

DOI: 10.11779/CJGE2023S10006

# 复杂卸荷路径下饱和粉土剪切特性研究

英旭<sup>1</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 夏百惠<sup>2</sup>, 沈楠杰<sup>2</sup>, 蒋刚<sup>\*2</sup>, 钟建峰<sup>3</sup>

(1. 上海隧道工程有限公司, 上海 200032; 2. 南京工业大学交通运输工程学院, 南京 211816; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 为研究基坑开挖卸荷路径下土体的力学特征, 开展了饱和粉土卸荷路径三轴排水剪切试验, 获取了不同应力路径的应力应变曲线, 分析了卸荷比、围压和应变水平对割线模量的影响, 提出了饱和粉土卸荷模量简化公式。结果表明: 不同卸荷应力路径的应力应变曲线均呈应变软化型, 卸荷模量随卸荷比的减小、围压的增大而增大。 $K_0$ 固结双向卸荷路径(EB)的峰值剪应力高于 $K_0$ 固结双向卸荷路径(EC、FD); 应力路径对割线模量衰减的影响程度差异显著,  $K_0$ 固结双向卸荷路径(EC、FD)对割线模量衰减的影响最大。说明基坑坑底土体强度较高, 受开挖的影响较小, 抗变形能力较大, 在基坑工程设计中, 应考虑基坑不同区域对应的割线模量。

**关键词:** 基坑开挖; 饱和粉土; 应力路径; 卸荷比; 割线模量

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0075-04

**作者简介:** 英旭(1979—), 男, 正高级工程师, 主要从事地下工程施工技术管理工作。E-mail: 15571559@qq.com。

## Shear behavior of saturated silt under complex unloading paths

YING Xu<sup>1</sup>, LI Min<sup>1</sup>, XIA Baihui<sup>2</sup>, SHEN Nanjie<sup>2</sup>, JIANG Gang<sup>2</sup>, ZHONG Jianfeng<sup>3</sup>

(1. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. College of Transportation Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** The excavation of foundation pit engineering has different unloading effects on the surrounding soil. The existing specifications mainly use the consolidated undrained strength index based on the conventional triaxial tests, which cannot describe the mechanical characteristics of the excavation soil under the unloading path. The triaxial drainage shear tests on the unloading path of saturated silt are conducted, the stress-strain curves for different stress paths are obtained, the effects of unloading ratio, confining pressure and strain level on the secant modulus are analyzed, and a simplified formula proposed for the unloading modulus of saturated silt. The results show that the stress-strain curves of different unloading stress paths all exhibit a strain softening type, and the unloading modulus increases with a decrease in the unloading ratio and an increase in the confining pressure. The peak shear stress of  $K_0$  consolidation lateral unloading path (EB) is higher than that of  $K_0$  consolidation bidirectional unloading path (EC, FD). The influences of the stress paths on the attenuation of the secant modulus vary significantly, with  $K_0$  consolidation bidirectional unloading paths (EC, FD) having the greatest impact on the attenuation of the secant modulus. The strength of the soil at the bottom of the foundation pit is relatively high, and it is less affected by excavation, with a greater capability to resist deformation. In the design of foundation pit engineering, the corresponding secant modulus in different areas of the foundation pit should be considered.

**Key words:** excavation of foundation pit; saturated silt; stress path; unloading ratio; secant modulus

## 0 引言

南京位于长江中下游地区, 因其特殊的地理位置, 漫滩沉积地层为大面积的粉土, 极易震动液化, 基坑开挖过程中会导致土体侧向位移、坑底隆起等问题, 土体往往处于卸荷状态<sup>[1]</sup>, 常规三轴试验难以真实反映基坑开挖卸荷土体的特性。不同卸荷路径下土体的应力应变和强度特性差异较大。大量研究结果表

明<sup>[2-5]</sup>: 围压和密度是影响割线模量发展的主要因素。在相同应变水平下, 割线模量随着围压的增加<sup>[2-3]</sup>和密度的增大<sup>[4-5]</sup>逐渐增大。

应力路径对土的力学特性影响十分显著, 割线模

基金项目: 上海市科学技术委员会资助课题(20DZ2251900)

收稿日期: 2023-07-07

\*通信作者 (E-mail: g.jiang@njtech.edu.cn)

量表现出明显的非线性,随着应变的增加而衰减<sup>[6-7]</sup>,在固结比为2时,侧向卸荷应力路径下土体的模量约为侧向加荷的1.3倍<sup>[6]</sup>。土体在常规压缩条件下其强度最高,卸载压缩条件下的强度最低,但最终在不同的应力比水平下趋于稳定<sup>[8]</sup>,Burland<sup>[9]</sup>发现在不同的应力路径中,应变范围在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间土体刚度较大,当应变超过 $10^{-3}$ 时,土体的应力应变曲线表现出明显的非线性。

本文选取南京地铁5号线福建路站饱和粉土为研究对象,开展了一系列常规三轴排水剪切试验和多种卸荷路径的排水剪切试验。研究了饱和粉土的应力应变特性,分析了卸荷比、围压和应变水平对割线模量的影响,为饱和粉土地基基坑开挖的设计提供了依据。

## 1 试样与试验方法

### 1.1 试样

试验样品取自南京地铁5号线福建路站基坑现场。福建路站地基土层沿深度依次为杂填土、粉砂、粉土、中风化砂岩。其中,粉土层厚度为9.1~28.6 m。土样在6个钻孔取出,每次取样间隔1.5 m至2 m之间。该地区粉土的基本物理性质见表1。

表1 粉土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of silt

含水率 $w/\%$	天然干 密度 $\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	天然重度 $\gamma/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$G_s$	液限 $w_L/$ $\%$	塑限 $w_P/$ $\%$	塑性 指数 $I_p$	液性 指数 $I_L$
33.4	1.34	17.8	2.70	35.2	25.5	9.7	0.81

### 1.2 试验方法

现场钻孔采用薄壁取样法取出土样,将土样制为直径50 mm,高度100 mm的三轴试样。试样上下表面各放滤纸和透水石并采用橡皮膜包裹,将试样置于应力路径三轴仪中,采用三级反压饱和,最终反压为390 kPa。

本试验共有12个土样,包括4组应力路径的三轴试验(见图1),分别为 $K_0$ 固结侧向卸荷试验(EB)、 $K_0$ 固结轴向卸荷试验(EG)以及卸荷比( $R = \Delta\sigma_1 / \Delta\sigma_3$ )为0.25和0.5的 $K_0$ 固结双向卸荷试验(EC、FD),每组试验的有效围压分别为100, 200, 400 kPa。其中: $K_0$ 固结侧向卸荷试验(EB)的轴向应力不变,围压减小速率为0.1 kPa/min; $K_0$ 固结轴向卸荷试验(EC)的侧向应力不变,围压减小速率为0.1 kPa/min。试验方案如表2所示。

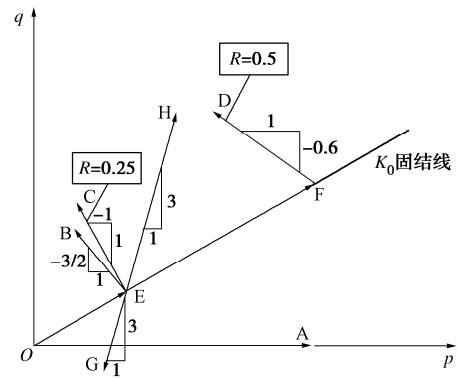


图1 应力路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stress path

表2 饱和粉土三轴试验方案

Table 2 Triaxial test protocol for saturated silt

试验名称	卸荷路径		卸荷速率/( $\text{kPa}\cdot\text{min}^{-1}$ )	
	$\sigma_1/\text{kPa}$ (轴向)	$\sigma_3/\text{kPa}$ (侧向)	$\sigma_1$ (轴向)	$\sigma_3$ (侧向)
EB-100	不变	100→0	0	-0.1
EB-200	不变	200→0	0	-0.1
EB-400	不变	400→0	0	-0.1
EG-100	208→0	不变	-0.1	0
EG-200	433→0	不变	-0.1	0
EG-400	833→463	不变	-0.1	0
EC-100	208→183	100→0	-0.025	-0.1
EC-200	416→366	200→0	-0.025	-0.1
EC-400	833→733	400→0	-0.025	-0.1
FD-100	208→158	100→0	-0.05	-0.1
FD-200	416→316	200→0	-0.05	-0.1
FD-400	833→633	400→0	-0.05	-0.1

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同卸荷应力路径下土体的应力应变性状

图2为 $K_0$ 固结侧向卸荷路径(EB)和 $K_0$ 固结双向卸荷路径(EC、FD)应力应变曲线。不同应力路径的应力应变曲线均呈应变软化型,且随着有效围压的增大,峰值剪应力也随之升高。 $K_0$ 固结侧向卸荷路径(EB)峰值点对应的轴向应变为2%~5%,在400 kPa有效围压下应力约为100 kPa时的4倍。 $K_0$ 固结双向卸荷路径(EC、FD)峰值点对应的轴向应变为1%~3%,随着卸荷比增大,峰值偏应力也随之增大。在相同围压下,侧向卸荷峰值偏应力比双向卸荷峰值偏应力比大。

### 2.2 卸荷模量简化公式

文献[10]规定基坑开挖时,地基土的应变普遍介于 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 之间,通过上述试验结果可以发现:基坑开挖过渡区域土体强度相比坑外侧土体强度要小,因此,处于开挖过渡区的土体更容易发生破坏。为此,

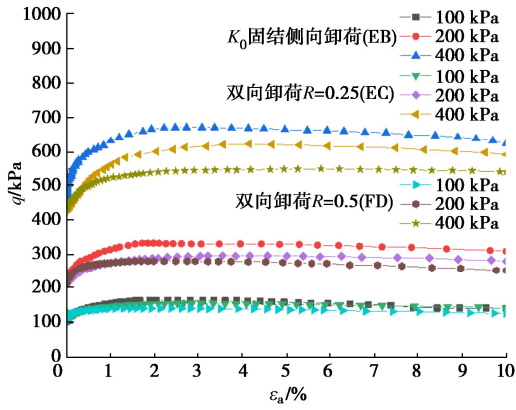


图 2 不同卸荷路径应力应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves for silt along unloading paths

本文选取轴向应变为  $10^{-3}$  对应的卸荷模量进行分析。试验结果表明：卸荷模量随着卸荷比的增加而减小，随着围压的增大而增大，并呈现明显的非线性特征。卸荷路径下的割线模量与应力比和围压的关系可采用下式进行描述：

$$E_{sec} = mp_a \left( -\frac{q}{p} \right) \left( \frac{p}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

式中： $p_a$  为标准大气压 (101.325 kPa)； $m$  和  $n$  为常数，参数  $m$  值越大，表明土体初始模量越高，参数  $n$  表征了模量随围压的非线性变化程度，南京粉土的  $m$  和  $n$  建议取 2.21 和 0.58； $q/p$  为应力比，偏差应力  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ，平均主应力  $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 。

如图 3 所示，本文试验路径中， $K_0$  固结侧向卸荷路径 (EB) 的割线模量最大，围压为 400 kPa 时可达 104.4 MPa，约为其它应力路径的 1.1~2.9 倍。双向卸荷路径下，卸荷比从 0.25 增加至 0.5，割线模量随之减小，说明基坑过渡区的土体的刚度随卸荷比的增加而减小，抗变形能力降低。通过本文的卸荷模量简化公式，可对基坑开挖不同情况的稳定性计算提供支撑。

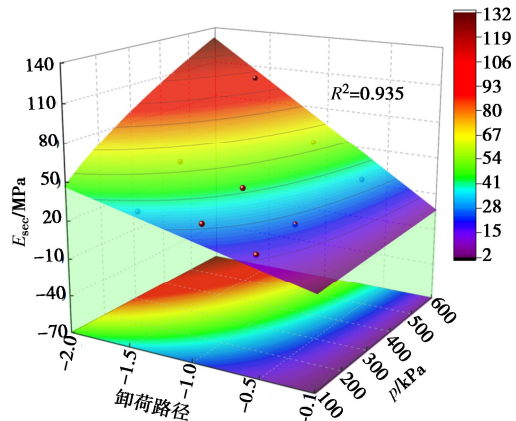
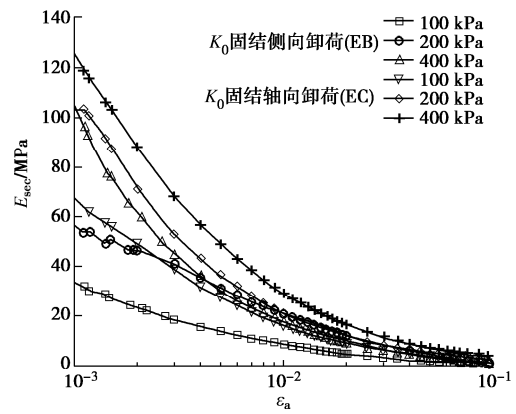


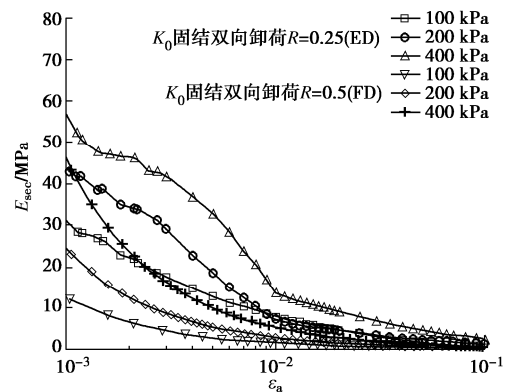
图 3  $10^{-3}$  轴向应变下卸荷模量-卸荷比-围压关系图

Fig. 3 Relationship among unloading secant modulus ( $\epsilon_a=0.1\%$ ), unloading ratio and mean effective stress

图 4 为不同卸荷路径下割线模量随轴向应变的发展规律。从图 4 可以看出，相同卸荷路径下，围压越高，卸荷模量衰减越快。轴向应变从  $10^{-3}$  增加至  $10^{-2}$  时，各个路径下的割线模量衰减幅度最大，轴向应变从  $10^{-2}$  增加至  $10^{-1}$  过程中，割线模量衰减幅度变小，当轴向应变达到  $10^{-1}$  时，土体的割线模量值趋于一致。此外，应力路径对卸荷模量的衰减幅度具有一定的影响。在 100~400 kPa 围压范围内，轴向应变从  $10^{-3}$  增加至  $10^{-2}$  的过程中，侧向卸荷路径 (EB) 割线模量衰减幅度最大，约为 82.84%~86.38%。轴向卸荷路径 (EG) 割线模量衰减幅度为 74.6%~76.39%；双向卸荷路径 (EC、FD) 的割线模量衰减幅度为 75.2%~83.8% 和 71.2%~77.6%。由此看来，应力路径对割线模量的衰减具有一定的影响。



(a)  $K_0$  固结侧向卸荷(EB)和轴向卸荷(EG)割线模量



(b)  $K_0$  固结双向卸荷(EC、FD)割线模量

图 4 不同应力路径的割线模量

Fig. 4 Secant moduli for silt along different stress paths

对于原状与重塑的上海软黏土进行不排水剪切试验<sup>[11]</sup>，其割线模量也随着轴向应变的增大而减小<sup>[12]</sup>。综上所述， $K_0$  固结侧向卸荷路径 (EB) 的割线模量衰减幅度是所有应力路径中最大的，说明在基坑开挖的实际工程中，基坑外侧的土体受基坑开挖的影响较大，导致土体的刚度较低。应变为  $10^{-3}$  时， $K_0$  固结轴向卸荷路径 (EG) 的割线模量比  $K_0$  固结侧向卸荷路径 (EB)

割线模量大,说明基坑开挖坑底土体的模量比基坑外侧土体的模量高,坑底土体的强度大,受开挖的影响较小,抗变形能力较大。因此,在基坑的计算中,采用土体的模量参数应该参考卸荷应力路径下土体的模量参数。

### 3 结 论

针对基坑开挖典型应力路径,开展了南京饱和粉土卸荷应力路径三轴试验,阐明了南京粉土在不同卸荷路径下的应力应变特性,着重分析了卸荷比、围压和应变水平对割线模量的影响,得出以下结论:

(1) 不同应力路径的应力应变曲线均呈应变软化,在相同围压下, $K_0$ 固结侧向路径(EB)的峰值剪应力最高, $K_0$ 固结双向卸荷路径(EC、FD)的峰值剪应力最低。在实际基坑工程中,基坑开挖过渡区域的土体强度相比基坑外侧土体强度要小,土体更容易发生破坏。

(2) 在轴向应变为 $10^{-3}$ 时,不同应力路径的割线模量均随围压的增大而增大, $K_0$ 固结轴向卸荷路径(EG)割线模量高于 $K_0$ 固结侧向卸荷模量路径(EB)。基坑开挖坑底土体的模量比基坑外侧土体的模量高,坑底土体的强度大,受开挖的影响较小,抗变形能力较大。

(3) 应力路径对割线模量衰减的影响程度差异显著。其中, $K_0$ 固结侧向卸荷路径(EB)对割线模量衰减的影响最大,而卸荷比对割线模量的衰减幅度影响不大。在基坑工程设计中,应考虑基坑不同区域对应的割线模量。

#### 参考文献:

- [1] 曾国熙,潘秋元,胡一峰. 软黏土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1988, **10**(3): 13-22. (ZENG Guoxi, PAN Qiuyuan, HU Yifeng. The behavior excavation in soft clay ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **10**(3): 13-22. (in Chinese))
- [2] 谷川,王军,张婷婷,等. 应力路径对饱和软黏土割线模量的影响[J]. 岩土力学, 2013, **34**(12): 3394-3402. (GU Chuan, WANG Jun, ZHANG Tingting, et al. Influence of stress path on secant modulus of soft saturated clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(12): 3394-3402. (in Chinese))
- [3] ZHU S, YANG G, WEN Y, et al. Dynamic shear modulus reduction and damping under high confining pressures for gravels[J]. Géotechnique, 2014, **4**(3): 179-186.
- [4] XIAO Y, LIU H L, CHEN Y M, et al. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests I: influences of density and pressure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, **140**(12): 1-16.
- [5] HEITOR A, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Laboratory study of small-strain behavior of a compacted silty sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, **50**(2), 179-188.
- [6] 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 Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(6): 18-23. (in Chinese))
- [7] KANTESARIA N, SACHAN A. Small-strain shear modulus and yielding characteristics of compacted high-plasticity clay[J]. Géotechnique, 2022, **72**(5): 424-437.
- [8] 秦鹏飞,谢晓杰,马玉林. 不同应力路径下饱和粉土强度与变形特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2016, **33**(4): 78-80, 85. (QIN Pengfei, XIE Xiaolin, MA Yulin. Deformation and strength characters of saturated silty soil under different stress paths[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, **33**(4): 78-80, 85. (in Chinese))
- [9] BURLAND J B. Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: "small is beautiful": the stiffness of soils at small strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, **26**(4): 499-516.
- [10] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guobin, WANG Weidong. Foundation Pit Engineering Manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 高彦斌,罗文康,骆佳樑,等. 两种固结状态下软土的三轴不排水剪切模量非线性及对比[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 2): 64-67. (GAO Yanbin, LUO Wenkang, LUO Jialiang, et al. Nonlinear characteristics and comparison of triaxial undrained shear moduli of soft soils under two consolidation states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2):64-67. (in Chinese))
- [12] 韩波,李杭州,宋丽. 原状黄土非线性强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 1): 117-121. (HAN Bo, LI Hangzhou, SONG Li. Experimental study on nonlinear strength characteristics of intact loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S1): 117-121. (in Chinese))