

广连高速含砂低液限黏土路基压实控制标准研究

黄宇¹, 肖宇鹏²

(1.中交四航局第三工程有限公司, 广东 湛江 524000;2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为研究广东湿润多雨地区细粒土路基压实控制标准,对广东广连(广州—连州)高速公路典型天然含水率偏高含砂低液限黏土开展基本物理性质、重型湿法击实、浸水 CBR(加州承载比)和固结试验,利用容量瓶法测定土样的吸附结合水含量,分析吸附结合水对含砂低液限黏土击实特性、强度、水稳性和压缩性的影响。结果表明,吸附结合水含量与塑限成正相关关系;含砂低液限黏土中吸附结合水具有类似固体的性质,且在路基运营期始终稳定;初始含水率低于吸附结合水含量时,含砂低液限黏土 CBR 试件浸水后的膨胀量显著增强;吸附结合水对含砂低液限黏土在高含水率状态下保持一定 CBR 强度和低压缩性起到积极作用;压实度控制下限值与吸附结合水含量和最佳含水率相关。

关键词:公路;含砂低液限黏土;吸附结合水;压实度;路基;控制标准

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)05-0048-04

在中国南方地区公路工程建设中经常会遇到大量细粒土,其具有天然含水率高、细粒含量大、液塑限高、亲水性较强、水稳性差等特点。建设中主要存在 3 个问题:一是在南方地区湿润气候条件下很难通过翻晒将细粒土填料从天然含水率降至最佳含水率附近进行碾压使其达到压实控制标准,导致路基填筑工期大大延长;二是采用传统弃土换填技术会大量占地,造成严重水土流失;三是若采用掺灰或掺砂改良技术,会导致环境污染和造价数倍增加。杨世基分别采用干法和湿法制作同一含水率土样进行击实试验,发现 2 种制样方法的试验结果存在明显差异,表明实际合理的压实含水率应根据填土类型、需获得的工程性能及可操作性来选择。吴立坚等以确保路基强度与稳定为目标,通过已完工多个工程实例的总结,结合相关科研成果进行分析,认为高塑性土应选取稠度 1.0~1.3 的含水率作为填筑含水率,其压实度下限值为 87%。JTG D30-2015《公路路基设计规范》规定,对于南方湿润多雨地区的特殊土压实,可适当降低其压实度标准。已有工程实践也表明,在细粒土满足路基对填料强度和变形要求的前提下适当降低压实度控制标准,同样可确保路基的长期稳定。由于含水率是影响路基压实

的关键因素,吸附结合水又是细粒土中水的主要形式,研究结合水对细粒土路用性能的影响和压实机理,对于促进中国特殊土路基工程问题研究和绿色公路建设具有重要理论和实际意义。

1 广连高速公路细粒土的物理性质

广连高速公路 TJ02 标段(起止桩号为 K19+866.958—K48+090)长 28.223 km,工程投资 23.46 亿元。根据勘探结果,路段存在 80 多万 m³天然含水率偏高的细粒土填料,其中高液限土 26.4 万 m³,主要分布路段占全线的 10%。对较典型的细粒土从现场取样进行液限和塑限试验、土颗粒筛分试验等,分析其基本物理性质与组成,结果见表 1。

由表 1 可知:土样的液、塑限较高;细粒含量较大,两土样均大于 60%;粗粒组中的砂粒含量均大于砾粒含量,根据 JTG E40-2007《公路土工试验规程》,两土样均为含砂低液限黏土(CLS);土中大量细粒为其吸附结合水创造了有利条件,天然含水率较大且均大于 25%。两土样为典型的细粒土。

2 吸附结合水测试

已有研究表明:土中含有大量吸附结合水,吸附

表 1 广连高速公路细粒土的物理性质

土样编号	取样位置	细粒含量/%	砂粒含量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	天然含水率/%	天然稠度
GL-1	K40+680	60.25	39.75	44.2	27.2	17.0	25.3	1.11
GL-2	K39+950	61.42	38.58	47.1	31.1	16.0	27.1	1.25

结合水密度大,约为 1.3 g/cm^3 ,在一定条件下仍具有近似固体的性质,不传递静水压力,具有一定的黏滞性和抗剪强度,不能自行由一个土颗粒旁移到另一个土颗粒上,只有当压力大于 3 MPa 时,这部分结合水才能从土中排出。

文献[6]选取应用较广、试验简单、适合在工程中推广的容量瓶法和等温吸附法进行对比研究,发现容量瓶法测试吸附结合水的过程更符合工程中土样的实际情况,吸附结合水含量测试宜采用容量瓶法。

表 2 各土样的吸附结合水含量测定结果

试样编号	干土质量/g	相对密度	干土体积/ cm^3	水体积/ mL	最终液面 读数/ mL	蒸发量/ mL	总体积减 小量/ mL	吸附结合水含量 $w_g/\%$	
								试验值	平均值
GL-1-1	24.32	2.73	8.90	245.00	252.53	0.20	1.17	20.9	21.2
GL-1-2	24.90		9.12	245.00	252.68	0.20	1.23	21.3	
GL-2-1	23.80	2.71	8.78	245.00	252.32	0.20	1.26	22.6	22.6
GL-2-2	23.99		8.85	245.00	252.39	0.20	1.26	22.5	

由表 2 可知:各土样的吸附结合水试验结果虽然不同,但具有相似的规律,吸附结合水都是从形成较快再减慢最后趋于稳定。GL-1、GL-2 试样的吸附结合水含量均较高,分别为 21.2%、22.6%,均小于且接近于塑限,且 GL-1 的吸附结合水含量小于 GL-2,测量结果与文献[6-8]中黏土吸附结合水和塑限经验公式接近。

3 吸附结合水对含砂低液限黏土路用性能的影响

对试样展开重型湿法击实、湿法浸水 CBR 和非饱和固结试验,结合容量瓶法测试结果,分析吸附结合水对含砂低液限黏土击实特性、强度、水稳性和非饱和固结特性的影响。

参照 JTG E40-2007《公路土工试验规程》,按

参照文献[7]中容量瓶法试验步骤对土样进行吸附结合水含量测试。将土样在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干取出,待土样冷却后,取一定质量土样与一定体积 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的水,在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温下分别加入容量瓶中混合,使土颗粒完全分散并充分吸附结合水。吸附结合水的密度由吸附前的 1.0 g/cm^3 增至 1.3 g/cm^3 ,总体积减小,通过观测容量瓶中总体积的变化,并进行蒸发校正,根据文献[7]中公式计算得到标准温度下土样的吸附结合水含量(见表 2)。

照湿法制样进行重型标准击实试验,确定填料干湿法的最优含水率与最大干密度。用湿法击实成型后的试件浸水进行 CBR(加州承载比)试验,确定 CBR 值和 CBR 膨胀量。取至少 5 份天然含水率状态下的土样,用手拣除其中大于 40 mm 的粗石子,把土样铺开在室内干燥,每隔 1 h 翻拌 1 次,使其含水率比天然含水率依次降低 $2\%\sim 4\%$,对土样分别进行重型击实后测量湿法土样在相应含水率状态下的干密度,得到湿法击实曲线。按 CBR 试验要求将湿法土样在水中浸泡 4 d 后进行 CBR 试验,得到湿法土样的 CBR 值及 CBR 膨胀量(见图 1)。

由图 1 可知:1) 土中吸附结合水的含量远高于最佳含水率,GL-1、GL-2 的最佳含水率分别为 16.5% 和 17.5% ,均低于其天然含水率 10% 左右,在广东湿润地区很难使天然含水率降低至最佳含水率

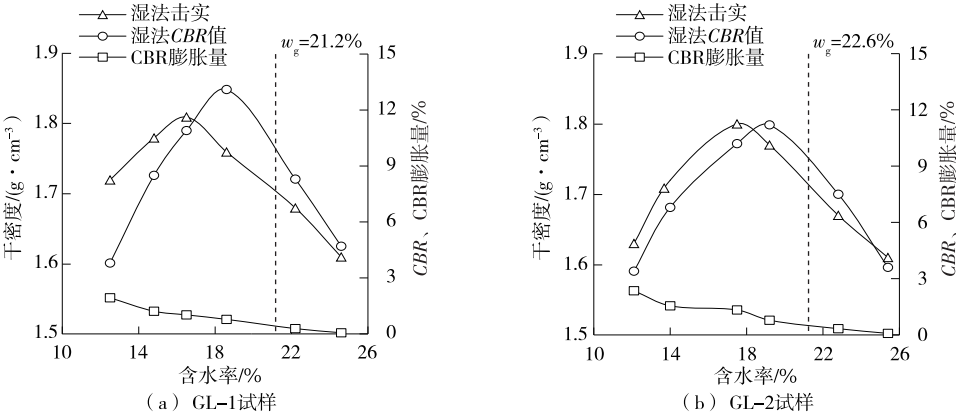


图 1 湿法击实及 CBR 试验结果

附近;随着初始含水率的降低,浸水后虽然黏粒结合水膜增厚,但粉粒和粗粒之间的刚性接触保证了土体整体强度, CBR 增大;随着初始含水率逐渐减小至吸附结合水含量附近,土中水多具有固体性质且具有一定抗剪强度,这种状态下含砂低液限黏土的 CBR 均在强度较理想的范围内。浸水 CBR 峰值的初始含水率也靠近吸附结合水含量,大于最佳含水率 2%~3%。2) 在同一击实功作用下,土样的 CBR 浸水膨胀量随制样含水率的增加而减小,说明偏湿状态下碾压的含砂低液限黏土路基的水稳定性更好。初始含水率低于吸附结合水含量时,试样浸水后的膨胀量显著增大;试件含水率低于吸附结合水含量时,土颗粒表面吸附结合水还未吸附饱和,土颗粒吸附结合水,使水膜增厚发生体积膨胀,随着结合水含量的降低,土颗粒吸附结合水的能力越强,能吸附的结合水含量也越多;试件含水率大于吸附含水率时,吸附结合水的含量基本达到饱和,试件基本不发生膨胀。

在广东湿润地区采用含砂低液限黏土填筑路基,通常压实含水率较高,压实度较低,路基工后沉降偏大。为评价含砂低液限黏土在高含水率状态下填筑的压缩性,对两土样湿法重型击实曲线的湿侧各点(含水率比最佳含水率高的各试验结果点位)开展非饱和固结试验,测定其压缩系数,结果见图 2。

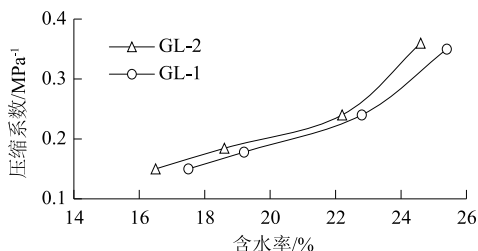


图 2 固结试验结果

固结过程是土体在应力状态改变时孔隙水排出、体积压缩,荷载引起的应力从孔隙水逐渐转移到土颗粒骨架上,直至变形达到稳定的过程。由图 2 可知:土体的压缩系数随含水率的增大而增大。含水率小于吸附结合水含量时,压缩系数随含水率增加较缓;含水率大于吸附结合水含量时,受力可变形和迁移的弱结合水增加,压缩系数随含水率增加而显著增大。但各含砂低液限黏土在高含水率状态下的压缩系数均小于 0.5 MPa^{-1} ,表明在天然含水率至最佳含水率之间的任何含水率下进行碾压,只要能达到该含水率下的最大密度,就能满足规范对填

料压缩系数的要求。尽管广连高速公路含砂低液限黏土在高含水率下干密度较小,但吸附结合水含量多,这一部分吸附结合水一般不会被压缩移动,故其压缩系数能满足规范要求。

4 湿润气候条件下含砂低液限黏土路基压实度控制标准

在南方气候条件下,路面以下路堤填料的温度一般为 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,文中吸附结合水含量标准测试温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据南方地区膨胀土路基不同土体位置长期温度监测结果,南方地区除表层土体在极少出现的极端气候时其温度能达到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 外,其余路基内部大多数时间的土体温度平均在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或以下。同一土样的吸附结合水含量会随温度升高而降低,故绝大多数时间路基中的吸附结合水含量大于文中试验结果,即使极端升至 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,吸附结合水含量的减少也不会超过 1%。因此,在湿润多雨的广东地区,路基内部大多数时间的土体温度平均在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或以下,上述容量瓶法测试结果基本符合路基实际情况且相对稳定。多个现场调查结果也表明,在南方气候条件下,细粒土路基含水率会从初始压实控制含水率逐年升至平衡含水率,约为塑限。

规范针对土质路基压实度标准,提出“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”。针对这一空白点,文献[12]对南方地区高液限土展开研究,根据吸附结合水具有近似固体的特性和在路基中长期稳定,将其视为土中固相一部分,基于规范对高速公路下路堤压实度的要求,提出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 K_{\min} 计算公式:

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

式中: w_{opt} 为土样的最佳含水率。

按照式(1),根据湿法击实和吸附结合水测试结果计算广东湿润地区含砂低液限黏土路基压实度控制标准,并对广连高速公路两土样就近开展试验路试验,试验结果见表3。根据现场检测结果,压实含

表 3 各土样的试验路段压实度检测结果

土样 编号	吸附结合 水含量/%	最佳含 水率/%	压实度下 限值/%	平均填筑 含水率/%	平均压实 度/%
GL-1	21.2	16.5	89.4	23.9	90.2
GL-2	22.6	17.5	89.1	25.2	89.9

水率略低于天然含水率 1.2%~2.4%,但大于最佳含水率 7%~8.4%,两试验路现场检测压实度基本上能达到文献[12]中方法确定的压实度下限值。

不论填筑含水率高低,含砂低液限黏土路基含水率会从初始压实控制含水率逐年升至平衡含水率,在南方湿润地区花大量时间翻晒含砂低液限黏土降低含水率进行填筑不仅耗时耗力且效果不好。由于平衡含水率大于吸附结合水含量,在含砂低液限黏土路基湿度平衡后的运营期直至设计使用年限末期,含砂低液限黏土中的吸附结合水含量都相对稳定,吸附结合水具有一定的强度又难以排出,湿润地区路基工程中吸附结合水可看作含砂低液限黏土中稳定的一部分。第3节的试验结果也说明试验初始含水率在吸附结合水含量附近时水稳定性好、CBR强度能满足规范要求。因此,广连高速公路含砂低液限黏土宜在偏湿条件下进行施工。按文中压实度标准填筑广连高速公路路基,既可充分利用天然含水率过高的含砂低液限黏土,又可保证含砂低液限黏土路基的施工效率。

5 结论

(1) 含砂低液限黏土中含有大量吸附结合水,且其含量略低于塑限。

(2) 广东广连高速公路典型含砂低液限黏土的 CBR 峰值含水率比最佳含水率高 2%~3%;其 CBR 膨胀量均随初始含水率的降低而增大,初始含水率低于吸附结合水含量时试样浸水后的膨胀量显著增大;初始含水率在吸附结合水含量附近时 CBR 强度较好,且水稳性好;其压缩性较好,在高含水率状态下也能满足规范对填料压缩性的要求。

(3) 在南方湿润地区,含砂低液限黏土宜在偏湿条件下施工,可采用文献[12]中适用于南方湿润地区的含砂低液限黏土压实度控制标准。吸附结合

水含量越大大于最佳含水率,含砂低液限黏土路基压实度控制的下限值越低。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨世基.黏性土路基的压实和稳定性[J].中国公路学报,1989,12(3):1-10.
- [3] 吴立坚,陈礼彪,张燕清,等.高塑性土路基压实与压实标准[J].公路,2007(3):33-35.
- [4] 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.
- [5] 吴立坚,郑甲佳,邓捷.高液限土路基的沉降变形规律[J].岩土力学,2013,34(增刊2):351-355.
- [6] 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.
- [7] 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(6):84-93.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 邵玉娟,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.
- [11] 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.
- [12] 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.

收稿日期:2020-01-20

(上接第47页)

- 改扩建新老地基土工程特性评价研究[J].岩土工程学报,2019,41(增刊2):81-84.
- [3] 杨慧,胡隼.布袋灌注桩技术在软土路基处理工程中的应用研究[J].公路工程,2019,44(4):202-207+231.
 - [4] 董建松,欧阳彦,陈正斌.湿喷桩加固技术在软土地基控制桩基成孔施工中的应用[J].公路,2019(5):118-120.
 - [5] 洪景春.粉喷桩处理软基施工技术研究[J].工程技术研

究,2019,4(8):68-69+137.

- [6] 谢腾骁.粉喷桩施工技术在软土路基中的应用研究[J].施工技术,2017,46(增刊1):242-246.
- [7] 杜毅.碎石桩处理软土路基变形影响因素分析[J].公路工程,2019,44(4):213-216+290.
- [8] 袁玉卿,刘文利,张得嵩.碎石桩控制粉砂土拼接路基沉降的数值模拟[J].公路,2017(10):57-61.

收稿日期:2019-12-13