的干燥器中备用。在 9 个不同相对湿度的干燥器内进行等温吸附试验。试验时,采用精度值为 0.001 g 的分析天平进行试验,每次称取 5 g 左右的土样放入直径为 10 cm 的铝盒上,再将铝盒放置于不同的 9 个干燥器内,不同相对湿度的干燥器内采用不同的饱和盐溶液和水进行控制(见表 3)。试验过程温度保持在 25 ℃ 左右,试验期间每 24 h 称重一次,直至质量不变,吸附水汽量达到平衡。每组土样取 2 个平行样,试验结果取平均值。

表3 不同饱和盐溶液对应的相对湿度

Table 3 Relative humidity of different saturated salt solutions

饱和盐溶液	相对湿度	饱和盐溶液	相对湿度
醋酸钾	0.23	氯化镁	0.33
碳酸钾	0.43	溴化钠	0.59
氯化钠	0.75	氯化钾	0.85
硫酸锌	0.90	硫酸钾	0.98
蒸馏水	1.00		

### 3.3 等温吸附法测试结果及分析

三种土样吸附水汽达到平衡的时间为6~10 d左右,其中,粗粒土吸附水汽平衡时间最短,为6 d;细粒土吸附水汽平衡时间最长,为10 d。由图3可以看到三种土样表面吸附结合水量与相对湿度之间的关系。图3中试验结果取的是平均值。随着相对湿度的增加,三种土样对水分子的吸附规律是一致的。在较低的相对湿度下( $0 < RH < 0.85$ )下,随着相对湿度的增加,吸附水汽的含量增长较为平缓;随后,在 $0.85 < RH < 0.98$ 这一范围内,吸附水汽的含量增加加快,吸附曲线缓慢上扬;而在 $0.98 < RH < 1$ 这个范围内,吸附水汽的含量快速增加,吸附曲线急速上扬,在这一阶段说明有一种新的能量状态开始作用,同时预示了有一种新的形式的水出现。

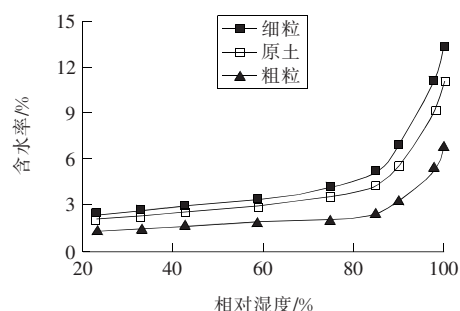


图3 三种土样结合水量与相对湿度之间的关系

Fig. 3 Relationship between bound water content and relative humidity of three soil samples

土粒强、弱结合水的界定有着很大的理论和实际意义。从图3可以看出,相对湿度在0.85~1范围内,吸附水汽的增量是最大的。已有的研究表明,土粒在 $RH=0.9$ 或 $0.88$ 时,吸附的结合水有着质的变化。由图3可知,当相对湿度在 $0 < RH < 0.85$ 这一区间内增加时,土粒吸附水汽的含量增加较为缓慢,其吸附等温线的变化较为平稳,

近似为线性变化,该过程土颗粒与水是以静电引力相互作用为主的物理化学吸附。土粒表面吸附的水分子经历了与黏土矿物表面相连接,此过程中吸附的结合水分子与黏土矿物表面之间有着强烈的相互作用(化学键形式、化学吸附结合),其固存于黏土矿物当中,从结晶化学的角度来看,这种结合水与黏土矿物的晶体格架形成统一整体,属于固体范畴,这就是强结合水;当相对湿度 $RH > 0.85$ 时,随着相对湿度的增大,吸附曲线迅速上升,其曲线与BET多分层吸附曲线较为吻合,说明在这一区间土颗粒发生了多分子层吸附,所吸附的水不属于固相范畴。总的来说,在相对湿度 $RH=0.85$ 时,等温吸附曲线上存在着一个明显的拐点,该点为强、弱结合水的交界点。

根据试验结果,细粒土吸附强结合水的含量为5.25%,粗粒土吸附强结合水的含量为2.49%。同质量的细粒土样的强结合水含量是粗粒的2.11倍。已知海南高液限土样的粗粒含量和细粒含量,则根据式(4),吸附结合水含量结果为 $3.69\% + 0.73\% = 4.42\%$ ,和原土样实测结果4.28%基本一致。由等温吸附法结果可以看出,海南高液限土中主要是土中细粒吸附结合水,占总体的83.48%。

### 3.4 结合水的物理性质

将等温吸附试验后的原土土样用比重瓶法测量其水合后原土土样的比重,并把该比重定义为水合比重,得到水合原土土样的水合比重(Hydrous Specific Gravity)与结合水含量的关系(见图4)。由图4可以看出,原土土样的水合比重随结合水含量的增加而减小。

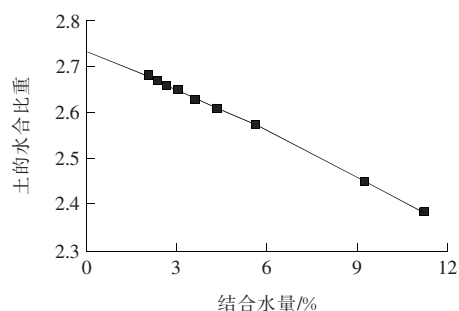


图4 原土水合比重与结合水量的关系

Fig. 4 Relationship between hydrous specific gravity of soil and bound water content

原土样水合之后相关物理指标的计算公式如下。  
吸附结合水后的土样的体积为:

$$V_{hs} = m_{hs} / \rho_{hs}。$$

式中:  $V_{hs}$  为水合原土土样体积;  $m_{hs}$  为水合原土土样质量;  $\rho_{hs}$  为水合原土土样比重。

则结合水的体积为:

$$V_{hw} = V_{hs} - V_s。$$

式中:  $V_{hw}$  为结合水的体积;  $V_{hs}$  为水合土样的体积;  $V_s$  为干原土的体积。

因为结合水的质量为:

$$m_w = m_{hs} - m_s。$$

式中:  $m_{hs}$  为水合后原土的质量;  $m_s$  为干原土的质量;  $m_w$  为结合水的质量。

则结合水的密度为:

$$\rho_w = m_w / V_{hw}。$$

式中:  $\rho_w$  为结合水的密度;  $V_{hw}$  为结合水的体积;  $m_w$  为结合水的质量。

根据等温吸附试验和比重瓶法试验的结果,以 100 g 干原土为例,通过上述计算,求得吸附结合水后原土土样的参数及一些结合水的参数,结果统计见表 4。

表 4 等温吸附法测试结果分析(以 100 g 原土为例)

Table 4 Analysis of the test results of isothermal adsorption(Taking 100 g soil as an example)

土样	100 g 干土样吸附		结合水密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	吸水后土样体积/cm <sup>3</sup>	吸水后土样密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
	相对湿度 RH	的含水量			
		重量/g	体积/cm <sup>3</sup>		
海南高液限土	0.00	0.00	0.00	0.00	36.63
	0.23	2.07	1.46	1.42	38.09
	0.33	2.35	1.70	1.38	38.33
	0.43	2.60	1.94	1.34	38.57
	0.59	3.00	2.24	1.34	38.87
	0.75	3.60	2.76	1.30	39.39
	0.85	4.28	3.32	1.29	39.95
	0.90	5.60	4.38	1.28	41.01
	0.98	9.23	7.95	1.16	44.58
	1.00	11.18	9.98	1.12	46.61

根据表 4 可知,当相对湿度小于 0.85 时,结合水的密度在 1.3 g/cm<sup>3</sup> 附近浮动,原土强结合水的平均密度值为 1.3 g/cm<sup>3</sup>,与王铁行等人<sup>[5]</sup>得到的数值相近,同时也验证了通常研究认为强结合水的平均密度值为 1.3 g/cm<sup>3</sup> 的合理性。还可以看到,在相对湿度大于 0.85 之后开始吸附弱结合水,

在这个阶段水合比重和结合水的密度快速下降,此试验结果也从侧面验证了划分界限的准确性,即相对湿度 RH=0.85 为强、弱结合水的交界点。

## 4 结论

1) 海南高液限土中较多的粘粒含量、大量的亲水矿物高岭石和土粒微观结构的构成是其结合水含量较高的主要原因。

2) 采用容量瓶法和等温吸附法对三种不同粒径组成的土样测试结果表明,颗粒大小对结合水含量的影响在规律上是一致的,即颗粒越小,结合水量越大。

3) 等温吸附法测得的试验结果低于容量瓶法。在等温吸附法测试中,土样是在空气中吸附结合水,测试时土粒堆积且具有成团聚体的特点,而土粒之间的黏聚力大于水分子的楔入力,使得水分子只被吸附在土颗粒表面。而容量瓶法测试时,土颗粒是在液态水中吸附结合水,土颗粒充分分散,从而充分吸附结合水,所以等温吸附法试验结果势必低于容量瓶法。且容量瓶法测得同质量下细粒土样的强结合水含量为粗粒的 2.57 倍,而等温吸附法同质量下细粒土样的强结合水含量为粗粒的 2.11 倍。

4) 在相对湿度 RH=0.85 时,等温吸附曲线上存在着一个明显的拐点,该点为强、弱结合水的交界点。在这一拐点前后,结合水的密度、体积、质量和水合比重等重要物理量也有着很大区别,通过这些变化也印证了对强弱结合水界定的合理性。

5) 作者认为,对于吸附结合水的含量,可以参考容量瓶法的测试结果。相较于等温吸附法自水汽中吸附结合水,容量瓶法从液体水中吸附结合水的测试过程更符合路基填料的实际情况;且其在数值上也更贴近通常研究对强结合水的一般认识,即强结合水的含量略低于其塑限值,因此建议使用容量瓶法测试结合水的含量。虽然该两种方法在测试结果上有一定的差异,但将容量瓶法和等温吸附法取长补短,将其测试结果有机地结合起来,对于结合水的测试具有一定的意义。

## 〔参考文献〕

- [1] 程涛,洪宝宁,程江涛.降低压实度标准的高液限土填筑方案[J].水利水电科技进展,2014,34(4):70-74.  
CHENG Tao, HONG Bao-ning, CHENG Jiang-tao. High liquid limit soil filling scheme for reducing the standard of compactness[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 70-74.
- [2] Min F, Peng C, Song S. Hydration layers on clay mineral surfaces in aqueous solutions: a review[J]. Archives of Mining Sciences, 2014, 59(2): 489-500.
- [3] 党发宁,刘海伟,王学武,等.基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1909-1917.  
DANG Fa-ning, LIU Hai-wei, WANG Xue-wu, et al. Empirical formulas of permeability of clay based on effective pore ratio[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1909-1917.
- [4] 张玉,陈铁林,王志芬,等.微观结合水“固化”黏性土渗流系数等效计算方法研究[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 1004-1010.  
ZHANG Yu, CHEN Tie-lin, WANG Zhi-fen, et al. Equivalent calculation method for seepage coefficient of clay based on micro-bound water “solidification” [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 1004-1010.
- [5] 王铁行,李彦龙,苏立君.黄土表面吸附结合水的类型和界限划分[J].岩土工程学报, 2014, 36(5): 942-948.  
WANG Tie-hang, LI Yan-long, Su Li-jun. Types and boundaries of bound water on loess particle surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 942-948.
- [6] 谢刚,邓明毅,张龙.黏土结合水的热分析定量研究方法[J].钻井液与完井液, 2013, 30(6): 1-4, 91.  
XIE Gang, DENG Ming-yi, ZHANG Long. Quantitative research method for thermal analysis of clay bonded water[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2013, 30(6): 1-4, 91.
- [7] Prost R, Koutit T, Benchara A. State and location of water adsorbed on clay minerals: consequences of the hydration and swelling-shrinkage phenomena [J]. Clays and Clay Minerals, 1998, 46(2): 117-131.
- [8] Li Y L, Wang T H, Su L J. Determination of bound water content of loess soils by isothermal adsorption and thermogravimetric analysis [J]. Soil Science, 2015, 180(3): 1.
- [9] 吴凤彩.黏性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J].岩土工程学报, 1984(6): 84-93.  
WU Feng-cai. Measurement of adsorbed bound water in clay soils and some characteristics of seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984 (6): 84-93.
- [10] 李文平,于双忠,王柏荣,等.煤矿区深部黏性土吸附结合水含量测定及其意义[J].水文地质工程地质, 1995, 22(3): 31-34.  
LI Wen-ping, YU Shuang-zhong, WANG Bo-rong, et al. The measuring of adsorbed bound water of the typical deep clay soil in coal mining area and its significance[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1995, 22(3): 31-34.
- [11] 李硕,王常明,吴谦,等.上海淤泥质黏土固结蠕变过程中结合水与微结构的变化[J].岩土力学, 2017, 38(10): 2809-2816.  
LI Shuo, WANG Chang-ming, WU Qian, et al. Variations of bound water and microstructure in consolidation-creep process of Shanghai mucky clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2809-2816.
- [12] 韩婷婷,吴思麟,吕一彦.泥浆中水分形态对抗剪强度与流变性的影响[J].长江科学院院报, 2018, 35(2): 104-108.  
HAN Ting-ting, WU Si-lin, LV Yi-yan. Influence of water form in mud on shear strength and rheology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 104-108.