

干湿循环作用下粉质黏土抗剪强度的试验研究

吕光东

(西藏农牧学院 水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000)

摘要:为探究干湿次数、压实度、饱和度和围压对粉质黏土强度的影响,采用UU试验测定几种因素作用下配制试样的应力应变曲线,测定配制试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,并探究其劣化规律。试验结果表明:①随着干湿次数的增加,土体应力应变曲线由应变硬化模式向应变软化模式转变,且在2次干湿循环后,软化速率增大;②土体黏聚力、内摩擦角随压实度的增加而增加,前者提高较大,后者提高幅度有限。土体黏聚力随饱和度的增加而减小,土体内摩擦角随饱和度的增加呈现先增大后减小的趋势;③土体黏聚力和内摩擦角随干湿循环次数的增加出现不同程度的劣化,前者劣化程度大于后者;④对黏聚力影响程度强的因素依次为干湿循环次数>饱和度>压实度。对内摩擦角影响程度强的仅有干湿循环次数,其余因素影响程度不高。

关键词:粉质黏土; 干湿循环; UU试验; 强度劣化; 影响性

中图分类号: U414

文献标志码: A

在工程建设地基中往往有粉质黏土的存在,地下水位的升降、气候等的变化使得土体处于干湿循环的作用之下,从而导致地基基础、路基主要受力层产生裂缝、局部破坏等现象,降低建筑结构、公路路基等的安全性,因此粉质黏土在干湿循环作用下的物理性质及力学指标备受专家学者的关注。近些年来,国内外学者针对膨胀土、黏性土在干湿循环作用下工程特性的研究已经取得较为丰硕的成果。有学者^[1-4]研究表明随干湿循环的发展,膨胀土的膨胀速率加快,荷载对干湿循环过程中膨胀土的胀缩幅度及强度衰减具有明显抑制作用;徐彬等^[3]的研究表明膨胀土经过干湿循环后,含水率和裂隙对强度参数的影响较大;吕海波等^[5-7]认为干湿循环作用对土的粒间联结产生不可逆的削弱,进而对土体的物理力学性质产生一定的影响;蔡正银等^[8]研究表明渠基土的膨胀性越强,每次干湿循环后的裂隙扩展越严重,渠水入渗作用也越强,渠道越容易破坏;Rayhani^[9]针对干湿循环作用对黏性土裂缝影响的研究表明,土体裂缝随着黏性土塑性指数与黏土含量的增加而增加。在此基础上,Li和Zhang等^[10]将黏性土及膨胀土在干湿循环作用下的裂缝发展过程划分为初始阶段、扩展阶段、稳定阶段;邓华锋^[11]等认为黏性土样在干湿循环作用下,其内部的微观裂纹、裂隙反复张开闭合,逐渐发育、汇集,土样由密实状态逐渐变为内部裂纹发育的松散状态,土样内部

的损伤是导致其抗剪强度参数逐渐劣化的根本原因;张家俊^[12-13]研究认为在干湿循环作用下,膨胀土体的范性变形均在不断发育积累,侧限作用下,膨胀土体的范性变形在高度、面积及体积上均有所体现,但在高度方向上的发育最为充分;王沪生^[14]认为干湿循环作用下,抗压强度随循环次数增加而降低,质量损失逐渐增大,并具有阶段性。综合国内外学者的研究成果,研究方向主要集中于膨胀土和黏土等在干湿循环作用下土体强度的变化规律。针对广西地区粉质黏土在干湿循环作用下物理力学指标变化规律的文献较少,且该地区干湿季节分明,结合实际工程中出现的不良现象,该文通过对干湿循环条件下粉质黏土强度特性的研究,为该地区的工程设计、施工和检测提供技术支撑。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

为具有代表性,试验材料取自广西南宁地区,年均降雨量达1304.2 mm,属于亚热带。土体受城市用水和河流水系补给影响较大。夏季潮湿,而冬季稍显干燥,干湿季节分明。试样直径39.1 mm,高80 mm,风干含水率为3.13%,最优含水率为14.26%,最大干密度为1.74 g/cm³,液限为39.72%,塑限为28.68%,塑性指数为11.04,无胀缩性。

收稿日期:2021-07-05(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51268003)

作者简介:吕光东,男,大学本科,讲师。E-mail:23023054@qq.com

1.2 试验方案

为探究干湿次数对试样强度的影响,采用单因素试验方案。结合该地区实际工程经验,设定试样的干湿次数为0、2、4、8次。压实度依据地基规范设置为0.90、0.93、0.95。饱和度是结合最大干密度以及该地区土体的饱和度设定为45%、60%、75%、90%。围压等级设定为100、200、300、400 kPa。试验方案见表1。

表1 单因素试验方案

干湿次数/次	压实度	饱和度/%	围压/kPa
0、2、4、8	0.90、0.93、0.95	45、60、75、90	100、200、300、400

1.3 试验方法

试验过程包括试件制备、养护、干湿循环及UU(三轴不固结不排水)试验。该文选用平均最优含水率进行试样制备。过2.5 mm筛去除粒径较大的杂质,

分层喷水至试验设定的含水率,密封24 h以保证含水率均匀,通过静压法制成直径为50 mm、高50 mm的圆柱形试件,每组做6个平行试样,试验完成后进行标准养护。干湿循环过程为,先将试件放入烘干箱中低温烘干24 h至风干含水率状态,然后取出试件进行补水加湿,试样达到最优含水率时,完成吸湿过程。每组试验完成指定干湿循环次数后,按照GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行UU试验。

2 试验结果与分析

2.1 应力—应变曲线

制备试样在不同的干湿循环次数、压实度、饱和度及围压条件下的应力—应变曲线经过汇总和整理,具有一致性,为简便、减小重复,示出压实度为0.90和饱和度60%对应的应力—应变曲线如图1所示。

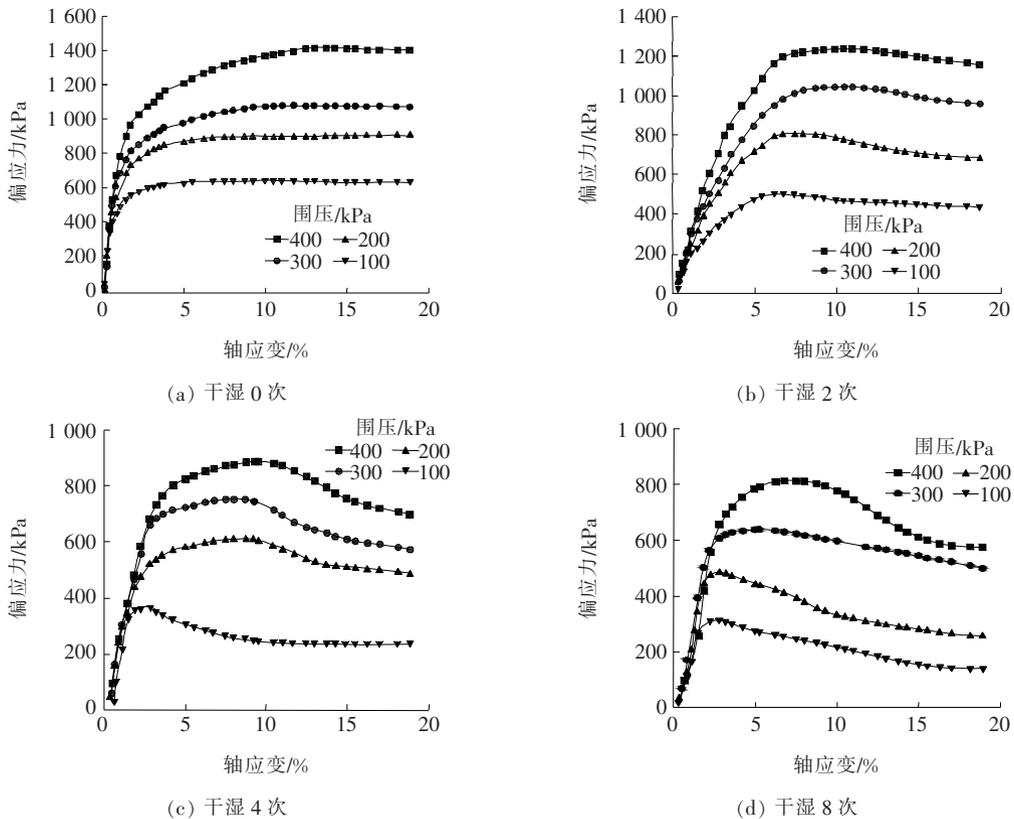


图1 压实度0.90—饱和度60%试样应力—应变曲线

由图1(a)可知:在干湿次数为0次时,试样应力—应变曲线表现为应变硬化模式,且随着围压增大,硬化趋势增大。由图1(b)、(c)、(d)可知:干湿循环次数为2、4、8次后,试样应力—应变曲线表现为应变软化型,且随着围压增大,软化程度和速率减小。分析认为试验

干燥过程是水分通过土体中孔隙排水的过程,将会形成一定的排水通道和裂隙,排水完成后,原结构中孔隙压力转化为有效应力,从而对试样结构产生一定的影响。试样的吸湿过程是干燥的逆过程,试样饱和度增加,有效应力减小,同时吸湿的过程土体颗粒相对容易

发生移动,因此循环往复的干燥和吸湿过程在试样内部形成一定的通道和裂隙,在试验过程中表现为剪胀,呈现出一定程度的软化。不难发现,干湿 2 次后,试样的软化程度速率加快,说明干湿程度的不断加重,试样内部裂隙不断贯通,内部结构有较大的破坏,当轴向应变接近某一定值时偏应力明显减小,因此表现出软化速率加快。同时可以得出,随着围压的增加,试样的强度有所提高。

2.2 强度指标劣化分析

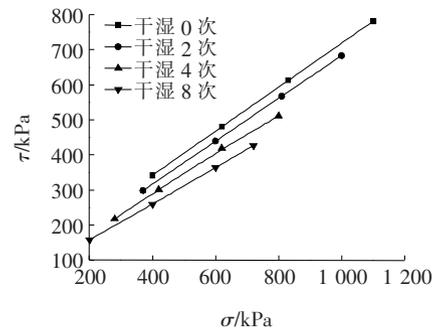
2.2.1 干湿次数对强度指标的影响

试样总强度和干湿次数的关系曲线、相同饱和度不同压实度时强度曲线如图 2 所示,其对应的内摩擦角和黏聚力如表 2 所示。

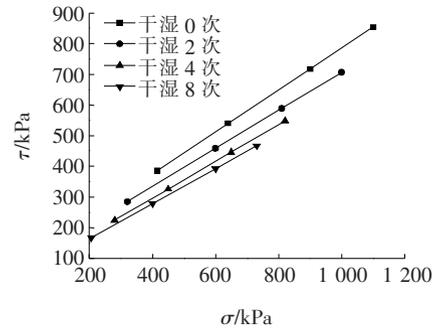
由表 2、图 2 可知:试样的黏聚力随着干湿次数的增加而明显减小,干湿次数从 0~8 次时,0.9 的压实度时黏聚力从 91.3 kPa 降低到 48.5 kPa,劣化幅度达到 46.9%。试样强度包线的斜率较为一致,说明随着干湿次数的增加,其内摩擦角变化较小,干湿次数从 0~8 次时,0.9 的压实度时内摩擦角从 32.1°降低到 27.7°,相差不大。分析认为:干燥的过程,土体内含水量排出,形成裂隙和通道,然而此时有效应力增加,使得土体结构产生一定的破坏,干湿过程不断反复,颗粒间黏结程度降低,因此黏聚力减小较大。虽然干湿循环的过程破坏了颗粒间的黏结,颗粒之间发生了一定的错动,但是由于围压的作用,加之较高的压实度,这种错动即使有但不会较大,因此土体的摩擦角变化不大。

2.2.2 压实度对强度指标的影响

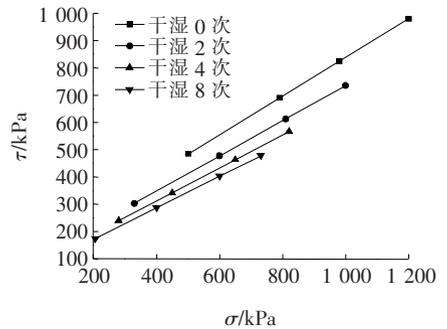
由图 2 及表 2 可知:试样的黏聚力随着压实度的增加而增加,以干湿次数 0 为例,压实度从 0.90~



(a) 压实度 0.90



(b) 压实度 0.93



(c) 压实度 0.95

图 2 强度包络线(饱和度 60%)

表 2 强度试验结果(饱和度:60%)

干湿次数/次	不同压实度的黏聚力/kPa			不同压实度的内摩擦角/(°)		
	0.9	0.93	0.95	0.9	0.93	0.95
0	91.3	130.3	130.6	32.1	34.2	35.3
2	72.5	86.4	90.7	31.4	31.8	32.8
4	61.3	56.4	70.1	30.7	30.9	31.2
8	48.5	50.1	55.3	27.7	29.7	30.1

0.95,黏聚力从 91.3 kPa 增大到 130.6 kPa,提高幅度达到 43.1%。内摩擦角从 32.1°增大到 35.3°,提高幅度有限。压实度增大,也即土体空隙率降低,土颗粒间距离减小,单位体积内土颗粒的数量增加,土颗粒不断

相互靠拢镶嵌而逐渐密实,土的单位质量提高,形成密实的整体,架空结构逐渐减小,土颗粒的镶嵌微孔胶结结构更加紧密^[15],黏聚力逐渐增大。同时由于土颗粒不断靠拢,使得水分进入土体的通道减少,而阻力增

加,增强了土体的强度。但是由于压实度 0.95 时土颗粒的架空结构相对压实度 0.90 时较为接近,并未显著减小,也即两者的架空空隙较为接近,土颗粒的摩擦和镶嵌作用相差不大,因此内摩擦角有所增加,但两者相差较为接近。

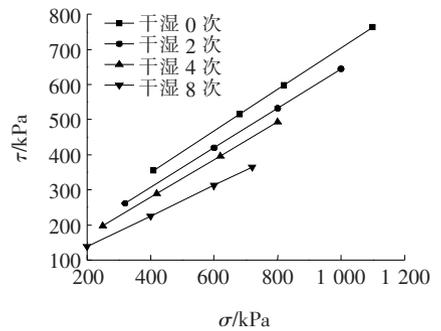
2.2.3 饱和度对强度指标的影响

相同压实度、不同饱和度时强度曲线如图 3 所示,其对应的内摩擦角和黏聚力如表 3 所示。

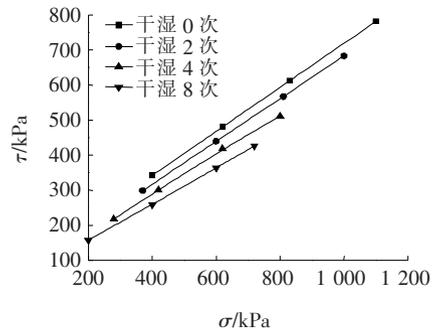
由图 3 及表 3 可知:试样的黏聚力随着饱和度的增加而减小,以干湿次数 0 为例,饱和度从 45%~75%,黏聚力从 111.2 kPa 减小到 87.6 kPa,减小幅度达到 21.2%。内摩擦角呈现出先增大后减小的趋势。黏聚力降低是由于随着土体内含水量增加,土颗粒间电分子引力减小,干湿循环的过程形成的裂隙破坏了土体结构,破坏了土颗粒间的胶结作用。内摩擦角非线性的变化是由于适当的含水量起到润滑作用,使得土颗粒镶嵌排列更紧密,一旦超过此含水量,反而会降低土颗粒间的摩擦作用,进而内摩擦角减小^[16-17],这方面的研究成果较多,不再赘述。

3 各因素影响程度分析

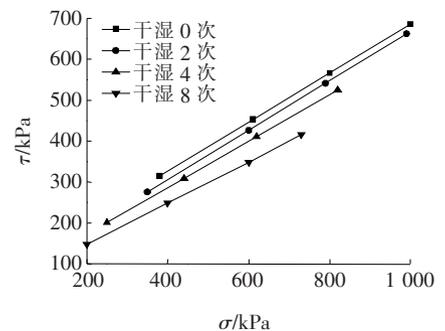
前面讨论了土体强度与干湿循环次数、饱和度、压实度的关系,是单因素分析法,只能给出某一指标和某一因素的关系,不能给出该因素对该指标的影响次序,实际上,土体强度往往受某一主要因素的作用,因此利用 SPSS 软件进行了数据处理分析,确定了 3 种因素影响程度的主次顺序,为路基、地基基础、地基处理等工程质量控制和工程性质的改善提供依据。影响程度可由 p 值(显著性水平)判断, p 值小于 0.05,说明该



(a) 饱和度 45%



(b) 饱和度 60%



(c) 饱和度 75%

图 3 不同饱和度时试样强度包络线(压实度:0.90)

表 3 强度试验结果(压实度:0.90)

干湿次数/次	不同饱和度的黏聚力/kPa			不同饱和度的内摩擦角/(°)		
	45%	60%	75%	45%	60%	75%
0	111.2	91.3	87.6	30.7	32.1	30.9
2	81.4	72.5	64.8	29.4	31.4	31.1
4	62.5	61.3	60.1	28.3	30.7	29.5
8	50.2	48.5	47.7	23.6	27.7	26.6

因素对指标影响程度较高,反之则影响不显著。分析结果见表 4、5。

由表 4、5 可知:各因素对土体黏聚力的影响程度依次为干湿次数>饱和度>压实度。各因素对土体内

摩擦角的影响程度强的仅为干湿次数。因此实际路基工程、地基基础为防止土体强度劣化,首先应考虑防排水措施,减小土体受干湿循环次数的影响,其次给土体配水使其含水量接近最优含水量,加之合适的压实度,

从而提高土体的强度、整体性,减少不良工程现象的发生,保证建筑结构、地基基础的安全稳定。

表 4 各因素对黏聚力影响程度分析

因素	平方和	自由度	p 值	影响程度
干湿次数	38 521.7	3	0.000 1	强
饱和度	5 234.5	3	0.000 1	强
压实度	2 786.9	2	0.000 1	强

表 5 各因素对摩擦角影响程度分析

因素	平方和	自由度	p 值	影响程度
干湿次数	785.6	3	0.000 1	强
饱和度	3.6	3	0.620 0	低
压实度	1.1	2	0.810 0	低

4 结论

(1) 随着干湿次数的增加,土体应力应变曲线由应变硬化模式向应变软化模式转变,且在 2 次干湿循环后,软化速率增大。

(2) 土体黏聚力、内摩擦角随压实度的增加而增加,前者提高较大,后者提高幅度有限。土体黏聚力随饱和度的增加而减小,土体内摩擦角随饱和度的增加呈现先增大后减小的趋势。

(3) 土体黏聚力和内摩擦角随干湿循环次数的增加出现不同程度的劣化,前者劣化程度大于后者。

(4) 对黏聚力影响程度的因素依次为干湿循环次数>饱和度>压实度。对内摩擦角影响程度强的仅有干湿循环次数,其余因素影响不显著,因此为提高公路路基、地基基础安全、耐久性和稳定性,应首先采取防水措施,减少干湿循环次数,其次考虑最优含水量和压实度。

参考文献:

[1] 刘松玉,季鹏,方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(1):12-16.
 [2] 杨和平,张锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环膨胀变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报,2006,28

(11):1 936-1 941.
 [3] 孙德安,黄丁俊. 干湿循环下南阳膨胀土的土水和变形特性[J]. 岩土力学,2015,36(S1):115-119.
 [4] 徐彬,殷宗泽,刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(1):44-50.
 [5] 吕海波,曾召田,赵艳林,等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(12):3 797-3 802.
 [6] NOBUHIDE O, MASAYUKI Y, TETSUYUKI K. Effects of Salt Concentration on Strength and Creep Behavior of Artificially Frozen Soils[J]. Cold Regions Science and Technology,1983,8(2):139-153.
 [7] ZHANG Y, YANG Z H, LIU J K, et al. Impact of Cooling on Shear Strength of High Salinity Soils[J]. Cold Regions Science and Technology,2017,141: 122-130.
 [8] 蔡正银,陈皓,黄英豪,等. 考虑干湿循环作用的膨胀土渠道边坡破坏机理研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(11): 1 977-1 982.
 [9] RAYHANI M H T, YANFUL E K, FAKHER A. Desiccation-Induced Cracking and its Effect on the Hydraulic Conductivity of Clayey Soils from Iran[J]. Canadian Geotechnical Journal,2007,44(3): 276-283.
 [10] LI J H, ZHANG L M. Study of Desiccation Crack Initiation and Development at Ground Surface[J]. Engineering Geology,2011,123(4): 347-358.
 [11] 邓华锋,肖瑶,方景成,等. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究[J]. 岩土力学,2017,38(9):2 629-2 638.
 [12] 张家俊. 干湿循环下膨胀土裂隙、体变与渗透特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
 [13] 刘义虎,杨果林,黄向京. 干湿循环作用下水对膨胀土路基破坏机理的试验研究[J]. 中外公路,2006,26(3): 30-35.
 [14] 王沪生. 冻融干湿作用下硫酸盐渍土的耐久性研究[D]. 兰州:兰州大学,2016.
 [15] 陈开圣. 公路工程压实黄土的强度与变形及其微观结构研究[D]. 西安:长安大学,2006.
 [16] 李广信,张丙印,于玉贞. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
 [17] 高英,马艳霞,张吾渝,等. 西宁地区不同湿陷程度黄土的微观结构分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(1):65-73.