

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1992

基于不同卸荷速率与路径影响下 吹填土力学特性研究

杨爱武^{1,2}, 杨少坤^{1,2}, 张振东²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 运用应力路径三轴试验仪, 对天津滨海吹填土开展等向固结条件下的不排水卸荷试验, 探讨不同卸荷路径及卸荷速率对应力-应变关系、孔压变化规律及破坏强度特性的影响。试验结果表明: 各卸荷路径下应力-应变曲线都近似呈双曲线型。UU_{0.0} (径向卸荷、轴向不卸荷) 卸荷路径下试样变形表现为轴向压缩, 且孔压变化曲线存在明显的屈服点; UU_{2.0} (轴向和径向均卸荷), UU_∞ (轴向卸荷、径向不卸荷) 及 UL_{1.0} (轴向卸荷、径向加荷) 路径下试样变形表现为轴向伸长, 孔压随着应变的增加而增大, 最终速度减缓并趋于稳定增长状态。同种路径下, 卸荷速率越大, 卸荷初期孔压发展越缓慢, 峰值孔压越大。对 0.1、0.2、0.3 kPa/min 卸荷速率下的应力-应变曲线研究发现, 卸荷压缩路径下初始切线模量受卸荷速率影响较大, 拉伸路径下则不明显。UL_{1.0} 路径下卸荷破坏强度最大, UU_{2.0} 路径下该值最小, UU_∞ 路径下则居中。同一卸荷路径下, 土体破坏强度随卸荷速率的增大而增大。对各应力-应变曲线进行归一化处理, 构建了考虑卸荷速率及卸荷路径影响的初始切线卸荷模量和卸荷破坏强度预测公式。

关 键 词: 吹填土; 卸荷路径; 卸荷速率; 应力-应变; 初始卸荷模量; 卸荷破坏强度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 09-2891-11

Experimental study of mechanical properties of dredger fill under different unloading rates and stress paths

YANG Ai-wu^{1,2}, YANG Shao-kun^{1,2}, ZHANG Zhen-dong²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The undrained unloading tests of isotropic consolidation on soft dredger fill of Tianjin Binhai are performed using the stress-path triaxial apparatus to determine the effects of different unloading stress paths and unloading rates on stress-strain relationship, pore pressure variation and failure strength characteristics. Some findings are as follows. The stress-strain curves under each unloading path are approximately hyperbolic curves. Under the unloading stress path of UU_{0.0} (radial unloading, axial not unloading), the deformation of samples exhibits axial compression, and the curves of pore pressure have sharp yield points. On the contrary, the deformation of samples under the path of UU_{2.0} (both axial and radial unloading), UU_∞ (axial unloading, radial not unloading) and UL_{1.0} (axial unloading, radial loading) show axial tension. In this way, the pore pressure increases with the increase of strain, and finally the growth rate of the pore pressure slows down and tends to increase steadily. Under the same stress paths, the larger the unloading rate, the slower the development of the pore pressure in the initial stage of unloading and the greater the peak pore pressure. The stress-strain curves at unloading rate of 0.1, 0.2 and 0.3 kPa/min are found that the initial tangent modulus is greatly affected by unloading rate under unloading compression paths, while it is not influenced under the tensile paths. The value of unloading failure strength is the maximum under the UL_{1.0} path, the minimum in the UU_{2.0} path, and centered in the UU_∞ path. Under the same unloading path, the failure strength increases with the increase of the unloading rate. According to the normalization of stress-strain curves, the formulas, which considers the influence of unloading rates and unloading stress paths, are developed to estimate the initial tangent modulus and the unloading failure intensity.

Keywords: soft dredger fill; unloading stress path; unloading rate; stress-strain; initial unloading modulus; unloading failure strength

收稿日期: 2019-11-25

修回日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51978440); 天津市科技计划项目 (No.19JCZDJC39700, No.2016CJ01)。

The work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51978440) and Tianjin Science and Technology Project (19JCZDJC39700, 2016CJ01).

第一作者简介: 杨爱武, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事软黏土力学特性及土体微观结构研究。E-mail: tulilab@163.com

1 引言

基坑开挖是岩土工程中典型的开挖卸荷问题。基坑开挖过程中,土体在经历不同的卸荷路径及卸荷速率下达到同一应力状态时,表现出不同的力学性状^[1]。天津滨海新区地质条件复杂,具有典型的海相冲积地层特征,以淤泥、淤泥质黏土等软弱土层为主^[2],随着环渤海湾吹填造陆工程大规模地开展,利用航道疏浚作为吹填土地基并进行基础设施的建设发挥出巨大优势,而吹填土力学特性受施工开挖等因素影响十分显著,因此有必要加强土体卸荷特性方面的研究。

目前许多学者从不同角度对土体卸荷状态下的力学特性进行了试验研究及理论分析,并取得了一些成果。刘维宁等^[3]提出了开挖作用分区的新概念,并用新的应力路径分类方法来表达这种分区;张荣堂等^[4]利用应力路径仪对汉口某区域黏土进行了一系列减P路径试验,并由此建立了一个与应力路径有关的归一化应力-应变双曲线模型;周秋娟等^[5-6]通过三轴卸荷蠕变试验发现不同的卸荷路径使土体产生不同性质的蠕变变形,并进行了不同卸荷条件下围压、卸荷路径及排水的卸荷流变试验,得到了能考虑围压及卸荷路径影响的软土卸荷流变经验模型;王绪民等^[7]发现在卸荷应力路径下,孔压表现出先增加后降低的特性;刘明等^[8]通过对重塑黏土进行一系列的 K_0 固结后卸除围压或轴压剪切试验,总结了关于卸荷应力路径下黏性土变形过程与强度变化关系;刘熙媛等^[9]等利用TSZ30型三轴试验仪对天津滨海软土进行了不同卸荷路径的模拟试验,研究了侧向卸荷过程对土体抗剪强度指标的影响;王祥秋等^[10]探讨了不同应力路径条件下土体的力学特性,得出侧向卸荷条件下土体的抗剪强度指标

大幅度降低的结论,且有效应力指标降低幅度大于总应力指标;宰金珉等^[11]对南京河西地区原状黏性土进行应力路径试验,发现侧向卸荷试验得到的割线模量大于轴向加荷试验得到的割线模量,但其有效抗剪强度指标基本一致;郑刚等^[12]探索了天津市地层中第一海相层底部的粉质黏土卸荷路径下的变形特性,发现其初始切线卸荷模量与固结围压成正比。众多学者^[13-16]的研究均表明,土体的力学特性与土体卸荷时的应力路径密切相关。

综上所述,单独在卸荷路径对土体力学性质的研究上已经取得诸多成果,但综合考虑卸荷路径与卸荷速率作用的研究目前还很少,对天津吹填土在不同卸荷速率条件下的力学特性研究仍有大量工作要做。基于此,本文在设置不同卸荷路径的基础上,选取不同卸荷速率进行一系列等向固结条件下的不排水卸荷试验,以模拟基坑开挖工程中不同的卸荷方式及开挖速度,研究不同卸荷路径与不同卸荷速率作用下土体应变、孔压及强度特性,以期对天津吹填土地下空间的利用提供理论支撑。

2 试验简介

2.1 试验土样及设备

天津滨海疏浚土吹填的厚度,根据原始泥面标高的不同而不同,一般为3.0~8.0 m不等^[17]。本次试验用土取自天津滨海新区经过真空预压处理的某吹填场地,取土深度集中在5~8 m。由于吹填土层是滨海新区基坑开挖工程涉及到的主要土层之一,因此研究该土层在不同卸荷条件下的力学性状具有一定的针对性。吹填土基本物理力学性质指标如表1所示,可以看出所选取的吹填土样具有典型的软土特性,具备含水率高、孔隙比大、强度低、压缩性高等特点,工程性质较差。

表1 吹填土基本物理力学性质指标

Table 1 Basic physical and mechanical properties of soft dredger fill

含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
48.5	1.74	1.403	44.2	23.0	21.2	1.20	1.036	2.32	22.3	16.6

注:抗剪强度指标由常规三轴固结不排水试验(CU)测得。

本次试验为等向固结不排水卸荷试验,首先通过专用削样器将钻孔原状土制备成圆柱体试样,其尺寸与常规三轴试样相同,高度为80.0 mm、直径为39.1 mm,试验前将制备好的土样进行真空饱和,并保存在已抽过气的水中。试验仪器采用英国威克阿姆·法兰斯(Wykeam Farrance)公司研制的应力路

径控制式三轴仪,该仪器具备一套自动三轴试验系统,可控制应力路径试验所需参数,并由采集传感器反馈试验数据。

2.2 卸荷路径确定

基坑开挖过程中各部位土体经历的应力路径较为复杂。为便于研究,将基坑影响范围内土体按

被动土压区和主动土压区进行分类,并用图 1 所示土单元体代表不同的应力路径^[12]。被动土压区:随着上部土体开挖,其竖向应力减少,即轴向卸荷,但由于坑底隆起及支护结构的位移,横向可能卸荷也可能加荷。对于开挖面附近土体单元 A,由于竖向卸荷最为明显,认为其竖向卸荷、横向不卸荷,卸荷路径表示为 UU_{∞} ;而对于基坑支护附近的土体,如土单元 B 和单元 C,其竖向卸荷,同时考虑竖向、横向载荷按一定比例卸荷或加荷,卸荷路径表示为 $UL_{1.0}$ 、 $UU_{2.0}$ 。主动土压区:随着基坑的开挖,支护结构发生侧向位移,水平向应力逐渐减小,竖向应力基本保持不变。对于基坑支护外侧的土体,如土单元 D,极限情况下则认为其水平向完全卸荷,竖向荷载不变,卸荷路径表示为 $UU_{0.0}$ 。综上所述,设计 4 种有代表性的卸荷路径,分别为 UU_{∞} 、 $UL_{1.0}$ 、 $UU_{2.0}$ 、 $UU_{0.0}$,其中 UU 代表轴向和径向均卸荷, UL 代表轴向卸荷、径向加荷,脚标表示轴向应力变化量与径向应力变化量的比值,且无正负之分,具体的卸荷应力路径如图 2 所示。图中 σ_1 、 σ_3 分别为轴压、围压。

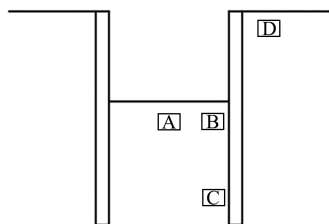


图 1 土体应力状态示意图
Fig.1 Schematic diagram of stress state of soil

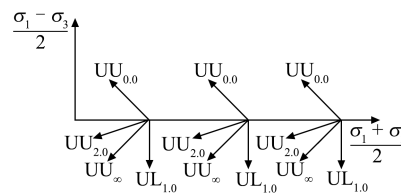


图 2 卸荷应力路径示意图
Fig.2 Schematic diagram of unloading stress paths

2.3 卸荷速率选取

基坑开挖工程中,不仅卸荷路径影响土体的变形及强度特征,开挖的快慢(即卸荷速率)对土体性状也有很大的影响,选择多大的卸荷速率进行施工最具合理性值得深入研究。本文拟通过室内试验在不同卸荷应力路径的基础上初步设置多组不同卸荷速率,即设置 3 组试验:I 组卸荷速率为 0.01、0.02、0.03 kPa/min; II 组卸荷速率为 0.1、0.2、0.3 kPa/min; III 组卸荷速率为 1、2、3 kPa/min。3 组试验围压均为 75 kPa,卸荷路径均采用 UU_{∞} ,具体方案如表 2 所示。

表 2 卸荷速率方案初选

Table 2 Primary scheme of unloading rates

组别	卸荷速率/(kPa · min ⁻¹)	围压 σ_3 /kPa	卸荷路径
I	0.01, 0.02, 0.03	75	UU_{∞}
II	0.1, 0.2, 0.3	75	UU_{∞}
III	1, 2, 3	75	UU_{∞}

由表 2 试验方案得到 3 组不同卸荷速率下的应力-应变关系曲线如图 3 所示,图中 ε 为应变。

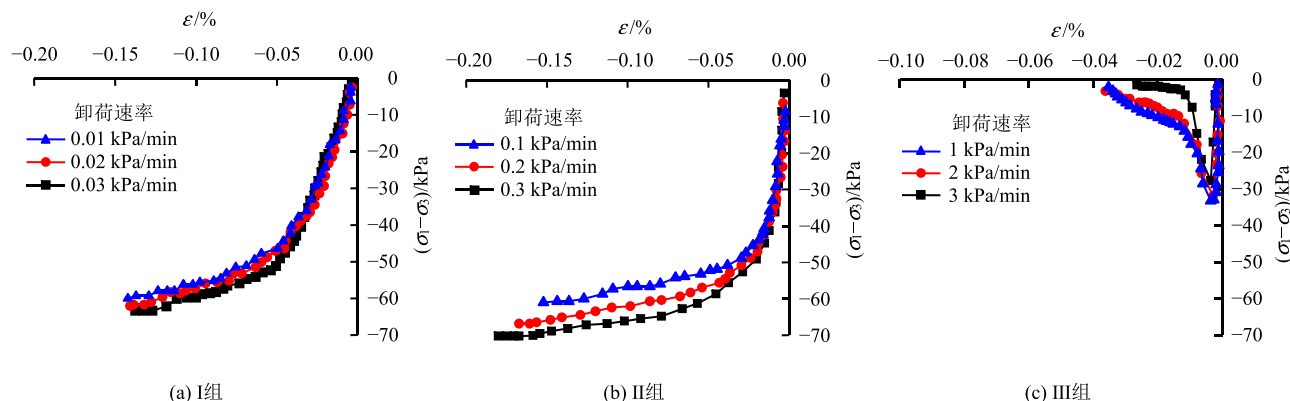


图 3 不同卸荷速率应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of different unloading rates

由图 3 可知,将应力-应变曲线形态归纳为两种类型:卸荷速率为 1、2、3 kPa/min 的应力-应变曲线形态为应变软化型,具有明显的峰值拉应力;卸荷速率为 0.01、0.02、0.03 kPa/min 及 0.1、0.2、

0.3 kPa/min 的应力-应变曲线形态为应变硬化且近似呈双曲线型。这是因为,当卸荷速率为 0.01、0.02、0.03 kPa/min 及 0.1、0.2、0.3 kPa/min 时,土体受到拉应力作用较慢,由于土颗粒间黏结力的作用,使

得土体破坏存在一定的滞后效应,从而在一定应力范围内其应变发展较为缓慢。随着拉应力的持续增加,克服了部分由于键入咬合而联结在一起的颗粒间作用力,所以土体应变达到一定水平后,应力渐趋稳定;而当卸荷速率为 1、2、3 kPa/min 时,由于卸荷速率过快,破坏了土颗粒之间的联结强度和结构状态,部分脱离接触,土体内部结构遭受破坏程度较快,在应变很小时便产生拉裂破坏,但此时土体并未完全发生断裂,因此达到峰值应力后,拉应力随应变的增加迅速减小直至土样完全被拉断,曲线呈现应变软化型。

由图 3 还可以看出,卸荷速率为 0.01、0.02、0.03 kPa/min 时,拉应变随主应力差增大而增大,但 3 种速率作用下的应力-应变曲线差别不明显,即应力-应变曲线对该卸荷速率并不敏感,故在工程实际中该卸荷速率实际意义不大,因此本文不对其进行研究。卸荷速率为 1、2、3 kPa/min 时,应力-应变曲线为软化型,土体发生拉裂破坏过快,并不符合实际施工条件,因此本文也不对其进行研究。根据以上分析,结合工程实际,最终选取的卸荷速率为 0.1、0.2、0.3 kPa/min。具体试验方案如

表 3 所示。

表 3 试验方案
Table 3 Test schemes

控制方式	固结阶段		卸荷阶段		
	固结方法	围压 σ_3/kPa	卸荷路径	卸荷速率 $/(\text{kPa} \cdot \text{min}^{-1})$	排水条件
应力控制	等向固结	50	UU _{0.0}	0.1, 0.2, 0.3	不排水
应力控制	等向固结	75	UU _{0.0}	0.1, 0.2, 0.3	不排水
应力控制	等向固结	100	UU _{0.0}	0.1, 0.2, 0.3	不排水
应力控制	等向固结	50	UL _{1.0}	0.1, 0.2, 0.3	不排水
应力控制	等向固结	75	UU _{2.0}	0.1, 0.2, 0.3	不排水
应力控制	等向固结	100	UU _∞	0.1, 0.2, 0.3	不排水

3 试验结果与分析

卸荷土体变形分伸长和压缩两种类型^[18]。由分析可知,表 3 确定的 4 种卸荷路径中,UU_{0.0} 路径下试样变形表现为轴向压缩,其他 3 种卸荷路径下试样变形均表现为轴向伸长,或者称为“挤长”。

3.1 应力-应变关系

不同卸荷路径下试样的应力-应变曲线如图 4~7 所示。

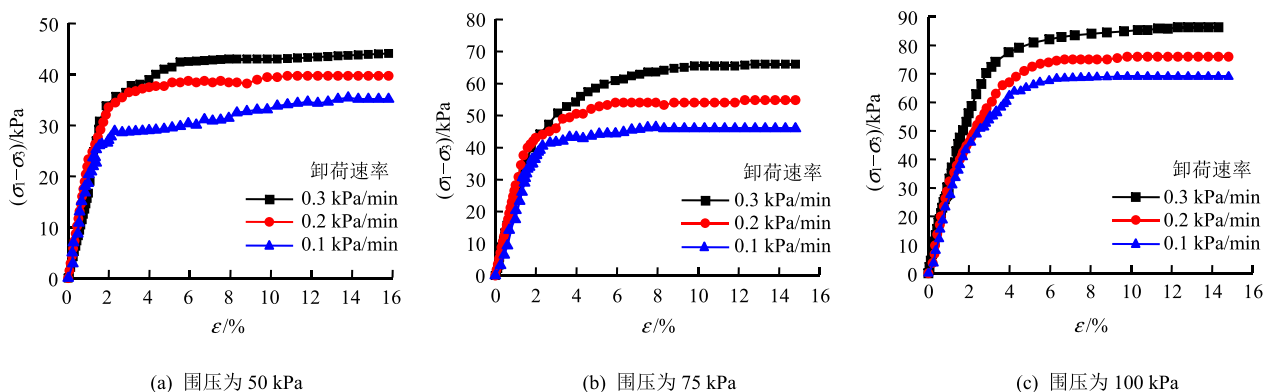


图 4 路径 UU_{0.0} 不同围压及卸荷速率下应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of UU_{0.0} unloading path under different confining pressures and unloading rates

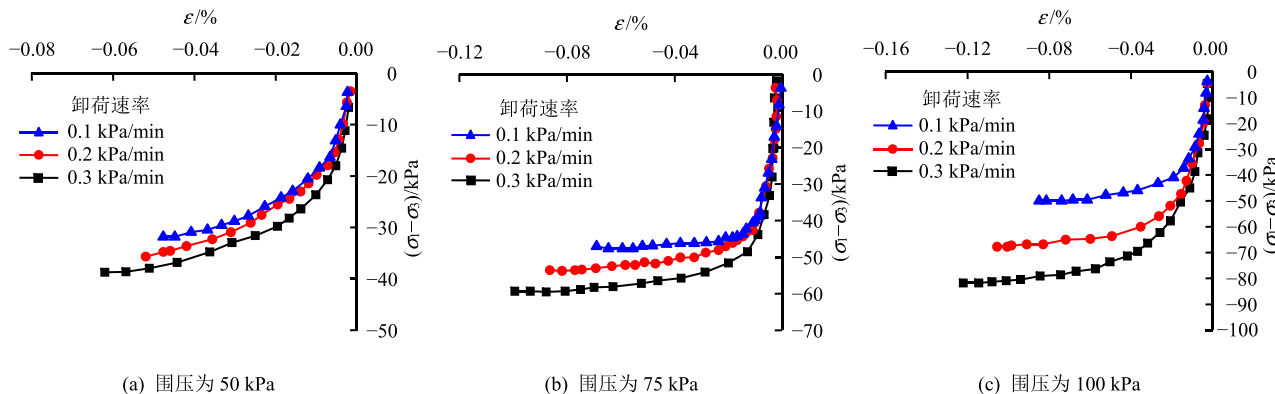
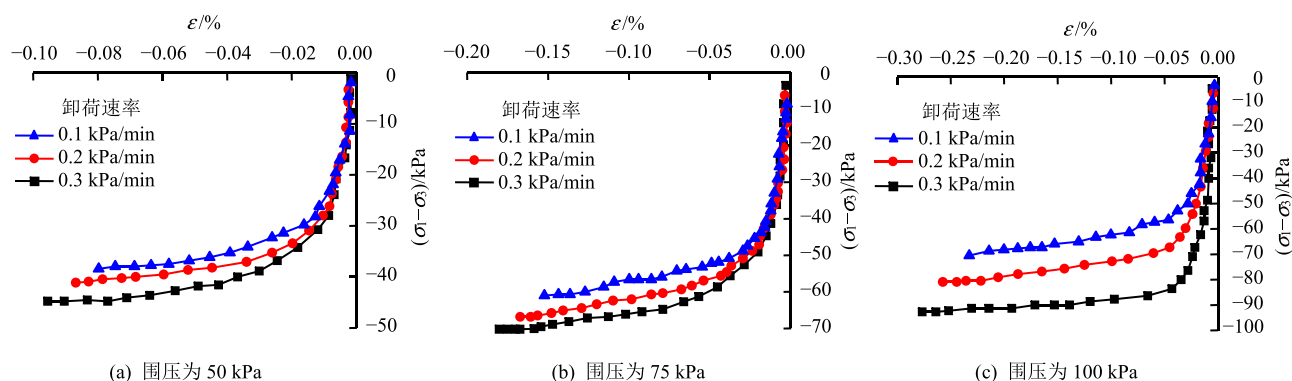
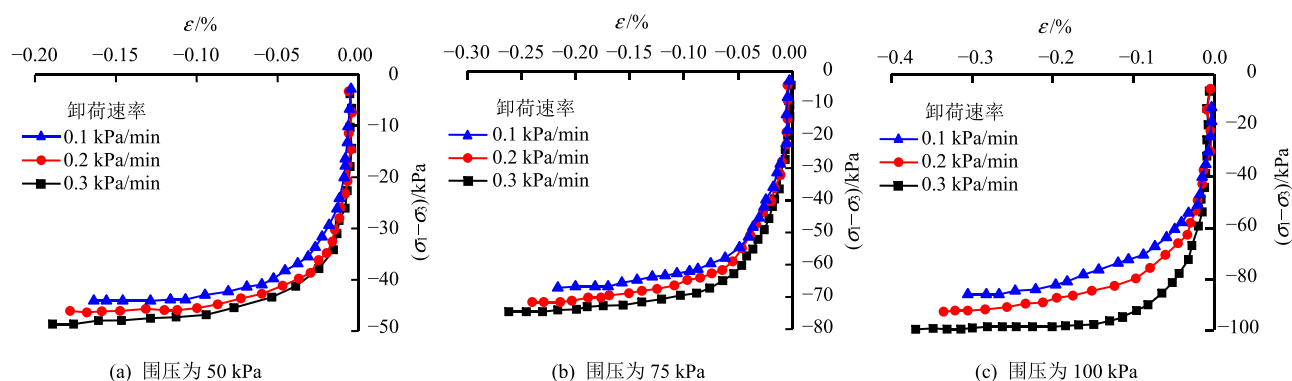


图 5 路径 UU_{2.0} 不同围压及卸荷速率下应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of UU_{2.0} unloading path under different confining pressures and unloading rates

图6 路径 UU_{∞} 不同围压及卸荷速率下应力-应变曲线Fig.6 Stress-strain curves of UU_{∞} unloading path under different confining pressures and unloading rates图7 路径 $UL_{1.0}$ 不同围压及卸荷速率下应力-应变曲线Fig.7 Stress-strain curves of $UL_{1.0}$ unloading path under different confining pressures and unloading rates

由图4~7可以发现以下规律：

(1) 各卸荷路径及围压下的应力-应变曲线形状相似，都存在明显的非线性特征，近似呈双曲线关系。其他条件相同情况下，在卸荷的开始阶段，不同卸荷速率下的应力-应变曲线分布较为集中，说明在卸荷初期应力-应变曲线对卸荷速率并不敏感；随着卸荷的不断进行，当应变达到一定值时，应力不再随应变的增加而增加，并逐渐趋稳定，且卸荷速率越大，土体破坏应力越大。

(2) $UU_{0.0}$ 卸荷路径下的应力-应变曲线明显区别于其他3组应力路径： $UU_{0.0}$ 路径下试样变形表现为轴向压缩，且试样达到破坏时的轴向应变多在2%~4%之间，比常规三轴压缩试验要小很多，即基坑开挖工程中支护结构后侧土体在产生小应变时便发生破坏，这表明基坑外土体在较小的侧向变形下便可达到主动极限平衡状态，因此在实际工程中要有效控制挡土墙的水平位移，以避免墙后土体发生滑移破坏； $UU_{2.0}$ 、 UU_{∞} 及 $UL_{1.0}$ 路径下试样表现为轴向伸长，应变绝对值均处于0.4%以内，而挡土墙工程的土体应变值一般在0.1%以下，地基及隧道工程土体的应变值稍大一些，但也不会超过1%^[19]，故此组应力路径试验成果可以为研究土体

小应变提供参考资料。

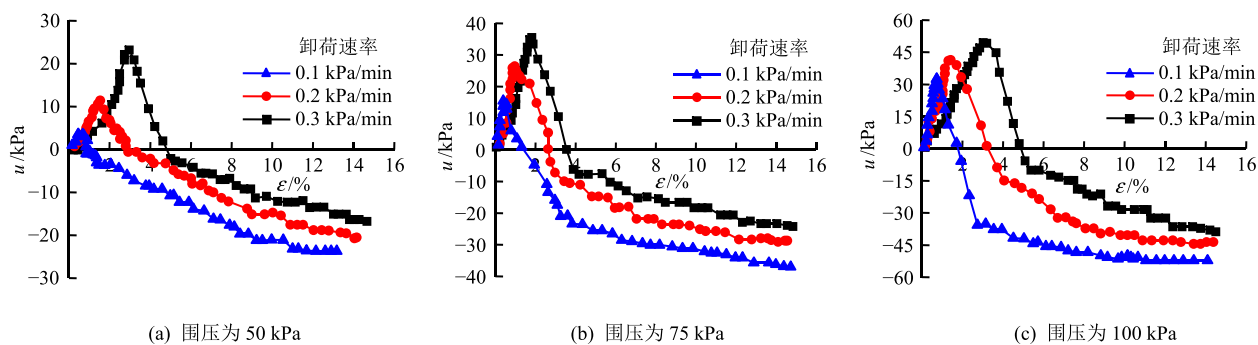
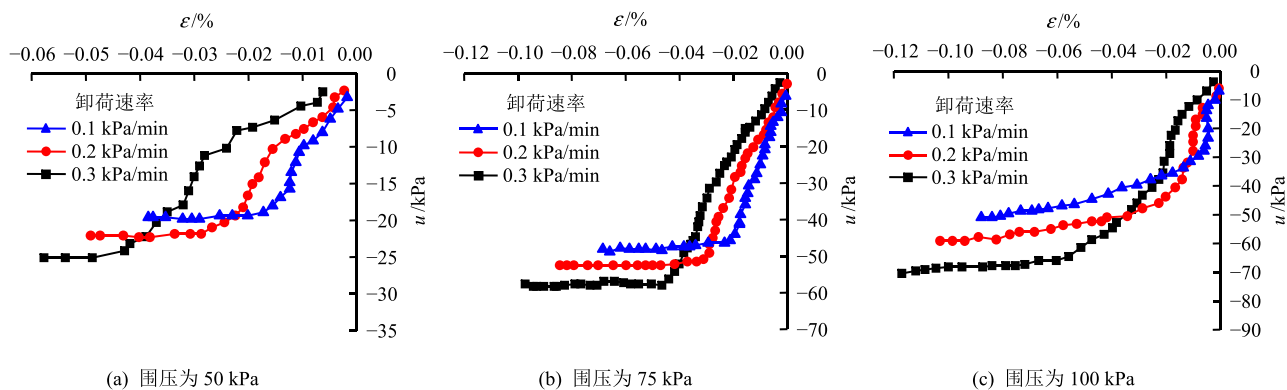
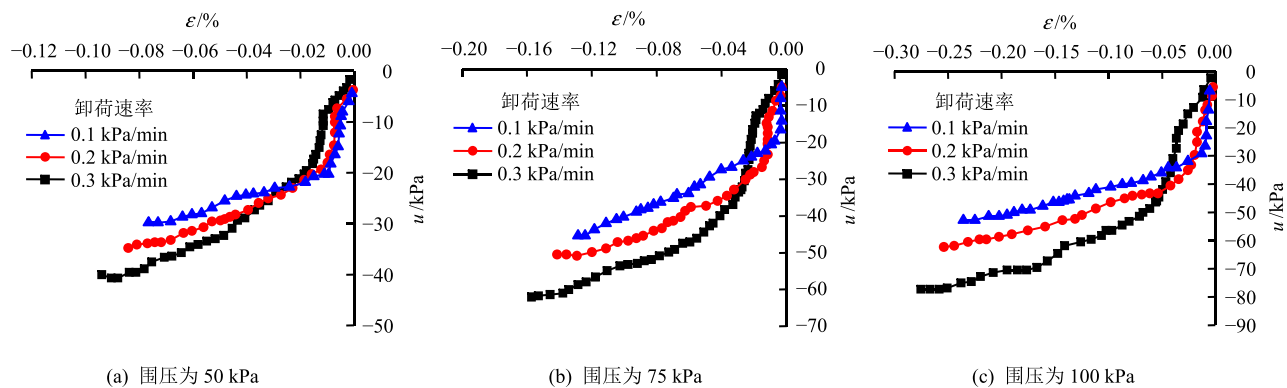
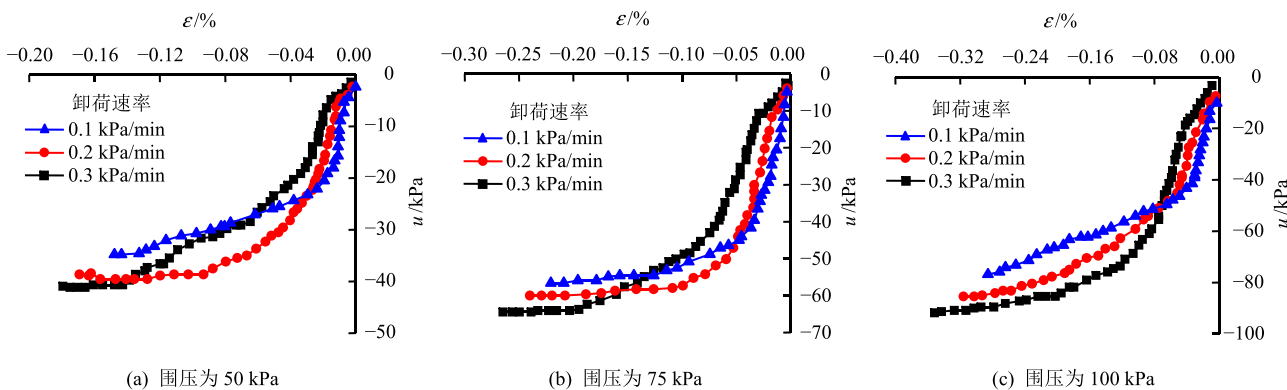
(3) 同种应力路径下，随着固结围压的增大，不同卸荷速率下的曲线差别更为显著，即围压越大，卸荷速率对土体影响也越大，在一定程度上体现出结构性对土体应力-应变关系的影响。分析可知，当固结围压都不大时，土体结构性较弱又不稳定，较容易发生破坏且破坏强度区别不大；随着围压的增加，土体的原始结构性遭到一定破坏，土颗粒连接将发生不同程度的错动、断开或破裂，土颗粒在较大的固结压力作用下被挤压密实，粒间接触更加紧密，土体现有结构性增强的同时，其破坏强度亦大幅增加，此时受速率影响更加明显。

3.2 孔压变化规律

不同卸荷路径下试样孔压 u 与应变 ε 关系曲线见图8~11所示。

由图8~11可以看出：

(1) 卸荷压缩路径下的孔压变化规律与拉伸路径下的孔压变化规律明显不同： $UU_{0.0}$ 路径下，孔压先是随应变的增加而迅速上升，到达峰值点后急剧下降，变为负值并逐渐趋于稳定，峰值点即为土体屈服点； $UU_{2.0}$ 、 UU_{∞} 及 $UL_{1.0}$ 路径下，卸荷开始阶段，超静孔隙水压力随拉应变的增加而快速累

图 8 路径 $UU_{0.0}$ 下孔压变化曲线Fig.8 Change curves of pore pressure of $UU_{0.0}$ unloading path图 9 路径 $UU_{2.0}$ 下孔压变化曲线Fig.9 Change curves of pore pressure of $UU_{2.0}$ unloading path图 10 路径 UU_{∞} 下孔压变化曲线Fig.10 Change curves of pore pressure of UU_{∞} unloading path图 11 路径 $UL_{1.0}$ 下孔压变化曲线Fig.11 Change curves of pore pressure of $UL_{1.0}$ unloading path

积, 拉应变超过一定值后, 超静孔隙水压力增长逐渐放缓, 趋于稳定增长状态, 曲线均存在明显的转折点。这主要是由于不排水卸荷试验中, 试样将通过内部应力的自动调整, 以增大超静孔隙水压力, 进而使有效应力增加来保持试样体积不变。对于 $UU_{0.0}$ 路径来说, 在达到土体屈服点之前, 因弹性膨胀产生的负孔压 (超静孔隙水压力) 远远小于卸荷压缩产生的正孔压, 因此孔压先是迅速增大, 到达屈服点后, 由剪切破坏引起塑性变形产生的超静孔隙水压力和弹性膨胀产生的超静孔隙水压力共同作用使孔压快速下降, 导致超静孔隙水压力值增加更为明显; 对于卸荷拉伸路径, 由于土体在小应变条件下便发生拉伸破坏, 转折点后土体结构产生变化, 颗粒间孔隙变大使内部水流动更加自由, 所以由土体弹性膨胀和塑性变形引起的超静孔隙水压力增加不再明显, 孔压趋于稳定增长状态。

(2) 相同条件下卸荷速率越大, 卸荷初期孔压发展越缓慢, 峰值孔压越大。这是因为在卸荷的开始阶段, 卸荷速度越快, 因弹性膨胀产生的超静孔隙水压力来不及上升, 而随着卸荷的持续进行, 土体破坏应力增加, 最终孔压值也变大。

(3) 围压对孔压的发展亦有一定影响, 同等条件下, 围压越大, 最终趋于稳定时的孔压值也越大。产生这种现象的原因与前述应力-应变发展机制相

一致, 即等向固结条件下, 随着围压的增大, 土体结构性破坏增加, 原本由土颗粒通过其接触点而传递的压力 (有效应力), 便传给孔隙水承担, 引起孔隙水压力的显著增加。

4 初始切线卸荷模量

前人对大量土工试验数据进行研究, 发现应变硬化条件下土体应力-应变曲线可用双曲线关系来描述^[20-22], 即

$$(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) = \frac{\varepsilon_a}{b\varepsilon_a} \quad (1)$$

式中: σ_{1c} 、 σ_{3c} 分别为固结状态下的轴压和围压; ε_a 为轴向应变; b 为所拟合直线的斜率。将 $1/a = E_i$ 定义为初始切线卸荷模量, a 为所拟合直线的截距, $1/b = (\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 为应力-应变曲线的渐进线。因本试验中所有试样均为等向固结, 故 $(\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) = 0$, 因此可将式 (1) 转化为

$$a + b\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_a}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (2)$$

根据式 (2) 得到 $\varepsilon_a / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 关系曲线如图 12 所示。由图可见, 不同应力路径、不同卸荷速率条件下几乎所有曲线均呈良好的线性关系, 各

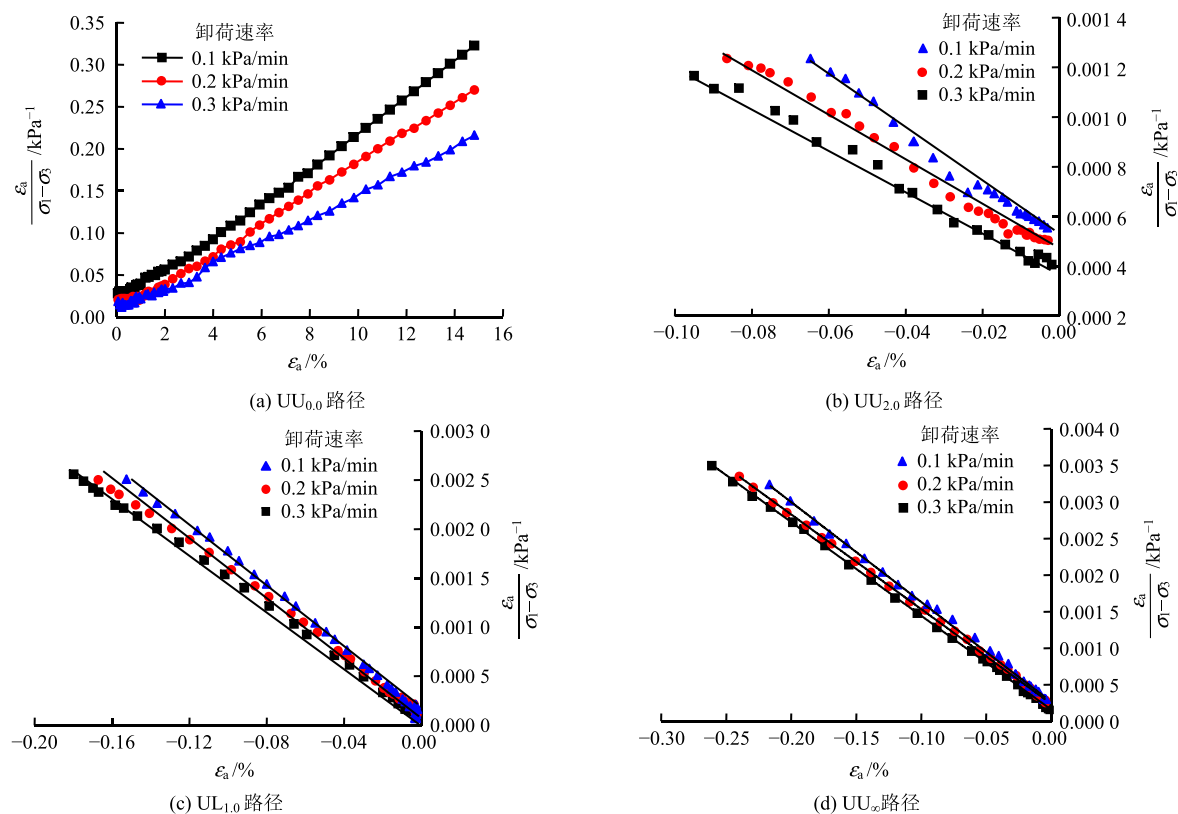


图 12 不同应力路径下初始卸荷模量

Fig.12 Initial unloading modulus of different unloading stress paths

曲线拟合参数值见表 4。限于篇幅, 仅对围压为 75 kPa 时的应力-应变曲线进行分析, 其他围压采用相同的分析方法。

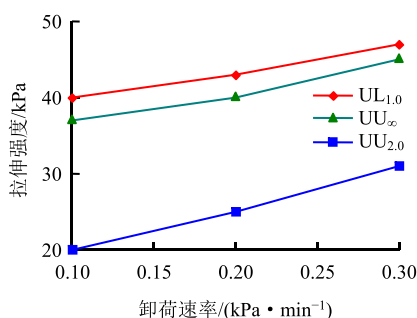
由表 4 可获得各卸荷路径下不同卸荷速率的初始卸荷模量值, 见表 5。为进一步探究卸荷模量与卸荷速率的关系, 对两者进行深入分析, 得到两者之间关系式与具体参数如表 5 所示, 其中 R^2 为曲线拟合度。

表 4 应力-应变曲线归一化拟合参数值
Table 4 Normalized fitting parameters of stress-strain curves

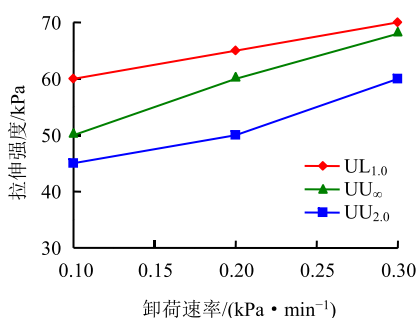
应力 路径	卸荷速率 $v / (\text{kPa} \cdot \text{min}^{-1})$	a	b
UU _{0.0}	0.1	0.019 0	0.020 0
UU _{0.0}	0.2	0.008 4	0.017 5
UU _{0.0}	0.3	0.007 9	0.013 8
UL _{1.0}	0.1	0.028 1	-0.015 4
UL _{1.0}	0.2	0.026 1	-0.019 5
UL _{1.0}	0.3	0.023 2	-0.022 0
UU _∞	0.1	0.023 9	-0.014 3
UU _∞	0.2	0.022 5	-0.015 3
UU _∞	0.3	0.020 2	-0.017 0
UU _{2.0}	0.1	0.022 1	-0.014 0
UU _{2.0}	0.2	0.021 1	-0.014 6
UU _{2.0}	0.3	0.019 1	-0.015 7

由表 5 可以看出, 卸荷压缩路径下初始切线模量受卸荷速率影响较大, 拉伸路径下则不明显。为了探索不同卸荷路径下土体初始卸荷模量的变化, 再对卸荷模量与卸荷路径进行研究, 得到卸荷模量随卸荷路径变化的函数关系式:

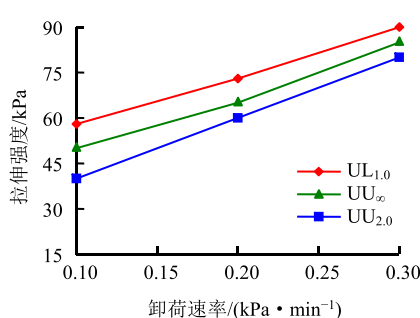
$$E_i = \frac{i}{1 + e^{j(v+k)}} \quad (3)$$



(a) 围压为 50 kPa



(b) 围压为 75 kPa



(c) 围压为 100 kPa

图 13 不同围压下破坏强度与卸荷速率关系曲线

Fig.13 Relationship curves between tensile strength and unloading rates under different confining pressures

(1) 同一卸荷路径下, 土体破坏强度随卸荷速率的增大而增大。这是因为当卸荷速率较小时, 黏聚力发挥慢, 而摩擦力发挥相对较快, 同步发挥作

式中: i 、 j 、 k 为与卸荷路径相关的参数; v 为卸荷速率, 具体参数值如表 6 所示。

表 5 初始卸荷模量与卸荷速率拟合关系式及参数值
Table 5 Relationships between initial unloading modulus and unloading rates and its parameters

应力路径	卸荷速率 $v / (\text{kPa} \cdot \text{min}^{-1})$	E_i	$R^2/\%$	E_i 与 v 关系式
UU _{0.0}	0.1	52.63	98.79	$E_i = \frac{126.8}{1 + e^{-30.999(v-0.112\ 08)}}$
UU _{0.0}	0.2	119.04		
UU _{0.0}	0.3	126.58		
UU _{2.0}	0.1	35.57	96.53	$E_i = \frac{43.56}{1 + e^{-15.970(v-0.003\ 07)}}$
UU _{2.0}	0.2	38.26		
UU _{2.0}	0.3	43.13		
UU _∞	0.1	41.85	93.83	$E_i = \frac{49.75}{1 + e^{-16.150(v+0.007\ 16)}}$
UU _∞	0.2	44.31		
UU _∞	0.3	49.26		
UL _{1.0}	0.1	45.11	94.61	$E_i = \frac{52.85}{1 + e^{-16.880(v+0.008\ 43)}}$
UL _{1.0}	0.2	47.32		
UL _{1.0}	0.3	52.33		

表 6 不同路径下卸荷模量与卸荷速率关系式参数值
Table 6 Parameters for relationships between unloading modulus and unloading rates under different stress paths

卸荷路径	i	j	k
UU _{0.0}	126.80	-30.999	-0.112 08
UL _{1.0}	43.56	-15.970	-0.003 07
UU _∞	49.75	-16.150	0.007 16
UU _{2.0}	52.85	-16.880	0.008 43

5 卸荷破坏强度

5.1 卸荷破坏强度分析

不同围压下各拉伸路径的卸荷破坏强度与卸荷速率的关系曲线如图 13 所示。

由图 13 可以看出:

用比例较小, 破坏强度较低; 随着卸荷速率的提高, 土体结构破坏增加, 其黏聚力与摩擦力分量同步发挥作用比例增大。此外, 由于吹填土颗粒间胶结作

用的存在, 颗粒的旋转、滑移以及换位阻力会抵消掉一部分外力, 此时吹填土强度得到一定程度的回升。

(2) 路径 $UU_{2.0}$ 下土体卸荷破坏强度最小, 路径 UU_{∞} 下该值其次, $UL_{1.0}$ 路径下该值最大。

5.2 破坏强度预测公式

由图 13 试验结果可知, 卸荷破坏强度与卸荷速率有着比较好的正相关关系, 因此可以建立破坏强度与卸荷速率的关系式, 对破坏强度与卸荷速率进行一元线性分析, 得到如下函数关系式:

$$\sigma_t = Av + B \quad (4)$$

式中: σ_t 为卸荷破坏强度; A 、 B 均为试验参数值, 具体参数值见表 7。

表 7 破坏强度与卸荷速率关系式参数值
Table 7 Parameters for relationships between tensile strength and unloading rates

卸荷路径 围压/kPa	$UL_{1.0}$		$UU_{2.0}$		UU_{∞}	
	A	B	A	B	A	B
50	35	36.333	40	32.667	55	14.333
75	50	55.000	75	36.667	90	41.333
100	160	41.667	175	31.667	200	20.000

定义 L 为卸荷应力路径轴向卸荷量与径向卸荷量之比, 若二者同向卸荷, L 为正, 反之 L 为负, 如卸荷路径 $UL_{1.0}$ 中, $L = -1$; $UU_{2.0}$ 中, $L = 2$, 且定义 L 最大值取 5 (当 $L > 5$ 时, 围压的减小量相比轴向荷载卸荷量已经很微小, 可近似看作径向不卸载, 所以当 $L > 5$ 时均取 5, 即 UU_{∞} 中, $L = 5$, 则 A 、 B 可视为与 L 相关的函数, 可用下式表示:

$$\sigma_t = A(L)v + B(L) \quad (5)$$

依然仅对围压为 75 kPa 下的关系曲线进行分析, 分别对回归常数 $A(L)$ 与应力路径 L 以及回归常数 $B(L)$ 与应力路径 L 进行非线性回归分析, 得到其关系式分别为

$$A = 90.4281 - 28.85482e^{-\frac{L}{2.60519}} \quad (6)$$

$$B = -51.72396 + 102.96334e^{-\frac{L}{27.87634}} \quad (7)$$

将式 (6)、(7) 代入式 (5), 得到卸荷破坏强度与卸荷路径及卸荷速率的最终关系式为

$$\sigma_t = \left(90.4281 - 28.85482e^{-\frac{L}{2.60519}} \right) v - 51.72396 + 102.96334e^{-\frac{L}{27.87634}} \quad (8)$$

为了验证卸荷破坏强度公式的准确性及适用性, 任意选取卸荷路径 $UL_{1.5}$ 、 $UU_{3.0}$ 及 UU_{∞} , 利用式 (8) 对吹填土在上述不同卸荷路径及卸荷速率作用下计算得到的卸荷强度值与试验值进行比较, 对比结果如图 14 所示。

由图 14 可见, 计算值与试验数据整体较为接近, 当 L 即轴向卸荷量与径向卸荷量比值较大时, 卸荷强度计算值略低于试验值, 可使设计偏于安全。综合表明, 该预测公式可以满足卸荷破坏强度随速率的变化要求。

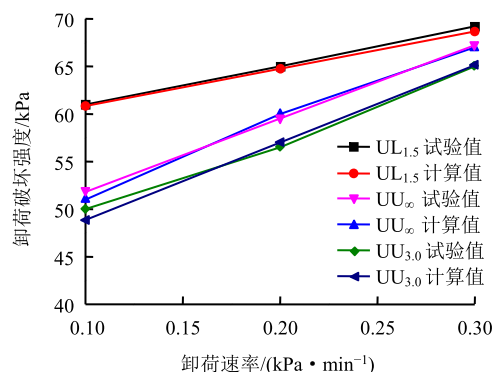


图 14 计算值与试验值对比图

Fig.14 Comparison between calculated values and experimental values

6 结 论

(1) 卸荷速率为 1、2、3 kPa/min 的应力-应变曲线形态是应变软化型, 具有明显的峰值拉应力; 卸荷速率为 0.01、0.02、0.03 kPa/min 及 0.1、0.2、0.3 kPa/min 的应力-应变曲线形态是应变硬化且近似呈双曲线型。

(2) 各卸荷路径及围压下的应力-应变曲线都近似呈双曲线型。应力-应变曲线在卸荷初期对卸荷速率并不敏感, 当应变达到一定值时, 应力逐渐趋稳定。 $UU_{0.0}$ 卸荷路径下土体变形表现为轴向压缩, 其破坏应变基本在 2%~4%之间; $UU_{2.0}$ 、 UU_{∞} 及 $UL_{1.0}$ 路径下土体变形表现为轴向伸长, 拉应变值均处于 0.4%以内。此外, 同种应力路径下, 围压越大, 卸荷速率对土体影响越显著。

(3) 卸荷压缩路径下, 孔压变化曲线存在明显的屈服点, 孔压先是随应变的增加而迅速上升, 到达屈服点后急剧下降, 变为负值并逐渐趋于稳定; 卸荷拉伸路径下, 超静孔隙水压力随着拉应变值的增加而增大, 最终速度减缓并趋于稳定增长状态。同等条件下, 卸荷速率越大, 卸荷初期孔压发展越缓慢, 峰值孔压越大。

(4) 卸荷压缩路径下初始切线模量受卸荷速率影响较大, 拉伸路径下则不明显。同一卸荷路径下, 土体破坏强度随卸荷速率的增大而增大。路径 $UU_{2.0}$ 下土体卸荷破坏强度最小, 路径 UU_{∞} 下该值其次, $UL_{1.0}$ 路径下该值最大。对各卸荷路径的应力-应变关系曲线进行归一化处理, 建立了不同应力路径下土体初始切线卸荷模量及卸荷破坏强度与卸荷速率间的预测公式。

参考文献

- [1] LAMBE T W. Stress path method[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations**, ASCE, 1967, 93(SM6): 268-277.
- [2] 盛利. 天津港地基土工程特性及软基加固[D]. 天津: 天津大学, 2009.
SHENG Li. Engineering properties and improvement method of Tianjin harbor soft soil foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [3] 刘维宁, 张弥, 华成. 开挖作用对基坑周围地层工程性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 60-64.
LIU Wei-ning, ZHANG Mi, HUA Cheng. Effects of excavation on engineering properties of the surrounding stratum[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(1): 60-64.
- [4] 张荣堂, 陈守义. 减 P 路径下饱和软黏土应力应变性状的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 612-616.
ZHANG Rong-tang, CHEN Shou-yi. An experimental study on stress-strain behavior of soft clay along decreasing average normal stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 612-616.
- [5] 周秋娟. 不同卸荷路径下软土变形特性试验研究[J]. 工程勘察, 2013(10): 17-22.
ZHOU Qiu-juan. Experimental study on the deformation of soft soil under different unloading paths[J]. **Journal of Geotechnical Investigation & Surveying**, 2013(10): 17-22.
- [6] 周秋娟, 陈晓平. 典型基坑开挖卸荷路径下软土三轴流变特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1299-1305.
ZHOU Qiu-juan, CHEN Xiao-ping. Research on rheological properties of soft clay under typical pit unloading paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(5): 1299-1305.
- [7] 王绪民, 何世秀, 朱志政. 软土卸荷孔压特性的试验研究[J]. 工程勘察, 2006(10): 17-21.
WANG Xu-min, HE Shi-xiu, ZHU Zhi-zheng. Experimental study on pore pressure characteristics of soft soil unloading[J]. **Journal of Geotechnical Investigation & Surveying**, 2006(10): 17-21.
- [8] 刘明, 黄茂松, 马金荣. 卸荷对高应力下粘土力学性质的影响[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 71-74.
LIU Ming, HUANG Mao-song, MA Jin-rong. Testing study on the clay soil's unloading properties under high stress[J]. **Industrial Construction**, 2005, 35(8): 71-74.
- [9] 刘熙媛, 闫澍旺, 窦远明, 等. 模拟基坑开挖过程的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 97-100, 104.
LIU Xi-yuan, YAN Shu-wang, DOU Yuan-ming, et al. Experimental studies of simulated excavation process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 97-100, 104.
- [10] 王祥秋, 杨文涛, 刘文添. 珠三角地区典型软土卸荷力学特性研究[J]. 公路工程, 2014, 39(6): 69-72.
WANG Xiang-qiu, YANG Wen-tao, LIU Wen-tian. Study on the unloading mechanical character of typical soft soil in the pearl river delta[J]. **Highway Engineering**, 2014, 39(6): 69-72.
- [11] 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): 1409-1412.
ZAI Jin-min, ZHANG Yun-jun, WANG Xu-dong, et al. Experimental research on deformation and strength of cohesive soil under lateral extension[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1409-1412.
- [12] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 天津市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 Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang, 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.
- [13] 程涛, 王靖涛, 晏克勤, 等. 考虑应力路径的黏土弹塑性固结问题的耦合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 403-409.
CHENG Tao, WANG Jing-tao, YAN Ke-qin, et al. Coupling analysis method for elastoplastic consolidation of clay considering stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 403-409.