

贵州高含水率高液限黏土压实控制方法研究

徐淑亮

(中铁十四局集团第三工程有限公司,山东 济南 250300)

摘要:为了验证研究贵州湿润多雨地区高液限黏土路基压实控制方法,对贵州省凯羊(凯里至羊甲)高速公路高含水率高液限黏土开展湿法重型击实、CBR强度、土的基本物理性质、固结试验、热重分析试验及试验路段试验,并分析凯羊高速公路高液限黏土的路用性能。研究结果表明:高液限黏土并不是击实功越大越好,过大的击实功反而降低了其CBR强度;土体的压缩系数随含水率的增大而增大,但在高含水率状态下其压缩系数都能满足规范要求;贵州凯羊高速公路高液限黏土的干密度在压实过程中会出现峰值,达到峰值之后继续碾压压实度不升反降;该文从吸附结合水可归为高液限土中固相一部分的角度计算凯羊高速公路高液限黏土的压实度控制标准,其结果与凯羊高速公路建设中实际提出的压实控制标准一致,验证了压实度标准的实用性和合理性。

关键词:道路工程;高液限黏土;吸附结合水;压实度;路基

中图分类号:U416.1+2

文献标志码:A

0 引言

在中国南方湿热地区,有大量天然含水率远高于最佳含水率且在塑限附近的高含水率高液限土,该类土黏粒含量大,亲水性较强,工程性质较差。在南方湿热地区用高液限土作路基填料通常很难达到规范中压实度的要求,一般要进行改良或弃土换填^[1-2];若采用弃土换填,则会造成大量水土流失,破坏环境,若进行改良,则会大幅提高造价并延长工期。尽管作为特殊土其工程性质较差,但中国已有工程实践表明:在保证路基强度和压缩变形的要求下高液限土仍可用作路基填料^[3-4];《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)中指出对于特殊气候地区或特殊填料可适当降低压实度标准进行填筑,但是通过什么方法降低和降低幅度是多少均未明确^[5]。

南方地区各省都出现了降低压实度填筑高液限土的工程案例,广东、福建、贵州等地还有相应指导施工的高液限土地方标准^[6-7];湖南省某一代表高速公路也同样遇到了高液限土处治的问题,谈云志等^[8]对此展开室内外试验研究,结合施工概况,提出将其

93区压实度降低至90.5%可以保证工程质量;程涛等^[9]在广东罗云高速公路建设中参与了其高液限土的处治研究,最终将用作罗云高速公路路基93区填料的高液限土压实度降至88%;张锐等^[10-11]发现南方湿热地区高液限土中存在大量吸附结合水,并据此提出了考虑吸附结合水的压实度下限值计算公式。以上研究表明:不同地区的高液限土压实度控制标准有所差异,路基土压实的目的是排出土中的气相及液相,以防止路基沉降。已有土质和土力学研究成果表明:吸附结合水在一定温度范围内也具有近似固体的性质^[12-15]。因此,有待进一步研究吸附结合水对路基压实的影响机理。

贵州省凯里至羊甲(简称凯羊)高速公路于2011年开工建设,在项目建设过程中遇到了大量高液限土处治问题,最终通过室内外研究结果,提出了在南方湿润地区高液限黏土可直接用于路基93区的填筑方案,且压实度控制标准可降低至86%。为了探究高液限土降低压实标准的内在原因及机理,以凯羊高速公路为依托进行研究。通过现场取样,进行基本物理性质、微观试验、路用性能试验、固结试验、试验路段填筑试验、热失重法等试验研究,深入了解吸

收稿日期:2022-12-13(修改稿)

基金项目:海南省地方标准修订项目(编号:2021-Z043)

作者简介:徐淑亮,男,大学本科,高级工程师.E-mail:544220834@qq.com

附结合水对高液限土压实度的影响机理,验证贵州高含水率高液限土压实度标准和考虑吸附结合水影响的压实度计算公式的合理性。

1 凯羊高速公路高液限黏土物理性质

贵州省凯羊高速公路位于黔东南地区,该地区高液限黏土具有 4 大特点:①亲水能力强,天然含水率高;②较高的液塑限;③干密度极低;④在一定的条件下其强度较高。凯羊高速公路沿线的高液限黏土液限为 50%~80%,天然含水率为 26%~45%。其基本物理性质见表 1。

表 1 凯羊高速公路(取样桩号:K25+000)
高液限黏土的基本物理性质

天然含 水率/%	液限/ %	塑限/ %	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含 水率/%	细粒含 量/%	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
42.4	55.1	33	1.60	22.2	92.2	2.74

根据凯羊高速公路典型土样基本土性指标测试结果和《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020)中土的分类标准,土样为高液限黏土;凯羊高速公路高液限黏土天然含水率较高,为 42.4%,含水率高出最佳含水率 20.2%,属典型高含水率高液限土。细粒含量

较大,土样的黏粒含量大于 90%。且土中存在大量微孔隙,这些微孔隙给吸附水赋存提供了有利条件。可以推测,贵州凯羊高速公路高液限土持水性好且含有大量吸附结合水,这是其具有高含水率的内在原因。

2 凯羊高速公路高含水率高液限黏土的路用性能

2.1 R_{CBR} 及 CBR 膨胀量

在贵州湿润气候条件下,很难具备充足的翻晒条件,因此高液限黏土路基填筑时含水率普遍较高,而压实度较低。为了与现场压实状态相匹配,确保室内试验检测的加州承载比 R_{CBR} 值能完全覆盖现场压实范围,最终可以通过试验结果的曲线插值得到可靠的现场路基 R_{CBR} 值。为此开展室内试验,分析不同含水率和不同干密度下的 R_{CBR} 值,从天然含水率开始进行试验,每组含水率通过晾晒依次降低 4%~6%,每组含水率准备 3 个试样,分别采用轻、中、重型 3 个不同击实功制件,最终根据试验结果分析贵州凯羊高速公路高液限土的 R_{CBR} 值和膨胀量随含水率及干密度的变化规律,试验结果见表 2。

表 2 凯羊高速公路高液限黏土的 R_{CBR} 结果

含水率/ %	击实功(层 数×击数)	湿密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		压实度/ %	R_{CBR} 值/ %	膨胀率/ %
		泡水前	泡水后	泡水前	泡水后			
24.9	3×30	1.936	1.959	1.549	1.538	91.7	17.3	0.7
	3×50	1.962	1.977	1.570	1.560	92.9	14.8	0.6
	3×98	1.972	1.987	1.578	1.567	93.4	11.5	0.7
33.6	3×30	1.885	1.900	1.410	1.407	85.4	3.0	0.2
	3×50	1.900	1.912	1.422	1.418	86.1	2.8	0.2
	3×98	1.903	1.914	1.424	1.421	86.2	2.8	0.2
37.8	3×30	1.809	1.821	1.312	1.312	77.6	2.2	0.0
	3×50	1.802	1.812	1.307	1.307	77.3	2.2	0.0
	3×98	1.798	1.811	1.304	1.304	77.2	2.1	0.0
42.4	3×30	1.743	1.751	1.215	1.215	71.9	1.5	0.0
	3×50	1.746	1.752	1.217	1.217	72.0	1.3	0.0
	3×98	1.754	1.756	1.221	1.221	72.3	1.2	0.0

由表 2 可以看出:含水率越高,不同击实功对高液限土的压实度影响越小,在同一击实功下,土样的 CBR 膨胀率随制件含水率的降低而升高,说明高液

限土在含水率较低时,土颗粒表面吸附结合水未饱和,从而吸水导致水膜增厚而发生膨胀。凯羊高速公路典型高液限土在高含水率下,其 CBR 浸水试件

不发生膨胀,此时说明土中颗粒吸附的水基本处于饱和状态,基本不发生吸水膨胀,只有当制件含水率在24.9%的时候膨胀率为0.7%左右;泡水前后的干密度变化不大,说明凯羊高速公路高液限土在高含水率状态下吸附结合水基本饱和。对于凯羊高速公路土样当其含水率小于33.6%时 R_{CBR} 均大于3%,可以用于93区填筑;试验结果同样说明了对于高液限土不是击实功越大越好,当含水率为24.9%时采用30击制件,其 R_{CBR} 值可达到17.3%,强度较高,而在同一含水率98击下 R_{CBR} 值仅为11.5%。根据不同击实功的 R_{CBR} 值可以看出:凯羊高速公路高液限土并不是击实功越大越好,过高的击实功反而降低了其强度,因此现场碾压过程中需要注意压实遍数,避免超压从而降低路基强度。通过路用试验可以看出:在略微降低高液限土的天然含水率状态下采取合适的击实功,路基强度 R_{CBR} 值能够满足《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)要求。

2.2 压缩性

高液限土在高含水率低压实度下,工程中会担心填筑后的沉降较大。为此对土样湿法击实曲线中含水率大于最佳含水率的各点,采用98击重型击实成型后的击实试件,从试件中部用环刀削样法备样,开展非饱和固结试验测定压缩系数 a_{1-2} ,用来评价高含水率高液限黏土在高含水率状态下填筑后的压缩性,试验过程参照《公路土工试验规程》(JTGE40—2007),试验结果见图1。

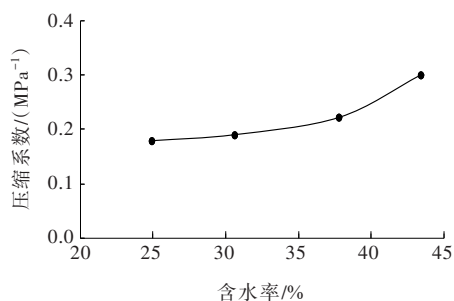


图1 凯羊高速公路高液限土非饱和固结试验结果

由图1可以看出:凯羊高速公路高液限土的压缩系数随含水率的增大而增大,最小为 0.18 MPa^{-1} ,最大为 0.3 MPa^{-1} ;但在偏高含水率状态下的压缩系数 a_{1-2} 均小于 0.5 MPa^{-1} ,这说明在偏湿状态下,现场碾压只要能达到其碾压含水率下的最大密度,就能满足《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)对填料压

缩系数小于 0.5 MPa^{-1} 的要求。凯羊高速公路高含水率高液限黏土在含水率高、干密度小的状态下压缩系数仍然较小,这是因为此时土中水大部分为在一般行车荷载作用下不会被排出的吸附结合水^[10]。

3 凯羊高速公路高含水率高液限黏土压实控制标准的理论验证

通过微观试验与宏观试验对结合水特性的研究,发现南方地区高液限土结合水含量较高,结合水与自由水特性有很大差异,其密度较大、黏滞性大、不易压缩与流动。且高液限土由于黏粒含量高、界限含水率高、天然含水率高的特点,结合水含量相对较高,在进行土体工程特性分析时,应当对其进行考虑。一是由于在中国南方湿热地区路基温度基本不超过 30°C ,且路基93区的温度长时间稳定在 25°C 左右^[16](容量瓶法测试吸附结合水含量控制温度)。结合水含量会随温度的升高而降低,结合气候条件,发现在 25°C 到最高温度 30°C ,吸附结合水最大变化量也不会超过1%^[17];二是除气候温度条件外,路基土体的平衡含水率也是影响土体吸附结合水含量的一项重要指标,路基平衡含水率是指不管初始填筑时含水率的高低,受水影响路基中的土体都会随时间增长含水率逐渐升至某一相对稳定状态,路基平衡含水率约为土样的塑限^[18-21],而通过一系列结合水测试试验结果可知高液限土中结合水的含量低于塑限值,因此将吸附结合水含量作为高液限土路基固相的一部分进行工程特性分析是可行的。

为此,文献[10]依据中国现行规范对土质路基压实度标准提出的“路堤采用特殊填料或处于特殊气候地区时,压实度标准根据试验路在保证路基强度要求的前提下可适当降低”这一条文开展研究;通过大量室内试验证明了高液限土中含有大量具有一定固体性质的吸附结合水,并论证了可以将其在压实度计算中视为高液限土中固相的一部分,最终基于现行规范对高速公路路基93区压实度的要求,提出了以吸附结合水含量和最佳含水率为参数的压实度控制下限值计算公式:

$$K_{\min} = 93\% \frac{1 + w_{\text{opt}}}{1 + w_g} \quad (1)$$

式中: w_{opt} 为最佳含水率; w_g 为吸附结合水含量; K_{\min}

为压实度控制下限值。

为了准确测定贵州凯羊高速公路高液限土吸附结合水的含量,采用 STA 449 F5 Jupiter 同步热分析仪,其天平称量的精确度可至 $0.1\ \mu\text{g}$ 。试验前将土样磨碎至粉末状,配置试样含水率略低于土样的液限,放置于湿度为 100% 的环境中,并保持温度为 $25\ ^\circ\text{C}$,密封保存,每隔 24 h 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。试验结果见图 2。

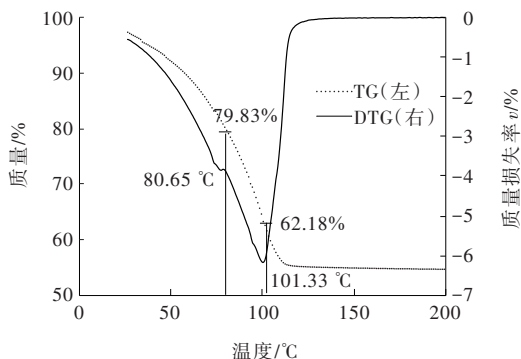


图 2 热重分析图

土样的 DTG 曲线峰值处表示土样的损失率最大,对应的温度为土样中不同类型的水的脱去温度。 $25\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 是土样质量损失率较大的阶段,土样的热重分析曲线出现明显的峰值。与吸附结合水相比,自由水脱去温度较低,脱去速率较小,在 $75\sim 90\ ^\circ\text{C}$ 之间会完全脱去。吸附结合水由于双电层作用,牢牢吸附在土颗粒表面,在 $100\sim 115\ ^\circ\text{C}$ 范围内可以完全脱去。且根据 TG 曲线可以看出:饱和土样中自由水与吸附结合水含量相差较小,即施工所用非饱和土体中吸附结合水的含量较高,最后根据式(2)计算贵州凯羊高速公路高液限土的吸附结合水含量为:

$$w_g = \frac{M_T(\theta_F - \theta_B) - M_0}{M_0} \quad (2)$$

式中: M_T 为试样初始质量; θ_F 为自由水完全脱去温度时 TG 曲线图对应的纵坐标; θ_B 为吸附结合水完全脱去温度时 TG 曲线图对应的纵坐标; M_0 为升温结束后试样稳定的质量。

按照上述公式,根据湿法击实结果可知最佳含水率为 22.2%;根据式(2)计算热重分析法试验结果可知其吸附结合水含量为 33.3%;最终根据式(1)计算出贵州凯羊高速公路高液限土路基压实控制标准为 85%,和凯羊高速公路建设中所提出的结果一致。

4 凯羊高速公路现场试验及压实控制标准的确定

高液限黏土除受其本身特殊的物理力学指标影响外,现场施工受到天气、晾晒条件、工期等因素的限制,因此高液限黏土填筑路基有其一定的适用条件和范围。本节主要从高液限黏土路用特性出发,依据工程应用,讨论贵州凯羊高速公路高含水率高液限黏土路基填料的路用特性、适用范围、施工工艺、压实标准与质量控制等。室外试验路段依据《公路路基路面现场测试规程》(JTJ E60—2019)展开试验,采用 22 t 光轮压路机,试验碾压速度控制为 $2.5\sim 3.5\ \text{km/h}$,试验结果如表 3 所示。试验段起止桩号为: K33+600~K33+800,每层松铺厚度为 35 cm,不具有翻晒条件。

表 3 凯羊高速公路高液限土试验路段测试结果

碾压工艺	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	压实度/ %	R_{CBR} 值/ %	累计下沉 量/mm
静压 1 遍+	1.488	31.0	88.0	5.8	7.2
振压 1 遍	1.442	34.4	85.3		
静压 1 遍+	1.509	31.2	89.3	11.6	12.8
振压 2 遍	1.515	33.5	89.6		
静压 1 遍+	1.475	31.7	87.3	5.8	12.7
振压 4 遍	1.454	34.2	86.0		

注:各碾压工艺包含两组平行数据,施工工艺均为先静压再振压。

通过室外试验结果可以看到:压实度在静压 1 遍+振压 2 遍之后干密度达到最大值;在压实度达到峰值之后继续碾压,在振压第 4 遍碾压之后压实度不升反降;结果表明贵州凯羊高速公路高液限土所需压实功较小,仅需碾压 3 遍就能达到峰值,这是由于高液限土含水率高,持水性好,土中颗粒大多都与土颗粒外的吸附水膜接触,润滑性好,因此只需较小压实功就能得到该含水率下最大干密度。试验路段结果和室内不同击实功击实试验结果一致。现场压实结果表明最大压实度为 89.5%,超压之后达到的压实度为 86.7%,均能满足项目方所提出的 85% 压实度标准;且各压实状态下的 R_{CBR} 均大于 3%,能满足《公路路基设计规范》(JTJ D30—2015)中对于 93 区填料 R_{CBR} 需大于 3% 的要求,所以凯羊高速公路所提出

的压实控制标准为86%是合理的。根据试验结果,凯羊高速公路高液限黏土的压实应在路基出现软弹前停止碾压。本文通过高液限土的压实控制标准结果的验证,进一步证明了将吸附结合水作为土中固相一部分的合理性和实用性;凯羊高速公路高液限土的路用性能试验、压缩试验和室外试验路段试验结果也都验证了标准的合理性。贵州凯羊高速公路通过降低压实度填筑高液限土路段已通车6年以上,至今运营良好。

5 结论

(1) 对于高液限黏土选择合适的击实功很重要,并不是击实功越大越好,同一含水率下过大的击实功反而降低了其CBR强度;且在一定的含水量状态下采取合适的击实功, R_{CBR} 值均大于3%,能够满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中对93区填料的要求。

(2) 贵州凯羊高速公路典型偏湿高液限土的压缩系数随含水率的减小而减小,在偏湿状态下的压缩系数 a_{1-2} 均小于 0.3 MPa^{-1} ;在偏湿状态下,现场碾压只要能达到其碾压含水率下的最大密度,都能满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)对填料压缩系数小于 0.5 MPa^{-1} 的要求。

(3) 高液限黏土的压实应在路基出现软弹前停止碾压,现场压实过程中会出现峰值,达到峰值之后继续碾压高液限土压实度不升反降。

(4) 本文采用热重分析法测试吸附结合水含量,选用文献[10]从结合水可归为高液限土中固相一部分的角度提出的适用于南方地区的高液限黏土压实度下限值计算公式,计算结果与凯羊高速公路建设中所提出的标准一致,验证了将高液限土中吸附结合水作为固相一部分及压实度下限值计算公式的实用性和合理性。

参考文献:

- [1] 戴范,刘枫,黄希望,等.一级公路高液限土水泥改良试验研究[J].中外公路,2020,40(1):240-242.
- [2] 曾胜.高液限土室内改良试验研究[J].中外公路,2007,27(3):208-210.
- [3] 吴立坚,钟发林,吴昌兴,等.高液限土路基填筑技术研究[J].中国公路学报,2003,16(1):32-35,39.
- [4] 杨世基.粘性土路基的压实和稳定性[J].中国公路学报,1989,2(3):1-10.
- [5] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [6] 贵州交通运输标准化技术委员会.贵州省红粘土和高液限土路基设计与施工技术规范:DB52/T 1041—2015[S].贵阳:贵州省质量技术监督局,2015.
- [7] 福建省高速公路建设总指挥部,交通运输部公路科学研究所,福建三明泉三高速公路有限公司,等.福建省高液限土路基设计与施工技术规范:DB35/T 1640—2017[S].福州:福建省质量技术监督局,2017.
- [8] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等.红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J].岩土力学,2010,31(3):851-855.
- [9] 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.
- [10] 张锐,肖宇鹏,刘闯,等.考虑吸附结合水影响的高液限土路基压实度控制标准[J].中国公路学报,2020,33(1):32-40,50.
- [11] 张锐,肖宇鹏,刘闯.海南高液限土结合水试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(1):10-16.
- [12] A.H.库里契茨基,著.土中结合水译文集[M].李生林,薄遵照,秦素娟,等,译.北京:地质出版社,1982.
- [13] MIN F F, PENG C L, SONG S X. Hydration layers on clay mineral surfaces in aqueous solutions: A review/warstwuwodnione Na powierzchni minerałów ilastych W roztworach wodnych: Przegląd[J]. Archives of Mining Sciences, 2014, 59(2): 489-500.
- [14] 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.
- [15] 张锐,申炯宁,杨相展,等.黏土结合水分类及测试方法研究综述[J].中外公路,2022,42(3):1-10.
- [16] 郑健龙,缪伟.膨胀土路基温度现场观测分析与研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2007,4(4):12-15.
- [17] 邵玉娴,施斌,刘春,等.黏性土水理性质温度效应研究[J].岩土工程学报,2011,33(10):1576-1582.
- [18] 郑健龙,张锐.公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J].中国公路学报,2015,28(3):1-10.
- [19] 李邦武,任天程,张锐.高液限土路基顶面回弹弯沉控制方法研究[J].中外公路,2021,41(5):17-21.
- [20] 张锐,龙明旭,刘昭京,等.膨胀土的二维膨胀各向异性试验研究[J].中国公路学报,2022,35(10):65-74.
- [21] 袁胜洋,刘先峰,潘高峰,等.压实膨胀土压实特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(S1):2913-2922.