

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.065



# 超静孔隙水压下软土卸荷蠕变特性试验研究

刘东燕<sup>1,2</sup>, 邓晓佳<sup>1</sup>, 黄伟<sup>2</sup>, 李东升<sup>2</sup>, 蒋海飞<sup>3</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆科技学院 a. 建筑工程学院;

b. 能源工程力学与防灾减灾重庆市重点实验室, 重庆 401331; 3. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

**摘要:**考虑超静孔隙水压作用的软土卸荷力学特性对富水软土地区地下空间开挖变形和稳定性分析具有重要作用。以深圳地区淤泥质软土为研究对象,开展不同初始超静孔隙水压作用下的  $K_0$  固结不排水三轴卸荷强度试验和卸荷蠕变试验。试验结果表明:初始超静孔隙水压越大,固结围压越小,软土卸荷破坏越具有突然性;软土卸荷强度应力-应变曲线大致呈双曲线型,其双曲线函数拟合结果表明,卸荷强度随着初始超静孔隙水压的增大而大致线性减小。卸荷蠕变对初始超静孔隙水压敏感性很大,卸荷蠕变破坏时的偏应力约为卸荷强度试验中偏应力的 90%。UU0.5 应力路径相对于 UU0.0 应力路径更容易发生卸荷强度破坏和卸荷蠕变破坏,在实际工程中,应尽可能控制软土侧向卸荷比和超静孔隙水压的大小。

**关键词:**超静孔隙水压;软土;卸荷力学;应力路径

**中图分类号:**TU431 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)04-0001-09

## Experimental study on unloading creep properties of soft soils under excess pore-water pressure

Liu Dongyan<sup>1,2</sup>, Deng Xiaojia<sup>1</sup>, Huang Wei<sup>2</sup>, Li Dongsheng<sup>2</sup>, Jiang Haifei<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2a. School of Civil Engineering and Architecture, 2b. Chongqing Key Laboratory of Energy Engineering Mechanics & Disaster Prevention and Mitigation, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

**Abstract:** The unloading creep properties of soft soil under the excess pore water pressure are important for analysis of the deformation and stability of underground excavation in water-rich soft soil region. In this paper, the silty soft soil in Shenzhen was investigated via conducting unloading  $K_0$  consolidation undrained triaxial test and unloading creep test under different initial static pore water pressures. Results show that a

**收稿日期:**2018-10-29

**基金项目:**重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ1713327);重庆科技学院内科研基金(ck2017zkyb013);重庆科技学院建工学院院内基金(JG201703)

**作者简介:**刘东燕(1959-),男,教授,博士,主要从事岩土工程、防灾减灾工程研究,E-mail:liudy@cqu.edu.cn.  
黄伟(通信作者),男,博士,E-mail:huangwei20041@126.com.

**Received:**2018-10-29

**Foundation item:** Science and Technology Research Project of Chongqing Education Committee (No. KJ1713327); Natural Science Foundation of Chongqing University of Science and Technology (No. ck2017zkyb013); The Foundation of School of Civil Engineering and Architecture in CQUST(No. JG201703)

**Author brief:** Liu Dongyan (1959-), professor, PhD, main research interests: geotechnical engineering, disaster prevention and reduction engineering, E-mail: liudy@cqu.edu.cn.

Huang Wei(corresponding author), PhD, E-mail: huangwei20041@126.com.

higher initial excess pore water pressure and a smaller consolidation confining pressure will cause more abrupt unloading failure of the soft soil. The stress-strain curve of the unloading strength of soft soil is in the form of hyperbola. The results of hyperbolic function fitting show that the unloading strength decreases linearly with increase of initial excess pore water pressure. The unloading creep deformation is found to be sensitive to the initial excess pore water pressure. The failure deviatoric stress in unloading creep test is about 90% of the deviatoric stress in unloading strength test. The unloading failure and creep failure are more likely to occur under stress path with UU0.5 compared with UU0.0. Therefore, the confining unloading rate and the excess pore water pressure should be cautiously controlled in engineering practice.

**Keywords:** excess static pore-water pressure; soft soils; unloading mechanics; stress path

软土广泛分布于中国珠三角、长三角等沿海和内陆沿江地区。随着以上地区城市建设的快速发展,大量软土地下空间被开发,如:地铁盾构隧道、软土深基坑等。软土地下空间开挖的工程实践表明,在开挖完成瞬间通常都不会引起软土的失稳和破坏,而是要经历一段时间,软土才会发生卸荷蠕变破坏<sup>[1]</sup>。与此同时,软土地区一般会存在高位地下水,施工振动将引起难以消散的超静孔隙水压,它将弱化软土颗粒组织结构,进一步加剧软土卸荷蠕变的发生,最终造成软土围岩的流变灾害<sup>[2]</sup>。因此,超静孔隙水压作用下,软土卸荷蠕变特性及破坏规律是富水软土地下空间开发中的重要基础研究课题。

早期软土地下空间设计和理论研究的重点集中在加载应力路径下软土的强度和蠕变特性<sup>[3-4]</sup>。随着对卸荷开挖的深入认识,陈昆等<sup>[5]</sup>认为,软土卸荷作用会引起一定程度的强度降低,忽略卸荷应力路径,用常规轴向加载试验所得参数和模型来计算软土地下空间开挖引起的应力和应变,其结果会产生较大误差。因此,如何选择符合实际卸荷过程中的应力路径来探索软土的卸荷工程特性,引起学者和工程界的高度重视。刘国彬等<sup>[6]</sup>对上海软土进行卸荷试验研究并指出,上海软土卸荷应力-应变曲线为双曲线形式,卸荷模量远大于加载模量。周秋娟等<sup>[7]</sup>对珠三角软土进行三轴不排水试验,发现侧向卸荷条件下的土体蠕变效应比轴向加荷显著。付艳斌等<sup>[8]</sup>研究表明,上海软土卸荷后蠕变曲线分3个阶段,在蠕变过程中,孔压系数会随着时间变化而变化。郑刚等<sup>[9]</sup>以天津粉质黏土为研究对象,开展K<sub>0</sub>固结不排水三轴侧向卸荷试验,试验表明,土体的初始切线模量与固结围压成正比。Cui等<sup>[10]</sup>对比加载、卸荷和重复加载应力路径下,天然粘土的应力-应变曲线对应力路径较为敏感。Tanaka等<sup>[11-12]</sup>研

究了轴向恒应变卸荷速率下软土孔隙率、有效应力和孔隙水压的分布关系。张坤勇等<sup>[13]</sup>以不同初始应力状态和卸荷应力比对粉质黏土,开展了K<sub>0</sub>固结排水卸荷应力路径试验研究,分析出土体的力学、变形特性与卸荷应力路径的关系。另外,在卸荷条件下,软土内摩擦角、回弹模量、卸荷蠕变与速率的关系和模拟基坑开挖的卸荷力学模型等软土卸荷力学特性被广泛研究<sup>[14-15]</sup>。在饱和软土孔隙水压特性方面,魏新江等<sup>[16]</sup>研究了盾构施工引起土体超静孔隙水压峰值的分布规律,研究表明,在埋深10~14 m间,超静孔隙水压约为21.2~56.12 kPa。李晓静等<sup>[17]</sup>研究表明,强夯施工振动过程中超孔隙水压的消散时间为20~40 h。Jian等<sup>[18]</sup>分析了在主应力旋转过程中,软土应变与孔隙水压的变化规律。

以上分析表明,该领域研究主要集中在单一侧向卸荷路径下,软土卸荷强度或者施工振动引起的超静孔隙水压分布规律,而在其他卸荷应力路径和超静孔隙水压耦合作用下,软土卸荷蠕变的定量分析较少。因此,笔者以富水软土地区(深圳)海相沉积淤泥质软土为研究对象,开展一系列K<sub>0</sub>固结三轴不排水强度试验和蠕变试验,探讨不同初始超静孔隙水压、不同固结围压以及不同卸荷应力路径(卸荷应力比)对软土的卸荷蠕变力学性状的影响,从而为软土卸荷工程的支护和施工应用提供科学依据。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土样

试验土样为深圳某大型基坑工程淤泥质软土扰动重塑土样,按照《土工试验规程》(SL 237—1999)制备高80.0 mm、直径39.1 mm的标准土样。其密度为1.82 g/cm<sup>3</sup>,含水率为39.6%,比重2.73,孔隙比1.094,塑性指数16.3。通过常规三轴试验,从绘

制的莫尔圆得出,该土样粘聚力为 19.95 kPa、内摩擦角为 28°。

### 1.2 试验方案设计与步骤

试验方案:由于开挖部位、支护方式及支护时间的不同,软土在地下空间开挖过程中涉及到多种卸荷应力路径。为简化问题,主要对 2 种应力路径进行三轴卸荷蠕变试验:1)针对地下空间主动区土体侧向卸荷蠕变特性,进行 UU0.0 应力路径的侧向卸荷蠕变试验(UU 为轴向卸荷和水平卸荷,数值表示轴向卸荷应力与水平卸荷应力的比值,下同);2)针对地下空间被动区土体的卸荷时效性规律,进行 UU0.5 应力路径的卸荷蠕变试验。文献[16]指出,在软土地质环境中,盾构施工引起超静孔隙水压的范围为 21.2~56.12 kPa。为分析不同超静孔隙水压下软土的卸荷力学特性,选择 0、20、40、60 kPa 共 4 种初始超静孔隙水压进行试验。

试验步骤:1)饱和与固结。在进行试验之前,对试样进行反压饱和,待饱和度达到 98%之后,再对试件完成  $K_0=1-\sin \varphi'=0.53$  的不等向  $K_0$  固结,使其恢复到自重应力状态。2)施加初始超静孔隙水压。 $K_0$  固结完成后,关闭三轴仪的上下排水阀,通过反压系统施加预定的初始超静孔隙水压。3)进行不同初始超静孔隙水压下软土的卸荷强度试验。4)进行不同初始超静孔隙水压下软土的卸荷蠕变试验。重复步骤 1)~2)并根据步骤 3)得到的强度指标,分 4~6 级完成卸荷蠕变试验,每级荷载持续时间为 3~4 d。5)以上试验的固结围压分别为 100、200 和 300 kPa。试验过程中,记录轴压、围压、轴向变形和孔隙水压变化,以轴向应变达到 15%为试验结束条件。

以上所有试验均为  $K_0$  固结后的等应力比应力路径试验,具体试验方案中关于围压、卸荷应力路径和卸荷过程的详细设计见表 1。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 卸荷强度应力-应变曲线

软土卸荷强度是影响软土卸荷稳定性的重要因素之一。卸荷强度试验的部分应力-应变曲线如图 1 和图 2 所示。固结围压为 300 kPa 的试验曲线类似,限于篇幅,略去。

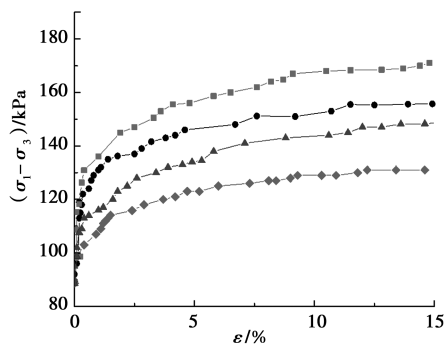
对比图 1 和图 2 可以发现,软土卸荷应力-应变曲线具有如下特征:

1)应力-应变曲线基本都接近于双曲线,在小应变情况下,应力-应变曲线表现为明显的非线性。随

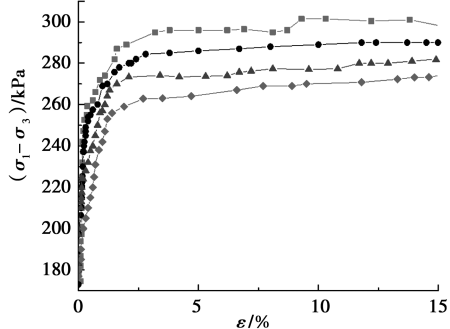
表 1 试验卸荷方案

Table 1 Test unloading plan

应力 路径	卸荷 过程	固结围压 100 kPa		固结围压 200 kPa		固结围压 300 kPa	
		$\sigma_3$ /kPa	$\sigma_1$ /kPa	$\sigma_3$ /kPa	$\sigma_1$ /kPa	$\sigma_3$ /kPa	$\sigma_1$ /kPa
UU0.0	$K_0$ 固结	100	189	200	377	300	566
	卸荷 1	90	189	180	377	270	566
	卸荷 2	80	189	160	377	240	566
	卸荷 3	70	189	140	377	210	566
	卸荷 4	60	189	120	377	180	566
	卸荷 5	50	189	100	377	150	566
UU0.5	$K_0$ 固结	100	189	200	377	300	566
	卸荷 1	85	182	170	362	260	546
	卸荷 2	70	174	140	347	220	526
	卸荷 3	55	167	110	332	180	506
	卸荷 4	40	159	80	317	140	486
	卸荷 5	25	152	50	302	100	466



(a) 固结围压  $\sigma_{3c}=100$  kPa



(b) 固结围压  $\sigma_{3c}=200$  kPa

注: —■—  $u_0=0$  kPa    —●—  $u_0=20$  kPa  
—▲—  $u_0=40$  kPa    —◆—  $u_0=60$  kPa

图 1 UU0.0 应力路径不同孔隙水压下的应力-应变曲线  
Fig. 1 Stress-strain curves with different pore water pressures in the stress path of UU0.0

着固结围压的增加,应力-应变曲线的起始坡度变陡,即初始卸荷模量变大。同时,应力-应变曲线表现为应变硬化状态。

2)以应变达到 15%对应的应力作为软土的卸

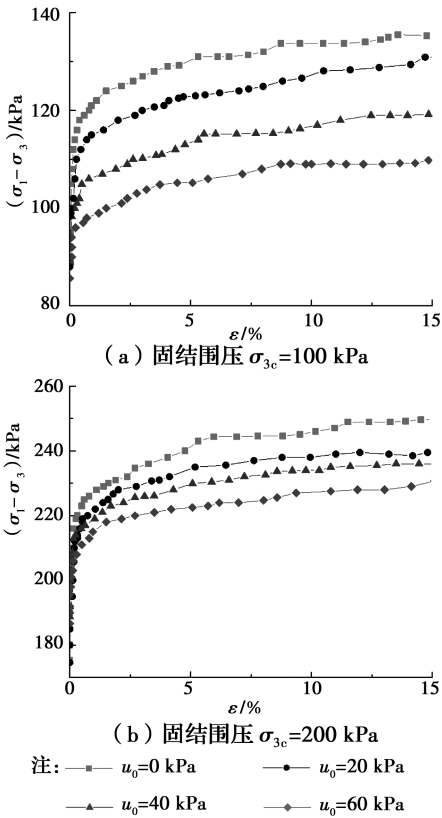


图2 UU0.5 应力路径不同孔隙水压下的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves with different pore water pressures in the stress path of UU0. 5

荷强度,发现初始超静孔隙水压对软土的卸荷强度具有极大的弱化作用。通过拟合初始超静孔隙水压与卸荷强度的关系(表2)得知,相同固结围压下,软土卸荷强度与初始超静孔隙水压近似呈线性关系;固结围压越小,初始超静孔隙水压对土体卸荷强度的影响越大。

表2 初始超静孔隙水压与卸荷强度的关系

Table 2 Relationship between initial excess static pore-water pressure and unloading strength

应力 路径	固结围 压/kPa	卸荷强度 $\sigma$ 与孔隙水压 $u$ 拟合关系	相关性 系数 $R$
UU0.0	100	$\sigma = -0.56u + 156.4$	0.998 3
	200	$\sigma = -0.50u + 295.6$	0.985 8
	300	$\sigma = -0.47u + 420.6$	0.995 9
UU0.5	100	$\sigma = -0.44u + 131.1$	0.998 8
	200	$\sigma = -0.34u + 242.7$	0.988 4
	300	$\sigma = -0.31u + 358.8$	0.993 8

3)在其他试验条件相同的情况下,UU0.5 应力路径得到的卸荷强度要低于 UU0.0 应力路径的卸荷强度,这一结论与刘国彬等<sup>[6]</sup>研究成果中的趋势一致,但破坏时偏应力的大小却相差较大。在文献<sup>[6]</sup>中,UU0.0 应力路径中 100 kPa 围压下的偏应

力约为 105 kPa,而本文的偏应力约为 174 kPa,主要是由于初始固结的试验条件不同、深圳和上海软土力学的区域性特性所致。

4)对比图 1(b)和图 2(b)发现,土样在较小应变下就产生了接近峰值应力的偏应力,说明软土的卸荷破坏具有显著的突然性。同时,在高初始超静孔隙水压作用下,软土的卸荷强度更低,破坏性更强。因此,在实际工程中,应避免施工振动导致软土地质环境中出现较高孔隙水压,并时刻监测孔隙水压的变化情况。

## 2.2 应力-应变双曲线拟合

学者们对软土应力-应变双曲线拟合的研究成果较为丰硕,但多数成果是基于不同围压和加荷试验条件得到,对软土在卸荷条件和超静孔隙水压下是否具有以上特性的研究较少。为此,参考 Kondner 的研究成果,尝试对不同卸荷应力路径和超静孔隙水压的试验结果进行处理。

Kondner 采用式(1)所示的双曲线函数来表示黏性土的固结不排水三轴试验的应力-应变关系。

$$\frac{\epsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b \epsilon \quad (1)$$

从式(1)可以看出, $\epsilon/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与  $\epsilon$  呈线性关系,直线的截距为  $a$ ,斜率为  $b$ 。从式(1)推导可知初始切线斜率为  $1/a$ ,将其定义为初始卸荷模量  $E_i = 1/a$ 。为消除  $K_0$  固结时初始固结应力差 $(\sigma_{1c} - \sigma_{3c})$ 对归一化结果的影响,将试验过程中的应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 减去初始固结应力差,式(1)即为

$$\frac{\epsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_{1c} - \sigma_{3c})} = a + b \epsilon \quad (2)$$

以围压为 100 kPa、UU0.0 和 UU0.5 为例,根据式(2)绘制应力-应变曲线,如图 3 所示。不同初始超静孔隙水压下所有曲线均呈现良好地线性关系,证明式(2)能够较好地试验结果进行双曲线拟合。

将试验结果按照式(2)处理,可以获得一系列双曲线的参数: $a$ 和  $E_i$ ,见表 3。通过分析可以发现:

1)在同一应力路径和相同初始超静孔隙水压下,该土样的初始卸荷模量随着固结围压的增大而呈线性增大趋势,熊春发<sup>[19]</sup>也得出类似结论。但本文研究结论不仅限于文献<sup>[19]</sup>中初始孔隙水压 $u_0 = 0$  kPa的情况,而对于 $u_0 = 20, 40, 60$  kPa时,初始卸荷模量依然随着固结围压的增大而线性增大。因此,在实际工



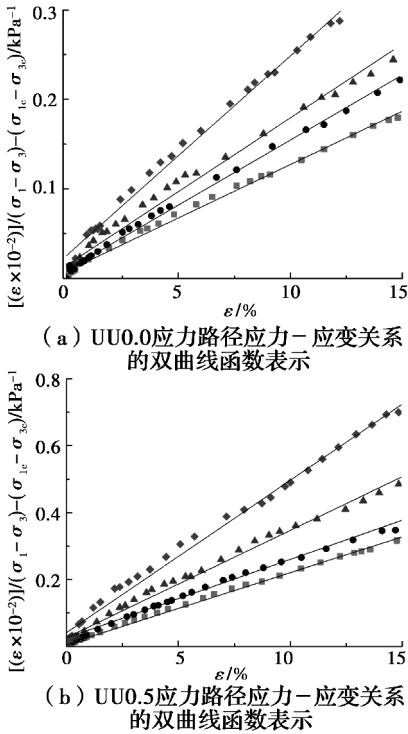


图 3 应力-应变关系的双曲线函数表示  
Fig. 3 Hyperbolic function representation of stress-strain relationship

程中,应采用预压固结、侧向加固等方式增强软土的固结围压,以提高软土的初始卸荷模量。

2)在同一应力路径相同固结围压下,土样的初始切线卸荷模量会随着初始超静孔隙水压的增大而减小,即初始超静孔隙水压越大,对软土初始卸荷模量的弱化就越强。同一固结围压相同的初始超静孔隙水压下,UU0.5 应力路径的初始卸荷模量要低于 UU0.0 应力路径的初始卸荷模量。

3)深入分析发现,初始超静孔隙水压为 20 kPa 对应的初始卸荷模量,相对于 0 kPa 时减幅不大。但是,初始超静孔隙水压由 20 kPa 增大到 40 kPa 时,初始卸荷模量首次过大地减小,这种现象在固结围压越大时表现越明显(图 4),说明在 20~40 kPa 之间存在某特定值,当初始超静孔隙水压大于此特定值,初始卸荷模量会随着孔隙水压的增大首次大幅度下降。但由于缺少相关文献,且不能确定 20~40 kPa 之间某个孔隙水压对初始卸荷模量的影响最大,因此,笔者将在后续研究中开展初始超静孔隙水压为 25、30、35 kPa 下的试验,寻求软土的初始超静孔隙水压临界值,以此作为富水软土地下空间施工过程中孔隙水压控制的参考标准。

表 3 软土应力-应变双曲线函数拟合参数

Table 3 Fitting parameters of stress-strain hyperbolic function of soft soil

应力路径	固结围压/ kPa	初始超静孔隙 水压/kPa	$a/\text{MPa}^{-1}$	$E_i/\text{MPa}$
UU0.0	100	0	0.079 1	12.64
	100	20	0.092 2	10.85
	100	40	0.146 1	6.84
	100	60	0.255 5	3.91
	200	0	0.0235	42.55
	200	20	0.024 9	40.16
	200	40	0.031 0	32.30
	200	60	0.039 1	25.58
	300	0	0.014 0	71.43
	300	20	0.014 8	67.57
	300	40	0.018 7	53.48
	300	60	0.021 6	46.30
UU0.5	100	0	0.093 2	10.73
	100	20	0.127 1	7.87
	100	40	0.260 8	3.83
	100	60	0.413 0	2.42
	200	0	0.038 2	26.21
	200	20	0.040 2	24.88
	200	40	0.050 0	20.01
	200	60	0.060 8	16.44
	300	0	0.022 0	45.45
	300	20	0.022 9	43.67
	300	40	0.029 1	34.37
	300	60	0.033 2	30.12

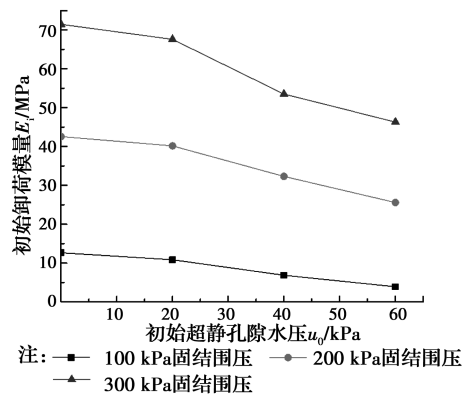


图 4 初始超静孔隙水压与初始卸荷模量的关系

Fig. 4 Relation between initial excess pore water pressure and initial unloading modulus

### 2.3 超静孔隙水压对软土卸荷蠕变力学特性的影响

超静孔隙水压作用下,软土卸荷蠕变力学特性对富水软土地区地下空间开挖引起软土的流变破坏研究至关重要。对超静孔隙水压下软土卸荷蠕变试验数据进行整理分析,绘制出部分应变-时间曲线,如图5所示。

对比分析图5(a)~(d)可知,软土卸荷蠕变具有以下力学特性:

1)对比软土卸荷强度试验和蠕变试验发现,土样在蠕变条件下受破坏时的偏应力明显低于软土卸荷强度试验中的偏应力,约为卸荷强度试验中偏应力的90%。其原因是,在卸荷强度试验过程中,软土轴向变形并未得到充分发展就进行下一级加载,而在卸荷蠕变试验过程中,软土蠕变变形得到充分发展,蠕变损伤逐渐积累导致蠕变强度降低。因此,在富水软土地下空间开挖过程中,应高度重视软土围岩的侧向蠕变,并尽可能控制侧向蠕变速率和发生蠕变的时间。

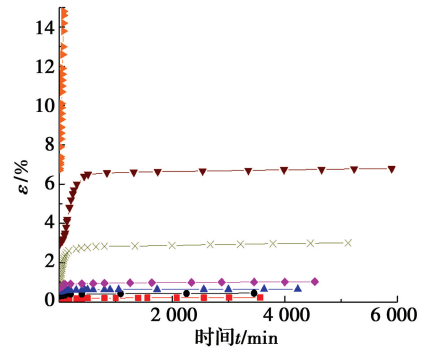
2)相同应力路径和固结围压下,初始超静孔隙水压越大,达到软土卸荷蠕变破坏所需的偏应力越低,即高孔隙水压更容易导致卸荷蠕变破坏。在高孔隙水压试验条件下,软土达到蠕变平衡所需的时间变长,卸荷蠕变通常只出现减速蠕变和破坏蠕变2个阶段,即较低偏应力时,卸荷蠕变变形较小,甚至可以忽略不计;一旦偏应力继续增大到某一级,土样会在该级荷载下变形迅速增大而发生破坏蠕变。此时,土样的破坏具有显著的突发性,破坏形式为鼓型破坏(见图6)。

3)软土卸荷蠕变特性对初始超静孔隙水压的敏感性较大。随着初始孔隙水压的增大,瞬时变形陡增,土样在更短的时间内就进入蠕变变形阶段,且随着蠕变变形量的增大,软土卸荷蠕变的非线性特性更加明显。

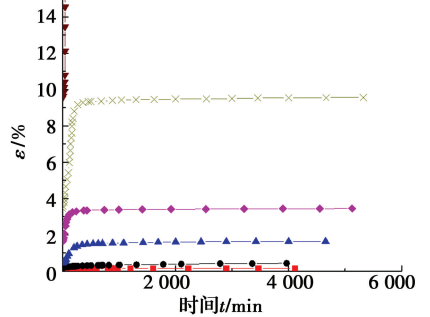
### 2.4 超静孔隙水压的时效特性

孔隙水压的时效性,对分析软土卸荷蠕变过程中土体体积改变、蠕变过程的发展和破坏具有重要作用。因此,整理出固结围压100 kPa、UU0.0应力路径下卸荷蠕变全过程的孔压-时间曲线,如图7所示。

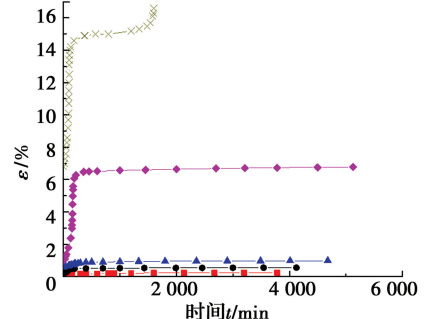
由图7可以看出,软土卸荷蠕变过程中超静孔隙水压的时效性具有如下特征:



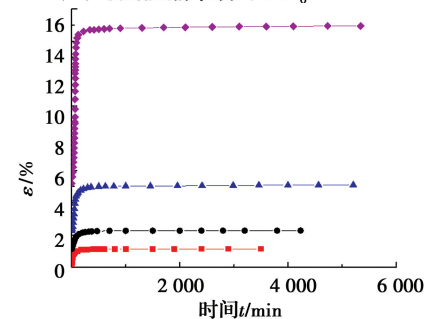
(a) 初始超静孔隙水压  $u_0=0$  kPa



(b) 初始超静孔隙水压  $u_0=20$  kPa



(c) 初始超静孔隙水压  $u_0=40$  kPa



(d) 初始超静孔隙水压  $u_0=60$  kPa

注: —  $\sigma_3=90$  kPa,  $\sigma_1=189$  kPa    —  $\sigma_3=50$  kPa,  $\sigma_1=189$  kPa  
—  $\sigma_3=80$  kPa,  $\sigma_1=189$  kPa    —  $\sigma_3=40$  kPa,  $\sigma_1=189$  kPa  
—  $\sigma_3=70$  kPa,  $\sigma_1=189$  kPa    —  $\sigma_3=30$  kPa,  $\sigma_1=189$  kPa

图5 UU0.0应力路径、固结围压为100 kPa时应变-时间曲线

Fig. 5 Strain-time curve under in the stress path UU0.0 (100 kPa confining pressure)

1)在卸荷蠕变试验过程中,超静孔隙水压总体呈现出下降趋势,其原因是卸荷造成土体侧向约束减小,在不排水条件下,土体产生侧向膨胀,最终导致超静孔隙水压减小。尤其是土样即将发生破坏蠕



图6 试样的鼓型破坏

Fig. 6 Drum type failure diagram of specimen

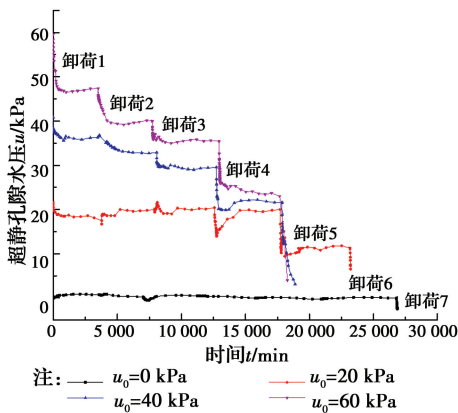


图7 不同初始孔隙水压下的孔压-时间曲线

Fig. 7 Pore pressure- time curve under different initial pore water pressures

变时,较高的偏应力在短时间内引起土体过大的塑性剪切变形,侧向膨胀现象更加明显,超静孔隙水压会迅速下降。

2)软土卸荷蠕变过程中,孔隙水压表现出不同的时效性。当 $u_0=0、20$  kPa时,卸荷蠕变过程中孔隙水压几乎都在初始值附近上下小幅波动,直到土样在破坏前才急剧下降;而当 $u_0=40、60$  kPa时,每一级卸荷后超静孔隙水压都急剧下降。这说明,较高的初始超静孔隙水压带来了土体内部孔隙更大的变化,其自愈能力无法完全恢复这一孔隙变化,因此,土体内部自由水增多、土体强度降低。结合图5还可以看出,由于较高初始超静孔隙水压的存在,外部荷载很大一部分施加在不可压缩的自由水上,使得土体有效应力减小、抗剪强度降低,因此,蠕变更加明显。

3)超静孔隙水压发生上述变化与软土卸荷蠕变机理有关。软土卸荷蠕变的实质是土体内部颗粒结构的损伤效应与自愈效应的耦合过程。卸荷发生

后,土体颗粒间的受力平衡被打破,土体颗粒调整相对位置以寻求新的平衡,若此时土体的自愈效应大于损伤效应时,土体进入衰减蠕变阶段,超静孔隙水压先下降,然后再缓慢上升并趋于稳定,这一过程在 $u_0=40$  kPa和60 kPa前3次卸荷阶段尤为明显。当损伤效应大于自愈效应时,土体颗粒间通过调整一直寻求不到新的平衡,此时,剪切引起的塑性变形直接表现为显著的侧向膨胀,导致土体内超静孔隙水压急剧下降,如不同初始孔隙水压下蠕变破坏阶段。因此,在实际工程中,应密切监测超静孔隙水压的大小及变化速率,尤其是应注意在某级卸荷下超静孔隙水压下降过大的情况。

### 3 结论

通过施加不同的初始超静孔隙水压,考虑UU0.0和UU0.5卸荷应力路径,对深圳市淤泥质软土进行不排水三轴卸荷强度试验和卸荷蠕变试验,得出以下结论:

1)试验得到不同初始超静孔隙水压条件、不同固结围压和卸荷应力路径下的应力-应变关系。软土卸荷强度应力-应变曲线大致呈双曲线形式;UU0.5应力路径相对于UU0.0应力路径更容易导致土体发生卸荷强度破坏。

2)初始超静孔隙水压对软土卸荷强度具有极大的弱化作用,固结围压越低、初始超静孔隙水压越高,软土卸荷破坏就越具有突发性。同时,在不同初始超静孔隙水压作用下,软土的卸荷应力-应变归一化结果显示,随着固结围压的减小和超静孔隙水压的增大,初始卸荷模量减小。

3)相同条件下,软土卸荷蠕变破坏的偏应力明显低于卸荷强度试验中的偏应力,约为卸荷强度试验中偏应力的90%。软土卸荷蠕变对初始超静孔隙水压敏感性很大,孔隙水压越大,非线性蠕变变形越大。在实际工程中,应高度重视软土卸荷蠕变,并尽可能控制卸荷蠕变速率和发生时间。

4)在软土不排水卸荷蠕变过程中,超静孔隙水压随着每级卸荷而突然降低,然后再趋于平稳;但在卸荷蠕变破坏前,超静孔隙水压会突然陡降,作为软土卸荷蠕变破坏的先兆。因此,在实际工程中,应密切监测超静孔隙水压的变化规律。

软土卸荷强度试验和卸荷蠕变试验均表明,初始孔隙水压在20~40 kPa之间存在一个临界水压,

使其初始卸荷模量急剧下降或造成孔隙水压变化趋势不一致(图7),建议后续研究在初始超静孔隙水压为25、30、35 kPa的试验中来寻找该临界水压,可将该临界水压作为富水软土地下空间施工过程中超静孔隙水压控制的一个参考值。

### 参考文献:

- [1] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.  
WANG M S. Tunneling by TBM/shield in China: state-of-art, problems and proposals [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 179-187. (in Chinese)
- [2] 钱七虎, 戎晓力. 中国地下工程安全风险管理的现状、问题及相关建议[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 649-655.  
QIAN Q H, RONG X L. State, issues and relevant recommendations for security risk management of China's underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 649-655. (in Chinese)
- [3] WHEELER S J, NÄÄTÄNEN A, KARSTUNEN M, et al. An anisotropic elastoplastic model for soft clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 403-418.
- [4] LEONI M, KARSTUNEN M, VERMEER P A. Anisotropic creep model for soft soils [J]. Géotechnique, 2008, 58(3): 215-226.
- [5] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1075-1082.  
CHEN K, YAN S W, SUN L Q, et al. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1075-1082. (in Chinese)
- [6] 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 G B, HOU X Y. Unloading stress-strain characteristic for soft clay [J]. Underground Engineering and Tunnels, 1997(2): 16-23. (in Chinese)
- [7] 周秋娟, 陈晓平. 侧向卸荷条件下软土典型力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2215-2221.  
ZHOU Q J, CHEN X P. Test research on typical mechanical characteristics of soft clay under lateral unloading condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2215-2221. (in Chinese)
- [8] 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(S1): 3244-3249.  
FU Y B, ZHU H H, YANG J. Experimental study on time-dependent properties and pore water pressure of soft soil under unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup1): 3244-3249. (in Chinese)
- [9] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 天津市区第一海相层粉质黏土卸荷变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1237-1242.  
ZHENG G, YAN Z X, LEI H Y, et al. Experimental studies on unloading deformation properties of silty clay of first marine layer in Tianjin urban area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1237-1242. (in Chinese)
- [10] CUI Y J, NGUYEN X P, TANG A M, et al. An insight into the unloading/reloading loops on the compression curve of natural stiff clays [J]. Applied Clay Science, 2013, 83/84: 343-348.
- [11] TSUTSUMI A, TANAKA H. Compressive behavior during the transition of strain rates [J]. Soils and Foundations, 2011, 51(5): 813-822.
- [12] TANAKA H, TSUTSUMI A, OHASHI T. Unloading behavior of clays measured by CRS test [J]. Soils and Foundations, 2014, 54(2): 81-93.
- [13] 张坤勇, 李广山, 梅小洪, 等. 基于  $K_0$  固结排水卸荷应力路径试验粉土应力-变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1182-1188.  
ZHANG K Y, LI G S, MEI X H, et al. Stress-deformation characteristics of silty soil based on  $K_0$  consolidation and drainage unloading stress path tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1182-1188. (in Chinese)
- [14] CHEN L. Active earth pressure of retaining wall considering wall movement [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2014, 18(8): 910-926.
- [15] HUANG M, LIU X R, ZHANG N Y, et al. Calculation of foundation pit deformation caused by deep excavation considering influence of loading and unloading [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(9): 2164-2171.



- [16] 魏新江, 陈伟军, 魏纲. 盾构施工引起土体超孔隙水压力峰值的计算及影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 280-285.  
WEI X J, CHEN W J, WEI G. Calculation and factors for distribution of initial distribution of peak value of excess pore water pressure due to shield construction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 280-285. (in Chinese)
- [17] 李晓静, 李术才, 姚凯, 等. 黄泛区路基强夯时超孔隙水压力变化规律试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2815-2820.  
LI X J, LI S C, YAO K, et al. Test study of changing rules of excess pore water pressure during dynamic consolidation at subgrade of expressway in Yellow River flood area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2815-2820. (in Chinese)
- [18] JIAN Z, CHANGJIE X. Impact of shear stress on strain and pore water pressure behavior of intact soft clay under principal stress rotation [J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(3): 447-462.
- [19] 熊春发, 孔令伟, 杨爱武. 海积软黏土力学特性与应力路径的关联性研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Sup2): 341-345.  
XIONG C F, KONG L W, YANG A W. Correlation between mechanical properties of marine soft clay and stress path [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup2): 341-345. (in Chinese)

(编辑 胡玥)