

荷载与干湿循环作用下预崩解炭质泥岩 抗剪强度及渗透特性

耿帆¹, 刘杰²

(1.长沙理工大公路工程试验检测中心, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 水利工程学院)

摘要:为研究预崩解炭质泥岩抗剪强度、渗透系数与竖向荷载及干湿循环的关系,研发一套可施加竖向荷载的岩土干湿循环试验装置,分别利用直剪仪、渗透仪开展预崩解炭质泥岩干湿循环后抗剪强度及渗透试验研究。结果表明:预崩解炭质泥岩的抗剪强度与法向应力呈正相关关系,随竖向荷载、循环时间的增加而增大,随循环次数的增加而降低,且抗剪强度的变化主要是由于颗粒间黏聚力的变化。渗透系数与竖向荷载及干湿循环时间呈负相关关系,而随循环次数的增加呈正相关关系,拟合预崩解炭质泥岩抗剪强度与渗透系数的幂函数关系模型,可为预崩解炭质泥岩抗剪强度、渗透特性及路堤稳定性研究提供理论依据。

关键词:预崩解炭质泥岩; 抗剪强度; 渗透特性; 竖向荷载; 干湿循环

1 引言

炭质泥岩广泛分布于中国西南地区,是由软弱灰岩、砂岩、页岩和页岩互层等沉积类岩石构成的地质体。由于炭质泥岩具有风化快、强度低等特点,进行路堤填筑之前须先对其进行充分的预崩解,即预崩解炭质泥岩。已有研究表明,季节性反复降雨后,预崩解炭质泥岩产生持续崩解及强度劣化,堵塞路堤排水管道,导致路堤内部处于荷载与浸水环境,产生超限变形,甚至引发路堤失稳,危害行车安全。因此,为避免或减少炭质泥岩路堤失稳等灾害,有必要全面深入地研究荷载与干湿循环条件下预崩解炭质泥岩抗剪强度及渗透特性。

国内外学者针对岩土体的抗剪强度及渗透特性已开展一些研究。在抗剪强度方面,毛瑞等研究了剪切速率对剪碎带土体抗剪强度的影响,剪碎带土体抗剪强度的增大不仅在剪切速率由慢变快时发生,且在快速剪切速率减小时也发生;吴珺华等利用现场大型直剪试验研究了干湿循环对膨胀土抗剪强度的影响,发现经历干湿循环作用后的膨胀土,峰值剪应力与未经历干湿循环作用的相比明显减小,而软化特征不明显;S. K. Vanapalli 对非饱和土抗剪强度的预测方法进行了研究,通过对3种不同的基质吸力的计算,对比分析

了非饱和剪切强度的测量值与预测值;Ulusay R 等进行了干湿循环作用下不同岩土体的抗剪强度试验研究,对干湿循环前后岩土体的强度进行了对比,表明干湿循环后岩土体的抗剪强度均有一定程度的下降;Mario Torres 从物理、化学、力学和成分组成等角度研究了干湿循环对哥伦比亚安第斯山脉泥岩力学性能的影响。土体渗透系数与边坡稳定性存在重要联系,是反映土壤渗透特性的一项综合指标。陈伟等通过现场监测和原位试验等方法对降雨条件下路堤岩土渗透系数的变化规律进行了深入的研究;苗强强、蔡国庆等依次针对路堤在荷载作用下其渗透系数的变化规律做了大样本的室内试验研究,初步掌握了在荷载作用下岩土体的渗透系数变化规律。上述研究虽取得了较为丰硕的成果,促进了岩土体抗剪强度试验技术及相关理论的发展,但仍有一些问题有待研究。首先,现有研究主要针对粗颗粒、膨胀土、剪碎带土体等,而关于预崩解炭质泥岩抗剪强度的室内试验、数值计算及理论研究却鲜见报道;其次,季节性降雨使得路堤经受反复干湿循环,长期处于荷载与干湿循环条件下,对路堤的变形和稳定产生不可忽视的影响,而关于荷载与干湿循环共同作用下预崩解炭质泥岩的抗剪强度及渗透特性研究较少。

鉴于此,该文利用一套可施加竖向荷载的岩土干湿循环试验装置,并利用直接剪切仪、渗透仪分别开展

预崩解炭质泥岩直剪试验及渗透试验,分析各因素对预崩解炭质泥岩抗剪强度及渗透特性的影响,以期对炭质泥岩路堤工程实践提供一定参考和依据。

2 试验设计

2.1 试验材料与试样制备

取广西六寨—河池高速公路沿线某路堤处预崩解炭质泥岩用于此试验,将其进行 X 射线衍射分析,发现炭质泥岩主要由绿泥石、石英、黑色绿泥石、高岭石组成,其他矿物成分含量均低于 7%,化学成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主。

预崩解炭质泥岩最大干密度为 2.09 g/cm^3 ,最佳含水率为 10.56%,土粒密度为 2.66 g/cm^3 ,液限为 32.9%,塑限为 25.3%,塑性指数为 7.6。

选取崩解完全的炭质泥岩土样,过 2 mm 土工筛,闷料 24 h 后制作直径 10 cm、高度 20 cm 的试样。通过数显式压力试验机并采用分层制样法分 5 层压样成型,静压完成后须让千斤顶继续施加压力并稳定一段时间后再卸载以防止试样回弹。最后,用其他垫块从底部把试样慢慢顶出。压样前钢模内须涂抹少许凡士林以便减少脱模时试样与钢模间的摩擦力。试样成型后用保鲜膜密封,封装好后放入保湿箱内静置以备试验使用。

2.2 试验方案

结合炭质泥岩路堤的工程实际,采用控制变量法研究竖向荷载(p)、循环时间(t)及循环次数(n)对预崩解炭质泥岩抗剪强度的影响,各变量设置 4 个水平,共 12 组试验,考虑到土工试验可能存在一定误差,故每组试验做 3 组平行试验,结果取平均值。根据 JTG F10—2006《公路路基施工技术规范》,土质高速公路路堤压实度大于等于 94%,故控制试样压实度为 96%,初始含水率取 10%(最佳含水率附近)。考虑路堤深度一般不超过 10 m,故竖向荷载可取 0、50、100、200 kPa;考虑干湿循环影响,循环时间取 0、24、48、72 h;试验发现循环次数 6 次后,变形基本稳定,故循环次数分别取 0、2、4、6 次。试验变量水平及试验方案见表 1。

2.3 试验仪器与操作步骤

2.3.1 试验仪器

自主研发了一套可施加竖向荷载的岩土干湿循环试验仪器,其主要由加载系统、干湿循环系统两部分组成,装置实图见图 1。通过试验装置的通水孔控制试

验仪器的水位,模拟炭质泥岩在水循环中的环境,竖向荷载通过砝码及杠杆加载。

表 1 正交试验方案

编号	竖向荷载/kPa	循环时间/h	循环次数/次
T1	0	48	6
T2	50	48	6
T3	100	48	6
T4	200	48	6
T5	100	0	4
T6	100	24	4
T7	100	48	4
T8	100	72	4
T9	200	24	0
T10	200	24	2
T11	200	24	4
T12	200	24	6

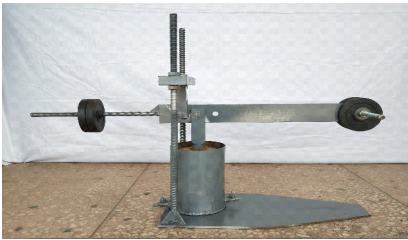


图 1 考虑荷载的干湿循环试验装置

利用应变控制式直接剪切仪进行室内快剪试验;采用变水头渗透仪进行渗透系数研究。

2.3.2 试验步骤

(1) 调平:调节试验仪器左端杠杆上的调平砝码位置,使之与未加砝码前右端杠杆保持平衡,并用螺母将其固定。

(2) 装样:将制好的试样从保湿箱内取出,缓慢装入筒壁带有孔眼的内筒,装入内筒前须给内筒涂抹凡士林,保持润滑以减少筒壁与试样的摩擦力,注意装样过程中勿破坏试样。

(3) 加载:将装好试样的内筒放入外筒,下部垫上直径 10 cm 的透水石,上部放置加载盖,调节加压杆为竖直方向并在内筒中央位置,施加砝码进行加载。

(4) 干湿循环:先将试样在无水环境下加载 1 个循环时间,然后将外筒灌满水,使整个试样泡在水中 1 个循环时间,此为一个干湿循环。进行下一个循环时,需将试样连同内筒取出放进烤箱内烘干($50\text{ }^{\circ}\text{C}$),刚开

始烘干时,每间隔 5 h 称量一次,当含水率与初始含水率之差小于 10% 时,每间隔 1 h 称量一次,当误差绝对值小于 0.5% 时,认为完成由湿到干的过程。反复循环,直至干湿循环次数完成。

(5) 直剪试验:采用直剪环刀对干湿循环后的试样进行取样,取样完毕后立即进行室内快剪试验,操作步骤均严格按 JTG E40—2007《公路土工试验规程》的要求执行。

(6) 渗透试验:采用渗透环刀对干湿循环后的试样进行取样,取样完毕后立即进行变水头渗透试验,操作步骤均严格按 JTG E40—2007《公路土工试验规程》的要求执行。

3 试验结果与分析

3.1 抗剪强度特性

(1) 抗剪强度变化规律

干湿循环条件可导致土体抗剪强度劣化,进而影响路堤稳定性,需对预崩解炭质泥岩抗剪强度特性进行研究。

测试荷载及干湿循环作用后预崩解炭质泥岩的抗剪强度,可得到各组试样的剪应力—剪切位移($\tau-\delta$)曲线,限于篇幅,仅取典型试样(试验编号 T1)的试验结果进行分析,如图 2 所示。

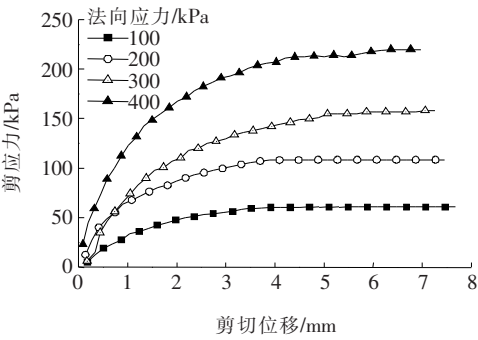


图2 T1 试样剪应力—剪切位移曲线

由图 2 可知:荷载及干湿循环作用后的预崩解炭质泥岩的剪切位移随剪应力增大不断增加,且其增长速率不断增大。剪应力—剪切位移曲线为平缓、光滑的曲线,无波动状态,亦无应变软化阶段。

通过试样的剪应力—剪切位移关系曲线能够获取各组预崩解炭质泥岩的抗剪强度值,见表 2。

由表 2 可知:① 各组预崩解炭质泥岩的抗剪强度与法向应力呈正相关关系,随法向应力增加而增大;② 对比 T1~T4 的数据,循环时间及次数相同时,预崩解

炭质泥岩的抗剪强度随竖向荷载的增加而增大;③ 对比 T5~T8 的数据,在竖向荷载及循环次数不变的情况下,抗剪强度随循环时间的增加而逐渐增大;④ 对比 T9~T12 的数据,在竖向荷载及循环次数一定时,抗剪强度与循环次数呈负相关关系,随循环次数的增加而降低。

表2 预崩解炭质泥岩抗剪强度

试件编号	不同法向应力(kPa)下的抗剪强度/kPa			
	100	200	300	400
T1	60.5	108.1	157.0	219.5
T2	71.1	116.6	172.9	230.2
T3	73.1	130.5	175.0	234.3
T4	76.1	132.6	180.2	236.5
T5	76.4	136.7	181.4	238.6
T6	77.6	140.2	191.0	245.2
T7	79.4	142.0	189.9	240.7
T8	79.5	143.1	192.0	247.0
T9	102.4	168.6	242.9	302.2
T10	83.6	147.4	193.0	250.1
T11	79.4	143.2	192.0	247.5
T12	71.1	127.3	172.8	233.9

(2) 抗剪强度指标变化规律

内摩擦角(φ)和黏聚力(c)是表征土体抗剪强度的两个重要指标,通过抗剪强度—法向应力关系曲线可得到炭质泥岩的剪切强度指标。以 T1 试样试验数据为例,抗剪强度—法向应力关系曲线见图 3,利用 Origin8.0 对曲线进行拟合,可知 $c=4.8$ kPa, $\tan\varphi=0.5259$,得 $\varphi=27.7^\circ$ 。因此,可得各组试样的抗剪强度指标见表 3。

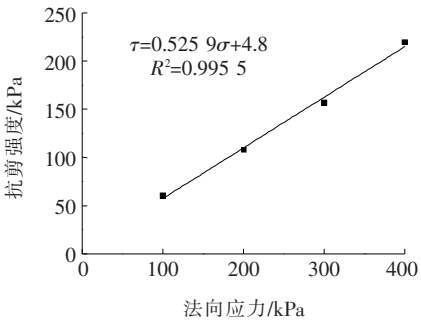


图3 T1 试样抗剪强度—法向应力关系曲线

由表 3 可知:在荷载及干湿循环作用后预崩解炭质泥岩的黏聚力变化范围为 4.8~35.6 kPa,内摩擦角的变化范围为 $27.7^\circ\sim44.9^\circ$ 。黏聚力的最小值为最

大值的 13.48%，降低幅度达 86.52%，内摩擦角的最小值为最大值的 61.69%，降低幅度仅 38.31%；因此，在荷载及干湿循环条件下预崩解炭质泥岩抗剪强度的变化主要是由于颗粒间黏聚力的变化而引起。

表 3 预崩解炭质泥岩的 c, φ 值

编号	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	编号	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
T1	4.8	27.7	T7	30.1	28.0
T2	14.3	28.1	T8	27.6	28.9
T3	21.2	27.8	T9	35.6	34.0
T4	24.2	27.9	T10	32.3	28.6
T5	25.5	28.0	T11	27.3	29.0
T6	25.1	29.0	T12	17.8	44.9

各因素对预崩解炭质泥岩黏聚力的影响见图 4。

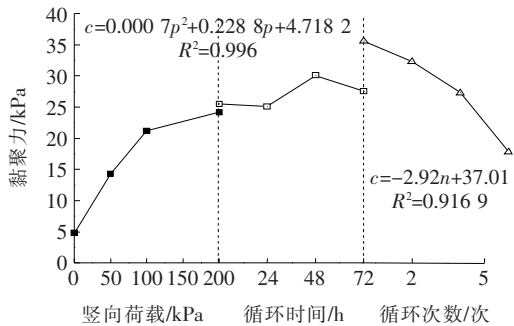


图 4 各因素与预崩解炭质泥岩黏聚力的关系曲线

由图 4 可知：预崩解炭质泥岩的黏聚力与竖向荷载和循环次数均具有密切联系，与循环时间无明显规律，具体规律为：黏聚力随竖向荷载先增大后趋于稳定，随循环次数的增加而不断减小。此外，拟合得到了黏聚力与竖向荷载、循环次数的函数关系式，相关系数均大于 0.90，可为预崩解炭质泥岩抗剪强度研究提供一定理论依据。

3.2 渗透特性

(1) 渗透试验原理

通过记录变水头管内水头变化高度与试验时间，再利用达西定律可求得土体渗透系数。由 Darcy 定律可知， t 时间内渗流量 Q 由式(1)、(2)决定：

$$Q = kAit \tag{1}$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \tag{2}$$

式中： k 为渗透系数； A 为试样断面面积； i 为水力梯度； Δh 为水头差； L 为渗流路径。

对式(1)两边进行微分：

$$dQ = kA \frac{\Delta h}{L} dt \tag{3}$$

设刻度管横断面为 $S, Q = Sh$ ，则 $dQ = Sdh$ ，再代入式(3)可得到式(4)：

$$Sdh = kA \frac{\Delta h}{L} dt \tag{4}$$

若 t_1 时刻变水头管内水头高度为 h_1, t_2 时刻为 h_2 ，那么对式(4)进行水头 h 和时间 t 的积分有：

$$\int_{h_2}^{h_1} \frac{1}{\Delta h} dh = \int_{t_2}^{t_1} \frac{kA}{SL} dt \tag{5}$$

当 $\Delta t = t_1 - t_2$ 时，有：

$$\ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{kA \Delta t}{SL} \tag{6}$$

则渗透系数：

$$k = \frac{SL}{A \Delta t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \tag{7}$$

(2) 渗透系数变化规律

各组预崩解炭质泥岩的渗透系数见表 4。

表 4 预崩解炭质泥岩渗透系数

编号	$k/(\times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$	编号	$k/(\times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$
T1	7.29	T7	1.19
T2	4.75	T8	0.87
T3	3.82	T9	0.27
T4	2.21	T10	0.35
T5	1.39	T11	0.79
T6	1.14	T12	4.59

由表 4 可知：各组预崩解炭质泥岩的渗透系数处于 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 量级，渗透性较低。

可根据表 4 中的数据得到预崩解炭质泥岩渗透系数随竖向荷载、干湿循环时间及次数的变化曲线(图 5)。

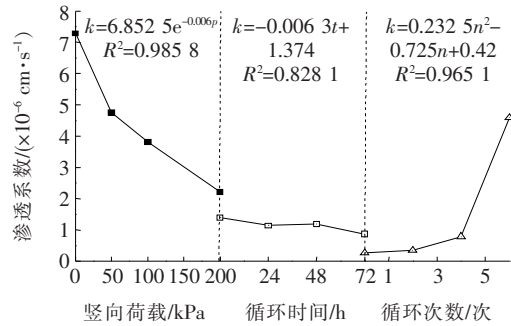


图 5 各因素与预崩解炭质泥岩渗透系数的关系曲线

由图 5 可知：渗透系数与竖向荷载及干湿循环时间呈负相关关系，而随循环次数的增加呈正相关关系，尤其当循环次数大于 4 次时，渗透系数急剧增加。此

外,拟合得到了预崩解炭质泥岩渗透系数与竖向荷载、循环时间及循环次数的函数关系式,相关系数均大于0.80,可为预测预崩解炭质泥岩渗透系数提供参考。

3.3 抗剪强度与渗透系数的关系

为进一步分析荷载及干湿循环条件下预崩解炭质泥岩抗剪强度与渗透系数的关系,根据表 2、4 可绘制抗剪强度与渗透系数的关系图,见图 6。为定量分析预崩解炭质泥岩抗剪强度与渗透系数的关系,对图 6 中的数据进行非线性拟合,对比各拟合模型发现幂函数拟合度最优,通用关系式为:

$$\tau = a + bk + cr^k \tag{8}$$

式中: τ 为抗剪强度 (kPa); k 为渗透系数 (1×10^{-6} cm/s); a 、 b 、 c 、 r 为拟合参数值,见表 5。

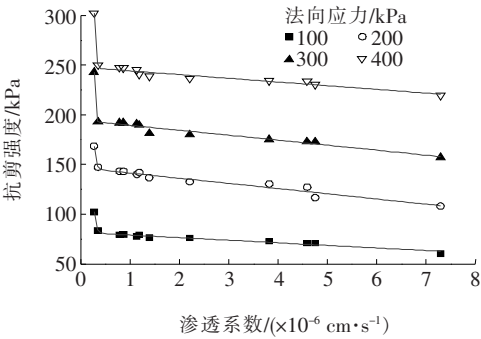


图 6 抗剪强度与渗透系数关系图

表 5 拟合参数值

法向应力/kPa	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i>	<i>R</i> ²
100	81.69	−2.59	2.00×10^4	9.84×10^{-12}	0.978 6
200	146.67	−5.22	4.06×10^4	9.96×10^{-13}	0.957 4
300	194.44	−5.00	5.82×10^8	6.62×10^{-27}	0.980 3
400	247.75	−3.71	5.40×10^6	1.69×10^{-15}	0.981 7

由图 6 可知:预崩解炭质泥岩干湿后的抗剪强度与渗透系数有明显的非线性关系,各法向应力下抗剪强度先随渗透系数的增加急剧降低,随后抗剪强度仍然随渗透系数增加而降低,但降低的速率大大减小。由表 9 可知:各法向应力下关系式的相关系数均高于 0.90,表明拟合度较高,式(8)可用于预测荷载与浸水条件下预崩解炭质泥岩干湿循环后的抗剪强度及渗透系数,为数值计算及工程设计提供一定参考依据。

4 结论

研究了竖向荷载及干湿循环对预崩解炭质泥岩抗

剪强度与渗透特性的影响,得到以下结论:

- (1) 预崩解炭质泥岩的抗剪强度与法向应力呈正相关关系,且抗剪强度随竖向荷载、循环时间的增加而增大,随循环次数的增加而降低。
- (2) 荷载及干湿循环条件下预崩解炭质泥岩抗剪强度的变化主要是由于颗粒间黏聚力的变化而引起。
- (3) 渗透系数与竖向荷载及干湿循环时间呈负相关关系,而随循环次数的增加呈正相关关系,当循环次数大于 4 次时,渗透系数急剧增加。
- (4) 拟合预崩解炭质泥岩抗剪强度与渗透系数的幂函数关系模型,可为炭质泥岩路堤稳定性数值计算及工程设计提供一定参考。

参考文献:

[1] 许中杰,程日辉,李飞,等. 粤西高明地区晚三叠世小坪组元素地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010(2).

[2] 曾铃,付宏渊,贺炜,等. 三轴 CT 条件下预崩解炭质泥岩路堤填料的细观试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(3).

[3] Brunetti A, Mazzanti P. Monitoring an Unstable Road Embankment for Public Safety Purposes by Terrestrial SAR Interferometry [C]. International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2015.

[4] 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(9).

[5] Lu N, Wayllace A, Oh S. Infiltration—Induced Seasonally Reactivated Instability of a Highway Embankment Near the Eisenhower Tunnel, Colorado, USA[J]. Engineering Geology, 2013, 162(14): 22—32.

[6] 毛瑞,杨和平. 不同剪切速率下黏土的抗剪强度[J]. 中外公路, 2018(1).

[7] 吴珺华,袁俊平. 干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013(S1).

[8] Vanapalli S K, Fredlund D G. Comparison of Different Procedures to Predict Unsaturated Soil Shear Strength [J]. Geotechnical Special Publication, 2000, 287(99): 195—209.

[9] Ulusay R, Karakul H. Assessment of Basic Friction Angles of Various Rock Types from Turkey under Dry, Wet and Submerged Conditions and Some Considerations on Tilt Testing[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2015, 28(4): 1—17.

[10] 陈伟,李文平,刘强强,等. 陕北非饱和重塑红土渗透特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2014(1).