

DOI: 10.11779/CJGE201704020

加卸载条件下吸力对黄土变形特性影响的试验研究

郭楠¹, 陈正汉^{1, 2}, 高登辉¹, 周勇¹, 杨校辉¹, 扈胜霞³

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 后勤工程学院建筑工程系, 重庆 400041; 3. 延安大学土木工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 为了探讨基质吸力和净围压对黄土的变形-强度及卸载-再加载模量的影响, 用非饱和土三轴仪对原状 Q₃ 黄土及其重塑土共做了 3 组 27 个试验, 即 9 个控制吸力和净围压等于常数的原状 Q₃ 黄土的三轴固结排水剪切试验、9 个原状 Q₃ 黄土和 9 个重塑 Q₃ 黄土的控制吸力和净围压等于常数的三轴固结排水卸载-再加载剪切试验。研究表明: 基质吸力和净围压均对试样的强度及变形特性有显著影响; 原状 Q₃ 黄土的偏应力-应变曲线随净围压的增大从理想弹塑性型演变为硬化型, 因其结构性导致偏应力-应变曲线的初始阶段存在交叉现象, 试样一直处于剪缩状态; 重塑试样在净围压较小时由剪缩逐渐变为较强的剪胀, 在净围压较大时则只发生剪缩; 表观凝聚力、切线杨氏模量和卸载-再加载模量均随着吸力的增大而增大; 而吸力对有效内摩擦角及参数 n (原状 Q₃ 黄土的初始杨氏模量随净围压增大而变化的指数)、 n_{ur} (原状 Q₃ 黄土的卸载-再加载模量随净围压增大而变化的指数) 和 n'_{ur} (重塑 Q₃ 黄土的卸载-再加载模量随净围压增大而变化的指数) 的影响很小, 皆可视为常数。基于试验研究结果, 提出了考虑吸力和净围压影响的表观凝聚力、切线杨氏模量和卸载-再加载模量的修正计算公式, 完善了非饱和土的增量非线性模型。

关键词: 非饱和黄土; 基质吸力; 剪胀; 卸载-再加载试验; 卸载-再加载模量; 变形参数; 强度参数

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)04-0735-08

作者简介: 郭楠(1987-), 女, 博士研究生, 主要从事非饱和土与特殊土力学及其工程应用研究。E-mail: guonan8810@126.com。

Experimental research on influences of suction on deformation characteristics of loess under unloading-reloading conditions

GUO Nan¹, CHEN Zheng-han^{1, 2}, GAO Deng-hui¹, ZHOU Yong¹, YANG Xiao-hui¹, HU Sheng-xia³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Department of Architectural

Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China; 3. School of Civil Engineering, Yan'an University,

Yan'an 716000, China)

Abstract: In order to explore the influences of matrix suction and net confining pressure on the deformation-strength and unloading-reloading modulus of loess, three groups of 27 tests are performed using the unsaturated triaxial apparatus for undisturbed Q₃ loess and remoulded loess, namely, 9 triaxial consolidated drained shear tests on undisturbed Q₃ loess under controlled suction and net confining pressure, 9 unloading-reloading triaxial tests on undisturbed Q₃ loess and 9 unloading-reloading triaxial tests on remoulded loess under controlled suction and net confining pressure. The research results show that the matric suction and net confining pressure have great influences on the strength and deformation characteristics of the soils. The behavior of deviatoric stress-strain curve of the undisturbed Q₃ loess turns from the ideal elastic-plastic model into hardening type, and the curves cross at the initial stages because of their constitutive property, and the volume of the samples decreases during shearing. And the behavior of the remoulded samples exhibits gradually strong dilatancy when the net confining pressure is small, and shear contraction only occurs when the net confining pressure is larger. Apparent cohesion, tangent Young's modulus and unloading-reloading modulus increase with the increase of the suction. The influences of suction on the friction angle and parameter n (the index that the initial Young's modulus of undisturbed Q₃ loess changes with the increase of net confining pressure), n_{ur} (the index that the unloading-reloading modulus of undisturbed Q₃ loess changes with the increase of net confining pressure), and n'_{ur} (the index that the unloading-reloading modulus of remoulded Q₃ loess changes with the increase of net confining pressure) are insignificant and can be regarded as constants, respectively.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11672330, 11272353); 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2014KTDZ03-01)

收稿日期: 2016-01-06

***通讯作者** (E-mail: chenzhenghan47@163.com)

and then, the modified formulae for the apparent cohesion, tangent Young's modulus and unloading-reloading modulus are proposed based on the test results considering the influences of suction and net confining pressure, so the incremental nonlinear model for unsaturated soils is improved.

Key words: unsaturated loess; matric suction; dilatancy; unloading-reloading test; unloading-reloading modulus; deformation parameter; strength parameter

0 引言

近年来,随着西部大开发战略的实施和城市化建设的推进,黄土地区的高层建筑基坑、地下商场、地铁、隧道等开挖工程越来越多,土体的变形和稳定性问题也随之而来。为了反映开挖卸载对土的变形的影响,邓肯-张模型采用了卸载一再加载模量不同于初始加载模量的方法,通过常规三轴试验的加卸载曲线确定其卸载模量。

国内外已有一些学者对黄土、黏土及砂土的卸载-再加载力学特性进行了研究,也取得了一些成果^[1-13]。李广信等^[1-2]认为,卸载体缩源于土的可恢复剪胀变形,在剪胀过程中土颗粒一般是从低势能状态向高势能状态变化,处于不稳定状态,当剪应力消除时,有很大部分的剪胀变形将会恢复。张孟喜等^[6]通过室内非常规三轴卸载试验,对受施工卸载扰动的黄土的变形与强度特性进行了研究。叶朝良等^[7]通过大量试验分析了原状黄土的各向异性及卸载变形特征。陈存礼等^[8]研究了不同应力路径对固结排水条件下饱和和原状黄土变形及强度特性的影响。黄茂松等^[9]基于结构体损伤概念和非饱和土力学,利用边界面塑性理论,提出了一个可以描述循环荷载作用下非饱和土力学特性的弹塑性本构模型。但是,上述研究成果均未充分考虑基质吸力的影响,众所周知,基质吸力对非饱和黄土强度及变形特性的影响不可忽略。

陈正汉等^[10]在1999年提出了非饱和土的增量非线性模型,涉及土骨架变形和水量变化两个方面,是邓肯-张模型的合理推广^[11]。但该模型没有给出非饱和土的卸载-再加载模量随吸力的变化规律,因而不能用于开挖和基坑变形分析。目前用于有限元计算的回弹模量及参数常按经验取值,缺乏试验依据。

本文以延安新区的原状Q₃黄土及其重塑土为对象,用非饱和土三轴仪进行了控制基质吸力和净围压的三轴排水剪切试验和卸载一再加载试验,揭示有关规律,为完善非饱和土的增量非线性模型及其工程应用提供方便。

1 研究方法

1.1 试验设备与土样

试验设备采用改进的非饱和土三轴仪,其构造在文献[14]中已介绍,此处不再详述。试验用土取自延

安新区工地现场,为原状 Q₃ 黄土及其重塑土,该土的基本物理性质如表 1 所示。

表 1 土样的基本物理指标

Table 1 Physical parameters of soil samples				
土颗粒相对密度 d_s	塑限 $w_p / \%$	液限 $w_L / \%$	最大干密度 度 ρ_{dmax}	最优含水率 率 $w_{op} / \%$
2.71	17.3	31.1	1.91	12.5

由于原状试样的初始含水率较低,初始吸力较高。因此试样在切土盘上削完之后,将试样的初始饱和度统一配置为 80%。测得原状试样的干密度为 1.33 g/cm³,按计算结果加入相应的水量,为使水份均匀扩散,所加水用注射器分几次缓慢均匀滴入试样中,在保湿罐中放置 72 h 以上。

考虑到延安新区填土的干密度按 88% 的压实度控制,故重塑试样按照 80% 的初始饱和度、1.68 g/cm³ 的干密度(相应于压实度 88%)和相应的含水率计算出每个土样所需湿土的质量,然后用专门的制样模具在千斤顶上将湿土分五次均匀压实,分层加土时每次加土之前必须把上层的土琢毛,使层间结合良好。试样的直径为 39.1 mm,高度为 80 mm。

1.2 试验方案

共做了3组27个三轴试验,即9个控制吸力和净围压等于常数的原状 Q₃黄土的三轴固结排水剪切试验、9个原状 Q₃黄土和9个重塑 Q₃黄土的控制吸力和净围压等于常数的三轴固结排水卸载-再加载剪切试验。其中,第一组试验用于研究基质吸力和净围压对原状 Q₃黄土的变形与强度的影响,第二组和第三组试验分别用于研究基质吸力和净围压对原状 Q₃黄土及其重塑土的卸载模量的影响。

3组试验的净围压($\sigma_3 - u_a$)均分别控制为100, 200, 300 kPa,基质吸力($u_a - u_w$)均分别控制为50, 100, 200 kPa。其中 σ_3 是总围压, u_a 和 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力。固结稳定的标准为2 h 内体变和排水均小于0.01mL,固结历时40 h 以上;剪切速率选用0.0072 mm/min;每个试验共持续75 h 左右。

在进行卸载-再加载试验时,首先进行三轴固结排水剪切试验,当轴向荷重施加到约为破坏轴向荷重的70%时进行第一次卸载,卸载到约50 kPa 时进行第二次加载;加载到约为破坏轴向荷重的90%时再卸载,卸载到约50 kPa 再加载。

2 原状 Q₃ 黄土的三轴固结排水剪切试验结果分析

2.1 应力 - 应变性状分析

原状Q₃黄土的控制基质吸力和净围压为常数的三轴固结排水剪切试验的偏应力 - 轴向应变曲线和轴向应变 - 体应变关系曲线如图1所示。从图1可见, 在净围压较小时 (如 $\sigma_3 - u_a = 50$ kPa) 偏应力 - 轴向应变曲线接近线性弹塑性; 而当净围压较大时 ($\sigma_3 - u_a \geq 100$ kPa) 偏应力 - 轴应变曲线均表现为硬化型。相同吸力作用下, 净围压越大, 强度越大。相同净围压作用下, 吸力越大试样的强度越大, 说明吸力对土样强度有着重要的影响。当轴向应变较小时, 偏应力 - 轴应变关系曲线有交叉现象, 这与黄土的结构性有关。这一点在文献[15]中亦有报道。

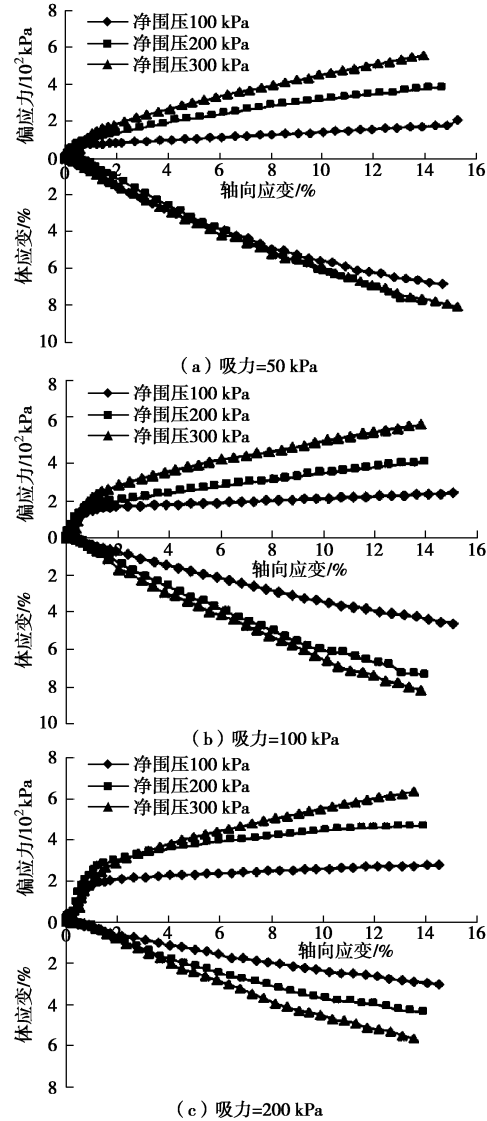


图 1 原状 Q₃ 黄土三轴剪切试验 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 1 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ and $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ of undisturbed Q₃ loess using triaxial shear tests

从图1中还可以看出: 试验过程中, 试样一直处于剪缩状态。当吸力较小时, 不同净围压下, 试样的体应变相差不大; 而当吸力较大时, 净围压越大, 试样的体应变越大。这也与原状黄土的结构性有关。

众所周知, 原状黄土具有较强的结构性, 对其偏应力 - 轴向应变曲线和体应变 - 轴向应变曲线都有影响。原状黄土的结构强度是否破坏取决于试样所受的应力状态, 包括净围压、吸力和偏应力的组合, 而不仅仅取决于净围压。若某个试样所受的应力状态不足以破坏原状黄土的结构强度, 则其偏应力 - 轴向应变曲线将高于所受应力状态能使结构强度破坏的试样的相应曲线, 不同试样的曲线就会发生交叉现象; 反之, 在各试样所受的应力状态都使原状黄土的结构强度破坏以后, 不同试样的曲线就不再有交叉现象。

2.2 吸力对原状 Q₃ 黄土强度和变形参数的影响

由于 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线上没有明显峰值点, 所以取轴向应变15%对应的应力为破坏应力。参照文献[10]对试验参数的处理方法, 得出土样相应的强度、变形参数, 将部分参数列于表2。其中 c 和 φ' 分别为土样的表观黏聚力和有效内摩擦角, E_i 为起始切线杨氏模量, 对非饱和土, 可参照 Kondner 的做法, 绘出 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg((\sigma_3 - u_a)/p_a)$ 的关系 (图2), 发现二者近似呈直线关系, 可表达如下:

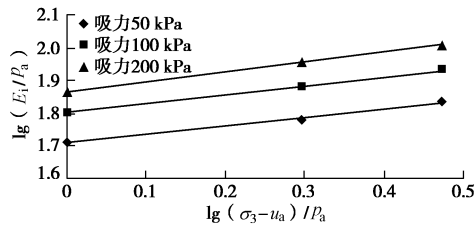
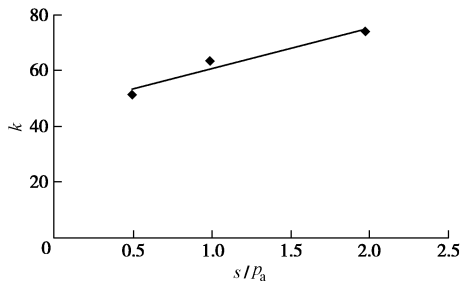
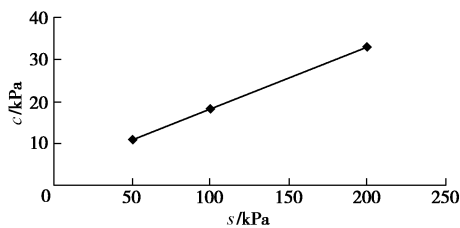
$$E_i = k p_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

式中 p_a 是大气压; k , n 为土性参数, 分别代表加载条件下的固结排水剪切试验的 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg((\sigma_3 - u_a)/p_a)$ 的直线关系的截距和斜率。

表 2 原状黄土单调加载三轴试验参数

Table 2 Parameters of triaxial tests on undisturbed loess under monotonic loading						
吸力/kPa	净围压/kPa	E_i /MPa	k	n	c	φ'
50	100	5.21	51.36	0.262	11.0	27.93
	200	6.12				
	300	6.98				
100	100	6.45	63.72	0.270	18.45	28.44
	200	7.69				
	300	8.70				
200	100	7.46	73.96	0.274	32.74	28.25
	200	9.21				
	300	10.42				

由表 2 可以看出, 相同净围压下, E_i 随着吸力的增加而增大, 参数 k 及表观黏聚力 c 也随着吸力的增加而增大。但是参数 n 和有效内摩擦角 φ' 随着吸力的增加却没有多大的变化。利用表 2 中数据, 分别绘出参数 k 随着吸力变化的关系图 (图 3) 及黏聚力 c 随着吸力变化的关系图 (图 4)。

图2 起始切线杨氏模量 E_t 随净围压的变化Fig. 2 Variation of initial tangent Young's modulus E_t with net confining pressure图3 参数 k 随吸力的变化Fig. 3 Variation of k with suction图4 黏聚力 c 随吸力的变化Fig. 4 Variation of c with suction

由图3、4可以看出,参数 k 及黏聚力 c 均随着吸力的增加呈线性增大趋势,运用最小二乘法拟合出关系式为

$$k = 14.53 \frac{s}{p_a} + 46.25, \quad (2)$$

$$c = 0.145s + 3.849. \quad (3)$$

结合式(1)和式(2),则初始切线杨氏模量 E_t 变为

$$E_t = \left(14.53 \frac{s}{p_a} + 46.25 \right) p_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{p_a} \right)^n, \quad (4)$$

式(4)即为考虑了吸力和净围压共同影响的初始切线杨氏模量计算公式。相应的切线杨氏模量的表达式可写为

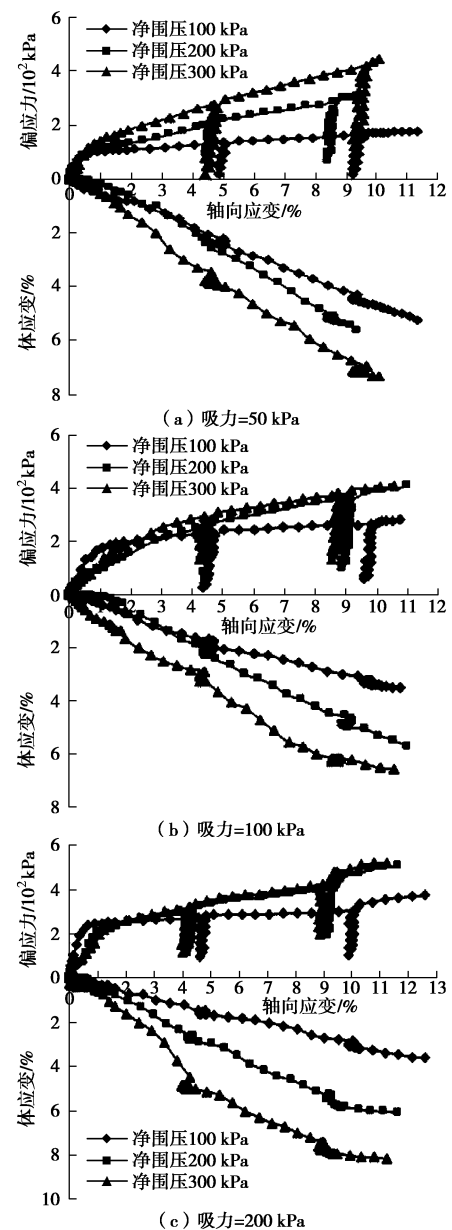
$$E_t = \left(14.53 \frac{s}{p_a} + 46.25 \right) p_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2(\sigma_3 - u_a) \sin \varphi} \right]^2, \quad (5)$$

式中,表观黏聚力 c 由式(3)表示。

3 原状 Q_3 黄土的卸载—再加载试验结果分析

3.1 应力—应变性状分析

图5是原状试样在控制基质吸力和净围压为常数下的卸载—再加载试验的偏应力—轴向应变关系曲线和偏应力—体应变关系曲线。从图5曲线可以看出,试样的卸载—再加载应力—应变曲线有明显的滞回圈,且随着应力水平的提高,滞回圈表现越明显(即滞回圈面积增大),两个滞回圈两交点的连线近似平行。在相同吸力下,净围压越大,滞回圈两交点的连线的斜率也越大。

图5 原状 Q_3 黄土的卸载—再加载试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线Fig. 5 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ and $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ of undisturbed Q_3 loess using unloading-reloading tests

从图5还可以看出, 卸载一再加载的滞回圈处所对应的体应变均有较大变化。且与单调加载试验相类似, 该组试样在整个试验过程中均表现为体缩。随着吸力的增加, 不同净围压下体应变的变化量也在增大。

3.2 吸力对原状 Q₃ 黄土卸载一再加载模量的影响

利用卸载和再加载时的轴向净应力改变量 $\Delta(\sigma_1 - u_a)$ 和轴向应变改变量 $\Delta\varepsilon_1$ 的比值求得卸载回弹模量, 按式 (6) 计算。

$$E_{ur} = \frac{\Delta(\sigma_1 - u_a)}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\varepsilon_1} \quad (6)$$

也可用滞回圈两交点连线的斜率作为卸载一再加载模量 E_{ur} 。从图5可见, 在相同吸力、相同净围压下卸载一再加载循环中, 两个滞回圈两交点连线的斜率近似相等, 所以可以近似认为在相同的吸力和净围压下, E_{ur} 是一个常数, 列于表3。由表3可知, 在相同吸力条件下, E_{ur} 随着净围压的增加而增加; 在相同净围压条件下, E_{ur} 随着吸力的增加而增加。图6是 E_{ur} 与净围压的关系 (双对数坐标), 可用直线近似, 其表达式为

$$E_{ur} = k_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{P_a} \right)^{n_{ur}} \quad (7)$$

式中 p_a 是大气压; k_{ur} , n_{ur} 为土性参数, 其几何意义分别代表卸载一再加载试验中 $\lg(E_{ur}/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3 - u_a)/p_a$ 直线的截距和斜率。

表 3 原状 Q₃ 黄土卸载一再加载试验参数

Table 3 Parameters of unloading-reloading tests on undisturbed Q₃ loess

吸力/kPa	净围压/kPa	E_{ur} /MPa	k_{ur}	n_{ur}
50	100	8.16	82.04	0.320
	200	10.73		
	300	11.48		
100	100	9.87	98.63	0.326
	200	12.79		
	300	14.08		
200	100	11.07	109.65	0.317
	200	14.08		
	300	15.38		

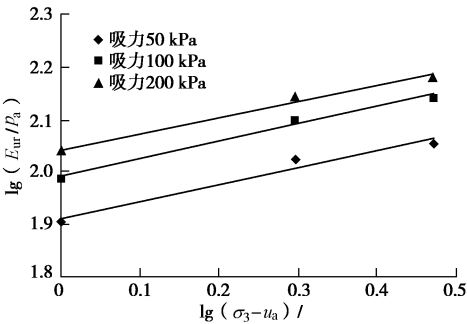


图 6 原状 Q₃ 黄土的卸载一再加载模量 E_{ur} 随净围压的变化
Fig. 6 Variation of unloading-reloading modulus E_{ur} of undisturbed Q₃ loess with net confining pressure

由表3还可以看出, 参数 k_{ur} 随着吸力的增加而增大, 而吸力对 n_{ur} 的影响不显著, 可取其平均值。利用表3中数据, 绘出参数 k_{ur} 随着吸力变化的关系图, 如图7所示。

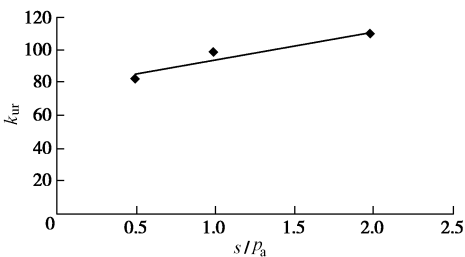


图 7 原状 Q₃ 黄土的参数 k_{ur} 随吸力的变化

Fig. 7 Variation of k_{ur} of undisturbed Q₃ loess with suction

由图 7 可以看出, k_{ur} 随着吸力的增加线性增加, 运用最小二乘法拟合出关系式为

$$k_{ur} = 17.53 \frac{s}{p_a} + 76.53 \quad (8)$$

结合式 (7) 和式 (8), 则卸载模量 E_{ur} 变为

$$E_{ur} = \left(17.53 \frac{s}{p_a} + 76.53 \right) p_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{p_a} \right)^{n_{ur}} \quad (9)$$

式 (9) 即为考虑了吸力和净围压共同影响的卸载模量计算公式。

4 重塑黄土的卸载一再加载试验结果分析

4.1 应力 - 应变性状分析

重塑黄土在控制基质吸力和净围压为常数下的卸载一再加载试验的偏应力 - 轴向应变曲线和偏应力 - 体应变关系曲线如图8所示。同原状土的卸载一再加载试验相似, 该组试验的卸载一再加载应力 - 应变曲线有更加明显的滞回圈, 两个滞回圈两交点的连线近似平行。

从图8可以看出, 相同吸力下, 当净围压较小时, 土样开始产生少量体缩, 后来体缩增加速率逐渐减小并表现出剪胀特性。围压较大时, 加载一再加载的整个过程中, 土样均表现为剪缩, 卸载或加载只对体缩的增量有影响, 但是整个趋势并没有发生变化。且围压越大, 剪缩发展的趋势就越强。

4.2 吸力对重塑 Q₃ 黄土卸载一再加载模量的影响

参照原状土卸载一再加载试验, 同理可计算出重塑土卸载一再加载试验变形参数, 列于表 4。由表 4 可以看出, 参数 k'_{ur} 随着吸力的增加而增大, 吸力对 n'_{ur} 影响不大, 可忽略不计。利用表 4 中数据, 分别绘出 $\lg(E'_{ur}/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3 - u_a)/p_a$ 的关系图, 如图 9, 以及参数 k'_{ur} 随着吸力变化的关系图, 如图 10 所示。

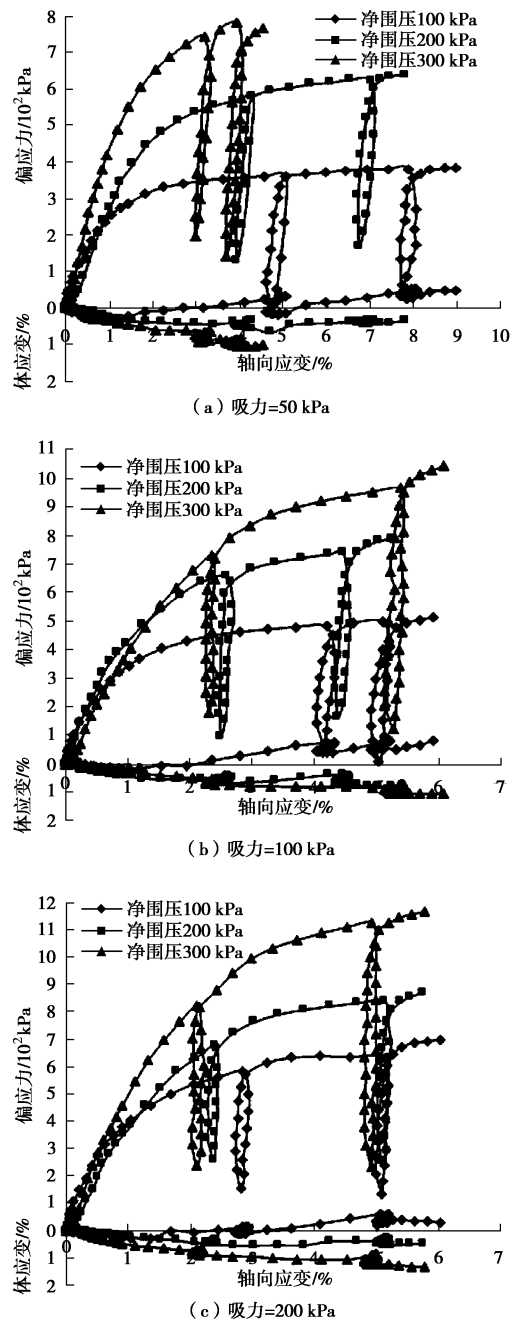


图 8 重塑黄土卸载—再加载试验 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 8 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ and $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ of remolded loess using unloading-reloading tests

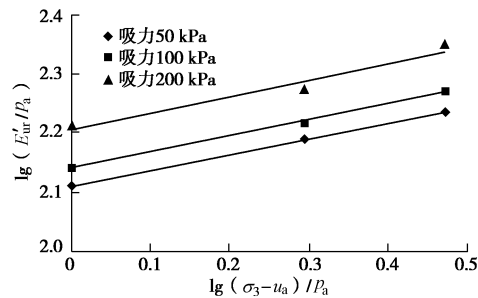


图 9 重塑黄土的卸载—再加载模量 E'_{ur} 随净围压的变化
Fig. 9 Variation of unloading-reloading modulus E'_{ur} of remolded loess with net confining pressure

表 4 重塑黄土卸载—再加载试验参数
Table 4 Parameters of unloading-reloading tests on remolded loess

吸力/kPa	净围压/kPa	E'_{ur} /MPa	k'_{ur}	n'_{ur}
50	100	13.04	129.12	0.263
	200	15.64		
	300	17.41		
100	100	14.10	139.32	0.269
	200	16.79		
	300	19.00		
200	100	16.50	161.44	0.277
	200	19.02		
	300	22.65		

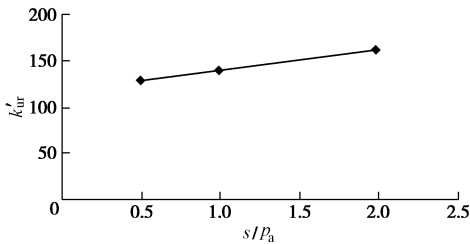


图 10 重塑土的参数 k'_{ur} 随吸力的变化
Fig. 10 Variation of k'_{ur} of remolded loess with suction
由图 10 可以看出, k'_{ur} 随着吸力的增加线性增加, 运用最小二乘法拟合出关系式为

$$k'_{ur} = 21.85 \frac{s}{p_a} + 118.06 \quad , \quad (10)$$

则卸载模量 E'_{ur} 变为

$$E'_{ur} = \left(21.85 \frac{s}{p_a} + 118.06 \right) p_a \left(\frac{\sigma_3 - u_a}{p_a} \right)^{n'_{ur}} \quad . \quad (11)$$

式 (11) 即为考虑了吸力和净围压共同影响的卸载模量计算公式。

对比表 2~4 可以看出, 经历了卸载—再加载以后, 土样的变形参数均有不同程度的增加, 这就说明, 对于卸荷工程, 在进行变形计算时不可直接应用单调加载情况下的相关参数, 否则将会带来较大误差。将 k_{ur} , k 及 k'_{ur} 的对比列于表 5。

表 5 变形参数对比 Table 5 Comparison of deformation parameters					
吸力/kPa	k_{ur}	k	k'_{ur}	k_{ur}/k	k_{ur}/k'_{ur}
50	82.04	51.36	129.12	1.60	0.64
100	98.63	63.72	139.32	1.55	0.71
200	109.65	73.96	161.44	1.49	0.68

由表5可以看出, 原状黄土 k_{ur} 值约为初次加载条件下 k 值的1.49~1.60倍; 原状黄土 k_{ur} 值约为重塑黄土 k'_{ur} 的0.64~0.71倍, 其主要原因是重塑土样的密度大于原状黄土。

5 结 论

(1)卸载—再加载试验条件下基质吸力和净围压均对试样的变形特性有显著影响;原状 Q₃ 黄土的偏应

力-应变曲线随净围压的增大从理想弹塑性型演变为硬化型,因其结构性导致偏应力-应变曲线的初始阶段存在交叉现象,试样一直处于剪缩状态;重塑试样在净围压较大时只发生剪缩,在净围压较小时由剪缩逐渐变为较强的剪胀。

(2) 基质吸力对非饱和黄土的强度特性、起始杨氏模量和卸载一再加载模量均有显著的影响,吸力越大,强度越高。表观黏聚力 c 及参数 k , k_{ur} 和 k'_{ur} 均随着吸力的增加而增大,而吸力对有效内摩擦角 φ' 及参数 n , n_{ur} 和 n'_{ur} 的影响不显著,可视为常数;提出了考虑吸力和净围压影响的切线杨氏模量和卸载一再加载模量的修正计算公式。

(3) 对于干密度约为 1.33 g/cm^3 原状非饱和黄土, k_{ur} 值约为初次加载条件下 k 值的 $1.49\sim 1.60$ 倍,此原状黄土 k_{ur} 值约为干密度为 1.68 g/cm^3 重塑黄土 k'_{ur} 的 $0.64\sim 0.71$ 倍;因而对于开挖卸荷工程,在进行变形计算时不可直接应用单调加载情况下的相关参数,否则将会带来较大误差。

本文的研究结果完善了非饱和土的增量非线性本构模型,为使其用于开挖卸荷工程提供了方便。

参考文献:

- [1] 李广信, 武世锋. 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(1): 47 - 50. (LI Guang-xin, WU Shi-feng. Experimental research on volume-contraction of soil under unloading and examination of its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(1): 47 - 50. (in Chinese))
- [2] 李广信, 郭瑞平. 土的卸载体缩与可恢复剪胀[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 158 - 161. (LI Guang-xin, GUO Rui-ping. Volume-contraction in unloading of shear tests and reversible dilatation of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **22**(2): 158 - 161. (in Chinese))
- [3] 程玉梅, 韩炜洁, 周明芳, 等. 土体加、卸载土工参数的区别[J]. 佳木斯大学学报, 2006, **24**(3): 448 - 450. (CHEN Yu-mei, HAN Wei-jie, ZHOU Ming-fang, et al. The difference of geotechnical parameters of soil loading and unloading[J]. Journal of Jiamusi University, 2006, **24**(3): 448 - 450. (in Chinese))
- [4] 陈愈炯. 土的卸荷弹性模量[J]. 工程勘察, 1988(5): 6 - 9. (CHEN Yu-jiong. Soil unloading elastic modulus[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1988(5): 6 - 9. (in Chinese))
- [5] 杨光, 孙逊, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1118 - 1121. (YANG Guang, SUN Xun, YU Yu-zhen, et al. The testing research of mechanical properties of coarse-grained soil in different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1118 - 1121. (in Chinese))
- [6] 张孟喜, 孙钧. 受施工卸载扰动黄土的变形与强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(13): 2248 - 2254. (ZHANG Meng-xi, SUN Jun. Unloading-induced deformation and strength properties of loess during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(13): 2248 - 2254. (in Chinese))
- [7] 叶朝良, 朱永全, 刘尧军, 等. 原状黄土各向异性及卸载变形特征试验研究[J]. 中国铁道科学, 2014, **35**(6): 1 - 6. (YE Chao-liang, ZHU Yong-quan, LIU Yao-jun, et al. Experimental study on unloading deformation characteristics of undisturbed loess anisotropy and[J]. China Railway Science, 2014, **35**(6): 1 - 6. (in Chinese))
- [8] 陈存礼, 郭娟, 杨鹏. 应力路径对固结排水条件下饱和原状黄土变形与强度特性的影响[J]. 水利学报, 2008, **39**(6): 702 - 708. (CHEN Cun-li, GUO Juan, YANG Peng. Influence of stress path on deformation and strength characteristics of saturated intact loess under drainage condition[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **39**(6): 702 - 708. (in Chinese))
- [9] 黄茂松, 杨超, 崔玉军. 循环荷载下非饱和结构性土的边界模型[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(6): 817 - 823. (HUANG Mao-song, YANG Chao, CUI Yu-jun. Elasto-plastic bounding surface model for unsaturated soils under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(6): 817 - 823. (in Chinese))
- [10] 陈正汉, 周海清, FREDLUND D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(5): 603 - 608. (CHEN Zheng-han, ZHOU Hai-qing, FREDLUND D G. Nonlinear model for unsaturated soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(5): 603 - 608. (in Chinese))
- [11] 殷宗泽, 周建, 赵仲辉, 等. 非饱和土本构关系及变形计算[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 137 - 146. (YIN Zong-ze, ZHOU Jian, ZHAO Zhong-hui, et al. Constitutive relations and deformation calculation for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 137 - 146. (in Chinese))

- [12] 张 玉, 邵生俊. 平面应变加、卸荷条件下黄土的非线性变形特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 185 - 190. (ZHANG Yu, SHAO Sheng-jun. Non-linear deformation behaviors of loess under plane strain state of vertical loading and lateral unloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 185 - 190. (in Chinese))
- [13] 李加贵, 陈正汉, 黄雪峰. Q_3 黄土侧向卸荷时的细观结构演化及强度特性[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1084 - 1091. (LI Jia-gui, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. CT-triaxial shear tests on the meso-structure evolution and strength of unsaturated loess Q_3 during unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1084 - 1091. (in Chinese))
- [14] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 多功能土工三轴仪的研制及其应用[J]. 后勤工程学院学报, 2007, **23**(4): 1 - 5. (CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, et al. Multifunction triaxial apparatus and its application[J]. Journal of Logistical Engineer University, 2007, **23**(4): 1 - 5. (in Chinese))
- [15] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))

第三届全国岩土本构理论研讨会

(一号通知)

近几年, 国内外学者在岩土材料的强度及本构理论取得了大量的创新性研究成果, 为进一步促进岩土本构理论的交流和学习, 土力学及岩土工程分会土的本构关系与强度理论专业委员会决定于 2017 年 9 月在北京工业大学召开第三届全国岩土本构理论研讨会。会议将围绕“重大工程防灾减灾中的岩土本构理论”这一主题, 针对土、混凝土、岩石等岩土类材料的本构理论、试验方法、数值模拟、工程应用等多个领域的问题进行研讨。本次会议旨在为国内外同行提供一个开放的交流平台, 相互交流防灾减灾和岩土本构理论相关领域近年来取得的新进展, 展现最新研究进展和研究成果, 共同探讨岩土本构理论面临的挑战和发展的趋势。会议将通过多种形式的报告开展, 共享新思想, 激发新思维, 拓宽新视野, 破解新难题, 解决新问题, 进一步推动我国在岩土本构理论、方法和应用等方面的进程, 促使我国岩土工程领域的发展和进步。望广大从事岩土本构理论及相关领域研究的专家、学者、工程技术人员以及研究生踊跃投稿并参加本次会议。

会议主题: 重大工程防灾减灾中的岩土本构理论,

征文范围: ①岩土材料本构理论与建模方法; ②岩土材料力学特性与试验技术; ③岩土本构理论的数值积分方法; ④本构理论在重大工程中的应用。

征文要求: ①论文截稿日期: 2017 年 6 月 30 日。②稿件要求在国内外未正式发表过的研究成果, 请严格按照《岩土工程学报》征文要求规范编辑全文。会议学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查, 精选一定数量的优秀论文推荐到《岩土工程学报》、《北京工业大学学报》。通过审稿程序的论文, 将在《岩土工程学报》、《北京工业大学学报》发表正刊各 1 期。③会议推荐优秀论文 8-10 篇至《工业建筑》正刊集中发表。④会议印刷供学术交流论文集一册, 已发表论文、尚未发表论文、1 页内的论文摘要均可, 论文集非正式出版, 尚未发表论文会后可投其他期刊。⑤论文的保密审查由作者本单位自行处理, 会议不再作保密审查, 作者本人对此负全部责任。⑥来稿请用 word 文档排版, 具体格式参见《岩土工程学报》模板。请在稿件首页注明作者研究方向、电话、Email 等联系方式、稿件是否公开发表过等。⑦稿件通过电子邮件发送到会议专用邮箱 (gctc_bjut@163.com)。

会议时间: 2017 年 9 月 1~3 日, 会议地点: 北京工业大学。联系地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号新学科楼 C452, 邮编: 100124, 电话: 010-67392981。联系人: 路德春 (13811035103), 范立峰 (13750826224), 王国盛 (15652352493), E-mail: gctc_bjut@163.com。

(会议组委会 供稿)