

不同干湿状态下高液限土变形特性对比试验研究

秦灵伟¹,张锐^{1,2*},李露¹,肖宇鹏¹

(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研究中心,湖南 长沙 410114)

摘要:为进一步揭示类固相结合水对高液限土变形特性影响的内在机制,通过干湿两侧对比研究,分析不同结合水含量对土样变形影响的差异性。取相同干密度下不同含水率的4种高液限土,并以一种低液限土为对比样开展变形试验研究。利用容量瓶法对各试验土样中吸附结合水的含量进行了测试,通过SEM和XRD试验从土样的微观层面进行分析,对各土样开展了击实试验,在击实曲线上选取相同压实度、不同含水率的点作为初始控制目标进行压缩试验,从而对比研究高液限土击实曲线干湿两侧的变形特性。

关键词:道路工程;高液限土;压实度;吸附结合水;压缩试验;孔隙比

中图分类号:U414

文献标志码:A

Comparative Experimental Study on Deformation Characteristics of High Liquid Limit Soil under Different Dry and Wet States

QIN Lingwei¹,ZHANG Rui^{1,2*},LI Lu¹,XIAO Yupeng¹

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2.National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to further reveal the internal mechanism of the influence of solid-like bound water on the deformation characteristics of high liquid limit soil, the difference in the influence of different bound water contents on the deformation of soil samples was analyzed through the comparison of dry and wet sides. Four types of high liquid limit soil with different water contents at the same dry density were used, and a low liquid limit soil was used as a comparison sample to carry out a deformation test. The volumetric flask method was used to test the content of adsorbed bound water in each test soil sample. SEM and XRD tests were carried out from the micro level of the soil sample, and compaction tests were conducted on each soil sample. The points with the same compaction degree and different water contents were selected on the compaction curve as the initial control targets for compression tests, so as to compare the deformation characteristics of the dry and wet sides of the compaction curve of high liquid limit soil.

Keywords: road engineering; high liquid limit soil; compaction degree; adsorption of bound water; compression test; void ratio

0 引言

高液限土是一种液限大于50%的细粒土,主要分布在中国南方地区,天然含水率较高,可塑性强,

在工程中属于特殊土。用作路堤填料时,需要数天翻晒,降低含水率后,再进行碾压,才能达到常规压实控制标准。随着中国公路建设的发展和工程经验积累,发现可以适当降低压实度,将高含水率的高液

收稿日期:2023-07-27

基金资助:国家自然科学基金资助项目(编号:52278432);海南省地方标准制修订项目(编号:2021-Z043)

作者简介:秦灵伟,男,硕士研究生.E-mail:qinlingwei@stu.csust.edu.cn

*通信作者:张锐,男,博士,教授.E-mail:zr@csust.edu.cn

限土直接用作下路堤填料^[1-4]。在湿润的南方选择高液限土进行填筑时,高液限土的含水率都高于最佳含水率,属于击实曲线中湿侧方。在实际工程中,往往会在高液限土处于高含水率,在低压实度的条件下进行路基填筑,且施工后路基稳定性良好,均能较好地满足路基设计要求。针对上述情况,已有研究从土中结合水的角度进行了解释。研究表明:高液限土中有较高含量的吸附结合水,吸附结合水有类似固相的性质,可以起到土骨架作用^[1]。然而,目前对于压实曲线干湿两侧变形差异性及其内在的根本原因,尚未能充分揭示。因此,需要更多证据进一步证实高含水率条件下吸附结合水对压实施工后土体变形的具体影响。

国内外学者已经对干湿两侧的土样变形特性开展了许多对比研究。穆青翼等^[5]通过研究相同干密度不同含水率的原状土和压实土样,发现湿侧的结构性显著强于干侧;Qiao等^[6]采用自行设计的压实模具制备了不同干密度和含水率的压实样,并进行三点弯曲试验,结果表明湿侧压实样的断裂韧性低于干侧;Du等^[7]用分子动力学模拟方法模拟膨胀土在不同含水量和干密度下的微观结构力学行为,发现湿侧的体积模量大于干侧;王志兵等^[8]选取击实曲线上3个不同含水率对应的压实样(最佳含水率及干侧、湿侧,后两者对应的干密度相同)进行了直剪试验,试验结果表明:干湿两侧抗剪强度相近,湿侧黏聚力大于干侧;吴立坚等^[9]通过对高液限土开展室内固结试验,结果表明高液限土可以在高含水率、高孔隙比、低干密度下保持较好的抗压缩性能;Limac等^[10]分析了4种不同的热带细粒土路面结构的力学响应,发现湿侧产生的永久变形大于干侧;樊科伟等^[11]通过对具有不同初始含水率的环刀试样开展不同干湿和冻融循环组合的系列试验研究,显示处于最优含水率干侧的土样经历相同组合循环后,相较于湿侧的体积变化量相对较小,这是因为膨胀土中膨胀性矿物水化不充分;王协群等^[12]分析了含水量对路堤的强度、稳定性和密实度等工程特性的影响,发现相同干密度下最优含水率湿侧的渗透性要低于干侧;李晓敏等^[13]通过配置相同干密度下击实曲线干侧和击实曲线湿侧的土样,对压实土进行变形特性影响试验研究,发现干侧的屈服应力小于湿侧;何平等^[14]通过建立压缩指数和回弹指数的经验关系,发现高

液限土的压缩系数会随着含水率的降低而减小,这是因为高液限土在自然情况下含水率较高,都高于最佳含水率,含水率降低,干密度会增大,提高了土体的抗压缩变形性能。以上研究表明干湿两侧的土样在不同的性能方面各有优异。从非饱和土理论进行分析,在相同干密度,不同含水率条件下,结合击实曲线和土水特征曲线,干侧基质吸力大于湿侧,土体的抗压缩性能和强度较湿侧更好,但实际研究结果表明并非如此,非饱和土理论不能对高液限土干湿两侧变形特性的差异进行很好的解释。已有学者^[15-20]通过考虑土中结合水对高液限土变形的影响,发现高液限土中有较高含量类似固相的吸附结合水,吸附结合水的存在使得高液限土在高含水率、高孔隙比下仍可以有好的抗压缩变形性能。以往对高液限土的研究,虽然也对干侧、湿侧进行了对比研究,以及对干湿两侧变形特性进行了分析,但是相关研究还未对击实曲线干湿两侧变形差异性以及内在的根本原因进行很好的揭示。

本文通过干湿两侧对比研究,分析结合水含量的不同对土样变形所产生的差异性,进一步揭示类固相结合水对高液限土变形特性影响的内在机制。取相同干密度下不同含水率的4种高液限土,并以一种低液限土为对比样开展变形试验研究。利用容量瓶法对各试验土样中吸附结合水的含量进行测试,通过SEM和XRD试验从土样的微观层面进行分析,对各土样开展了击实试验,在击实曲线上选取相同压实度、不同含水率的点作为初始控制目标进行压缩试验,从而对比研究高液限土击实曲线干湿两侧的变形特性。研究成果可为高液限土作为合理填料利用提供科学依据。

1 试验土样

试验从海南省万洋高速公路、海南省海屯高速公路和海南省文临公路采集了4个高液限土样,在湖南省长沙理工大学校园内采集了1个低液限对比土样。按照《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020)进行试验,土样基本物理性质指标测试结果见表1。结果表明:根据规范中的分类标准,海南文昌土WC、海南屯昌土TC、海南白马井土BM为高液限黏土;海南临高土LG为含砂高液限黏土;长沙理工大学校园土CS为黏土质砂。

表 1 试验土样基本物理性质指标测试结果

Table 1 Test results of basic physical property indicators of experimental soil samples

取样地点	土样 编号	颗粒组成/%			天然含水 率/%	相对 密度	液限 w_L /%	塑限 w_P /%	定名
		黏粒	粉粒	粗粒					
海南文昌	WC	37.80	39.40	22.80	36.7	2.74	74.5	34.6	CH
海南屯昌	TC	42.64	24.11	33.25	33.5	2.74	56.3	32.4	CH
海南白马井	BM	48.25	34.41	17.34	34.6	2.74	74.2	33.8	CH
海南临高	LG	36.13	35.61	28.26	28.6	2.73	55.7	26.8	CHS
长沙理工大学校园	CS	7.20	20.34	72.46	22.7	2.69	29.1	15.2	SC

2 试验方案

通过考虑土中吸附结合水的含量不同,对土样开展容量瓶法试验,测试各土样的吸附结合水含量。通过 SEM 和 XRD 试验,从微观层面观察土样。再开展击实试验,确定压实度和含水率的关系。最后在击实曲线上,选取最优含水率两侧相同压实度的点作为初始控制目标,开展压缩试验,对比研究高液限土击实曲线干湿两侧的变形特性。

2.1 容量瓶法试验方案

通过测试土样的吸附结合水含量,以便后续结合吸附结合水的含量,将常规孔隙比换算成有效孔隙比,分析土样的变形特性。用容量瓶法^[1]对 4 个高液限土样和 1 个低液限土样的吸附结合水含量进行测试。为保证试验的准确性,增加一组土样进行平行试验。

2.2 SEM 和 XRD 试验方案

土体的微观结构和物质组成成分是影响其物理性能的关键因素,通过开展 SEM 和 XRD 试验对各土样进行微观层面的研究,分析各土样吸附结合水含量的差异。

2.3 击实试验方案

击实试验的方法选择湿土法击实,实际施工过程中和湿土法击实的过程非常接近,湿土法相较于干土法最大干密度更小,最佳含水率更高,因此对于高液限土这类天然含水率高的土宜选湿土法。对 4 个高液限土和 1 个低液限土每种土采集 6 个土样,每个土样质量 3 kg 左右,从天然含水率分别晾干至所需的含水率,然后开展重型湿法击实试验。

2.4 压缩试验方案

根据《公路高液限土路基设计与施工技术规范》(DB43/T 2280—2021)中规定高液限土用作路堤填料时压实度不小于 88%,选取高液限土击实曲线上

压实度为 88% 的干湿两侧的点作为初始控制目标。对 4 种高液限土分别配制 88% 压实度下高低两种含水率的土,对低液限土则以压实度下限值 93% 下两侧含水率为控制目标进行配土。放入环刀中静压制样,试验所用环刀高 2 cm,体积 60 cm³,将制好的环刀样放入固结仪中开展压缩试验,按照 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 的顺序逐级加载。每级压缩时间为 24 h,压缩平衡稳定的标准为最后 1 h 变形量小于 0.01 mm。

为了更进一步对比干湿两侧的变形特性,在击实曲线上选取更低的压实度作为控制目标,所选干侧含水率会更低,湿侧含水率会更高。统一将压实度控制值下降 3%,4 种高液限土以 85% 压实度下干湿两侧的点为初始控制目标,低液限土以 90% 压实度下干湿两侧的点作为初始控制目标,试验过程与上述方法相同。

3 试验结果及分析

3.1 容量瓶法试验结果

各土样吸附结合水含量测试结果如表 2 所示。

表 2 土样的吸附结合水含量

Table 2 Adsorbed bound water content of soil samples

土样编号	吸附结合水含量 w_g /%	平均值/%
WC-1	30.3	30.5
WC-2	30.7	
TC-1	27.1	27.2
TC-2	27.3	
BM-1	28.3	28.4
BM-2	28.5	
LG-1	22.6	22.5
LG-2	22.4	
CS-1	13.0	13.3
CS-2	13.6	

从表2可以明显看出:高液限土的吸附结合水含量远多于低液限土,高液限黏土又较高于含砂高液限黏土。这是因为土体中黏土矿物和细粒含量越高,可以同晶置换的阳离子越多,土颗粒与水所接触的表面积也就越大,基于扩散双电层效应,吸附结合水含量也就越高。后续的试验会通过结合吸附结合水的含量对不同土样干湿两侧的变形特性进行分析。

3.2 SEM和XRD试验结果

SEM结果如图1所示。可以看出各高液限土内部呈叠片状分布,各层叠片之间有许多微小孔隙,低液限土内部则大多为松散颗粒。高液限土内部微小孔隙的存在为吸附结合水的储存提供有利的条件。

各土样XRD射线衍射图如图2所示。表3为XRD测试后各土样的矿物组成。

从图2可以看出:结果与SEM图接近,各高液限土中黏土矿物含量高,而低液限土中石英含量最高,黏土矿物较少。从以上微观结构测试结果可知:黏土矿物含量的差异是造成高液限土与低液限土中吸附结合水含量不同的主要原因。

3.3 击实试验结果

5个土样在进行湿法重型击实试验后的干密度

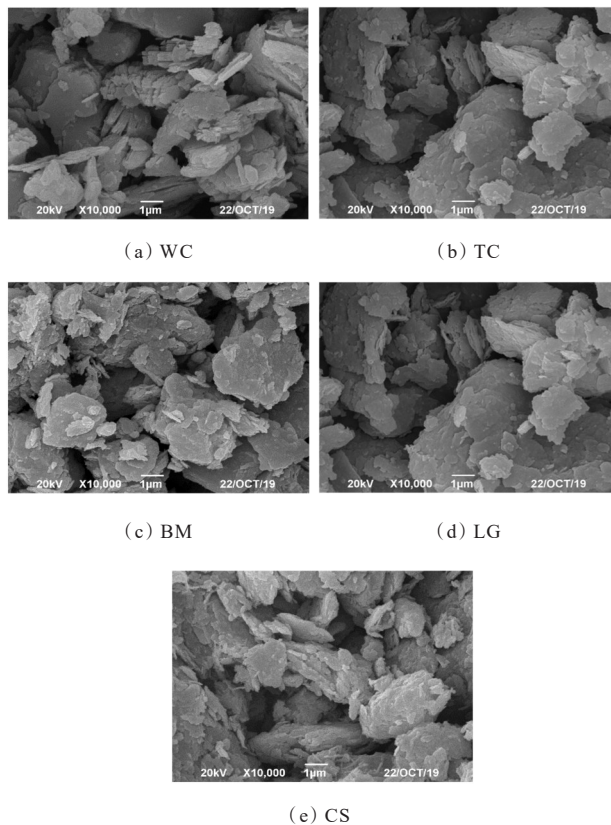


图1 各土样SEM图

Figure 1 SEM images of various soil samples

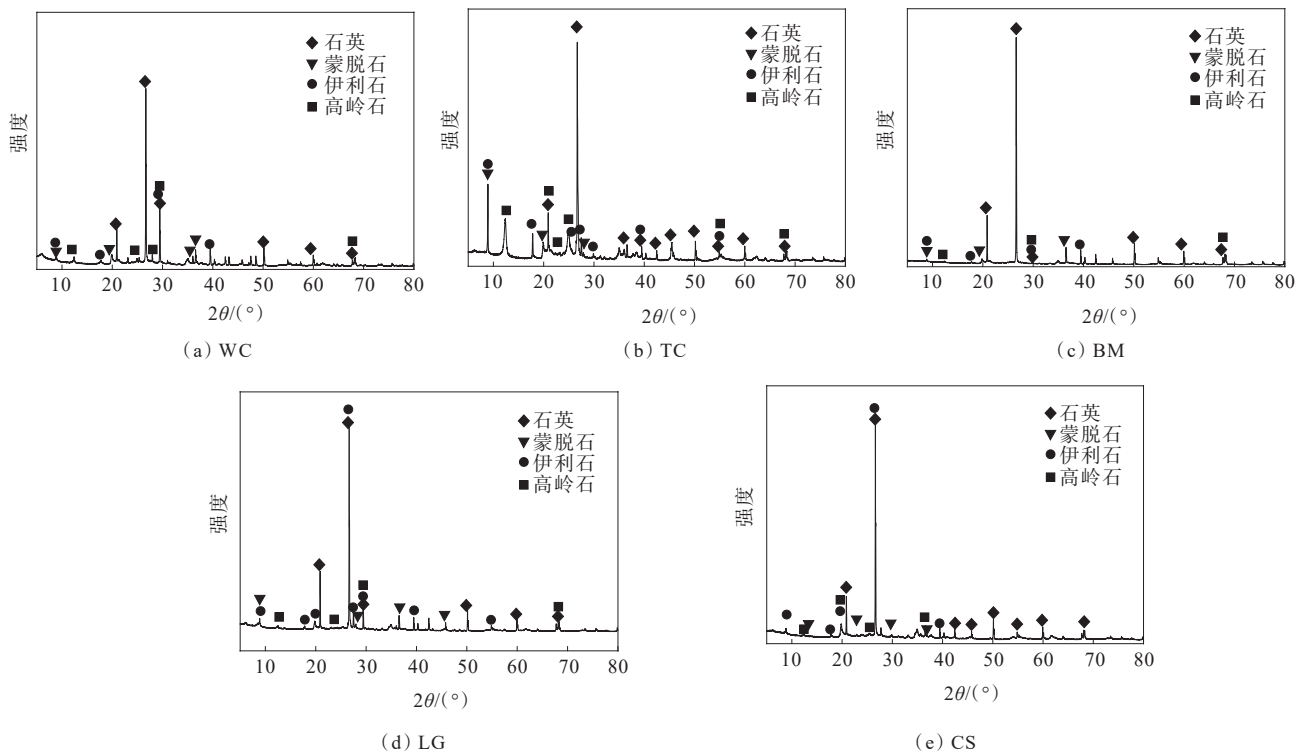


图2 各土样XRD射线衍射图

Figure 2 XRD patterns of various soil samples

表3 土样矿物组成

Table 3 Mineral composition of soil samples

土样编号	矿物组成/%			
	石英	蒙脱石	伊利石	高岭石
WC	69.2	1.1	11.6	18.1
TC	39.2	0.7	33.0	27.1
BM	47.2	0.6	30.3	21.9
LG	74.1	1.2	15.2	9.5
CS	90.4	0.5	5.3	3.8

随含水率变化曲线如图3所示。

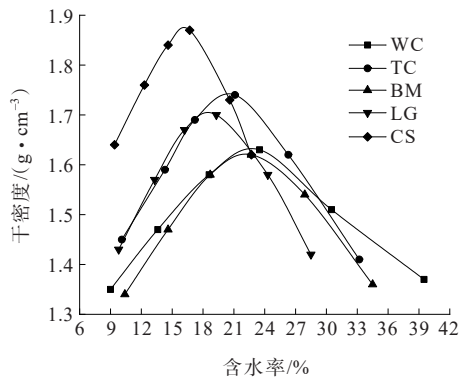


图3 湿法击实试验结果

Figure 3 Wet compaction test results

由图3可知:高液限土和低液限土相比,高液限土的最佳含水率更高,最大干密度更小;高液限土含有较多难以流失的吸附结合水,低液限土中吸附结合水含量远小于高液限土。这是因为吸附结合水有类似固相的性质,可以充当土骨架的作用,而吸附结合水的密度比土颗粒要小,所以高液限土的最佳含水率比低液限土高,最大干密度比低液限土低。

3.4 压缩试验结果

根据击实试验结果所确定的干密度与含水率的变化曲线,从中选取高液限土88%、85%压实度,低液限土93%、90%压实度下两侧含水率的点作为初始控制目标,计算对应的孔隙比,同时考虑吸附结合水的影响,将土样中的吸附结合水看作固相的一部分,将常规初始孔隙比换算成有效初始孔隙比,初始有效孔隙比按式(1)进行计算^[21],计算结果如表4所示。

$$e'_0 = \frac{e_0 + 1}{1 + \frac{G_s}{\rho_g} w_g} - 1 \quad (1)$$

式中: e'_0 为初始有效孔隙比, e_0 为初始孔隙比, w_g 为吸附结合水含量; ρ_g 为结合水密度(取土样结合水平均密度 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ ^[15]); G_s 为土粒比重。

表4 相应压实度下两侧含水率及孔隙比

Table 4 Water content and void ratio on both sides under corresponding compaction degree

土样编号	压实度/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/%		常规初始 孔隙比 e_0	有效初始 孔隙比 e'_0	
			干侧	湿侧		干侧	湿侧
WC	88	1.43	12	35	0.92	0.53	0.17
	85	1.39	10	37	0.97	0.63	0.20
TC	88	1.53	13	29	0.79	0.41	0.14
	85	1.48	11	31	0.85	0.50	0.18
BM	88	1.43	14	32	0.92	0.48	0.20
	85	1.38	12	34	0.99	0.59	0.24
LG	88	1.50	12	26	0.82	0.45	0.24
	85	1.45	10	28	0.88	0.55	0.28
CS	93	1.74	12	20	0.55	0.24	0.22
	90	1.68	10	22	0.59	0.32	0.25

土样压缩过程中,主要发生的是孔隙的压缩,从土的压缩量可以直观地看出土样的压缩变形特性,高液限土88%、低液限土93%压实度下的压缩量如图4所示。图中:干WC88指土样编号为WC,干侧压实度为88%,其余编号含义类似(后文同)。从图4可以看出:在相同压实度下高液限土干湿两侧的压缩量相差很多,干侧的压缩量远大于湿侧,低液限土干湿两侧的压缩量则非常接近。

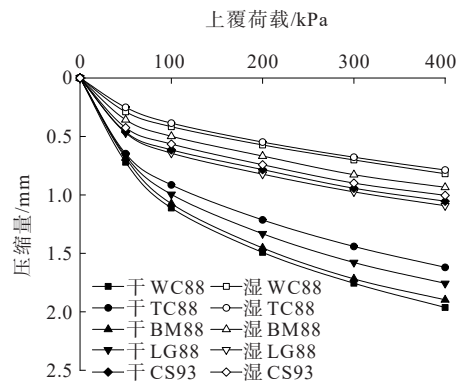


图4 高液限土88%、低液限土93%压实度下两侧压缩量

Figure 4 Compression on both sides with 88% compaction for high liquid limit soil and 93% compaction for low liquid limit soil

由于相同压实度下高液限土干湿两侧含水率相差较大,在相同干密度条件下,湿侧中吸附结合水含量更高,吸附结合水起到了土骨架作用,减小了土样的压缩量,低液限土中吸附结合水含量很低,干湿两侧含水率也相差较小,相同压实度下不同含水率对

低液限土的变形影响不大。

当压实度降低,压缩量如图5所示。干湿两侧的含水率差距进一步增大后,因为干密度减小,各土样压缩量都增长了。

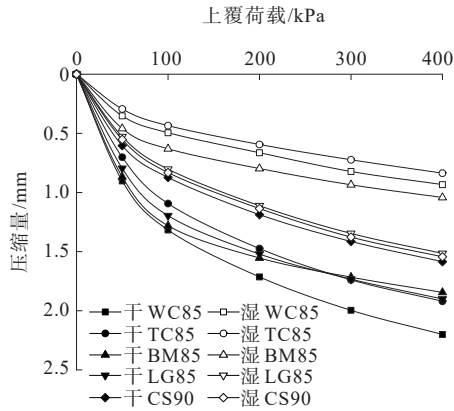


图5 高液限土85%、低液限土90%压实度下两侧压缩量
Figure 5 Compression on both sides with 85% compaction for high liquid limit soil and 90% compaction for low liquid limit soil

低液限土的压缩量随压实度的降低增长最多,高液限土的湿侧方随着压实度的降低变化很小,高液限土的湿侧方在压实度降低后,仍能维持较高的抗压缩性能,低液限土干湿两侧均因压实度降低导致抗压缩性能大幅减小。压缩模量和压缩系数可以有效反映土体的压缩特性,对高液限土88%、低液限土93%压实度下的压缩模量和压缩系数进行分析,结果如表5所示。

表5 两侧土样的压缩模量和压缩系数
Table 5 Compression modulus and compression coefficient of soil samples on both sides

土样编号	压缩模量/MPa		压缩系数/(MPa ⁻¹)	
	干侧	湿侧	干侧	湿侧
WC	9.66	16.95	0.20	0.11
TC	11.17	18.35	0.16	0.10
BM	11.11	18.52	0.17	0.10
LG	11.17	22.47	0.16	0.08
CS	18.02	19.05	0.09	0.08

由表5可知:高液限土干湿两侧的压缩模量和压缩系数相差较大,低液限土则相近,高液限土湿侧抗压缩性能均优于干侧。

孔隙比表示土样的密实程度,孔隙比越大,土样越松散,反之,则越密实。以常规孔隙比对高液限土的变形特性进行分析时,不考虑吸附结合水的影响,难以解释高液限土的孔隙比要比低液限土大很多,

但与低液限土的抗压缩性能相近,甚至更好的现象。因为高液限土在压实度相同时,湿侧的吸附结合水含量远大于干侧,所以将吸附结合水看作固相的一部分后,高液限土湿侧方的有效孔隙比要远小于常规孔隙比,相同压实度下高液限土湿侧的有效孔隙比也要远小于干侧,低液限土则差距较小。因此,所有土样的压缩变形规律基本符合有效孔隙比的规律,有效孔隙比越小,土样的压缩量越小。

以吸附结合水含量相差较大的WC和CS土样进行分析,其常规孔隙比的变化随上覆荷载的变化如图6所示。

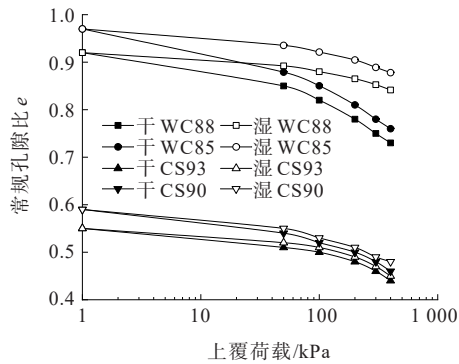


图6 WC、CS常规孔隙比压缩曲线
Figure 6 Compression curves of WC and CS conventional void ratios

从图6可以看出:WC干湿两侧在常规初始孔隙比相同的情况下,干侧常规孔隙比的变化量要远大于湿侧常规孔隙比的变化量,湿侧常规孔隙比的变化量很小,土样的压缩变化性较小,CS干湿两侧常规孔隙比的变化量接近一致。分析原因主要是WC湿侧中吸附结合水含量较高,吸附结合水有着类似固相的性质,WC湿侧的有效孔隙比与常规孔隙比相比更小,土体实际也更密实。

将WC和CS的常规孔隙比换算成有效孔隙比,能更直观看出相同压实度下干湿两侧的压缩变形特性,结果如图7所示。从图7可以看出:WC在压实度相同的情况下,干湿两侧的有效孔隙比相差很大,湿侧的有效孔隙比要远小于干侧,说明湿侧的实际密实程度比干侧要更高,湿侧孔隙比的变化量和干侧孔隙比的变化量相比要小很多,CS有效孔隙比的变化受压实度的影响更大,压实度降低时,CS压缩过程中有效孔隙比变化量增大,CS在相同压实度下,干湿两侧的有效孔隙比变化量非常接近。

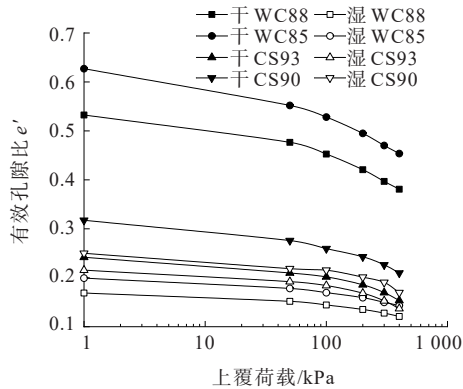


图7 WC、CS有效孔隙比压缩曲线

Figure 7 Compression curves of WC and CS effective void ratios

结论与实际工程相符,低液限土的变形特性受压实度的影响较大,压实度降低时,低液限土的抗压缩性能显著降低,而高液限土的湿侧方在压实度降低后,在高含水率的情况下,还是可以保持着较好的抗压缩性能。其原因是高液限土湿侧方中含有较多类似固相的吸附结合水,土体实际更密实。试验结果为类固相结合水提供了更多的证据,所以高液限土路基的压实控制可参照文献[1]进行压实控制。

4 结论

通过对比高液限土击实曲线上相同干密度不同含水率条件下土样的变形特性,以及进行更低压实度下干湿两侧和两个湿侧方的压缩性能对比,得出以下结论:

(1) 高液限土在压实度相同情况下,湿侧的变形量要远小于干侧,低液限土干湿两侧变形量较为接近,高液限土中有较高含量的吸附结合水,其可看作固相的一部分,起到土骨架的作用,在压实度相同时,在高液限土湿侧方吸附结合水含量远大于干侧方。因此,高液限土湿侧方抗变形能力更好,而低液限土吸附结合水含量较低,受到吸附结合水变化的影响小,干湿两侧变形差距不明显。

(2) 在高液限土击实曲线的湿侧方,压实度小于路基填筑规定压实度时,虽然土样含水率更高,但土样的抗压缩性能只是略小于规定压实度的土样,高液限土在湿热的南方地区,需要长时间的翻晒才能降低含水率至规定压实度。在湿侧方降低一定压实度,高液限土仍可以保持好的压缩性能,选择高液限

土作为路基填料时可以适当降低压实度,在达到路基填筑要求时还可大幅减少施工时间。

(3) 在考虑吸附结合水的影响后,将常规孔隙比换算成有效孔隙比,能更加准确地反映土样的实际压缩变形特性,进一步证明了吸附结合水对土体变形特性的影响,因此高液限土路基压实控制可参照文献[1]进行。

参考文献:

References:

- [1] 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. ZHANG Rui, XIAO Yupeng, LIU Chuang, et al. Control standards for degree of compaction of high liquid limit soil subgrade considering effects of adsorbed boundwater [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 32-40, 50.
- [2] 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):33-36,50. WU Lijian, ZHONG Falin, WU Changxing, et al. Study of subgrade construction from high liquid limit soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 33-36, 50.
- [3] ZHANG R, XIAO Y P, WU M L, et al. Measurement and engineering application of adsorbed water content in fine-grained soils[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(5): 1555-1569.
- [4] 张锐,肖宇鹏,郑健龙,等.吸附结合水对高液限土变形影响规律[J].中国公路学报,2023,36(10):84-94. ZHANG Rui, XIAO Yupeng, ZHENG Jianlong, et al. Influence of adsorbed bound water on deformation of high-liquid-limit soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 84-94.
- [5] 穆青翼,党影杰,董琪,等.原状和压实黄土持水特性及湿陷性对比试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(8):1496-1504. MU Qingyi, DANG Yingjie, DONG Qi, et al. Water-retention characteristics and collapsibility behaviors: Comparison between intact and compacted loesses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1496-1504.
- [6] QIAO L, LIU J, LI X, et al. Experimental study on mode I fracture characteristics of compacted bentonite clay[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 285: 109294.
- [7] DU J P, ZHOU A N, LIN X S, et al. Modeling

- microstructural mechanical behavior of expansive soil at various water contents and dry densities by molecular dynamics simulation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 158:105371.
- [8] 王志兵,麦棠坤,齐程.容县压实花岗岩残积土的力学性质与微结构特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 101-107.
- WANG Zhibing, MAI Tangkun, QI Cheng. Shear strength and microstructure of compacted granite residual soils in Rong County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5): 101-107.
- [9] 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.
- WU Lijian, ZHENG Jiajia, DENG Jie. Settlement and deformation law of subgrade with high liquid limit soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(sup 2): 351-355.
- [10] LIMAC D A, MOTTA L M G, ARAGÃO F T S. A permanent deformation predictive model for fine tropical soils considering the effects of the compaction moisture content on material selection[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 28: 100534.
- [11] 樊科伟,贾昊泽,蒯建国,等.干湿循环历史对季冻区膨胀土体变特性的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 280-287.
- FAN Kewei, JIA Haoze, LIN Jianguo, et al. Effect of the history of drying wetting cycles on the deformation of expansive soils in seasonal frost region[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(1): 280-287.
- [12] 王协群,邹维列.压实含水量对路堤的影响及中美规范对其控制的比较[J]. *中外公路*, 2007, 27(2): 16-19.
- WANG Xiequn, ZOU Weilie. Influence of compacted water content on embankment and comparison of its control between Chinese and American codes[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2007, 27(2): 16-19.
- [13] 李晓敏,穆青翼,丁心安,等.制样含水率对压实黄土持水及变形特性影响试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2022, 20(5): 123-130.
- LI Xiaomin, MU Qingyi, DING Xin'an, et al. Experimental study on effects of sample moisture content on water retention and deformation characteristics of compacted loess[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2022, 20(5): 123-130.
- [14] 何平,王卫东,徐中华.上海黏土压缩指数和回弹指数经验关系[J]. *岩土力学*, 2018, 39(10): 3773-3782.
- HE Ping, WANG Weidong, XU Zhonghua. Empirical correlation of compression index and swelling index for Shanghai clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(10): 3773-3782.
- [15] ZHANG R, WU M L, KUMAR P, et al. Influence of loosely bound water on compressibility of compacted fine-grained soils[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1496241.
- [16] ZHANG C, LU N. Soil sorptive potential: Its determination and predicting soil water density[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, 146(1): 0002188.
- [17] 张锐,申娟宁,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.
- ZHANG Rui, SHEN Xuning, YANG Xiangzhan, et al. Review on classification and testing methods of clay-bound water[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2022, 42(3): 1-10.
- [18] 李生林.苏联对土中结合水研究的某些进展[J]. *水文地质工程地质*, 1982, 9(5): 52-55.
- LI Shenglin. Some progress in Soviet Union's research on bound water in soil[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1982, 9(5): 52-55.
- [19] 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 Tielin, WANG Zhifen, et al. An equivalent method for calculating the seepage coefficient of clay based on solidified micro-bound water[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(4): 1004-1010.
- [20] MIN F, PENG C, SONG S X. Hydration layers on clay mineral surfaces in aqueous solutions: A review[J]. *Archives of Mining Sciences*, 2014, 59: 489-500.
- [21] LI S, WANG C M, ZHANG S Y, et al. Bound water characteristics and microstructure evolution during uniaxial compression of mucky silty clay[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(3): 782-796.