

吸附结合水对高液限土固结特性的影响^{*}

李邦武¹, 吴梦丽², 刘闯^{2,3}, 张锐²

(1.海南省交通工程建设局, 海南 海口 570208; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 3.海南省交通运输厅, 海南 海口 570100)

摘要: 高液限土的固结特性一直是路基工程中关注的重点。为获得高液限土中吸附结合水含量, 研究结合水对高液限土固结特性的影响, 选取海南省万洋(万宁—洋浦)高速公路的高液限土开展试验研究, 以长沙黏土质砂等作为对比, 采用热重分析法测定试验土样的吸附结合水含量; 开展相同初始常规孔隙下一维饱和固结试验, 对土体的固结特性进行研究; 考虑吸附结合水特性, 对土体三相进行划分, 提出考虑吸附结合水的修正孔隙比计算方法, 并据此进一步修正土体的压缩指数计算方法。结果表明, 吸附结合水含量受土体比表面积影响, 细颗粒含量越高, 土体吸附结合水含量越高, 且与土体的塑限有较大相关性, 二者关系为 $w_g = 0.8496w_p$; 相较于常规土体压缩指数, 修正后的土体压缩指数与理论压缩指数更接近, 更能反映土体的真实固结特性。根据吸附结合水含量与塑限的关系预估万洋高速公路 9 标、11 标两路堤的沉降量, 获得了接近实际沉降量的结果; 建议考虑高液限土中吸附结合水含量对其固结特性进行研究。

关键词: 公路; 吸附结合水; 高液限土; 路基; 固结特性; 沉降

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0069-04

高液限土是中国南方地区常见的路基填料, 由于其细颗粒含量高、液塑限含水率高, 在气候湿润多雨地区很难通过翻晒达到规范要求的干密度, 其固结压缩特性一直是工程施工中关注的重点。含水率是土体固结的重要影响因素, 而吸附结合水是土中水的主要存在形式, 故有必要研究吸附结合水对高液限土固结特性的影响。

土体是一个三相体, 由土颗粒、孔隙气与孔隙水组成。受土体矿物成分的影响, 土颗粒表面一般带有负电荷, 这些负电荷会由结合水及晶层表面阳离子补偿, 形成双电层结构。由于土颗粒表面电场较强, 强结合水紧紧固定在土颗粒表层, 温度敏感性低, 脱附温度在 200 °C 以上, 在目前的工程应用中已被包含于干土质量中。随着与土颗粒表面距离的增加, 电场作用减弱, 形成弱结合水。相较于强结合水, 弱结合水对温度的敏感性大得多。已有土质和土力学研究成果表明, 靠近强结合水的部分弱结合水即吸附结合水在一定温度范围内也具有近似固体的性质。Germaine J. T. 等通过试验发现温度大于 50 °C 时, 结合水才有可能转化为自由水, 被压缩排出。Zhang C. 等对土中水进行研究, 发现结合水的密度为 1.15~1.872 g/cm³。张锐等对吸附结合水

的密度进行进一步研究, 确定其约为 1.3 g/cm³。饱和土体的固结过程主要是孔隙水的排出, 吸附结合水黏滞性大、密度大, 与自由水特性不同, 而以往固结研究中没有考虑与研究土中吸附结合水, 且已有工程实践发现在采用高液限土进行路基填筑后, 路基沉降量并不会出现理论计算的较大沉降量, 能满足安全要求。因此, 研究土中吸附结合水特性, 确定土中吸附结合水含量, 分析吸附结合水的存在对高液限土固结特性的影响, 对高液限土路基施工具有重要意义。该文依托海南省万洋(万宁—洋浦)高速公路工程, 选取湖南高液限土、湖北高液限土与长沙砂性土开展对比研究, 采用热重分析法测试土样的吸附结合水含量, 根据不同土体吸附结合水含量与基本物理性质指标进行相关性分析, 建立预估吸附结合水含量的方法, 并进行一维固结试验, 分析吸附结合水对土体固结特性的影响。

1 试验土样

选取海南省万洋高速公路 10 标高液限土(WY)、湖南株洲高液限土(ZZ)、湖北恩施低液限土(ES)、湖南长沙砂性土(CS)开展室内试验, 分析造成不同土体吸附结合水含量差异的原因。土样的基本物理特性

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51108049); 交通运输部公路工程行业标准制修订项目(JTG-201507)

见表1。由表1可知:WY、ZZ、ES均表现为界限含水率较高、细颗粒含量大、天然含水率高的特点;CS的界限含水率则较低,粗颗粒含量大。对试验土样根据

JTG E40—2007《公路土工试验规程》命名,WY为高液限粉土(ML),ZZ为高液限黏土(CH),ES为低液限黏土(ML),CS为黏土质砂(SC)。

表1 试验土样的基本物理性质

试验土样	颗粒组成/%			土体 比重	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	天然含水 率/%	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	定名
	黏粒 含量	粉粒 含量	砂粒 含量							
海南高液限土	32.00	38.50	29.50	2.73	57.20	31.3	25.90	36.1	40.78	MH
湖南高液限土	50.80	40.98	8.22	2.71	69.90	33.4	36.50	36.1	50.34	CH
湖北低液限土	25.77	40.01	34.22	2.75	31.01	19.2	12.32	24.7	24.47	ML
长沙砂性土	7.76	20.12	72.12	2.69	29.80	15.6	14.20	21.2	20.39	SC

比表面积可反映土体表面的吸附性能。由于氮气吸附时无法深入到土体晶层内部,乙二醇乙醚吸附法受土体组成成分的影响,采用亚甲基蓝吸附法测试土样的比表面积,测试结果见表1。土体的比表面积受细颗粒含量的影响,土体的细颗粒含量越高,比表面积越大。

2 吸附结合水含量测试与确定

目前关于吸附结合水含量的测试方法主要有等温吸附法、热重分析法、容量瓶法。其中:等温吸附法应用较多,但其试验条件要求严格,温度与湿度难以控制恒定;热重分析法容易获得准确的吸附结合水含量数据,但仪器昂贵,难以广泛应用于工程实践;容量瓶法原理较简单,但试验时间较长。这里选择热重分析法对试验土样吸附结合水含量进行测试,以建立一种适用于工程实践的高液限土吸附结合水含量预测方法。

2.1 吸附结合水含量测试

热重分析法通过热重分析仪自带的热天平实时记录试验土样的质量随温度升高的变化情况,绘制TG(温度—质量)曲线。TG曲线上的阶梯可反映试样质量在该段温度区间的变化,对应的温度即为阶梯温度,可作为试验样品随温度变化发生反应的定性依据。但由于TG曲线没有明显的分级阶段,对TG曲线进行微分获得DTG曲线,用来记录质量随温度失去的速度,确定最大反应速度,有效划分自由水与结合水。

采用STA 449 F5 Jupiter同步热分析仪进行试验,其天平称量可精确至 $0.1 \mu\text{g}$ 。试验土样为粉末状,试样的含水率略低于土样的液限含水率,放置于湿度为1%的环境中,保持温度为 20°C ,密封保存,每隔24h进行质量称量,直至试样质量不发生变化,保证土样达到吸附结合水饱和状态后进行测试。4种土样的热重分析结果见图1。

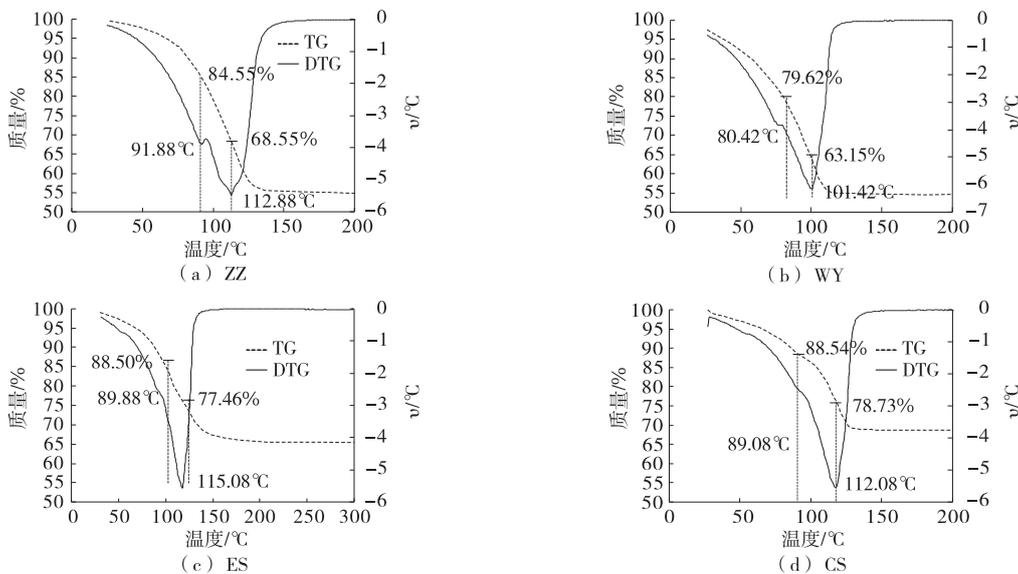


图1 试验土样热重分析结果

根据下式计算 4 种土样的吸附结合水含量:

$$\omega_g = \frac{M_T(\theta_F - \theta_B) - M_0}{M_0} \quad (1)$$

式中: ω_g 为土体的吸附结合水含量,以干土的质量百分比表示; M_T 为试样初始质量; θ_F 为自由水完全脱去温度时 TG 曲线对应的纵坐标; θ_B 为结合水完全脱去温度时 TG 曲线对应的纵坐标; M_0 为升温结束后土样稳定的质量。

从图 1 中 DTG 曲线可看出:土中自由水从 25 °C 开始脱附,脱附温度为 25~90 °C;吸附结合水的脱附温度为 100~115 °C,脱附温度相对较高,一般工程实践中难以达到。

按式(1)计算 4 种试验土样的吸附结合水含量,结合土体的基本物理特性指标,4 种土样的结合水含量随细粒含量的减少而减少,随比表面积的增大而增大。Jayadeva M. S.等的研究也表明土的固结压缩指数与颗粒比表面积有关。说明土体吸附结合水的能力受土颗粒粒径大小与比表面积的影响。

2.2 吸附结合水含量确定

由于目前没有统一的确定土体中吸附结合水含量的标准,为方便获得高液限土中吸附结合水含量,根据各土样的物理特性,建立吸附结合水与一般土性指标的关系,确定吸附结合水含量的预估方法。对已有土样及文献[11]中土样进行分析,发现吸附结合水含量与土体的塑限成正相关(见图 2)。

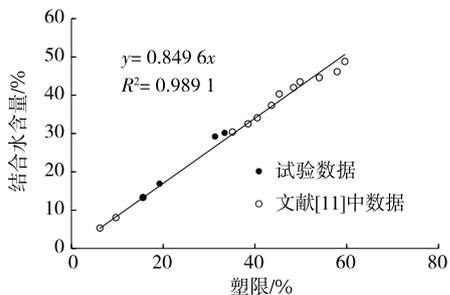


图 2 吸附结合水含量与塑限的相关性分析

从图 2 可看出:吸附结合水含量随土体塑限 ω_p 的增加而增加,成线性相关,约为塑限的 0.849 6 倍,相关系数为 0.989 1,相关性较高。在缺少试验条件时可按下式预估吸附结合水含量:

$$\omega_g = 0.849 6\omega_p \quad (2)$$

3 高液限土固结特性研究

3.1 饱和土体一维固结试验

对 4 种土样开展饱和一维固结试验,设定土样

的初始孔隙比为 0.81。将试样按塑限含水率配置后,置于阴暗处密封存储 24 h,之后置于真空饱和器中饱和 48 h,取出,安放到固结仪上,保持固结仪水平。固结仪的底座内装满水,水位高度始终没过试样,以减少试验过程中水分蒸发损失。进行饱和固结试验,按照 50 kPa→100 kPa→200 kPa→300 kPa→400 kPa 进行加载,每级荷载持续 24 h,记录土体在不同荷载下的压缩量。

3.2 固结试验结果与分析

压缩指数可表示土体的固结特性,对土体的工程应用有一定指导意义。对一维饱和固结试验数据进行整理,按式(3)进行计算,获得土体的常规固结压缩指数。

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \lg p} \quad (3)$$

式中: C_c 为土体的常规压缩指数; e 为土体的孔隙比; p 为上覆荷载。

不同于自由水,吸附结合水的黏滞性大,不易流动。Zhang Y.等将吸附结合水视为固体,作为黏土颗粒的一部分,通过将微观吸附结合水固化的等效原则将黏性土等效成粗粒土,并引入参数“等效孔隙比”,得出了黏性土渗流系数等效计算方法。据此,考虑将吸附结合水视为固相对土体的工程指标进行计算,土体的三相组成见图 3。但将吸附结合水归为固相的一部分后,土体的固相体积增大、液相体积变小,将直接影响土体的孔隙比计算,需对孔隙比进行修正。

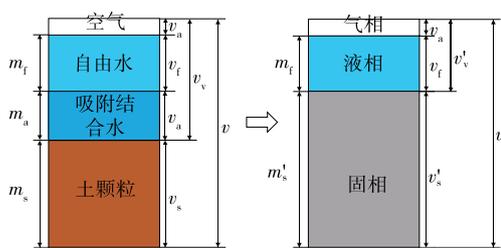


图 3 土体三相示意图

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{v}{v_s} - 1$$

$$v'_s = v_s(1 + \frac{G_s}{1.3}\omega_g)$$

式中: v 为土体总体积; v_s 为土中固相体积, v'_s 为修正后土中固相体积; G_s 为土体的比重;1.3为吸附结合水的密度值($g \cdot cm^{-3}$)。

修正孔隙比 e' 为:

$$e' = \frac{v}{v_s} - 1 = \frac{v_s(e+1)}{v_s} - 1$$

$$e' = \frac{e+1}{1+G_s/1.3w_g} - 1$$

进而获得修正压缩指数 C'_c 的计算公式:

$$C'_c = \frac{\Delta e'}{\Delta \lg p} = \frac{\Delta e}{(1+G_s/1.3w_g)\Delta \lg p} = \frac{C_c}{1+G_s/1.3w_g}$$

Jayadeva M. S. 等从微观入手对土体的压缩指数进行分析,推导出土体的压缩指数计算公式如下:

$$C_{ct} = \frac{G_s \gamma_w S \times 10^{-6}}{0.4367 \sqrt{(n/\epsilon T)^\nu}}$$

式中: C_{ct} 为土体的理论压缩指数; γ_w 为水的单位重量; S 为土壤颗粒的比表面积; n 为孔隙液离子的浓度; ϵ 为介电常数(78.54 F/m); ν 为阳离子的化合价; T 为开尔文常数(298 K)。

根据土样的基本物理特性,对固结试验数据进行整理,获得土体的常规压缩指数、修正压缩指数与理论压缩指数(见图4)。从图4可看出:常规压缩指数与理论压缩指数相差较大,而修正土体压缩指数与理论压缩指数较接近,说明未考虑吸附结合水时,土体的压缩指数高于理论压缩指数,即土体的压缩特性高于理论压缩特性;将吸附结合水考虑为固相的一部分后,修正压缩指数与土体的理论压缩指数接近,更能如实反映土体的固结特性,将吸附结合水考虑为固相的一部分可行。

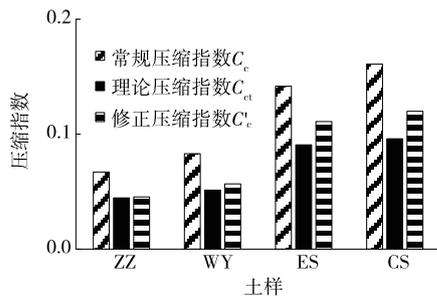


图4 压缩指数计算结果

4 工程应用

压缩指数是土体沉降计算的重要参数。根据吸附结合水与塑限的关系,对海南万洋高速公路9标、11标的两个路堤进行吸附结合水含量预估。两路堤均为全填路段,坡度1:1.5,高8m,填筑土料来自试验段相邻的挖方路段。路堤填筑施工前,在挖方路段地表以下2m处采集天然土样进行基本土

性试验,结果如下:9标路堤土体的比重为2.73,塑限含水率为34.2%,最大干密度为1.62 g/cm³,压缩系数为0.58;11标土体比重为2.70,塑限含水率为37.5%,最大干密度为1.47 g/cm³,压缩系数为0.58。根据预估的土体吸附结合水含量,采用分层总和法对路基沉降量进行预测,分别利用常规孔隙比与修正孔隙比进行计算。路堤施工时内部埋设沉降管,方便对比实时路基沉降量监测结果。路堤沉降量计算结果与实测结果见表2。

表2 路堤的沉降量 cm

路堤	常规计算 沉降量	修正计算 沉降量	实测沉 降量
9标路堤	13.2	9.6	8.4
11标路堤	12.1	10.4	9.5

从表2可看出:考虑吸附结合水含量后,沉降量计算结果与实测结果更接近;而常规沉降量计算结果高于实测结果,基于此进行设计,容易造成填料浪费。考虑吸附结合水含量对路基工程设计与施工具有一定参考意义。

5 结论

(1) 不同土体的吸附结合水含量不同,土体的细颗粒含量越高,比表面积越大,吸附结合水的能力越强,表面吸附结合水含量越高。

(2) 自由水的脱附温度为25~90℃;吸附结合水不同于自由水,其密度大,100~115℃才能脱附,在南方湿润气候地区进行路基施工时难以排出。

(3) 吸附结合水含量与土体的塑限成正相关,约为土体塑限的0.8496倍,工程实践中可根据土体的塑限预估其吸附结合水含量。

(4) 吸附结合水对土体的固结特性有一定影响,相较于常规压缩指数,考虑吸附结合水含量的压缩指数更接近土体的理论压缩指数。高液限土细粒含量高,吸附结合水含量高,工程施工设计时应考虑将其归为固相的一部分对土体固结指标进行修正。

参考文献:

- [1] TANG L S, CHEN H K, SONG J. Process of pore pressure diffusion in saturated clay soil and impact of adsorbed water[J]. Geosciences Journal, 2016, 20(5): 649-665.
- [2] WANG Y J, LU S, REN T S, et al. Bound water con-

(下转第75页)

量和吸水剖面,采用瞬时剖面法确定导水率。先通过吸力剖面按式(2)计算一定高度的水力坡降 i ,再利用含水量剖面按式(3)计算 Δt 时间内通过一定高度的水通量 Q ,最后按式(4)计算某一时刻某一高度的导水率 k 。图5为不同压实度土样的导水率。

$$i = \frac{dH}{dx} \quad (2)$$

式中: H 为从吸入剖面获得的液头; x 为从柱底部开始的高度。

$$Q = \frac{\int_{x_i}^L \theta_{t+\Delta t} dx - \int_{x_i}^L \theta_t dx}{\Delta t} \cdot A \quad (3)$$

式中: L 为柱的高度; A 为柱的横截面积。

$$k = -\frac{1}{A} \cdot \frac{Q}{(i_t + i_{t+\Delta t})/2} \quad (4)$$

式中: $i_t, i_{t+\Delta t}$ 分别为 t 和 $t+\Delta t$ 时的水力梯度。

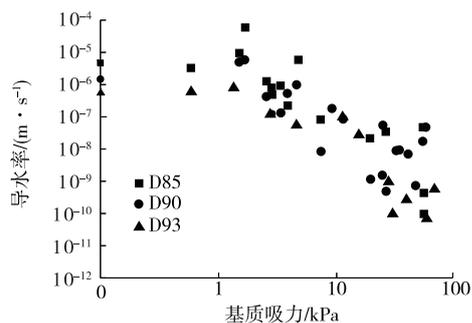


图5 不同压实度土样的导水率

从图5可以看出:D85土样的饱和电导率最高,

这主要是因为密实度较低的土样存在较多的大空隙,这些大空隙是水通过的主要通道。在非饱和和导水率方面,数据相互交织,差别不大,压实度的影响很小。

4 结论

考虑85%、90%和93%的压实度,采用大型渗透柱分析压实度对粗粒土水力性质的影响。结论如下:1)较高的压实度使SWCC曲线更平坦,这种现象与细颗粒的致密状态有关;2)压实度较低土体的饱和导水率较高,可能是因为压实度较低土体的空隙更大。压实度对非饱和电导率的影响不大。

参考文献:

- [1] 李小刚.影响土壤水分特征曲线的因素[J].甘肃农业大学学报,1994,29(3):273-278.
- [2] 徐绍辉,刘建立.土壤水力性质确定方法研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):394-401.
- [3] 余冬立,邵明安.成垄压实耕作条件下土壤水分分布的试验研究[J].水土保持学报,2007,21(5):110-113.
- [4] 王协群,邹维列,骆以道,等.压实度与级配对接基重塑黏土土-水特征曲线的影响[J].岩土力学,2011,32(增刊1):181-184.
- [5] 黄雪峰,孔洋,李旭东,等.压实黄土变形特性研究与应用[J].岩土力学学报,2014,35(增刊2):37-44.

收稿日期:2020-03-06

(上接第72页)

- tent of air-dry soils measured by thermal analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(2): 481-487.
- [3] MITCHELL J, SOGA K. Fundamentals of soil behaviour [M]. Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2005.
 - [4] 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.
 - [5] ZHANG C, LU N. What is the range of soil water density? Critical reviews with a unified model[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(3): 532-562.
 - [6] GERMAINE J T, WHITTLE A J, ZYMNIS D M. Measurement of temperature-dependent bound water in clays [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 42(6): 14-27.
 - [7] 张锐, 吴梦丽, 刘闯, 等. 结合水对高液限土固结压缩特

- 性的试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(4): 48-56.
- [8] 吴立坚, 钟发林, 吴昌兴, 等. 高液限土的路用特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 193-195.
 - [9] 吕海波, 钱立义, 常红帅, 等. 黏性土几种比表面积测试方法的比较[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 124-130.
 - [10] JAYADEVA M S, SRIDHARAN A. Double layer theory and compressibility of clays [J]. Géotechnique, 1982, 32(2): 133-144.
 - [11] 袁建滨. 黏中结合水特性及其测试方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
 - [12] ZHANG Y, CHEN T L, ZHANG Y J, et al. Calculation methods of seepage coefficient for clay based on the permeation mechanism [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 6034526.1-6034526.9.

收稿日期:2020-04-28