

饱和度对砾质土性质影响三轴试验研究

钱彬^{1,2},朱俊高^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:对糯扎渡土石坝心墙砾质土料进行了不同饱和度条件下三轴不固结不排水剪切试验,对非饱和砾质土的应力应变及强度特性进行了研究。结果表明,相同围压下,试样的变形模量随着含水率增大而逐渐减小;试样的强度随着含水率的增加而减小;试样的粘聚力和内摩擦角均随含水率增加而线性减小,且粘聚力比内摩擦角减小幅度较明显。

关键词:砾质土;三轴试验;饱和度;变形模量;抗剪强度

中图分类号:TU411.3

文献标识码:A

Research on influence of degree of saturation on behavior of gravelly soil in triaxial tests

QIAN Bin^{1,2}, ZHU Jun-gao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: The core wall material of gravelly soil of Nuozhadu earth rock dam under different degree of saturation conditions triaxial undrained shear test was carried out to research the stress-strain behavior of unsaturated gravelly soil. Analysis of the experimental curves shows that the deformation modulus of specimen decreases when water content increases under the same confining pressure; the strength of gravelly soil decreases when water content increases; cohesion and internal friction angle of specimen decreases linearly with increasing water content, and the value of cohesion decreases more obvious than the value of the internal friction angle.

Key words: gravelly soil; triaxial test; degree of saturation; deformation modulus; shear strength

砾质土在高土石坝工程中得到广泛应用^[1]。砾质土作为心墙防渗料,经常处于非饱和状态,对于非饱和土来说,它的强度不仅受应力影响,而且与其饱和度有关。前人大都是研究了饱和度对于粘土等强度的影响,很少对砾质土进行试验研究^[2-6]。在对砾质土工程特性研究上,国内学者有从颗粒组成、形状、性质及密度等影响因数对砾质土的抗剪强度进行了研究^[7-10],却很少有研究饱和度的变化对砾质土强度的影响。

本文通过对某非饱和砾质土进行了不同含水率即不同饱和度的常规三轴不固结不排水试验,对砾质土的应力应变及强度特性进行分析,研究

含水率的变化对非饱和砾质土抗剪强度参数的影响,对实际施工过程中具有一定的意义。

1 试验方案

1.1 试验仪器

本文试验采用了高压中型应变控制式三轴仪,三轴试样尺寸为,直径 $D = 101 \text{ mm}$,高度 $H = 200 \text{ mm}$ 。由于试样是非饱和的,试验中试样排出的水量不能用来计算体积应变,所以采用双层压力室,来量测体积变化,如图1所示。由于内压力室和外压力室是相通的,可以保证施加同一压力

时,内压力筒壁不会发生膨胀,即内压力室容积不变,就可以通过内压力室排出水量来确定体积变化,即用内玻璃管中水柱的升降可读出试样的体积变化值,这样就可以得出体积变化值。

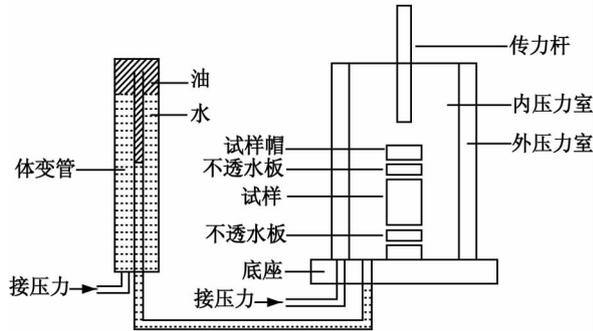


图1 双压力室体变量测系统示意图

Fig.1 Diagram of double pressure chamber strain measurement system

1.2 试验材料与试验方法

试验所采用的砾质土是取自糯扎渡料场可采厚度范围的土料。砾质土颗粒级配见表1,砾质土料中细粒土的基本物理性质指标为:土粒比重 $G_s = 2.75$,液限 $\omega_L = 29.1\%$,塑限 $\omega_p = 20.2\%$,塑性指数 $I_p = 9$,属低液限粉土。

表1 试样颗粒级配

Tab. 1 Grain composition of specimen

土的粒径 /mm	5 ~ 2	2 ~ 0.25	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.005	< 0.005
含量 /%	22.1	9	12.7	33.7	22.5

表2 试样含水率和饱和度

Tab. 2 Water content and degree of saturation of specimen

试样	含水率 $w/\%$	饱和度 $S_r/\%$
A	14	54.4
B	16	66.0
C	20	90.4
D	22	94.9

为了研究饱和度对砾质土变形及强度性质的影响,本文分别对糯扎渡心墙料砾质土进行了4种含水率试样的试验,对应含水率分别为14%、16%、20%和22%,对应试验编号为A、B、C和D,见表2。对试样A、B、C和D分别进行4组不同围压下的三轴不固结不排水试验,围压分别为200、500、1 000和1 500 kPa,来研究含水率的变化对非饱和砾质土强度的影响。制样采用分层击实法,

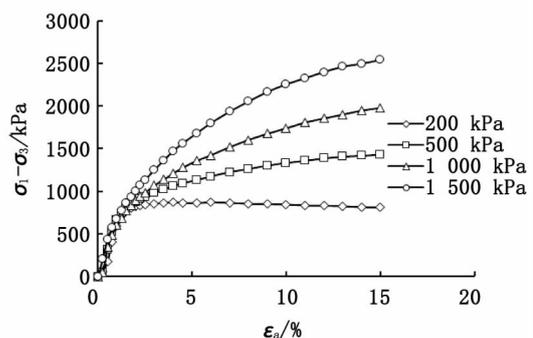
试验采用应变控制方式,剪切过程中,剪切速率为0.731 7 mm/min,直到轴向应变为15%结束。具体试验过程按照《土工试验方法标准》的相关要求操作^[11]。

2 试验结果与分析

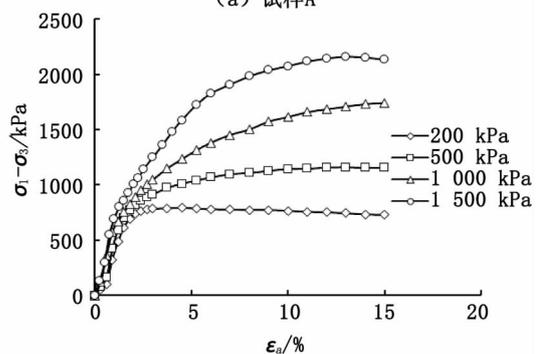
2.1 应力应变特性曲线分析

试验结果如图2所示,从图中可以看出,偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ϵ_a 关系曲线变形趋势相似,在很短的阶段内,即开始为弹性阶段,应力应变呈线性变化;随着应变的不断增大,应力应变呈非线性关系^[12-13];同一含水率下,峰值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 随着围压 σ_3 的增加而增加;在同一级围压下, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 随着含水率的增大而逐渐降低。在低含水率情况下,应力应变关系表现出应变软化现象,在高含水率下则表现出应变硬化现象;在高含水率20%的试验,在四个围压作用下,应力-应变均表现出应变软化现象。

一般情况下,土工结构或地基的变形在1%以内。为了进一步研究饱和度对砾质土变形性质的影响,作者整理出应变1%范围内的变形模量(以 E_1 表示),并分析其随围压的变化规律。根据试验数据整理得到不同饱和度试样的 E_1 与 σ_3 的关系,如图3所示。



(a) 试样A



(b) 试样B

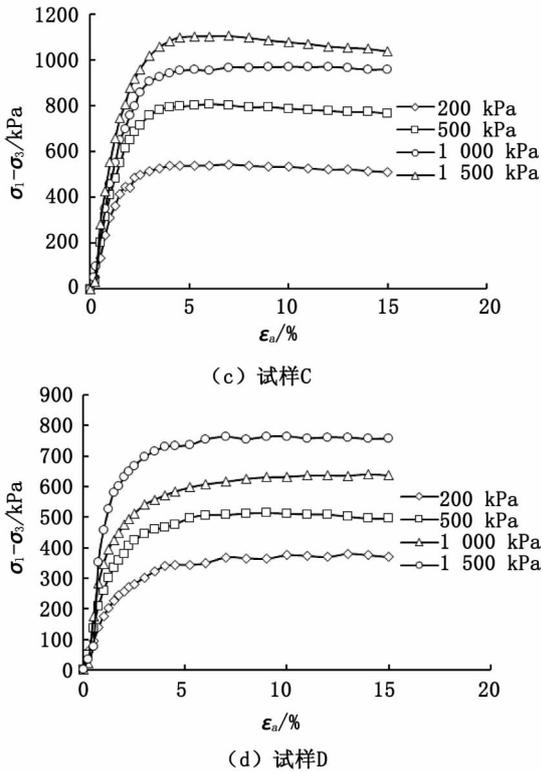


图2 不同围压下三轴试验的应力-应变关系
Fig.2 Stress strain behavior during tri-axial compression tests under different confining pressures

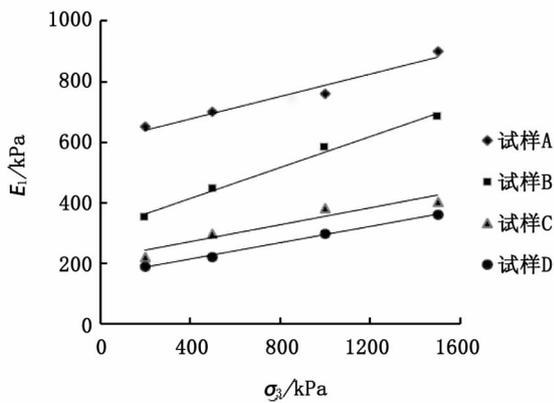


图3 变形模量与围压的关系
Fig.3 The curve of deformation modulus and confining pressures

从图3可以看出,在同一饱和度条件下,随着围压增大,试样的变形模量也增大;而在同一围压下,变形模量随着饱和度的增大而逐渐减小。随着围压的增大,试验的变形性状也发生明显的改变,即变形曲线逐渐由软化型过渡到硬化型,说明破坏类型逐渐由脆性破坏转变为延性破坏。饱和度越大、围压越高,土体塑性变形越明显。

作者将图3中直线延伸,得到截距数据,取名为初始模量(E_2),为试样在无围压状态下的变形

模量。整理出 E_2 与饱和度的关系,并用幂函数进行拟合,如图4所示。图中可以看出,随着饱和度的增大, E_2 逐渐减小。试样A和试样B,饱和度下降约为12%, E_2 具有较大幅度的降低,而在饱和度较高的时候,如试样C、D,随着饱和度的增大, E_2 降低幅度相对平缓。低饱和度的时候, E_2 值较大,土中水的含量较少,土体受力发生变形主要由土骨架来承担,不易被压缩变形,强度较大;而在高饱和度的时候,土中水含量较大,孔隙水被压缩,变形较大,强度较小。在饱和度60%之前,每降低10%, E_2 的降低幅度明显大于60%。在实际工程中,对于砾质土饱和度的控制,对填筑施工具有一定的实际意义。

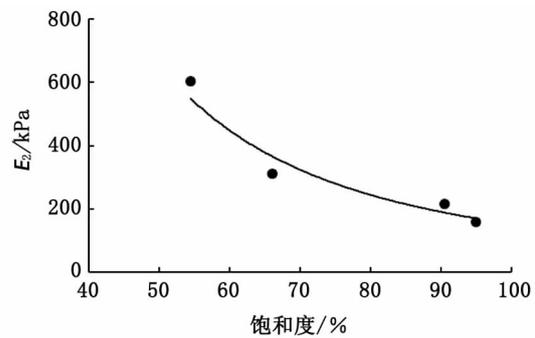


图4 变形模量与饱和度的关系
Fig.4 The curve of deformation modulus and degree of saturation

2.2 强度分析

根据实验数据得出试样在不同含水率下的强度摩尔圆,并得到抗剪强度参数,整理数据如表3。表中得出试样的强度随着含水率的增大而逐渐减小,抗剪强度受含水率的变化影响非常明显,UU状态下三轴剪切试验得到的结果,具有良好的规律性,且UU的摩擦角最小,小于CD试验的结果,与文献[14]中相符合。

表3 含水率与粘聚力及内摩擦角的关系

Tab. 3 Water content relationships with cohesion and friction angle

试样	C/kPa	$\varphi/^\circ$
A	269.3	22.5
B	228.1	19.9
C	179.8	11.5
D	160.7	6.3

为了分析非饱和砾质土的抗剪强度与含水率的关系,对抗剪强度参数与含水率、饱和度数据进行整理,得到结果如图5、图6所示。从图中我们可以看出:在试验的不同含水率条件下,抗剪强度

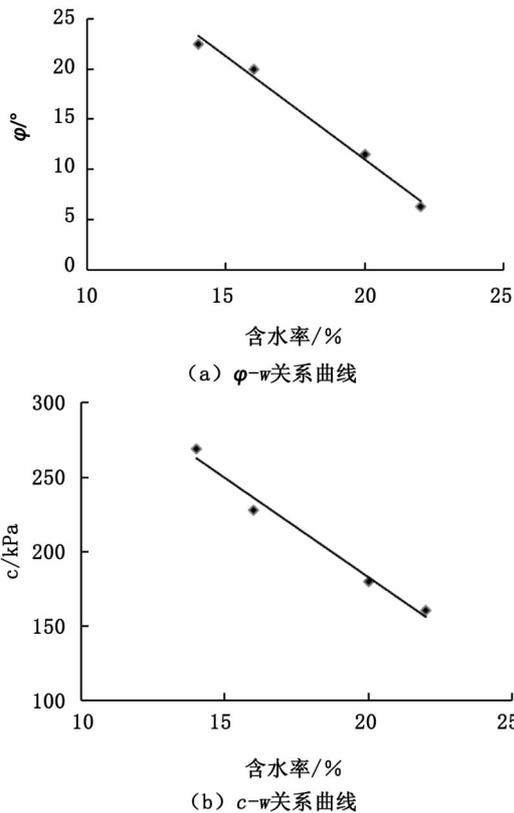


图5 抗剪强度参数与含水率的变化关系
Fig.5 The curve of water content and strength parameters

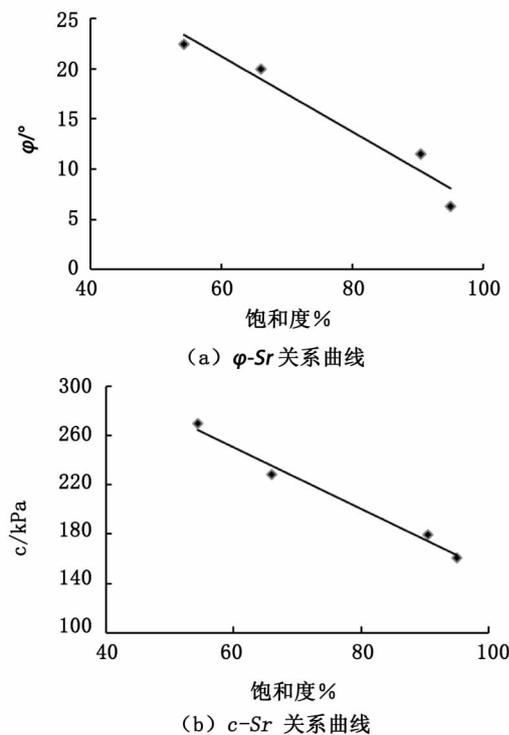


图6 抗剪强度参数与饱和度的变化关系
Fig.6 The curve of degree of saturation and strength parameters

随着含水率的增大而减小,但减小的幅度不一样;粘聚力的变化幅度较大,内摩擦角的变化幅度较小;当试样的含水率较高时,试样的饱和度较高,在高压下,由于气体体积压缩有限而造成孔隙水压力的产生,导致围压下峰值强度相近,从而强度减小。所以在大坝心墙实际填筑过程中,如果含水率过高,心墙强度会降低,并且由于心墙料透水性较差,里面的水不易排出,使心墙料很难被压实,将会降低大坝的稳定性,所以控制心墙的含水率非常重要。

3 结论

1) 在不同含水率条件下,砾质土的应力应变表现为非线性关系。在低含水率下,低围压下的应力应变曲线的形态表现为应变软化型,在高含水率,高围压下则表现出硬化特征。

2) 在同一含水率条件下,砾质土的变形模量随着围压的增大逐渐增大,而在同一围压下,随着含水率的增大,砾质土的变形模量逐渐减小。

3) 非饱和砾质土的粘聚力和内摩擦角均随着含水率的增加而线性减小,且粘聚力比内摩擦角的减小幅度较明显。

参考文献:

[1] 刘振飞. 水利水电工程设计与施工新技术全书:第一卷 [M]. 北京:海潮出版社,2001.

[2] 熊承仁,刘宝琛,张家生,等. 重塑非饱和粘土抗剪强度参数与饱和度的关系研究[J]. 岩土力学,2003(22): 195-198.

[3] 杨和平,张锐,郑健龙. 非饱和膨胀土总强度指标随饱和度变化规律[J]. 土木工程学报,2006(4):58-62.

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

[5] 凌华,殷宗泽,蔡正银. 非饱和土的应力-含水率-应变关系试验研究[J]. 岩土力学,2008(3):651-655.

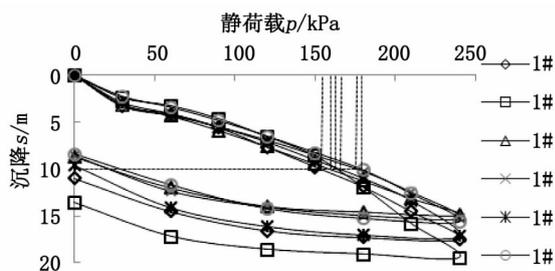
[6] 吕永高,郑召典. 饱和度对土的三轴不固结不排水试验强度指标的影响研究[J]. 岩土工程界,2009(6):46-48.

[7] 郭敏霞,孙刚锋. 邓肯模型对砾质土在高压下变形描述的适用性[J]. 西北水资源与水工程,1994(4):16-23.

[8] 卢廷浩,钱玉林. 宽级配砾质土的应力路径试验及其本构模型验证[J]. 河海大学学报,1996,24(2):74-79.

[9] 饶锡保,何晓民,刘鸣. 粗粒含量对砾质土工程性质影响的研究[J]. 长江科学院院报,1999,16(11):21-25.

(下转第 64 页)

图6 p - s 关系曲线Fig.6 Relation curve between p and s

5 结论

1)通过对试验区地下水位的观测,与常规真空井点降水强夯工艺相比,水气分离集成井降水强夯法降水深度可达地表以下5~6m,突破了深层加固因降水深度限制的瓶颈,在夯击过程中使夯击能对土体的加固深度、效果明显提高。

2)从表面沉降监测结果看,常规真空井点降水强夯工艺的加固效果虽然能达到设计所需的各项技术指标,但是工后沉降还是比水气分离集成井降水强夯工艺要大。

3)与常规真空井点降水强夯工艺相比,采用水气分离集成井降水技术夯后孔隙水压力的消散仅为1~2天,时间明显少于前者,而且由于工艺简单、投入设备及人力较少,可以大大加快软弱地基加固处理速度。

4)现场检测试验结果对比表明,采用水气分离集成井降水强夯工艺对软土地基进行加固,在加固深度、土体强度和地基承载力方面均有较大幅度的提升,其中第二层粉质粘土标贯击数由原来的最低2击提高到了最低8击,平板载荷试验

地基承载力特征值最小值达到165 kPa,地基加固效果明显。

参考文献:

- [1]周健,史旦达,贾敏才,等.低能量强夯法加固粉质黏土地基试验研究[J].岩土力学,2007,28(11):2359-2364.
- [2]周健,张健,姚浩.真空降水联合强夯法在软弱路基处理中的应用研究[J].岩土力学,2005,26(Z1):198-200.
- [3]周健,曹宇,贾敏才,等.强夯-降水联合加固饱和软粘土地基试验研究[J].岩土力学,2003,24(3):376-380.
- [4]刘嘉,罗彦,张功新,等.井点降水联合强夯法加固饱和淤泥质地基的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11):2222-2227.
- [5]徐敏生.低能量强夯结合轻型井点降水地基加固的试验研究[J].工程勘察,2010(Z1):472-476.
- [6]林佑高,林国强.井点降水联合低能量强夯法在某码头工程中的应用[J].中国港湾建设,2011,176(5):35-39.
- [7]刘宝臣,谢艳华,张炳晖,等.管井降水预压联合“轻夯多遍”软土地基处理试验[J].建筑结构,2011,41(1):118-121.
- [8]张群,吴名江,郑钰昊,等.管井降水动力联合预压固结法加固福安某厂软土地基的研究[J].路基工程,2012,162(3):14-16.
- [9]兰韡,张英英,沈驰.超强真空降水井研究与应用[J].工程勘察,2013(Z1):86-92.
- [10]冯建斌.采用“高真空降水加强夯”处理吹填砂地基[J].山西建筑,2014,40(3):81-82.

(责任编辑 王利君)

(上接第59页)

- [10]谭继文.宽级配砾质土在土石坝心墙防渗中的应用与研究[D].大连:大连理工大学,2001.
- [11]SL 237-1999,土工试验规程[S].
- [12]郭庆国.关于粗粒土抗剪强度特性的试验研究[J].水利学报,1987(5):59-66.

- [13]张婉璐,谢军,徐锴,等.不同初始条件下高液限土的力学特性研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(4):8-11.

- [14]保华富,沈蓉,李仕胜,等.风化料掺砾作为高坝心墙防渗体的研究[J].云南水力发电,2007(4):27-32.

(责任编辑 王利君)