DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.06.003
文章编号:1671-2579(2025)06-0017-08

静动荷载对高液限土吸附结合水和变形的影响规律研究

方中旺[1],周世杰[2],肖宇鹏[3],彭鑫[1],张锐[2]
(1.海南省交通工程建设局,海南 海口 570100;2.长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114;
3.桂林理工大学 土木与建筑工程学院,广西 桂林 541004)

摘要:为揭示静动荷载作用下高液限土吸附结合水演化规律及其变形特性,该文选取海南高液限土和湖南黏土质砂为对比样,通过开展固结、固结-蠕变试验和动三轴试验,分析了不同荷载作用下高液限土的变形规律,结合核磁共振试验,研究固结和动三轴试验前后试样中吸附结合水的变化规律。试验结果表明:在静荷载作用下,高液限土压缩系数满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2019)对路基填料的要求,吸附结合水含量保持相对稳定,固结-蠕变变形量较小;在动荷载作用下,试样的弹性应变和永久轴向应变随荷载幅值增加而增大,动荷载会引起高液限土中吸附结合水含量明显减少,从而导致高液限土在循环荷载作用下产生较大的塑性累积变形。研究成果可为高液限土作为下路堤填料的工程应用提供参考。

关键词:道路工程;高液限土;荷载;吸附结合水;塑性变形;核磁共振
中图分类号:U416.12 **文献标志码:**A

Influence Mechanism of Static and Dynamic Loading on Adsorbed Bound Water and Deformation in High Liquid Limit Soils

FANG Zhongwang[1], ZHOU Shijie[2], XIAO Yupeng[3], PENG Xin[1], ZHANG Rui[2]
(1.Hainan Transportation Engineering Construction Bureau, Haikou, Hainan 570100, China; 2.School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3.College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to reveal the evolution law of adsorbed bound water and the deformation characteristics of high liquid limit soil under static and dynamic loading, Hainan high liquid limit soil and Hunan clayey sand were selected as comparative samples. Through consolidation, consolidation-creep, and dynamic triaxial tests, the deformation patterns of high liquid limit soil under different loading conditions were obtained. By combining nuclear magnetic resonance tests, the variation pattern of adsorbed bound water content in specimens before and after the consolidation and dynamic triaxial tests was studied. The results show that under static loading, the compression coefficient of high liquid limit soil meets the requirements of the *Specifications for Design of Highway Subgrades* (JTG D30—2019) for subgrade fill materials. The adsorbed bound water content is basically stable, and the consolidation-creep deformation is small. Under dynamic loading, the elastic strain and permanent axial strain of the specimen increase with increasing loading amplitude. Dynamic loading significantly reduces the adsorbed bound water content in the high liquid limit soil, leading to the large plastic cumulative deformation of the soil under cyclic loading. The study can provide a reference for the engineering application of high liquid limit soils as lower embankment fill.

Keywords: road engineering; high liquid limit soil; loading; adsorbed bound water; plastic deformation; nuclear magnetic resonance

收稿日期:2024-01-17 **修回日期:**2024-12-15
基金项目: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:方中旺,男,工程师. E-mail:892322661@qq.com

0 引言

高液限土是指液限大于50%的细粒土，在天然状态下具有含水率高、持水性强、承载力低等特点，在中国气候湿润的南方地区广泛分布，是路基工程中常见的特殊土。在高液限土分布区筑路时，为避免对生态环境产生严重破坏和工程费用剧增，通常利用这种土直接填筑路堤，但施工前必须经过翻晒大幅降低含水率后进行碾压，才能达到常规压实控制标准。然而，即使达到常规压实标准，由于高液限土水稳性差，竣工后受湿润气候的长期影响，其含水率会显著升高，压实度和承载力急剧降低，加之行车荷载作用，易导致路基变形和路面破坏[1-2]。高液限土路基变形的关键在于高液限土中水的变化，而土中水的主要存在形式是结合水[3-4]，结合水含量及其性质的变化会显著影响高液限土的变形特性[5-6]。因此，研究荷载对高液限土吸附结合水和变形的影响，对高液限土填料的合理利用具有重要意义，也将为中国公路建设提供参考。

为更好揭示静动荷载对高液限土中吸附结合水和变形的影响，并指导工程应用，国内外学者开展了大量的研究。Zhang等[7]通过试验测定吸附结合水的脱附温度和密度，发现吸附结合水的脱附温度为100～115 ℃，密度约为1.3 g/cm^3；吴谦等[8]、Li等[9]通过固结-蠕变试验发现，在静荷载作用下高液限土中的结合水通常难以排出，只有当固结压力超出特定值（视土质不同，为170～400 kPa）时，弱结合水才可能被排出；陈志波等[10]对原状软土进行反复循环荷载作用下的一维固结试验，发现软土的次固结系数随初始预压荷载值和循环荷载次数的增加而减小；李国维等[11]通过固结试验研究了不同荷载条件下土样的变形特征。试验结果表明：在静荷载作用下，土样以固结变形为主要特征，在循环荷载作用下，以剪切变形为主要特征；Lee等[12]通过一维固结试验，分析了压缩指数与土样状态间相关性方程的正确性，试验结果表明，黏土的压缩特性与其土样的含水率有很大的关系；Zhang等[13]通过分析不同土样的固结试验结果以及已有相关论文数据，发现压缩指数与初始孔隙比呈线性关系，当将吸附结合水考虑为固相的一部分时，土的有效孔隙比与压缩指数相关性则大幅提高；郑晴晴[14]对杭州淤泥质软黏土的研究表明，在重塑振动、原状振动、冲击荷载3种荷载作用后，吸附结合水含量均有降低，其中重塑振动作用效果最显著，其次是原状振动作用，最小的是冲击荷载作用；刘勇健等[15]对饱和软黏土进行三轴冲击试验，研究软黏土中结合水含量和动力响应间的关系。试验结果表明：在三轴冲击荷载作用下，试验前后总含水量变化幅度为17.80%～29.87%，结合水含量变化幅度为15.83%～29.24%，这说明结合水的含量变化与土中水的动力固结有着必然的因果关系。

基于以上研究，本文以海南文昌的高液限土为研究对象，并以湖南长沙黏土质砂作为对比样，利用核磁共振法对高液限土中吸附结合水进行动态分析，通过固结试验和动三轴试验获取高液限土的变形特性，揭示静动荷载对高液限土吸附结合水和变形的影响规律。研究成果可为高液限土作为下路堤填料提供参考。

1 试验土样

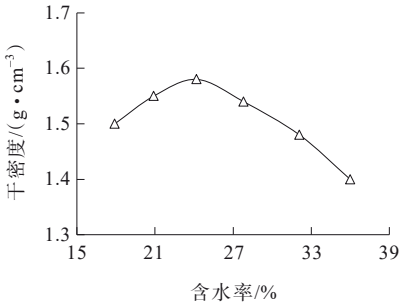
本文试验土样取自海南文昌，并以湖南长沙土样为对比样，参照《公路土工试验规程》（JTG 3430—2020）对土样展开天然含水率、颗粒分析、XRD、液塑限、相对密度和湿法击实试验，得到土样基本物理性质指标和矿物含量见表1，湿法击实试验结果见图1。

表1 土样基本物理性质指标及矿物含量

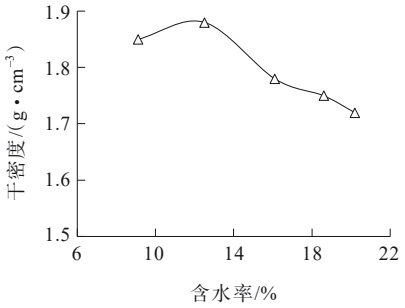
Table 1 Basic physical property index and mineral content of soil samples

土样编号	取样地点	天然含水率/%	颗粒组成/%			矿物含量/%				液限/%	塑限/%	相对密度
			黏粒	粉粒	粗粒	高岭石	石英	伊利石	蒙脱石			
WC	海南文昌	37.2	53.30	29.00	17.70	41.8	34.1	23.5	0.6	83.6	35.8	2.74
CS	湖南长沙	18.3	7.76	20.12	72.12	4.0	90.6	5.1	0.3	29.9	15.6	2.69

由表1可知：海南文昌土样为高液限黏土，湖南长沙土样为黏土质砂。高液限黏土中主要矿物为高岭石和伊利石等亲水黏土矿物，占比大于50%，而黏土质砂中的主要矿物为石英。因此，土中亲水黏土矿物含量越高，土样的亲水能力越强；土样天然含水率越高，液塑限越高。



(a) WC



(b) CS

图1　湿法击实试验结果

Figure 1　Wet compaction test results

2　试验方案

路基作为路面的基础结构,在自重和行车荷载的影响下会产生较大的工后变形。为揭示路堤动力影响区和非动力影响区不同工况下高液限土中吸附结合水和变形特性的变化规律,开展了固结试验、固结-蠕变试验、动三轴试验以及核磁共振试验,为高液限土中吸附结合水的演化机理及其变形特性提供参考依据。

2.1　静荷载对高液限土中吸附结合水及变形的影响试验研究方案

为研究静荷载作用下高液限土中吸附结合水含量及变形特性的影响规律,开展了固结试验和核磁共振试验,由于固结试验试样尺寸与核磁共振试验试样尺寸要求不同,在进行核磁共振试验时需重新制样,并对新试样在静荷载作用前后分别进行核磁共振试验。

2.1.1　固结试验

为研究下路堤工况中高液限土填料的变形特性,采用单杠固结仪开展固结试验。试验用环刀高为2 cm,体积为60 cm^3,待试样制备好后放入真空饱和器水箱进行饱和,随后放入固结仪进行分级加载。试验过程中,使用湿棉纱围住试样防止水分蒸发,每级固结时间为1 d,以最后1 h变形量小于0.01 mm为固结平衡稳定标准。具体试验参数及荷载路径见表2。

表2　固结试验方案

Table 2　Consolidation test scheme

试样	压实度/%	孔隙比	含水率/%	每级固结时间/d	固结荷载(kPa)路径
WC	90	0.93	35.3	1	0→50→100→200→400
CS		0.59	17.0		

2.1.2　核磁共振试验

核磁共振(NMR)技术基于电磁现象原理,通过静磁场与射频场的共同作用,使低能态的原子核发生塞曼跃迁。本研究利用土中结合水和自由水的横向弛豫时间T_2的差异性检测和区分土中结合水的含量。T_2分布曲线可有效表征水分子所处孔隙的大小,在不同孔径中T_2值不同,存在如下对应关系[16]:

$$\frac{1}{T_2}\approx\rho_2\frac{S}{V}\approx\rho_2\frac{3}{R} \tag{1}$$

式中:ρ_2为横向弛豫;S为饱水孔隙面积;V为饱水孔隙体积;R为孔隙半径。

由于土体孔隙中的液体主要为水,因此可通过核磁共振法测试土中吸附结合水含量。已有研究表明,由T_2曲线可知吸附结合水和自由水的临界值(即T_2截止值)。不同土类的T_2截止值存在差异,其范围通常为1.7~5.8 ms[17-19]。经过调研发现,T_2截止值取3 ms比较合理,当$T_2<3$ ms时,对应受强吸附力作用的结合水;当$T_2>3$ ms时,对应受弱吸附力作用的自由水。且经过初步计算,在此范围内T_2截止值的选取对试验结果影响不超过5%[20]。

由于核磁共振分析仪测试试管的有效检测尺寸为高100 mm、直径60 mm,而固结试验采用环刀样直径为61.8 mm,两者尺寸不一致,因此需重新制样。本文对WC高液限土和CS黏土质砂进行固结前后吸附结合水含量测试,试样高76 mm、直径38 mm,压实度和含水率与固结试验参数一致。试样制备完成后对其进行核磁共振试验,试验结束后将试样置于200 kPa静荷载作用下24 h,对试件再次进行核磁共振试验,试验结束后将试样置于400 kPa静荷载作用下24 h,对试件再次进行核磁共振试验。

2.1.3　固结-蠕变试验

高液限土下路堤除承受固结压缩作用外,还会受到持续静荷载的影响,从而产生蠕变变形现象。

蠕变试验可以获得高液限土应变和时间的规律，为高液限土路基沉降提供参考。试验参数见表3，选取200 kPa和400 kPa作为固结-蠕变试验的上覆荷载，荷载为单次加压，试验在室温下进行，试验过程中用湿棉纱围住试样防止水分蒸发，固结平衡后仍持续加载30 d。

表3 固结-蠕变试验方案

Table 3 Consolidation-creep test scheme

试样	压实度/%	孔隙比	含水率/%	固结时间/d	固结-蠕变荷载/kPa
WC	90	0.93	35.3	30	200、400
CS		0.59	17.0		

2.2 动荷载对高液限土中吸附结合水及变形的影响试验研究方案

为研究动荷载作用下高液限土中吸附结合水及变形的规律，开展动三轴试验和核磁共振试验。

2.2.1 动三轴试验

为研究动荷载作用下高液限土的变形特性，开展室内动三轴试验。试样高为76 mm，直径为38 mm，采用分层静压进行制样。调研高速公路路堤工作区平均参数，围压为28 kPa，考虑超载情况，偏应力分别为48 kPa、69 kPa和100 kPa。在室内动三轴试验中，为模拟实际行车荷载作用，通常将其简化为具有周期性的半正弦重复动荷载进行加载。经过调研，许多学者均采用1 Hz的加载频率[21]，荷载作用时间为0.1 s，间歇时间为0.9 s，该加载模式与行车速度80 km/h的车辆作用在路基土中的动应力较吻合[22]，具体试验参数如表4所示。

表4 动三轴试验方案

Table 4 Dynamic triaxial test scheme

土样	压实度/%	含水率/%	荷载作用次数/次	围压/kPa	加载波形	偏应力/kPa
WC	96.0	32.5	10 000	28	半正弦波形	48、69、100
CS		16.0				

2.2.2 核磁共振试验

动三轴试验所用试样与核磁共振所用试样尺寸一致，均为高76 mm，直径38 mm，因此对WC和CS试样在动三轴试验前后分别进行核磁共振试验，获得动荷载作用前后高液限土中吸附结合水含量的变化。

3 试验结果及分析

3.1 静荷载对高液限土吸附结合水和变形的影响规律

3.1.1 固结试验结果及分析

固结过程实质是土体在外部荷载作用下，通过排出孔隙水和孔隙气实现体积压缩，最终达到变形稳定的过程。在公路工程中，通常采用100～200 kPa荷载范围的压缩系数作为评价填料的压缩性的关键指标。本文对WC和CS试样进行固结试验，根据固结试验结果计算90%压实度下各土样的压缩系数$a_{1\text{-}2}$，计算结果见表5。

表5 土样的压缩系数

Table 5 Compression coefficients of soil samples

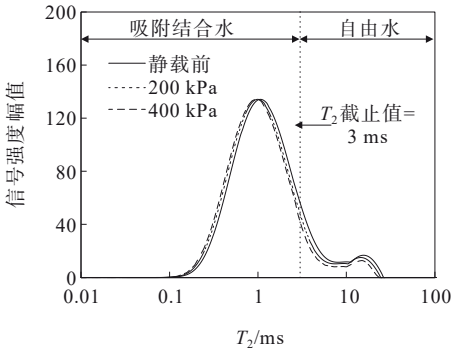
土样	压缩系数$a_{1\text{-}2}$/MPa^{-1}
WC	0.206
CS	0.292

由表5可知：WC试样在饱和状态下的压缩系数$a_{1\text{-}2}$低于0.5 MPa^{-1}，满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2019)对路基填料压缩系数的要求。在相同压实度条件下，WC试样的压缩系数显著小于CS试样，这是因为高液限土中的水主要为吸附结合水，而黏土质砂在高于最佳含水率的状态下土中存在较多空气，超过最佳含水率之后，含水量增加，干密度减小，因此压缩系数略低于高液限土。

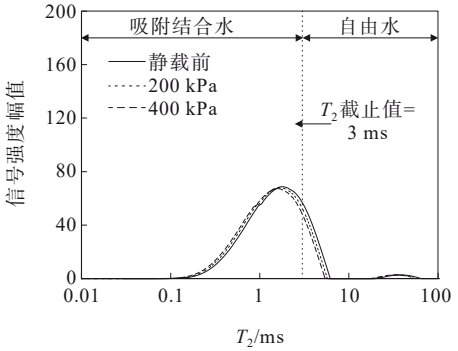
3.1.2 核磁共振试验结果及分析

对WC和CS试样在静载前、200 kPa和400 kPa荷载作用24 h后分别进行核磁共振试验，得到不同静荷载下的T_2值，如图2所示。

从图2可以看出：各曲线T_2值主要分布在0.1～11 ms区间。随着静荷载逐渐增大，各曲线T_2峰值基本不变，但T_2曲线整体面积减小，且各T_2曲线存在小幅度左移现象，这表明土中水有向紧密状态发展的趋势。随着静荷载增加，T_2>3 ms部分的曲线整体下移，这表明高液限土中的自由水含量在逐渐减少；虽然T_2曲线整体向左偏移，但T_2<3 ms的部分变化极小，在400 kPa静荷载作用下，高液限土中的吸附结合水几乎不受影响。因此，在400 kPa静荷载范围内，高液限土中的自由水会随着静荷载的增大而逐渐减小，而吸附结合水基本保持稳定。这表明：在400 kPa静荷载范围内，静荷载不会影响高液限土中的吸附结合水。



(a) WC



(b) CS

图2　不同静荷载作用下的T_2曲线图

Figure 2　T_2 curves under different static loads

3.1.3　固结-蠕变试验结果及分析

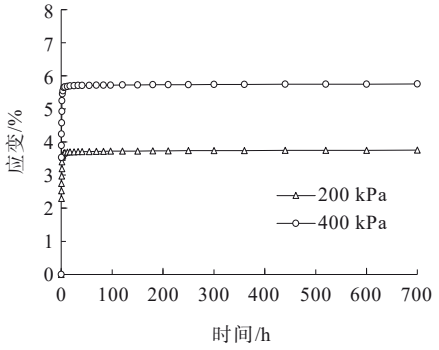
对WC和CS试样进行固结-蠕变试验,得到不同上覆荷载下的应变随时间变化曲线,见图3。

从图3可以看出:在200 kPa和400 kPa上覆荷载下,WC和CS试样的应变-时间曲线基本一致,这表明高液限土与黏土质砂在固结-蠕变变形趋势上基本相同。两组试样施加上覆荷载后,会产生较大的瞬间变形,随着时间增加,各土样的变形速率逐渐减缓,最终趋于稳定。在200 kPa和400 kPa上覆荷载下,两组土样的应变-时间曲线均表现为衰减蠕变形态,即土样的应变增加速率逐渐减小直至为零,由此间接说明土体在达到固结平衡后,变形量极小,基本保持稳定状态。200 kPa荷载下,WC试样在固结第10天时应变基本不再增加,达到稳定状态;CS试样在第7天后变形趋于稳定,略早于WC试样;400 kPa荷载下,各土样应变达到稳定所需时间分别比200 kPa荷载下增加了4 d和2 d。

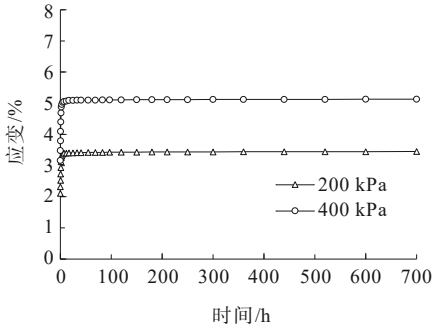
3.2　动荷载对高液限土吸附结合水和变形的影响规律

3.2.1　动三轴试验结果及分析

对WC和CS试样进行动三轴试验,获得不同荷载下弹性变形和永久轴向应变随荷载作用次数的变化曲线,试验结果见图4、5。



(a) WC



(b) CS

图3　固结-蠕变试验的应变-时间曲线

Figure 3　Strain-time curve of consolidation-creep test

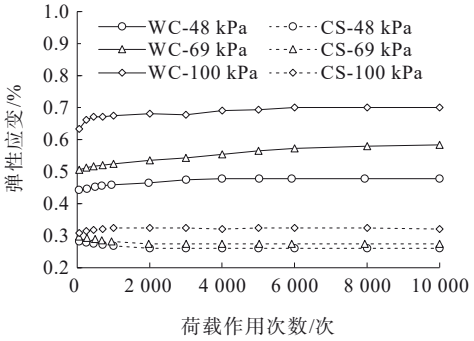


图4　弹性应变随荷载作用次数变化图

Figure 4　Variation of elastic strain with number of loads

从图4可以看出:WC和CS试样均处于安定状态,且WC试样的弹性变形量大于CS试样。随着加载次数累积,WC试样的弹性应变在前期呈略微增大趋势,随后逐渐趋于稳定,达到一个定值,这表明此时试样的弹性应变速率为0或接近于0。这是因为试样在经历加载前期的压实阶段后,其内部结构足以承受此时的加载应力,试样的弹性应变主要是由土中结合水膜引起。

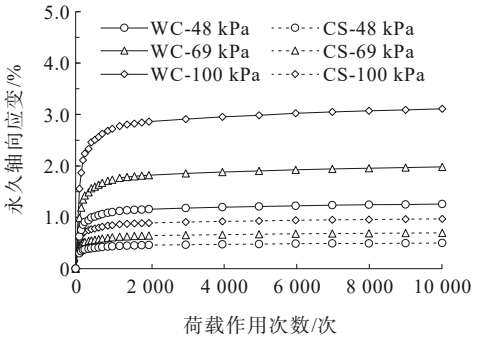


图5 动荷载作用下的永久轴向应变曲线图

Figure 5 Curves of permanent axial strain under dynamic loads

从图5可以看出：WC和CS试样在不同动荷载作用下均属于安定状态，随着荷载作用次数的增加，永久轴向应变也逐渐增大，最终趋于稳定。在100 kPa的动荷载作用下各试样的永久轴向应变最大，分别为3.11%和1.12%，永久轴向应变主要产生在加载初期（前2 000次加载）。在相同动荷载作用下，WC试样的永久轴向应变大于CS试样；此外，WC试样受动荷载影响更为明显，从48 kPa升至100 kPa动荷载下，永久轴向应变增大了1.85%；CS试样受动荷载影响相对较小，从48 kPa升至100 kPa动荷载下，永久轴向应变增大了0.47%。综上所述，与静荷载作用下高液限土变形特性作对比分析，发现高液限土在动荷载作用下的变形特性表现得更为明显。

3.2.2 核磁共振试验结果及分析

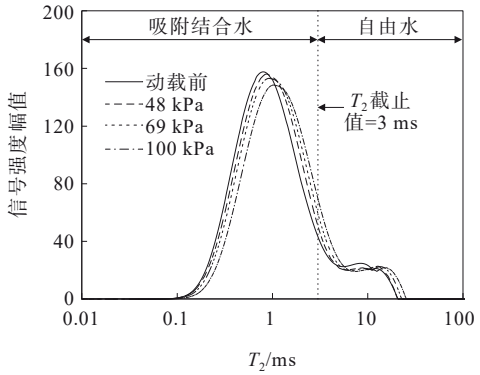
对WC和CS试样进行动三轴试验，并在动三轴试验前后分别对试样进行核磁共振试验，获得不同动荷载下的T_2分布曲线图，如图6所示。

从图6可以看出：WC和CS试样的T_2曲线均随动荷载的增大而向右偏移，说明在动荷载作用下，高液限土中部分吸附结合水转化为自由水；而CS试样的T_2曲线在动荷载作用前后的变化幅度较小，由此可见，相较于黏土质砂，高液限土中的吸附结合水更易在动荷载作用下发生转化、失去稳定状态。

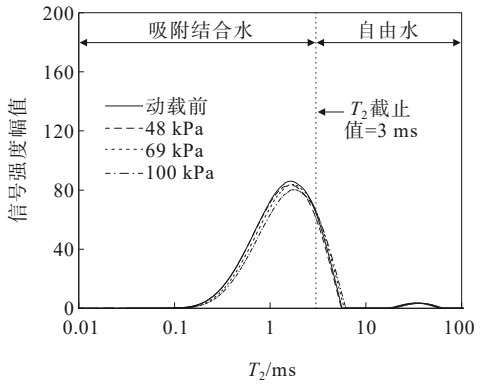
根据试验得到各土样的T_2曲线分布图，并通过式(2)计算各土样吸附结合水含量，计算结果见表6。

$$w_g = \frac{A_g}{A} w \tag{2}$$

式中：w_g为吸附结合水含量(%)；A_g为$T_2<3$ ms时的面积；A为T_2曲线中$T_2>3$ ms时的面积；w为初始含水率(%)。



(a) WC



(b) CS

图6 不同动荷载作用下的T_2曲线图

Figure 6 T_2 curves under different dynamic loads

表6 动荷载作用前后土中水状态变化表

Table 6 Changes in states in soil before and after dynamic loading

试样编号	$T_2<3$ ms占总面积的比例/%	$T_2>3$ ms占总面积的比例/%	含水率/%	吸附结合水含量/%	自由水含量/%
WC-动载前	85.71	14.29	32.52	27.87	4.65
WC-48 kPa	83.82	16.18	31.93	26.76	5.17
WC-69 kPa	82.49	17.51	31.56	26.03	5.53
WC-100 kPa	80.83	19.17	31.17	25.19	5.98
CS-动载前	83.33	16.67	15.53	12.86	2.67
CS-48 kPa	82.25	17.75	15.53	12.68	2.85
CS-69 kPa	81.92	18.08	15.42	12.54	2.88
CS-100 kPa	81.33	18.67	15.21	12.28	2.93

由表6可知：动荷载作用后，WC试样与CS试样的含水率和吸附结合水含量均有所降低。其中，WC试样中吸附结合水在动荷载作用下向自由水转化，导致含量降低；而CS试样的含水率和吸附结合水含量的降低幅度明显低于WC试样。

4　静动荷载作用下高液限土中吸附结合水和变形的影响规律分析

在静荷载作用下,吸附结合水在下路堤工况下稳定存在且具有类固相性质。基于双电层效应,吸附结合水会牢固地填充于土中的部分孔隙内,使得土中孔隙数量减少,压缩指数降低。在静荷载作用下的吸附结合水稳定存在,对高液限土抗变形起到了积极作用。此外,由高液限土的固结-蠕变试验发现,在400 kPa荷载下高液限土的应变-时间曲线为衰减蠕变形态,与黏土质砂一致。因此,通过室内试验结果可知,南方地区高液限土用作下路堤填料时,下路堤工后的状态相对稳定且不会产生较大沉降。

在动荷载作用下,高液限土中的结合水膜会承受部分荷载而被压缩。当土样卸载时,结合水膜会瞬间恢复原状,进而使土样产生弹性变形,这个过程类似于弹簧的弹性变形,如图7所示。在相同荷载作用下,动荷载作用后产生的应变远大于静荷载作用后产生的应变。这是因为在动荷载作用下高液限土中水分子运动加剧,结合水膜厚度减小,导致土中部分吸附结合水向自由水转化,且吸附结合水含量越高,转化的自由水越多,从而使试样产生更大的变形。

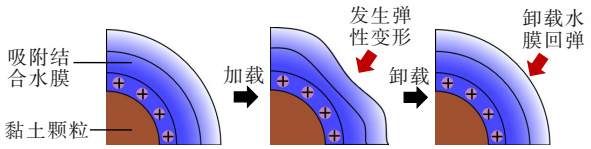


图7　土中吸附结合水影响弹性变形的假想模型

Figure 7　Hypothetical model of elastic deformation influenced by adsorbed bound water in soil

5　结论

(1)静荷载作用下,高液限土中吸附结合水含量保持稳定,未发生明显变化。固结和固结-蠕变试验结果表明:在静荷载作用下,高液限土变形量较小,表现出较好的稳定性。

(2)动荷载作用下,高液限土中吸附结合水含量会减小。动三轴试验结果表明:在动荷载作用下,试样的弹性应变和永久轴向应变增大,且高液限土的弹性应变和永久轴向应变均大于黏土质砂;在相同荷载作用下,动荷载作用会加剧土中水分子的运动,促使部分吸附结合水转化为自由水,导致动荷载对土体的变形影响远大于静荷载对土体的变形影响。

(3)在下路堤工况中,高液限土中的吸附结合水能够稳定存在并发挥土骨架作用,有利于增强高液限土抗变形能力;但动荷载作用对吸附结合水影响较大,导致高液限土变形增大。因此,建议将高液限土应用于动荷载影响较小的下路堤工作区,而避免用于动荷载影响较大的路堤工作区。

参考文献:

References:

[1] ZHANG J H, LI F, ZENG L, et al. Effect of cushion and cover on moisture distribution in clay embankments in Southern China[J]. Journal of Central South University, 2020,27(7):1893-1906.

[2] ZHANG J H, PENG J H, ZHANG A S, et al. Prediction of permanent deformation for subgrade soils under traffic loading in Southern China[J]. International Journal of Pavement Engineering,2022,23(3):673-682.

[3] TORRENCE M R. Adsorbed water on clay: A review[J]. Clays and Clay Minerals,1962(9):28-70.

[4] MIN F F,PENG C L,SONG S X.Hydration layers on clay mineral surfaces in aqueous solutions: A review[J]. Archives of Mining Sciences,2014,59(2):489-500.

[5] 张锐,申姁宁,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.

[6] 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 bound water [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 32-40,50.

[7] 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.

[8] 吴谦,毛雪松,王常明.结合水对软土次固结特性的影响机制研究[J].中国公路学报,2021,34(7):215-225.
WU Qian,MAO Xuesong,WANG Changming.Mechanism of bound water effects on the secondary consolidation property of soft soil[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(7):215-225.

[9] 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.

[10] 陈志波,孔秋平,朱俊高,等.反复循环荷载下考虑上覆土体压力软土次固结变形试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(10):3507-3514.
CHEN Zhibo, KONG Qiuping, ZHU Jungao, et al. Experimental study on behavior of secondary consolidation of soft soils considering upper soil layers' stress under repeated cyclic loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(10): 3507-3514.

[11] 李国维,蒋俊豪,侯宇宙,等.循环荷载下平面变形超固结软土蠕变特征试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(9):1745-1751.
LI Guowei, JIANG Junhao, HOU Yuzhou, et al. Experimental study on plane creep of overconsolidated clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(9):1745-1751.

[12] LEE C, HONG S J, KIM D, et al. Assessment of compression index of Busan and Incheon clays with sedimentation state[J].Marine Georesources & Geotechnology, 2015,33(1):23-32.

[13] ZHANG R, XIAO Y P, GAO Q F, et al. Effect of adsorbed water on compression behavior of high liquid limit soils [J]. Journal of Central South University, 2023, 30(2): 530-541.

[14] 郑晴晴.间歇性循环荷载下杭州淤泥质软黏土宏微观动力特性研究[D].杭州:浙江大学,2019.
ZHENG Qingqing. Study on macro-micro dynamic characteristics of Hangzhou muddy soft clay under intermittent cyclic loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2019.

[15] 刘勇健,符纳,林辉.冲击荷载作用下海积软土的动力释水规律研究[J].岩土力学,2014,35(增刊1):71-77.
LIU Yongjian, FU Na, LIN Hui. Law study of dynamic discharge water of marine soft clay under impact loading [J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(sup 1):71-77.

[16] 吕作俊.崇明岛东南部黏性土的结合水特征及次固结特性研究[D].长春:吉林大学,2022.
LYU Zuojun. Study on the characteristics of bound water and secondary consolidation of cohesive soil in the southeast of Chongming Island[D]. Changchun: Jilin University,2022.

[17] 何攀,许强,刘佳良,等.基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究[J].水文地质工程地质,2020,47(5):142-149.
HE Pan, XU Qiang, LIU Jialiang, et al. An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(05):142-149.

[18] 董均贵,吕海波,陈国强.基于核磁共振技术的孔隙水形态及土壤渗透性分析[J].农业工程学报,2020,36(6):74-80.
DONG Jungui, LYU Haibo, CHEN Guoqiang. Pore-water form determined by using NMR method and its influence on soil permeability[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(6):74-80.

[19] 明心凯.陕西渭北黄土孔喉及水膜流动特性研究[D].西安:长安大学,2018.
MING Xinkai. Study on the characteristics of loess pore throat and water film flow in Weibei of Shaanxi Province [D].Xi'an:Chang'an University,2018.

[20] 孔令明,梁珂,彭丽云.比表面积对土冻结特征曲线影响的试验研究[J].岩土力学,2021,42(7):1883-1893.
KONG Lingming, LIANG Ke, PENG Liyun. Experimental study on the influence of specific surface area on the soil-freezing characteristic curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(7):1883-1893.

[21] 张洪亮,边祥芹,王玉兰.重复荷载作用下路基土粘弹塑性永久变形预估[J].长安大学学报(自然科学版),2010,30(2):29-33.
ZHANG Hongliang, BIAN Xiangqin, WANG Yulan. Visco-elastic-plastic model of permanent deformation of subgrade soils under repeated load[J].Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2010,30(2):29-33.

[22] 岑广明.南方湿热地区路基含砂粉土永久变形特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.
CEN Guangming. Research on characteristics of permanent deformation of subgrade sand silt soil in South Hot and Humid Areas[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2015.