

基于数字图像测量技术的基坑开挖卸荷试验研究

郑卫锋^{1,2}, 邵龙潭^{*1}, 贾金青³

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 国网北京电力建设研究院, 北京 100055;

3. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以原状粉质黏土为试验土体, 采用三轴数字图像测量技术为基础的测试仪器, 对基坑开挖卸荷过程的土体应力路径进行模拟, 研究不同应力路径条件下的土体应力-应变关系, 分析侧向卸荷对基坑土体抗剪强度指标的影响. 试验结果表明, 经历侧向卸荷应力路径的土体抗剪强度指标与常规三轴加载试验明显不同. 数值计算验证了不同应力路径的试验结果对基坑稳定与变形的影响. 为了准确地分析基坑的稳定与变形情况, 有必要在试验时尽可能模拟基坑的侧向卸荷应力路径.

关键词: 数字图像测量; 应力路径; 基坑开挖; 侧向卸荷; 抗剪强度

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A

0 引言

随着城市建设的迅猛发展, 高层建筑、地下商场、地下车库等深基坑开挖支护工程越来越多. 深基坑开挖实际上是基坑周围土体的卸荷过程. 传统的土力学理论以原状土常规三轴加载试验作为计算基坑周围土体抗剪强度的依据, 而对卸荷条件下土体的应力路径试验研究很少, 其变形与稳定分析中所采用的土体强度参数往往基于三轴加载试验得出, 并没有考虑土体卸荷的强度变化对基坑变形与稳定的影响^[1], 因此无法真实地反映基坑开挖卸荷过程对周围土体强度及变形的影响^[2,3]. 只有当室内试验的应力状态、应力水平和应力路径与现场实际工程的应力条件基本吻合时, 试验所得的强度指标才更符合实际^[4,5]. 因此有必要对基坑开挖卸荷土体应力路径进行模拟研究, 分析卸荷对土体抗剪强度指标的影响.

1 基坑开挖中土的应力路径

以基坑开挖平面应变问题为例来探讨基坑开挖卸荷过程中土的应力路径, 如图1所示, 将基坑

开挖影响区域划分为3个区域, 在 p - q 应力空间进行应力路径分析, 其中 $p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$, $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$.

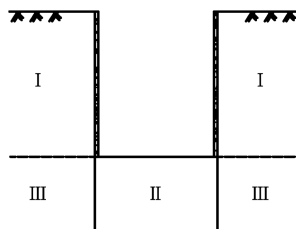


图1 基坑开挖卸荷影响区域

Fig. 1 Affected area of unloading in foundation excavation

(1) I区: 基坑外侧区域(侧向卸荷). 随着基坑的开挖, 支护结构发生侧向位移, 土体单元的水平应力逐渐减小, 即侧向卸荷; 垂直方向的自重应力基本上保持不变, 水平方向应力处于静止土压力与主动土压力之间. 随着开挖深度的增加, 坑壁的水平位移不断加大, 水平方向应力由 k_0 状态发展为主动土压力极限状态, 其应力路径如图2中的AB所示.

(2) II区: 基坑底部区域(轴向卸荷). 随着上部土体的开挖, 土体单元垂直方向的自重应力逐

渐减小,即轴向卸荷;水平方向应力不变,其应力路径如图 2 中的 ACE 所示。

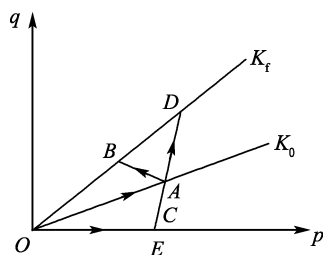


图 2 不同应力路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram under different stress paths

(3) III 区:过渡区域。在基坑土体开挖过程中,水平及垂直方向的应力均发生变化,使得主应力方向发生偏转,其应力路径介于 AB 与 ACE 之间。

目前,深基坑开挖过程中土体强度参数的确定以常规三轴加载试验为主,即在等压固结结束后,保持围压不变,增加轴向压力至土体剪切破坏,其应力路径如图 2 中的 OEAD 所示,与基坑开挖卸荷过程中土体的应力路径截然不同。而应力路径与土体强度变形特性密切相关,因此进行基坑卸荷应力路径的试验模拟对基坑变形稳定计算具有一定的现实意义。

2 试验内容

本试验主要以基坑侧向卸荷区域(I 区)中的土体为研究对象,进行原状土样在常规三轴加载试验与基坑卸荷应力路径试验的研究分析。

2.1 试验土样

试验土样取自大连地区某深基坑工程现场的原状粉质黏土,取土深度在 8 m 左右,土体色泽为黄褐色,整体呈硬塑状态,手捻粘滞并含有明显粉砂感,含铁锰结核,其物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 试验土样的基本参数

Tab. 1 Soil property parameters

土名	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G_s	$w/\%$	e	W_L	W_p
粉质黏土	1.97	2.71	16.8	0.601	31.8	18.4

2.2 试验仪器

试验仪器采用大连理工大学自主研发开发的

数字图像测量系统,如图 3 所示,主要由 CCD 传感器、视频采集卡、计算机和计算机图像处理软件组成^[6]。

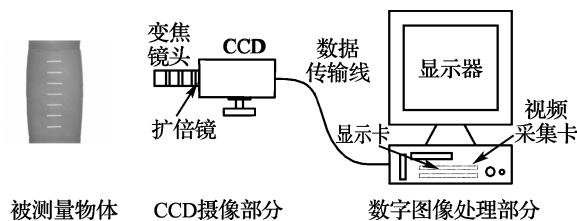


图 3 数字图像测量系统

Fig. 3 Digital image processing system

数字图像测量技术为土工三轴试验提供了全新的变形测量手段,具有传统测量方法无法比拟的优越性。数字图像测量系统可以任意选择多个测量部位或测量断面,实现三轴试样轴向和径向变形的非接触直接测量。大量的试验结果表明,对于直径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的三轴试样,以高度中心为对称面取 40 mm 左右的试样段,基本上能够排除试样两端刚性试样帽和底座的影响。有限元计算与物理模型试验对比表明,用数字图像测量得到的计算参数更合理^[7,8]。

2.3 试验步骤

葛卫春^[9]通过试验发现,在侧向卸荷应力路径下的固结排水剪切试验中,侧向卸荷而轴压不变的过程中体积基本上是不变化的,尽管存在排水通道,从现象上看仍表现为不排水性状。鉴于此,同时考虑到基坑开挖通常属于临时性设施,施工工期往往较短,对于黏性土地基近乎于不排水状态,因此试样剪切时采用固结不排水剪切试验。

试样采用二氧化碳进行饱和,根据土样的原始应力状态施加围压与轴压,保持主应力比 k_0 不变进行排水固结;固结稳定后,保持轴压不变,侧向分级卸除围压,每级卸荷量保持在 20 kPa(相当于基坑每步开挖 2 m);卸荷后施加不同的围压,在不排水条件下进行剪切试验。根据相关规范要求^[10],剪切过程中加荷速率为 0.1 mm/min,破坏标准为轴向应变达到 15%。

表 2 给出了侧向卸荷应力路径的试验方案,为了对比,同时也进行了围压分别为 60、120、180 kPa 的各向等压固结不排水常规三轴加载剪切试验。

表 2 侧向卸荷应力路径试验方案

Tab. 2 Stress path testing under lateral unloading

应力路径	初始固结 状态/kPa	侧向分级卸荷量	剪切状态 /kPa
基坑 侧向 卸荷 应力 路径	$\sigma_1 = 80$	60, 40, 20	$\sigma_1 = 60$
	$\sigma_3 = 60$		$\sigma_3 = 60$
	$\sigma_1 = 160$	120, 100, 80, 60, 40	$\sigma_1 = 120$
	$\sigma_3 = 120$		$\sigma_3 = 120$
路径	$\sigma_1 = 240$	180, 160, 140, 120, 100, 80, 60	$\sigma_1 = 180$
	$\sigma_3 = 180$		$\sigma_3 = 180$

3 试验结果分析

不同应力路径试验的应力-应变关系如图 4 所示,从图中可以看出,不同应力路径试验条件下的应力-应变曲线形状大体相似,基本呈双曲线形;在小应变状态时,均表现为非线性;同一应力路径条件下的不同固结围压试验,曲线的初始切线模量和极限应力,均随固结围压的增加而增加。

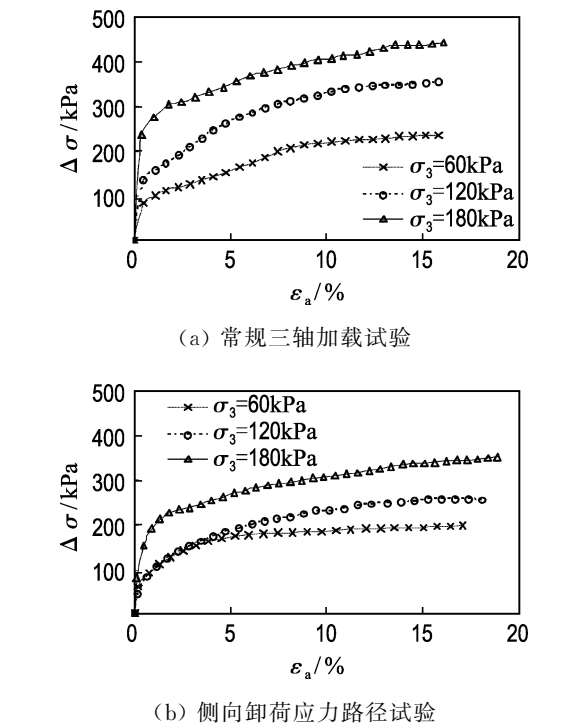


图 4 不同应力路径的应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves under different stress paths

对比两组曲线可知,在围压相同的情况下,试样经过侧向卸荷后,其剪切破坏时的主应力差值明显小于常规三轴加载试验的剪切破坏值. 进一步计算分析可知,如表 3 所示,经过侧向卸荷过程以后,土样达到剪切破坏时的主应力差值较常规三轴试验平均降低约 21.6%,这说明侧向卸荷过

程使土体抵抗剪切破坏的能力降低了,因此,必将导致土样的抗剪强度指标呈现下降的趋势。

表 3 土样剪切破坏时的主应力差

Tab. 3 Principal stress deviation for ultimate shear strength

围压/kPa	试验分类	主应力差/kPa	降低幅值/%
60	三轴加载试验	234	17.0
	基坑卸荷试验	194	
120	三轴加载试验	351	27.6
	基坑卸荷试验	254	
180	三轴加载试验	441	20.4
	基坑卸荷试验	351	

根据不同应力路径条件下的三轴剪切试验得到相应的抗剪强度包线,如图 5 所示. 从图中可以看出,基坑卸荷应力路径得到的土体抗剪强度指标与常规三轴加载试验下土体的抗剪强度指标有所不同,粘聚力基本没有变化,而内摩擦角有明显降低. 进一步计算分析可知,经历了侧向卸荷应力路径后,原状粉质黏土的内摩擦角降低了 18%. 由此可见,黏性土的抗剪强度指标与土体的应力应变状态关系密切,经历了侧向卸荷后,土体往往发生侧向膨胀变形,其应力应变状态与常规加载试验明显不同,因此土体的抗剪强度指标必然发生变化。

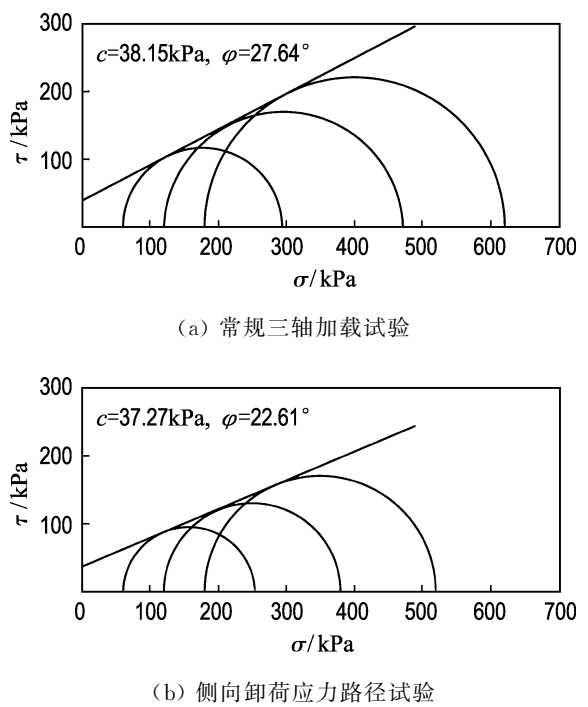


图 5 不同应力路径的抗剪强度包线

Fig. 5 Shear strength envelope under different stress paths

4 算例分析

为了研究应力路径对基坑变形与稳定的影响,用常规三轴加载试验及基坑侧向卸荷应力路径试验得到的土体强度参数,分别对基坑开挖过程进行数值模拟计算分析。

4.1 概况

某均匀粉质黏土基坑,开挖深度 10 m,10 m 以下为坚硬土层。施加 4 排预应力锚杆,锚杆水平间距 2 m,竖向间距 2 m,锚杆的倾角 15° ,锚杆自由段长度根据潜在滑移面位置确定,锚固段长度根据土体与水泥砂浆的粘结强度确定,图 6 为基坑的典型剖面示意图。锚杆采用 $\phi 25$ 热轧螺纹钢筋,其中第 1 排预加力为 80 kN,第 2、3 排预加力为 100 kN,第 4 排预加力为 60 kN;基坑顶部超载按 10 kPa 计算。

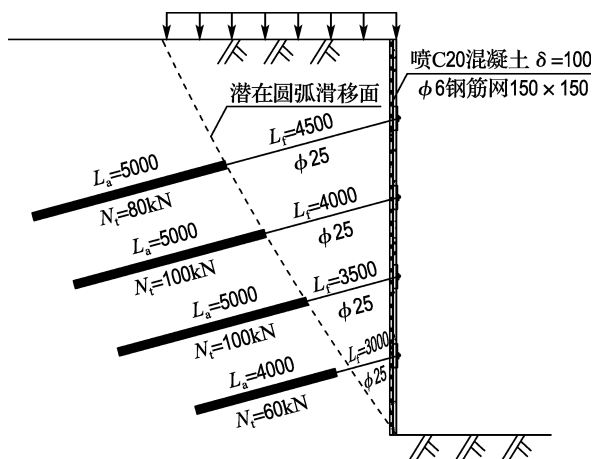


图 6 基坑支护剖面图

Fig. 6 Foundation excavation sectional drawing

粉质黏土 γ 取 19.7 kN/m^3 ,弹性模量 E 取 13 MPa ,泊松比取 0.3 ,抗剪指标 c, φ 根据上述应力路径试验结果获得。

4.2 稳定性计算

表 4 为不同应力路径条件下 Geo-slope^[11] 计算得到的基坑安全稳定系数。计算结果表明,无论对于何种计算方法(Ordinary 或 Bishop),基于三轴加载试验得到的稳定安全系数均大于基于基坑卸荷试验得到的稳定安全系数。

4.3 变形计算

图 7 为不同应力路径条件下基坑坑壁的水平位移沿基坑深度的分布规律,有限差分法(FLAC2D)^[12,13] 计算结果表明,不同应力路径条

件下基坑坑壁的水平位移分布性态相似,但位移量大小不同,基坑卸荷试验得到的坑壁最大位移量为 47.26 mm ,而常规三轴试验得到的坑壁最大位移量仅为 41.90 mm 。

表 4 不同应力路径条件下的基坑安全稳定系数

Tab. 4 Stability factor under different stress paths

Geo-slope 计算方法	参数取值	基坑稳定性安全系数	
		未支护	锚杆支护
Ordinary	三轴加载试验	1.072	1.320
	基坑卸荷试验	0.983	1.188
Bishop	三轴加载试验	1.051	1.298
	基坑卸荷试验	0.962	1.163

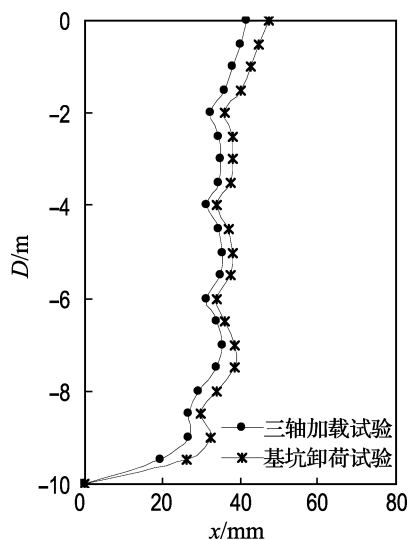


图 7 不同应力路径的基坑坑壁水平位移

Fig. 7 Horizontal displacements of foundation excavation under different stress paths

5 结论

(1) 基坑开挖卸荷试验时土体达到破坏时的主应力差明显小于常规三轴加载试验的剪切破坏值。

(2) 基坑开挖卸荷后,土体的抗剪强度指标有所降低,特别是土体的内摩擦角的变化,在基坑工程设计时应引起重视。

(3) 室内试验与数值计算均表明,应力路径对基坑的稳定与变形有很大影响,目前采用的传统三轴加载试验得到的稳定系数偏大,基坑坑壁水平位移偏小,均处于相对偏于危险状态。

在基坑工程设计中,土体的抗剪强度指标是保证基坑安全、经济合理的重要参数。而现有的常

规三轴加载试验,与基坑开挖卸荷的应力路径明显相反,得到的强度参数有所不同,建议在基坑工程中,采用与基坑开挖工况相符的土体侧向卸荷应力路径试验,使基坑设计参数与设计理论更符合实际工程状况,这对基坑工程的数值分析与优化设计,保证基坑工程的变形与安全稳定,具有重要的理论意义和实际意义。

参考文献:

- [1] 刘熙媛,闫谢旺,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
- [2] 何世秀,朱志政,杨雪强. 基坑土体侧向卸荷真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(6):869-872
- [3] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1977
- [4] 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报, 1999, **32**(4):3-9
- [5] LAMBE T W. Stress path method [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1967, **93**(SM6):309-331
- [6] 邵龙潭,孙益振,王助贫,等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **27**(1):29-34
- [7] 王助贫. 三轴试样变形的数字图像测量方法及其应用[D]. 大连:大连理工大学, 2002
- [8] 孙益振. 基于三轴试样局部变形测量的土体应力应变特性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005
- [9] 葛卫春. 基坑侧向卸荷应力路径及挡墙侧向变形研究[D]. 南京:河海大学, 2001
- [10] 中华人民共和国国家标准. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999
- [11] Geo-slope Office. *SLOPE/W 5 User's Guide* [M]. Canada:Geo-slope International Ltd. , 2002
- [12] Itasca Consulting Group, Inc. *FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) Online Manual* [M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc. , 2001
- [13] 刘波,韩彦辉. *FLAC 原理、实例与应用指南* [M]. 北京:人民交通出版社, 2005

Experimental research on simulated foundation excavation unloading process based on digital image processing technique

ZHENG Wei-feng^{1,2}, SHAO Long-tan^{*1}, JIA Jin-qing³

- (1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. Beijing Electric Power Construction Research Institute of SGCC, Beijing 100055, China;
 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the testing apparatus of digital image processing technique, using silty clay as testing specimen, the stress paths under foundation excavation unloading process are simulated. In order to analyze and compare experimental data, triaxial shear tests with different stress paths are chosen, and the stress-strain characteristics and shear strength parameters are studied. The test results show that the shear strength parameters of soils after lateral unloading are different from those of conventional triaxial test. A numerical example is given to compare the results obtained from different stress paths. The numerical analyses validate the affection for the foundation's stability and deformation under different stress paths. For accurate estimation of the foundation's stability and deformation, laboratory tests should be conducted under similar real conditions in foundation excavation unloading process.

Key words: digital image processing; stress path; foundation excavation; lateral unloading; shear strength