

# 侧向卸荷条件下软土典型力学特性试验研究

周秋娟<sup>1, 2</sup>, 陈晓平<sup>1</sup>

(1. 暨南大学 力学与土木工程系, 广东 广州 510632; 2. 广东水利电力职业技术学院 水利工程系, 广东 广州 510635)

**摘要:** 针对侧向卸荷条件下软土变形、强度、蠕变等典型力学特性, 选取珠三角洲相沉积的典型灰黑色淤泥质软土进行室内三轴试验研究。试验结果表明: 侧向卸荷条件下的应力-应变规律呈应变硬化现象, 可采用平均应力进行归一; 土样在侧向卸荷条件下进行不排水剪切时会产生负的孔隙水压力, 使得有效应力强度反而低于总应力强度, 与轴向加荷条件下的强度规律不同; 侧向卸荷条件下的初始卸荷模量小于轴向加荷条件下的初始卸荷模量, 与平均固结压力呈线性关系; 任一时间的卸荷变形模量仍可表示为切线模量, 并可通过试验成果推导得出; 侧向卸荷条件下软土蠕变变形比轴向加载显著, 即使在偏应力不大时仍占总变形的较大比例; 应变率随时间的下降呈较好的双对数线性关系, 可以建立考虑剪应力水平对初始应变率影响的线性经验公式来估算某级荷载下应变率随时间的发展。

**关键词:** 土力学; 侧向卸荷; 软土; 变形; 强度; 蠕变

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)11-2215-07

## TEST RESEARCH ON TYPICAL MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SOFT CLAY UNDER LATERAL UNLOADING CONDITION

ZHOU Qiujuan<sup>1, 2</sup>, CHEN Xiaoping<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanics and Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou, Guangdong 510635, China)

**Abstract:** The typical mechanical characteristics in deformation, strength and creep under lateral unloading condition of soft clay are investigated by laboratory triaxial tests. The specimens are black gray silty soft clay, which are taken from Pearl River Delta sediments. The results pointed that the stress-strain relationship shows the phenomenon of strain hardening, and can be normalized by average stress. The effective stress strength is lower than the total stress strength because minus pore water pressure is produced under the condition of lateral unloading, which is opposite to the stress law under the axial-loading condition. The initial unloading modulus under lateral unloading condition is smaller than that under the axial-loading condition, and there is a linear relationship with the average consolidation pressures. The unloading deformation modulus can be expressed as the tangent modulus at any time; and it can be obtained through the test results. Creep test shows that the creep deformation under lateral unloading condition is more significant than that under axial-loading condition. Even if the deviator stress is small, the creep deformation also occupied a large proportion of the total deformation. The logarithm of the strain rate decreases linearly with the increase of the logarithm of time. The development of the strain rate can be estimated at any loading condition from the linear experience formula considering the effect of

**收稿日期:** 2009-06-01; **修回日期:** 2009-07-16

**基金项目:** 广东省科技项目(2006B37201003); 湖北省环境岩土工程重点实验室开放基金资助项目(T110503)

**作者简介:** 周秋娟(1981-), 女, 1999年毕业于浙江大学水利工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: qjzhou2@126.com

shear stress on initial strain rate.

**Key words:** soil mechanics; lateral unloading; soft clay; deformation; strength; creep

# 1 引言

由于土地资源的日益匮乏，城市的建设已由地面建设逐渐重视向地下要建设空间，如地下商场建设、轨道交通建设等工程的迅速开展。因此，使得开挖卸荷条件下的岩土材料力学问题已成为各类地下空间开挖工程施工和运行管理中不可回避的问题，引起学者和工程界的高度重视，特别是软弱土层中的深大基坑，由软土卸荷带来的力学特性改变及其对工程的影响更不容忽视。因此，模拟各种条件下软土的卸荷过程，选择符合开挖卸荷过程应力状态的应力路径试验来探讨软弱地层中土体的卸荷工程特性显得非常必要，所得到的符合软土卸荷力学特性的本构模型及参数，结合现代化的计算手段，能够使计算结果更可靠、准确。

C. C. Ladd 等<sup>[1]</sup>较早地用超固结土概念推导了正常压密黏性土在开挖卸荷后的不排水抗剪强度计算公式；刘国彬和侯学渊<sup>[2, 3]</sup>则通过应力路径三轴仪对上海软土进行了不同卸荷路径试验，得到了不同卸荷路径下软土的应力 - 应变关系，并对此进行了归一化处理，同时给出了初始卸荷模量与平均固结压力及应力路径之间的关系；G. Mesri 和 S. Ali<sup>[4]</sup>通过三轴压缩、拉伸试验探讨了波斯蓝黏土的变形及强度特性，指出轴向拉伸时的内摩擦角大于压缩时的内摩擦角，并对 C. C. Ladd 等<sup>[1]</sup>提出的深基坑地基土的抗剪强度计算公式进行了探讨；庄心善等<sup>[5]</sup>通过真三轴试验进行了不同排水条件对侧向卸荷时土体应力 - 应变关系的研究，指出排水条件下土体为应变硬化型，而不排水条件下土体应变曲线由硬化型向软化型转变，给出了卸荷土体广义剪应力与广义剪应变的关系；宰金珉等<sup>[6]</sup>利用 GDS 试验机，对南京河西地区原状黏性土进行了开挖应力路径下的侧向卸荷试验，指出该地区饱和黏土加、卸荷路径下的破坏强度参数基本一致，且卸荷路径下的初始切线模量较大；P. G. Hsieh 等<sup>[7]</sup>根据 2 个失败的开挖工程，进行 5 种不同方法下的抗剪强度试验并进行计算，结果表明在计算中采用各向异性不排水强度较为合理，如在主动土区用  $K_0$  固结三轴压缩不排水剪强度、被动土区用  $K_0$  固结三轴拉伸不排水剪强度；由于土体的流变特性<sup>[8, 9]</sup>，胡其志等<sup>[10]</sup>

利用应力控制式三轴仪进行了软土排水侧向卸荷蠕变试验，结果表明蠕变曲线可用幂次关系蠕变方程表示；刘国彬和贾付波<sup>[11]</sup>针对基坑底部土体应力情况进行了软土不排水卸荷流变试验，揭示土体轴向荷载与侧向荷载同时卸荷下的流变特性；付艳斌等<sup>[12]</sup>对软土基坑工程中的卸荷时效性与加载时效性进行了对比研究，得到一些有益的结论。

虽然已有的研究成果从不同角度对软土卸荷力学特性进行了较好地揭示，但是由于土性的复杂性和区域性，所以在试验手段、机制分析、对工程的指导作用等方面还有很多的工作和研究空间。本文以广东珠三角相沉积软土为研究对象，选取典型土样进行了一系列三轴试验，通过分析在不同卸荷条件下软土的变形特性和强度特性，得到了针对特定应力路径的土体特性的认识及其对工程的影响。

# 2 侧向卸荷条件下三轴剪切试验及成果分析

## 2.1 试验概况

为模拟开挖过程中基坑侧面土体的应力状态，采用应力控制式三轴仪进行逐步降低侧向荷载、保持轴向荷载不变的固结不排水剪切试验(DCU)，试验中控制加荷标准为 0.02 kPa/min。同时进行了侧向荷载不变、轴向加载的对比试验(ICU)，试验方案如表 1 所示。为保证试验结果的可比性，试验过程中采用一致的固结条件和剪切速率，并采用了取自

表 1 侧向卸荷条件下三轴剪切试验方案

Table 1 Scheme of triaxial shear tests under the condition of lateral unloading

试验方案	试样编号	固结压力 $\sigma_3$ /kPa	剪切路径
ICU	ICU <sub>100</sub>	100	$\sigma_3$ 保持不变、 $\sigma_1$ 逐渐增大
	ICU <sub>200</sub>	200	
	ICU <sub>300</sub>	300	
	ICU <sub>400</sub>	400	
	DCU <sub>100</sub>	100	
DCU	DCU <sub>200</sub>	200	$\sigma_3$ 逐渐减少、 $\sigma_1$ 保持不变
	DCU <sub>300</sub>	300	
	DCU <sub>400</sub>	400	

注：试样编号下标表示围压，单位为 kPa。

同一母体的广州南沙灰黑色海陆交互沉积相软土原状样。试验土样的基本指标为： $w = 74.70\%$ ， $\rho = 1.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ， $e = 2.10$ ， $S_i = 4.90$ ， $w_L = 54.50\%$ ， $I_p = 29.90$ ， $E_{s1-2} = 1.40 \text{ MPa}$ 。粒径分布为：细粒含量(粒径小于  $0.075 \text{ mm}$ )占  $96\%$ ，其中黏粒含量(粒径小于  $0.005 \text{ mm}$ )占  $60\%$ ，属高液限黏土<sup>[13]</sup>。

### 2.2 试验成果及分析

#### 2.2.1 应力 - 应变规律及强度特性

图 1 为 2 种试验条件下应力 - 应变关系曲线，图 2 为相应的总应力强度包络线，总应力强度指标和有效应力强度指标如表 2 所示。

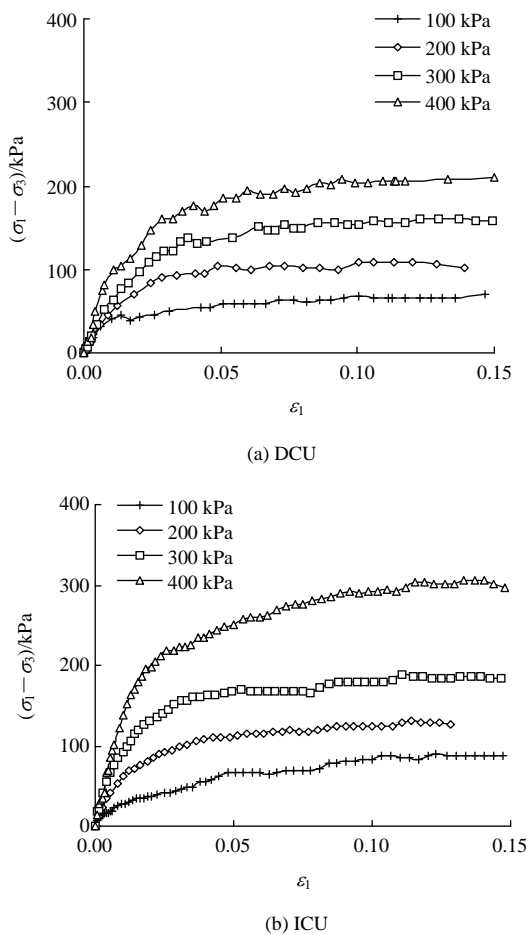


图 1 两种剪切条件下的应力 - 应变曲线  
Fig.1 Stress-strain curves under two shear conditions

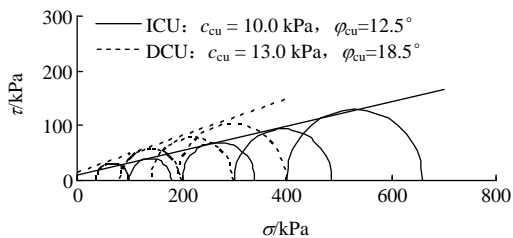


图 2 两种剪切条件下总应力强度包络线比较  
Fig.2 Comparison of strength envelopes under two shear conditions

表 2 两种剪切条件下的强度指标

试验方案	总应力强度指标		有效应力强度指标	
	$c_{cu}$	$\phi_{cu}$	$c'$	$\phi'$
DCU	13	18.5	4	17.2
ICU	10	12.5	5	24.4

图 1 结果表明，在相同的固结压力下，由侧向卸荷形成的剪应力(偏应力)比由轴向加荷形成的剪应力更能使土样产生剪切变形，表现为 DCU 试验获得的剪应力峰值低、轴向应变大(见图 1(a), (b))。根据加工硬化材料的加卸载准则，ICU 试验满足  $p-q$  空间  $dp > 0$ ， $dq > 0$  的完全加载条件( $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ ， $q = \sigma_1 - \sigma_3$ )；DCU 试验属于  $p-q$  空间  $dp < 0$ ， $dq > 0$  的部分加载。所以，侧向卸荷条件下土样产生的应变仍属于压缩，其应力 - 应变规律和土样的剪切性状与轴向加荷试验相比没有产生本质区别，但由于侧向卸荷降低了土体的侧向约束，因而除了压缩变形外还会产生由侧向变形导致的附加轴向变形，使得土样的剪应力峰值降低、轴向应变增大。

图 2 和表 2 结果表明，在相同的剪切条件下(不排水)，DCU 试验获得的总应力强度包络线在 ICU 试验获得的强度包络线上方(见图 2)，但有效应力强度却相反(见表 2)，即 DCU 试验获得的有效应力强度指标小于总应力指标，这与常规三轴试验结果非常不同，庄心善等<sup>[5]</sup>采用真三轴试验对一种粉质黏土也曾获得过类似结果。产生这一现象的原因可从 2 个方面解释：(1) 土样在逐步降低侧向荷载的过程中由于土样的侧向膨胀而产生了负的孔隙水压力，与 ICU 试验时产生的正孔隙水压力变化规律不同，该孔压会随着土样内部各点变形的传递而得到调整和降低，最终达到一种平衡，相应的有效应力强度会随着负孔压的消失而小于开挖初期的强度；(2) DCU 试验中一点的应力状态可表示为图 3 所示的摩尔圆，极限平衡条件下总应力强度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  可表示为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \phi + 2\sigma_1 \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (1)$$

式中： $\sigma_1$  为土体的初始固结压力； $c$ ， $\phi$  均为侧向卸荷试验得到的总应力强度指标。

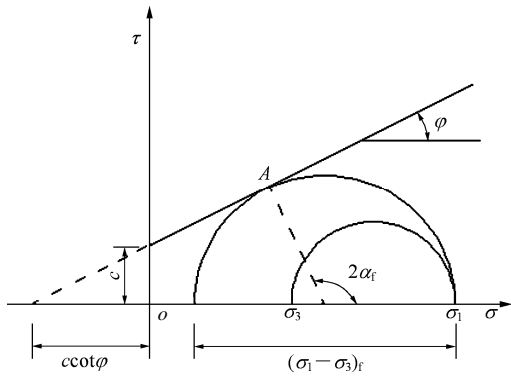


图3 土中一点达到极限平衡状态时的摩尔圆

Fig.3 Mohr circle of any point in the soil under the state of limit equilibrium

ICU 试验的极限条件为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = (2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi) / (1 - \sin \phi) \quad (2)$$

将式(1)与式(2)相比可知 DCU 试验中的莫尔圆发展方向不同(向坐标原点)、半径减小。

为进一步说明侧向卸荷对土体强度性状的影响,可根据土体临界状态的概念<sup>[14]</sup>整理出如图4所示的  $p'$ - $q$  平面上侧向卸荷和轴向加荷临界状态线,如果将此看作破坏状态线,可知在侧向卸荷条件下土体更易达到破坏,即土体在侧向约束减小后所能承受的剪应力将降低。

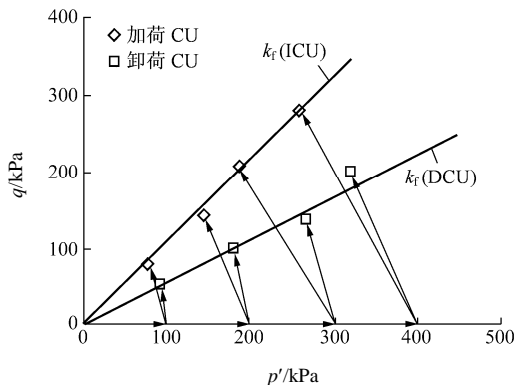


图4 两种剪切条件下软土的临界状态线

Fig.4 Critical state lines of soft soil under two shear conditions

上述试验结果所揭示的现象不仅很好地解释了为什么一般开挖工程的坍塌破坏往往不是产生于开挖瞬间、而是开挖后的某一时间,而且也提供了利用侧向卸荷路径下轴向应变和强度的变化特征进行破坏预警的依据。另外,对于开挖工程来说,若采用 ICU 试验的结果进行分析,对于变形有低估的可能,对于强度导致的稳定在某一时间段内会偏于安

全,但这种安全度是非常不可靠的,会随着负孔隙水压力的消散逐渐降低。

### 2.2.2 卸荷变形模量

#### (1) 应力 - 应变曲线归一化

采用平均应力  $(\sigma_m = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3)$  对不同固结压力下的应力 - 应变关系进行归一化处理,得出如图5所示的归一化曲线。若采用双曲线进行拟合,可以得出拟合公式为

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_1 \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1 - \sigma_3$  为偏应力;  $\varepsilon_1$  为轴向应变;  $a, b$  均为参数。

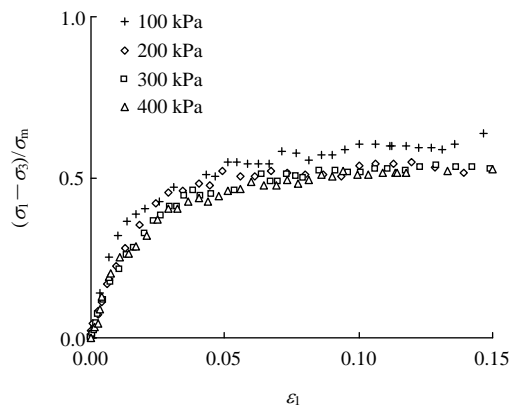


图5 卸荷路径下应力 - 应变曲线的归一化曲线

Fig.5 Normalized stress-strain curves on unloading path

根据式(3)点绘如图6所示的线性关系,证明了采用双曲线拟合的合理性。

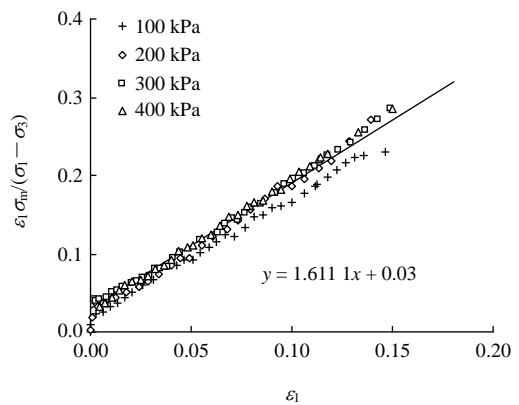


图6 卸荷路径下应力 - 应变曲线的归一化双曲线函数表示

Fig.6 Normalized hyperbola stress-strain curves on unloading path

#### (2) 初始切线模量

图7为通过试验数据得到的2种剪切条件下初始切线加/卸荷模量经验线性关系,可以看出  $E_{ui(DCU)}$

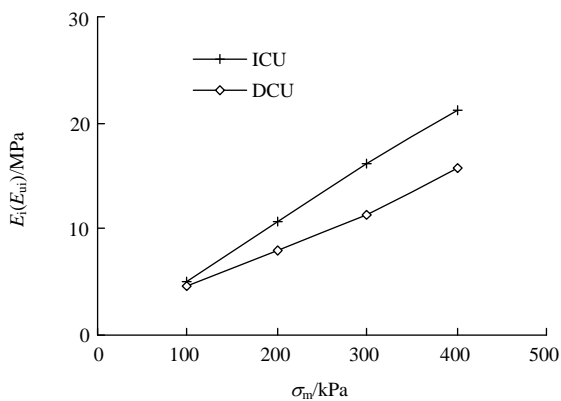


图 7 初始加/卸荷模量与平均固结压力关系曲线

Fig.7 Curves of initial loading/unloading modulus versus average consolidation pressure

是明显小于  $E_{i(ICU)}$  的。通过平均固结压力  $\sigma_m$  可以分别建立轴向加荷条件和侧向卸荷条件下的初始切线模量经验公式为

$$\left. \begin{aligned} E_{ui} &= a_1 \sigma_m + a_2 \\ E_i &= b_1 \sigma_m + b_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $a_1, a_2, b_1, b_2$  均为试验参数, 本次试验中得出  $a_1=0.0366, a_2=0.725, b_1=0.0553, b_2=0.265$ 。

(3) 卸荷变形模量

设土体变形满足增量广义虎克定律, 有

$$d\varepsilon_1 = \frac{1}{E_t} [d\sigma_1 - \nu_1(d\sigma_2 + d\sigma_3)] \quad (5)$$

式中:  $d\varepsilon_1$  为轴向应变增量;  $d\sigma_1$  为轴向应力增量;  $d\sigma_2, d\sigma_3$  均为径向应力增量;  $\nu_1$  为泊松比;  $E_t$  为变形模量。

侧向卸荷试验过程中, 为保持轴向压力  $\sigma_1$  不变, 需在减小围压  $\sigma_3$  的同时增大主应力差, 使  $d\sigma_2 = d\sigma_3 = -d(\sigma_1 - \sigma_3)$ , 由此得到  $d\sigma_1 = 0$ 。又由于试验在不排水条件下进行时, 体积应变为 0, 即  $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = 0$ , 因此有  $\nu_1 = 0.5$ 。将其代入式(4)可得

$$d\varepsilon_1 = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_t} \quad (6)$$

式(6)表明总应力条件下仍然可以定义卸荷模量  $E_t$  为切线变形模量  $d(\sigma_1 - \sigma_3) / d\varepsilon_1$ 。将式(3)代入式(6)并定义  $E_{ui}=1/a, (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}=1/b$ , 得

$$E_t = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} = \frac{[1 - b(\sigma_1 - \sigma_3)]^2}{a} = E_{ui} \left[ 1 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \right]^2 \quad (7)$$

定义破坏比为

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (8)$$

将式(1), (4)代入式(7)可得侧向卸荷条件下的变形模量计算公式为

$$E_t = (a_1 \sigma_m + a_2) \left[ 1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 + \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_1 \sin \varphi} \right]^2 \quad (9)$$

### 3 侧向卸荷条件下三轴剪切蠕变试验及成果分析

#### 3.1 试验方案

针对软弱地层中基坑开挖后未及时支护或支护不到位、可能出现由于变形过大而导致破坏的情况, 设计了通过应力控制逐级卸除侧向荷载的三轴固结不排水剪切蠕变试验。试验仪器采用应力控制式三轴仪。为较好模拟工程实际情况, 试验时先对土样进行  $k_0 = 1 - \sin \varphi' = 0.7$  的不等向固结, 使其恢复至自重应力状态, 然后再根据设定的卸荷路径对土体进行卸荷。固结时, 每小时施加围压  $\Delta\sigma_3 = 7 \text{ kPa}$  的同时施加偏应力  $\Delta q = 3 \text{ kPa}$ , 直至  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}, q = 43 \text{ kPa}$  停止加荷; 当孔压消散至 0 时固结结束。卸荷路径采用  $\sigma_3$  按 15 kPa 逐级卸载、 $\sigma_1$  不变的应力路径, 由于试验仪器是通过主应力差(偏应力)  $q$  来控制  $\sigma_1$ , 因此为保持  $\sigma_1$  不变,  $\sigma_3$  减小的同时增加  $q$ , 且使  $\Delta q = -\Delta\sigma_3$ ; 荷载持续时间为 2~4 d。

#### 3.2 侧向卸荷蠕变变形分析

图 8 为侧向卸荷路径下的三轴蠕变曲线。从图 8 中可以看出, 侧向卸荷路径下的三轴蠕变试验得到的变形可分为瞬时变形和蠕变变形, 以蠕变曲线的转折点进行划分。图 8 所示的蠕变曲线表明: 当偏应力较小时, 土体产生的总变形较小, 但蠕变变形仍占该级荷载下总变形的 47.6%, 说明即使在较小的应力下, 软土产生的蠕变变形依然是不可忽略的; 当偏应力较大时, 土体产生的总变形迅速增大, 蠕变效应更加明显, 蠕变变形占该级荷载下总变形的 53.7%; 随着偏应力的进一步增大, 应变随着偏应力的施加迅速发展直至土样产生鼓型破坏, 蠕变破坏强度明显大于相同初始围压下的侧向卸荷三轴剪切试验(DCU)的破坏强度。将图 8 所示的蠕变曲线转换为时间对数形式如图 9 所示, 图 9 更清晰地表明随着偏应力的增加, 土体的蠕变效应增长逐渐显著, 直至土体破坏。

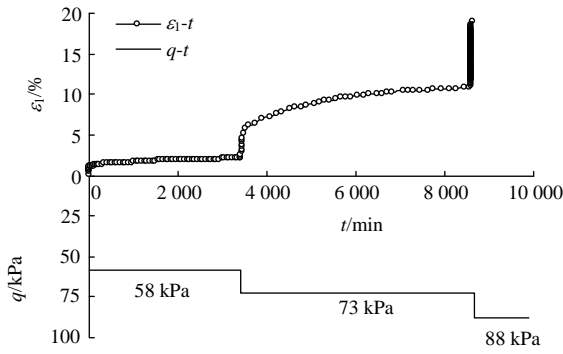


图 8 侧向卸荷路径下三轴蠕变曲线

Fig.8 Triaxial creep curves on lateral unloading path

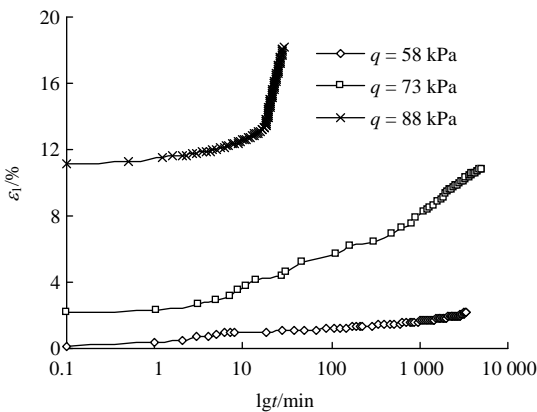


图 9 应变与时间对数曲线

Fig.9 Curves of  $\epsilon_1$  with  $lgt$

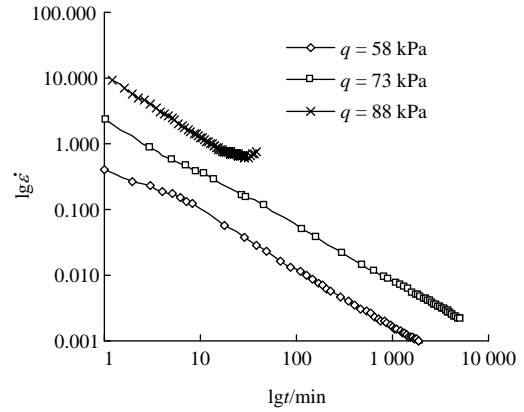


图 10 应变率与时间双对数曲线

Fig.10 Curves of  $lg \dot{\epsilon}$  with  $lgt$

水量大、液高、黏粒含量高；矿物成分分析表明，软土中的矿物成分活性较大，如蒙脱石及伊利石占 53%，这些均是土体蠕变效应显著的影响因素<sup>[16]</sup>。

### 4 结 论

通过侧向卸荷条件下固结不排水剪切试验及不排水蠕变试验，得到以下对于实际工程具有重要指导意义和参考价值的结论：

(1) 侧向卸荷的三轴试验属于  $p-q$  空间的部分加载试验，应力 - 应变规律仍呈应变硬化现象，可采用平均应力进行归一化处理。

(2) 在相同的固结条件下，侧向卸荷形成的剪切性状与轴向加荷相比具有剪应力峰值低、轴向应变大、有效应力强度指标小于总应力强度指标的特征。

(3) 根据归一的应力 - 应变关系可确定侧向卸荷条件下的初始切线模量小于轴向加荷条件下(常规三轴)的初始切线模量，即表明在相同条件下，侧向卸荷产生的瞬时变形较大；基于归一曲线可推导出侧向卸荷不排水条件下土体的卸荷变形模量。

(4) 相对于轴向加荷条件，侧向卸荷情况下软土蠕变特性更加明显，即使在偏应力不大时蠕变变形仍占总变形的较大比例；蠕变破坏规律不会呈现典型的非衰减特征，即往往没有明显的加速蠕变阶段。

(5) 应变率随时间增长呈良好的双对数线性降低规律，可以建立考虑剪应力水平对初始应变率影响的线性经验公式来估算某级荷载下应变率随时间的发展规律。

图 10 为应变率与时间之间的双对数曲线。结果表明侧向卸荷条件下土样的应变率随着时间逐步降低，降低规律呈较好的双对数线性关系：剪应力较低时这一规律持续到应变率衰减为 0、应力水平仅仅影响初始应变率；剪应力较高时，随着时间的发展应变率会出现突变，导致土样破坏。这一规律再次说明了开挖造成的破坏特征与轴向加载有很大不同，土样可能在衰减蠕变后产生突然破坏而不一定总是在加速蠕变后。

根据图 10，应变率与时间之间的关系可描述为

$$lg \dot{\epsilon} = n lgt + f(q) \tag{10}$$

式中： $\dot{\epsilon}$  为应变率； $n$  为图 10 中应变率与时间双对数曲线的斜率，可取 0.80~0.95； $f(q)$  表示与偏应力相关的一个函数关系式。

从以上分析可知，所研究软土的侧向卸荷蠕变效应非常显著，这与侧向卸荷使得土体侧向变形增大有关，也与该地区软土的物理性质及组成密切相关。根据常规物理力学试验结果<sup>[15]</sup>，该地区软土含

**参考文献(References):**

- [1] LADD C C, FOOTT R, ISHIHARA K, et al. Stress deformation and strength characteristics[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo: [s.n.], 1977: 293 - 305.
- [2] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18 - 23.(LIU Guobin, HOU Xueyuan. Unloading modulus of the soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 18 - 23.(in Chinese))
- [3] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷应力 - 应变特性[J]. 地下工程与隧道, 1997, (2): 16 - 23.(LIU Guobin, HOU Xueyuan. Unloading stress-strain characteristic for soft soil [J]. Underground Engineering and Tunnels, 1997, (2): 16 - 23.(in Chinese))
- [4] MESRI G, ALI S. Undrained shear strength of a glacial clay overconsolidated by desiccation [J]. Geotechnique, 1999, 49(2): 181 - 198.
- [5] 庄心善, 赵鑫, 何世秀, 等. 排水条件下卸荷土体变形特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学. 2007, 28(7): 1 387 - 1 390.(ZHUANG Xinshan, ZHAO Xin, HE Shixiu, et al. An experimental study of soil mass deformability subject to true triaxial loads during unloading under drainage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1 387 - 1 390.(in Chinese))
- [6] 宰金珉, 张云军、王旭东, 等. 卸荷状态下黏性土的变形和强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1 409 - 1 412.(ZAI Jinmin, ZHANG Yunjun, WANG Xudong, et al. Experiment research on deformation and strength of cohesive soil under lateral extension[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2007, 29(9): 1 409 - 1 412.(in Chinese))
- [7] HSIEH P G, CHANG Y O, LIU H T. Basal heave analysis of excavations with consideration of anisotropic undrained strength of clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(6): 788 - 799.
- [8] 陈晓平, 朱鸿鹄, 张芳枝, 等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 142 - 2 148.(CHEN Xiaoping, ZHU Honghu, ZHANG Fangzhi, et al. Experiment study on time-dependent deformation of soft soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 142 - 2 148.(in Chinese))
- [9] 庄丽, 周顺华, 宫全美, 等. 大面积软土基坑放坡开挖引起蠕变的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (增 2): 4 209 - 4 213. (ZHUANG Li, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Numerical analysis of creep induced by excavating slope in soft soil pit with larger area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Supp. 2): 4 209 - 4 213.(in Chinese))
- [10] 胡其志, 何世秀, 杨雪强. 基坑开挖软土流变特性的试验研究[J]. 湖北工学院学报, 2003, 18(3): 1 - 3.(HU Qizhi, HE Shixiu, YANG Xueqiang. Experiment study of rheology property of soft clay in excavation[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2003, 18(3): 1 - 3.(in Chinese))
- [11] 刘国斌, 贾付波. 基坑回弹时间效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 040 - 3 044.(LIU Guobin, JIA Fubo. Test research on time effect of foundation pit rebound[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp. 1): 3 040 - 3 044. (in Chinese))
- [12] 付艳斌, 朱合华, 杨骏. 软土卸荷时效性及其孔隙水压力变化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1): 3 244 - 3 249.(FU Yanbin, ZHU Hehua, YANG Jun. Experimental study of time-dependent properties and pore water pressure of soft soil under unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp. 1): 3 244 - 3 249.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL237 - 1999 Experiment regulation of earth engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [14] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. Yielding of clays in state wetter than critical[J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 211 - 240.
- [15] 周秋娟, 陈晓平. 软土蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 626 - 630.(ZHOU Qiujuan, CHEN Xiaoping. Experimental study of creep characteristics of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 626 - 630.(in Chinese))
- [16] JAMES K M, KENICHI S. Fundamentals of soil behavior[M]. 3rd ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 2004.