

# 干湿循环下吸附结合水对高液限土抗剪强度的影响

王月春, 雅成宏, 雷军伟, 杨仁平

(湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430056)

**摘要:** 为确定高液限土发生浅层滑坡是否与干湿循环条件下吸附结合水能力变化有关, 选取湖北安琥(安福寺—琥亭)一级公路高液限土为研究对象, 通过扫描电镜、基本土性和直剪试验, 利用容量瓶法测得不同干湿循环条件下土样吸附的结合水含量, 用直剪法测得不同循环条件下土样粘聚力和内摩擦角的变化, 采用塑限表征干湿循环对土样抗剪强度的衰减程度。结果表明, 土样从干燥到完成吸附结合水的过程需 15 d, 随着干湿循环次数的增加, 土样吸附结合水的含量逐渐下降, 由最初的 24.8% 衰减到 16.2%; 不同干湿循环条件下, 土样的粘聚力和内摩擦角逐渐下降, 粘聚力衰减较明显; 经过 6 次干湿循环后, 边坡会发生浅层滑塌, 实际情况也是如此, 干湿循环通过影响吸附结合水的能力影响土样粘聚力, 粘聚力降低是发生边坡失稳的主要原因。

**关键词:** 公路; 高液限土; 吸附结合水; 抗剪强度; 干湿循环; 容量瓶法; 边坡稳定性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0070-05

高液限土边坡的抗剪强度存在衰减, 在工后易出现失稳, 而土的抗剪强度受干湿循环影响大。高液限土最明显的特性是吸附能力强, 吸附结合水含量高。王中文研究发现在路基铺筑和工作期间, 红黏土的抗剪强度并不是一成不变而是动态变化的, 高含水率和低含水率的抗剪强度相差巨大, 随含水率增加, 粘聚力呈一阶指数衰减, 内摩擦角呈现分段函数特征。孔令伟等认为在干湿循环过程中, 膨胀土饱和度反复变化, 其抗剪强度亦不断变化; 干湿循环不仅影响土体的饱和度, 还会导致土体内部结构发生显著改变。对于非饱和土, 凌华、马少坤、李广信等提出采用含水率代替基质吸力来反映其对土体抗剪强度的影响。黄震等认为上覆荷载对抑制抗剪强度衰减有一定作用, 循环幅度、增湿幅度、初始含水率都对干湿循环下抗剪强度有一定影响。李硕等研究发现结合水对微观孔隙和黏土的固结蠕变起主导作用。库里契茨基 A. И.、Min F.、张玉等认为除强结合水外, 一部分弱结合水在一定温度范围内具有近似固体的性质。从已有研究成果来看, 吸附结合水对土体的力学特性影响甚大, 在干湿循环影响下, 土的抗剪强度存在一定衰减且衰减过程中水的含量是一个重要影响因素。研究吸附结合水在干湿循环条件下对土的抗剪强度变化的作用机理, 并采用相关指标来表示土的吸附能力大小和对抗剪强度衰减特性的影响至关重要。该文基于现有研究成果, 以湖北安琥一级公路高液限土为研究对象, 采用

容量瓶法测试干湿循环条件下高液限土吸附结合水含量, 通过试验揭示干湿循环下高液限土吸附结合水能力的变化规律, 研究吸附结合水含量对干湿循环下高液限土抗剪强度衰减特性的影响机理。

## 1 试验设计

### 1.1 试验土样及其基本物理性质

湖北地区潮湿多雨且高液限土分布广泛。安琥(安福寺—琥亭)一级公路建设期间高液限土边坡发生多次垮塌。K5+400 处高液限土基本物理性质测试结果(见表 1)表明: 土样具有典型的高液限土特征(也属于弱膨胀土), 天然含水率较高, 细粒含量大, 液、塑限高, 塑性指数大。根据 JTG E40-2007《公路土工试验规程》, 该土样为含黏粒高液限黏土。

表 1 试验土样基本物理性质测试结果

项目	测试结果	
土样颜色	浅黄色	
颗粒组成/%	黏粒	45.81
	粉粒	39.50
	粗粒	14.69
黏粒中蒙脱石含量/%	62.3	
天然含水率/%	26.1	
液限/%	54.0	
塑限/%	25.5	
自由膨胀率	51.1	
比重	2.73	

利用扫描电镜观察土样的微结构特征, 结果(见

图1)显示:土样中可见大量叠片状蒙脱石颗粒(土样黏粒中蒙脱石含量在50%以上),叠片之间存在微孔隙,为吸附大量结合水提供了有利条件。亲水性黏土矿物含量和微结构的不同是造成高液限土、砂土界限含水率显著差异的原因。

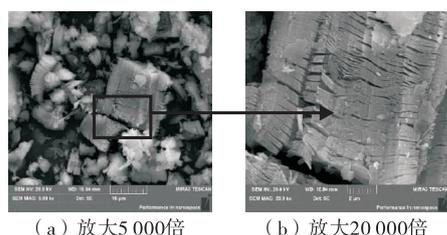


图1 试验土样电镜扫描照片

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 吸附结合水测量方法

目前主要采用热重分析法、等温吸附法和容量瓶法测定土中结合水。其中:热重分析仪价格昂贵,且只能测试1g左右的试样;等温吸附试验中,高液限土颗粒易堆积或成团,水分子只能吸附在土团表面,难以测定全部吸附结合水;采用容量瓶法,土颗粒在水中完全分散,充分吸附结合水,且测试简便,便于工程应用与推广。因此,采用容量瓶法测定试验土样的吸附结合水。

干湿循环方法:取12个试样盒放置试验土样(每个盒子放30g土)并分成6组。加水至质量含水率26.3%,用保鲜膜包裹闷料24h,再将其放入105℃烘箱中8h。此为一次完整的干湿循环。将每个土样的6组试样依次进行6次干湿循环。

容量瓶试验方法:为与常规土工试验中含水率测试时烘干控制温度保持一致,便于工程应用,容量瓶法试验中,先将土样在105℃下烘干,将烘干后的土样在干燥器中冷却后放入容积为255mL、分度值为0.05mL的干燥容量瓶中。将定量质量的25℃蒸馏水缓缓注入瓶中,振荡摇匀,使土颗粒分散与水充分接触,再将容量瓶放入25℃恒温水浴箱中。同时放入仅有蒸馏水的容量瓶,用于蒸发校正。每隔24h记录一次容量瓶中液面读数,直至液面高度不再发生变化。

容量瓶试验误差控制方法:1) 试验在25℃恒温水浴箱中进行,为避免试验误差,用25℃蒸馏水对容量瓶重新进行标定(常规容量瓶是在20℃下进行标定);2) 计算25℃下255mL蒸馏水的质量,用精度为千分位的电子秤称量好加入容量瓶中,消除

室温变化导致的误差;3) 在读数前振荡容量瓶,直至不再有微小气泡冒出,即在冒出的气泡消散不影响读数时再进行读数(在吸附结合水形成过程中会不断有微小气泡冒出,干扰读数)。

### 1.2.2 抗剪强度测试方法

土样制备:采用与容量瓶试验相同的土样,其基本性质见表1。用环刀( $h=20\text{ mm}$ 、 $\phi=61.8\text{ mm}$ )切削土样24个( $\rho=1.31\text{ g/cm}^3$ ),并将其分为6组,每组各4个土样。

试验方法与步骤:1) 将6组环刀试样分别编号为1#、2#、3#、4#、5#和6#。将制备好的环刀试样闷料24h(为使土样含水率变化尽可能小,用保鲜膜包裹),再在饱和箱中饱和24h(抽真空1h,且饱和过程中保持体积不变)。此为一次完整的干湿循环。2) 将6组环刀试样依次进行6次干湿循环。3) 将干湿循环后的环刀试样放入真空饱和缸中进行抽气饱和24h(抽真空1h),饱和结束后浸泡15d(使吸附结合水充分吸附)。4) 对6组试样进行100、200、300、400kPa 4级荷载直剪,速率为0.02mm/min,每隔5min记录一次测力环上百分表的读数,取最大值或6mm时剪切强度为试样的最大抗剪强度。

## 2 测试结果及分析

### 2.1 干湿循环下吸附结果分析

第1次干湿循环下吸附结合水的形成过程见图2。从图2可看出吸附结合水的形成过程大致分为3个阶段:第一个阶段为加水后至第3d,这个过程中吸附结合水形成速度最快,完成吸附总量的49%左右,时间较短,曲线斜率较大;第二个阶段为第3~11d,这个过程中土样吸附弱结合水的速度较快,时间较长,大致完成吸附总量的40%;第三个阶段为第11~15d,这个过程中吸附速度较稳定,曲线也趋于平缓。吸附结合水形成速率总体呈现先快后慢的趋势,说明随着时间的推移,土样吸附结合水的速

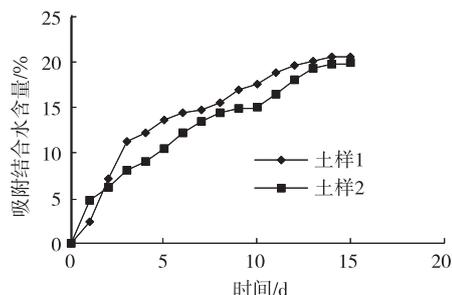


图2 第一次干湿循环下土样吸附的结合水

度逐渐降低。

不同干湿循环次数下土样吸附结合水情况见图3。从图3可看出:随着干湿循环次数的增多,土样吸附结合水的能力及吸附结合水的含量降低。第1次干湿循环的衰减幅度最大,为4.54%;第2、3次衰减幅度略微降低,分别为2.46%和0.95%;第3次之后,土样吸附结合水含量变化不大,趋于平稳。

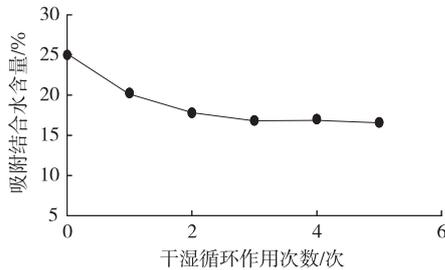


图3 干湿循环下土样吸附的结合水含量

## 2.2 干湿循环下抗剪强度分析

粘聚力表征土颗粒之间的胶合力,主要取决于土颗粒表面的分子引力。内摩擦角是土颗粒的表面摩擦力,表征颗粒间的嵌入和联锁作用产生的咬合力。采用摩尔-库伦准则对干湿循环过程中不同法向应力下土样的直剪试验结果进行拟合分析,得到干湿循环下土样的粘聚力和内摩擦角(见表2)。从表2可看出:干湿循环对高液限土粘聚力和内摩擦角都有明显影响。粘聚力呈现非线性衰减,大致分为2个阶段,第一阶段为0~3次循环,粘聚力衰减较快,衰减幅度为1.48 kPa;第二阶段为4~6次干湿循环,衰减幅度为0.89 kPa,在第3、4次干湿循环之间存在跳跃式衰减。经历6次干湿循环后,粘聚力为6.5~2.85 kPa。内摩擦角总体变化不大,1~2次干湿循环时存在衰减,后期随着干湿循环次数的增加基本保持不变。

表2 干湿循环下土样的抗剪强度

干湿循环次数/次	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	干湿循环次数/次	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	6.50	25.50	4	3.84	23.70
1	5.85	24.70	5	3.40	23.62
2	5.20	23.90	6	2.85	23.50
3	5.02	23.85			

图4为土样抗剪强度随干湿循环次数增加而发生的变化。从图4可看出:在100和300 kPa法向应力条件下,0~3次干湿循环过程中土样的抗剪强度存在衰减,4~6次干湿循环过程中抗剪强度基本保持不变。

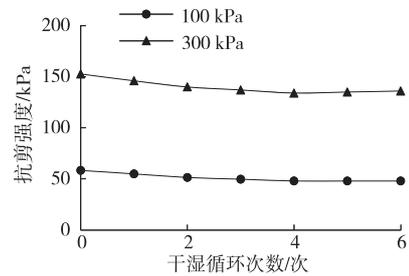


图4 抗剪强度随干湿循环次数增加的变化

为便于试验结果对比分析,定义干湿循环过程中抗剪强度降低程度为劣化度,按式(1)、式(2)计算,计算结果见表3。从表3可看出:1)干湿循环作用下,土样的抗剪强度劣化效应具有明显的非均匀性,前3次干湿循环导致的抗剪强度劣化幅度大,阶段劣化度占总劣化度的84%左右;之后的劣化度基本不变,土样的抗剪强度劣化趋势趋于平缓。2)低法向应力和高法向应力条件下,抗剪强度的劣化幅度存在差异。以前3次干湿循环为例,低法向应力下总劣化度比高法向应力下劣化度大4.4%;高法向应力下阶段劣化度均匀,降低幅度也较小。说明在干湿循环作用下,低法向应力的抗剪强度更易衰减,受干湿循环作用更明显,而高法向应力能抑制高液限土抗剪强度的衰减。

$$S_i = (T_0 - T_i) / T_i \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} \quad (2)$$

式中: $S_i$ 为总劣化度; $\Delta S_i$ 为单次干湿循环作用下抗剪强度劣化度。

表3 土样的抗剪强度劣化度

干湿循环次数/次	不同法向应力(kPa)下的总劣化度/%		不同法向应力(kPa)下的阶段劣化度/%	
	100	300	100	300
	1	5.8	4.3	5.8
2	11.8	8.3	6.0	4.0
3	14.7	10.3	2.9	2.0
4	17.6	12.2	2.9	1.9
5	17.6	11.6	0.0	-0.6
6	17.6	10.9	0.0	-0.7

## 3 干湿循环下结合水对抗剪强度的影响

土中结合水主要由黏土颗粒双电层效应形成。强结合水外层是吸附结合水,虽属于弱结合水,但其密度大于 $1.0 \text{ g/cm}^3$ ,不传递静水压力,具有一定的粘滞性和抗剪强度,不能自行由一个土颗粒移到另

一个颗粒上;其余弱结合水受范德华分子力影响,密度降为  $1.0 \text{ g/cm}^3$ ,可变形和迁移。

安琥公路 K5+400 处高液限土主要含蒙脱石类矿物,吸附结合水的形成主要是因为黏土类矿物表面有大量正、负电荷,这些电荷与水分子形成氢键和范德华力,使水分子包裹在土粒表面形成一层水分子膜。在高液限土增湿—脱湿过程中吸附结合水不断形成—失去,增湿过程中,自由水中的氢氧团会破坏吸附结合水表层不稳定的范德华力和氢键,使黏土表面的正、负电荷趋于平衡,降低土粒的电势能,导致吸附结合水含量减少。对于饱和土,失去的那部分弱结合水由自由水代替,自由水不具有固相性,对抗剪强度没有贡献。同时因为电荷均衡,吸附结合水变成自由水,土粒之间的吸引力变差,导致粘聚力变弱。因为水膜变薄,自由水增多,土粒之间的滑移变得容易,导致内摩擦角降低。

当土处于塑限,即半固态与可塑态之间的状态时,结合水包括全部吸附结合水和其他弱结合水,吸附结合水含量略低于塑限。随着含水率的增加,弱结合水逐渐增多,土的塑性增强,直至增至液限时,土中水既包括全部吸附结合水,还包括所有弱结合水和少量自由水。因此,吸附结合水含量与塑限的相关性最大,与液限的相关性次之。此外,由于不同高液限土中黏粒的矿物成分不同,不同黏土矿物吸附结合水的能力差异大,相对于与界限含水率指标的相关性,吸附结合水与黏粒含量的相关性较小。高液限土的最大特征是吸附结合水的能力较强,根据李文平等的研究成果,吸附结合水含量  $W_s$  和土的塑限  $W_p$  存在以下关系:  $W_s = 0.885W_p$ 。因此,可用塑限来表示土样吸附结合水能力的大小。土的吸附能力越强,受干湿循环的影响越大,从塑限可直观地判断土样的抗剪强度在干湿循环下受结合水衰减的影响程度。

#### 4 抗剪强度衰减对边坡稳定性的影响

以安琥公路 K5+400—482 边坡为例,对干湿循环影响下边坡稳定性进行分析。该边坡地处鄂西山地江汉平原过渡段,地貌属剥蚀堆积类型,以构造剥蚀丘陵为主。该边坡在 2018 年 7 月开挖,坡高 8.55 m,高 6 m 处设置宽度为 2 m 平台,初始坡率一级坡为 1:1.5,二级坡为 1:2。4 个月后发生浅层滑坡。利用 GeoStudio 软件对边坡进行稳定性分析,结果见表 4。

表 4 干湿循环后第一次边坡稳定性变化

干湿循环 次数/次	粘聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	稳定性系数
0	6.50	25.50	1.426
1	5.85	24.70	1.383
2	5.20	23.90	1.302
3	5.02	23.85	1.287
4	3.84	23.70	1.199
5	2.95	23.62	1.129
6	2.30	23.50	0.997

由表 4 可知:未经历干湿循环时,土样的抗剪强度能保持边坡稳定。经历干湿循环后,边坡的稳定性逐渐变差,第 6 次干湿循环后发生失稳。在这个过程中,粘聚力下降最明显,对抗剪强度的影响也最大,内摩擦角的作用不明显。由此判断,粘聚力降低是边坡发生浅层滑塌的主要原因,而土样吸附结合水能力的降低是导致粘聚力下降的主要原因。

#### 5 结论

(1) 高液限土含有大量黏土矿物和微孔隙,导致其吸附结合水含量很高。吸附结合水含量和土的塑限相关性很强,约为 0.885 倍。

(2) 安琥一级公路的高液限土从干燥到完全吸附结合水的过程需 15 d,吸附过程分为 3 个阶段,其中第一阶段吸附速度最快,吸附结合水含量最大。

(3) 干湿循环作用对高液限土的吸附能力影响很大。经历干湿循环后,高液限土吸附结合水的能力逐渐下降,循环 6 次后下降幅度基本保持稳定。

(4) 根据塑限和高液限土吸附结合水的相关关系,可用塑限表示土样吸附结合水的能力,也可初步判断土样抗剪强度受干湿循环影响的程度。但有待进一步验证。

(5) 随着干湿循环的进行,高液限土吸附结合水的能力降低,土的粘聚力下降明显,内摩擦角变化不大,边坡的稳定性下降,发生浅层滑塌。

#### 参考文献:

- [1] 洪宝宁,化君晖,刘鑫,等.高液限土路堤填筑的双指标控制方法研究[J].岩土力学,2016,37(1):255—262.
- [2] MARTIN R T. Adsorbed water on clay: A review[J]. Clays & Clay Minerals, 1992, 9(1): 28—70.
- [3] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. Third Edition. New Jersey: John Wiley &

Sons, 2005.

[4] 王中文,洪保宁,刘鑫,等.红粘土抗剪强度的水敏性研究[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(1):17-22.

[5] 孔令伟,陈正汉.特殊土与边坡技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(5):141-161.

[6] 袁俊平.非饱和膨胀土的裂隙概化模型与边坡稳定研究[D].南京:河海大学,2003.

[7] 凌华,殷宗泽.非饱和土强度随含水量的变化[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1499-1503.

[8] 马少坤,黄茂松,范秋彦.基于饱和土总应力强度指标的非饱和土强度理论及其应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):635-640.

[9] 李广信,司韦,张其光.非饱和土的清华弹塑性模型[J].岩土力学,2008,29(8):2033-2036.

[10] 黄震,傅鹤林,韦秉旭,等.等幅干湿循环条件下膨胀土的低应力抗剪强度特征[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(1):70-77.

[11] 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.

[12] 库里契茨基 А И.土中结合水译文集[M].李生林,译.北京:地质出版社,1982.

[13] 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.

[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] 张家俊,龚壁卫,胡波,等.干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J].岩土力学,2011,32(9):2729-2734.

[16] WANG Y, LU S, REN T, et al. Bound water content of air-dry soils measured by thermal analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(2): 481-487.

[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] 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.

[19] KULIGIEWICZ A, DERKOWSKI A. Tightly bound water in smectites[J]. American Mineralogist, 2017, 102(5):1073-1090.

[20] LI Y L, WANG T H, SU L J. Determination of bound water content of loess soils by isothermal adsorption and thermogravimetric analysis[J]. Soil Science, 2015, 180(3):90-96.

[21] 吴凤彩.粘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.

[22] 谭罗荣,孔令伟.特殊岩土工程土质学[M].北京:科学出版社,2006:38-52.

[23] 李文平,于双忠.煤矿区深部粘性土吸附结合水含量测定及其意义[J].水文地质工程地质,1995(3):31-34.

收稿日期:2019-12-17

\*\*\*\*\*

(上接第49页)

范的同时,积极学习、吸取和借鉴国外优秀标准先进的理论、技术和方法,提高企业和个人的素质,进而加强在国际工程市场中的竞争力,真正高效践行“一带一路”政策与号召。该文结合科特迪瓦阿比让四桥建设项目,分析欧洲标准(法国规范)体系下城市快速道路的路线立交几何设计的专业技术、方法流程及注意事项,供类似国际工程设计施工总承包项目应用参考。

参考文献:

[1] 城市交通规则研究中心.城市快速道路设计技术条件指令:ICTAVRU CERTU-2009[S].中交第一公路勘

察设计研究院有限公司,译.2009.

[2] 城市交通规则研究中心.A型城市快速道路引道设计·补充指南:ICTAVRU CERTU-2003[S].中交第一公路勘察设计院有限公司,译.2003.

[3] 中交第一公路勘察设计院有限公司.公路路线设计规范:JTGD20-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.

[4] 姜学良,葛胜锦.浅析中欧标准结构设计和绘图的异同点[J].公路,2008(9):252-260.

[5] 蔡晓,杨新春,蒋国为.高速公路城区段置换为城市道路的经济成本测算[J].公路与汽运,2018(5):149-152.

收稿日期:2019-08-20