

文章编号: 1000-7598-(2005)01-0097-04

模拟基坑开挖过程的试验研究

刘熙媛^{1,2}, 闫澍旺², 窦远明¹, 顾 杰¹

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 300132; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津, 300072)

摘 要: 采用三轴剪切试验对基坑开挖过程中土体卸荷的应力路径进行模拟, 研究了由于侧向卸荷对土体抗剪强度指标产生的影响, 并从土的微观结构角度分析了产生这一现象的原因。试验结果表明, 经过侧向卸荷过程土样的抗剪强度指标与常规三轴试验明显不同。

关 键 词: 基坑开挖; 侧向卸荷; 抗剪强度指标; 微观结构

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Experimental studies of simulated excavation process

LIU Xi-yuan^{1,2}, YAN Shu-wang², DOU Yuan-ming¹, GU Jie¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper simulates the stress paths in unloading state during excavation effect of lateral unloading on shear strength of soil mass is studied, and the reasons are analyzed according to the microstructure of soil samples. The test results show that the shear strength of soils after lateral unloading are different from that of conventional triaxial test.

Key words: excavation; lateral unloading; parameters of shear strength; microstructure

1 前 言

自 20 世纪 90 年代以来, 我国兴建了大量高层建筑, 相应的出现了大量的深基坑施工问题。另一方面, 诸多大城市中地铁隧道、地下车库等建设正如火如荼, 使得深基坑工程的规模和深度都不断加大。基坑开挖的卸荷过程对周围土层造成了不同程度的影响。长期以来, 由于对这一影响的认识不足而导致的工程事故不乏其例。传统的土力学理论以原状土常规三轴试验参数作为计算基坑周围土体强度的依据, 无法真实地反映基坑开挖的卸荷过程对周围土体应力状态及抗剪强度指标的影响。所以有必要模拟基坑开挖过程进行三轴试验研究, 分析卸荷对土体抗剪强度指标的影响。

2 基坑开挖过程中土体的应力路径

基坑工程的特殊性在于开挖卸荷, 而基坑中不同部位土体卸荷的应力路径是完全不一样的^[1]。因

此, 研究基坑开挖卸荷对土体强度的影响, 必须首先弄清卸荷条件下基坑不同部位土体的应力-应变关系。以基坑开挖平面应变问题为例, 如图 1 所示, 基坑开挖卸荷过程对周围土体的影响区域可分为 3 个部分:

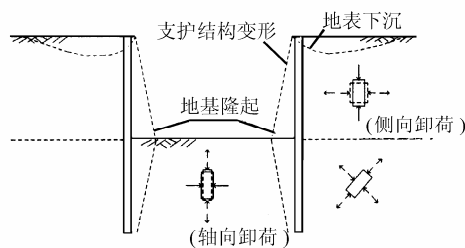


图 1 基坑开挖卸荷影响区域划分
Fig.1 Affecting area of unloading in excavation of pit

(1) 基坑外侧 (侧向卸荷): 随着基坑的开挖, 支护结构发生侧向位移, 水平方向地基应力逐渐减小, 即侧向卸荷; 竖直方向的自重应力基本保持不

变。水平方向应力在静止土压力与主动土压力之间。随着挖掘深度的增加,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) 基坑底部(轴向卸荷): 基坑底部以下的地基土在上部土体开挖后,上覆压力减小,竖直方向自重应力减少,即轴向卸荷。随着坑底隆起及支护结构向内移动,水平方向应力可能增加也可能减小。一般可将土单元体理想化成水平向应力不变,竖直向应力减小。应力路径如图 2 中的 AC 所示。

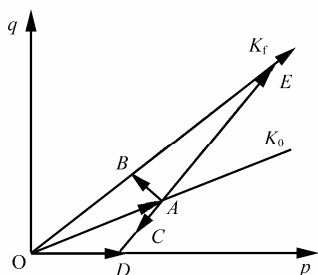


图 2 应力路径示意图

Fig.2 A schematic diagram of stress paths

(3) 过渡区域: 该部分土体位于基坑外侧和底部之间,因而,在基坑土体开挖过程中,水平及竖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 AC 之间。

综上所述,基坑开挖引起的坑侧土体侧向变形、坑底隆起与一般土工加载试验所表现的应力-应变状态不同,用常规土工加载试验模型及参数进行基坑工程的设计计算必然产生较大的误差。因此,进行模拟基坑开挖过程的试验研究对基坑工程的设计计算具有一定的指导意义。

3 模拟基坑开挖过程的三轴试验

本文以基坑围护结构后侧饱和土体在开挖过程中的应力-应变状态为研究对象,进行经历侧向卸荷过程的固结不排水三轴剪切试验研究。

3.1 土体应力状态分析

(1) 土样的原始应力状态

不考虑地下水影响时,天然状态的土体在 k_0 条件下进行固结,土体内任一点的应力状态为:

$$\sigma_1 = \sigma_z = \gamma z \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = k_0 \gamma z \quad (2)$$

$$k_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (3)$$

式中 γ 为土的天然重度(kN/m^3); z 为计算点深度(m); k_0 为静止土压力系数; φ' 为有效内摩擦角($^\circ$)。

(2) 开挖取样后,试样应力条件发生如下变化:

$$\sigma_1 = \sigma_z = \gamma z \rightarrow 0 \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = k_0 \gamma z \rightarrow 0 \quad (5)$$

由以上分析可知,三轴试验所用土样的初始应力均为 0,不符合土体实际的应力状态,所以进行模拟基坑开挖过程的试验前,应首先恢复土体原有的应力状态。一般认为,天然土体的固结过程是 k_0 固结^[2]。考虑到试验的可操作性以及土的各向异性等因素,本次固结试验采用等主应力比固结,主应力比根据 k_0 值加以确定。

3.2 经历侧向卸荷过程的三轴试验方法

本次试验采用 TSZ30 型三轴试验仪进行,利用与微型计算机相连接的孔压、轴压、位移传感器自动采集试验数据。试验所用原状土样选自天津市市区某建筑工地同一钻孔的不同深度,土样基本处于饱和状态,但土的种类、地质成因均不相同,以便检测侧向卸荷对不同土体的影响是否一致。

经历侧向卸荷过程的三轴试验步骤如下:

(1) 将钻孔原状土用切土器制备成圆柱体土样,试样直径为 39.1 mm,高度为 80 mm,然后在真空泵中进行抽气饱和。

(2) 根据土体原始应力状态施加围压和轴压,保持主应力比不变对土体进行排水固结;

(3) 固结稳定后,保持轴压不变,侧向分级卸除围压,卸荷等级一般为 5~6 级,每级的卸荷量根据围压大小而定;

(4) 对卸荷后的试样分别施加不同的围压,然后在不排水条件下进行剪切试验。

(5) 当轴向应变达到 15 % 时,认为土样达到剪切破坏,试验结束。

为了对比,在上述试验的同时进行了各向等压固结不排水常规三轴剪切试验(CU 试验)。在试验前,按照《土工试验方法标准》GB/T50123-1999^[3]对所有试验土样进行了含水量、重度、液塑限、压缩等物理力学性质指标的测定,结果如表 1 所示。

部分土样常规三轴试验与经历侧向卸荷过程三轴试验的典型应力-应变关系曲线如图 3~图 6 所示。根据这些曲线,土工试验微机数据采集处理系统绘制了三轴试验土的抗剪强度包线。图 7~图 8 给出了其中 2 个土样经历侧向卸荷过程三轴试验的抗剪强度包线,由此确定的土样抗剪强度指标如表 2 所示。

表 1 三轴试验的土体参数
Table 1 Soil parameters in triaxial test

土的类别	土的成因	取土深度 /m	含水量 ω /%	天然重度 γ /kN·m ⁻³	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	压缩指数 E_s /MPa
③粉质粘土	Q_{3al} 上部陆相层	5.3	24.7	19.8	0.71	14.8	0.44	0.30	5.8
⑤粉土	Q_{4m}^2 中部海相土	8.3	30.9	18.9	0.88			0.20	9.5
⑥粉土	Q_{4m}^2 中部海相土	9.3	26.9	19.3	0.77			0.18	9.8
⑨粉质粘土	Q_{4h} 沼泽沉积	15.3	25.3	19.7	0.73	13.7	0.53	0.30	5.8

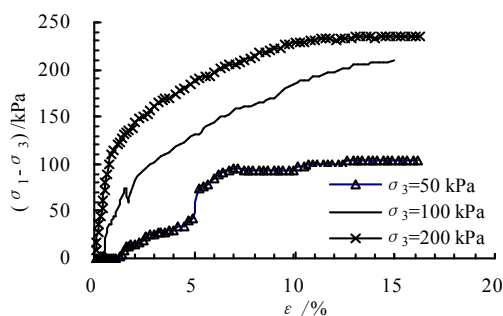


图 3 ③粉质粘土常规 CU 试验

Fig3. Conventional CU triaxial test curve for silty clay No.3

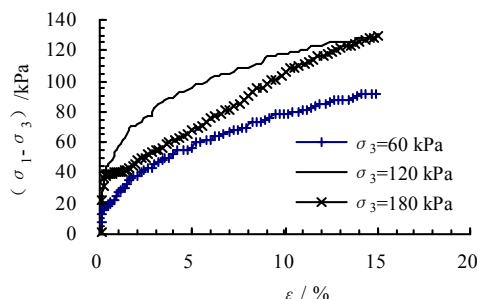


图 4 ③粉质粘土经历侧向卸荷 CU 试验

Fig4. Lateral unloading CU triaxial test curve for silty clay No.3

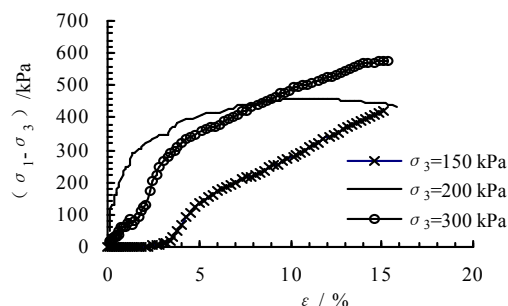


图 5 ⑥粉土常规 CU 试验

Fig5. Conventional CU triaxial test curve for silt No.6

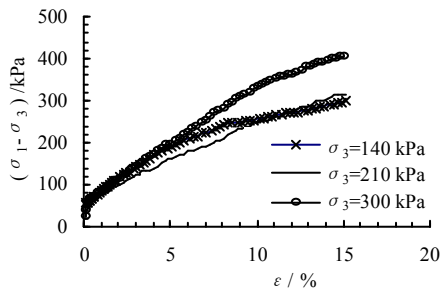


图 6 ⑥粉土经历侧向卸荷 CU 试验

Fig6. Lateral unloading CU triaxial test curve for silt No.6

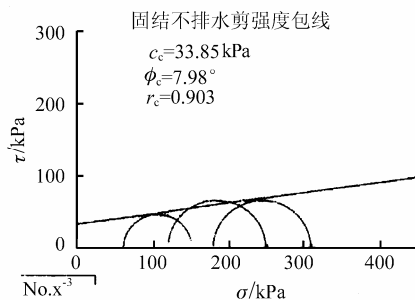


图 7 ③粉质粘土经历侧向卸荷 CU 破坏包线

Fig7. Failure envelop of lateral unloading test for silty clay No.3

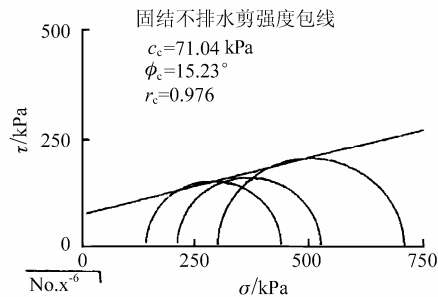


图 8 ⑥粉土经历侧向卸荷 CU 破坏包线

Fig8. Failure envelop of lateral unloading test for silt No.6

表 2 常规三轴试验与经历侧向卸荷过程的三轴试验结果对比

Table 2 Comparison between conventional CU triaxial test and lateral unloading triaxial test results

土的类别	常规三轴试验		经历侧向卸荷过程的三轴试验	
	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 ϕ /(°)
③粉质粘土	30.25	17.56	33.85	7.98
⑤粉土	85.26	32.68	84.27	23.82
⑥粉土	111.98	16.49	71.04	15.23
⑨粉质粘土	47.23	15.84	15.82	7.60

3.3 侧向卸荷过程对土体抗剪强度指标的影响

从上述试验结果可以看出, 经过侧向卸荷过程的三轴固结不排水试验与常规三轴固结不排水试验的应力-应变关系曲线明显不同。虽然试验所用原状土样的类别、历史成因均不相同, 但是经过侧向卸荷过程以后, 土样剪切破坏时的主应力差值均小于常规三轴试验的剪切破坏值。因此, 该试验测得的抗剪强度指标与常规三轴试验明显不同。其粘聚力基本上呈现减小趋势, 而内摩擦角减小幅度更大, 其中粉质粘土的内摩擦角减小幅度达 50 % 以上。

这一变化产生的原因可由土的微观结构变化加以定性分析。对于模拟基坑开挖过程的土样来说, 在经过侧向卸荷之后, 原状土的颗粒连接将发生不同程度的错动、断开或破裂。因此, 土体的原始结构性遭到一定破坏, 从而导致其抵抗剪切破坏的能力发生变化。

3.4 卸荷与常规三轴试验土样的微观结构对比

为了探求侧向卸荷过程对土样抗剪强度指标的影响原因, 本次试验对土的微观结构变化进行了定量分析。

在分析中, 将同一土样的原状土、经历侧向卸荷过程三轴试验及常规三轴试验后的圆柱状土样进行自然风干, 保持土样的原始状态。然后, 将其分别置于 Olympus 光学显微镜的载物台上, 选取原状土样的侧剖面和三轴试验土柱的侧立面进行微观结构观察。通过调整显微镜的物镜、目镜获得土体中孔隙和颗粒的分布情况。

本次微观结构研究试验中显微镜放大倍数为 300 倍时, 观测到了较为清晰的土中孔隙和颗粒的分布图像。这时, 使用 Olympus-PM-6 照相机拍摄典型的微观结构照片。图 9~图 11 为⑨号粉质粘土在不同状态下的微观结构照片。

用扫描仪将这些照片扫描至计算机, 使微观结构图像数字化, 成为量化级数为 256 级的离散化图像。然后, 利用 Olympus 图像处理系统对图像进行亮度和灰度调整, 并进行图像二值化处理, 使图像成为只有两个灰度级的二值化图像, 从而区分出图像中的背景及分析物。在土的微观结构图像中, 背景为颗粒, 分析物为孔隙。图像处理系统可计算出这些二值化图像中分析物, 即土中孔隙所占的百分含量。部分土样微观结构图像中的孔隙含量如表 3 所示。

由上述图像及计算结果可知, 在经过侧向卸荷过程或常规三轴固结不排水剪切试验后, 土样的孔隙率总体上较原状土有所减小, 颗粒连接更加紧密。

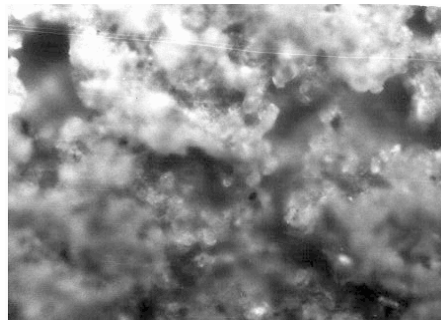


图 9 原状土微观结构

Fig.9 Microstructure of undisturbed soil sample

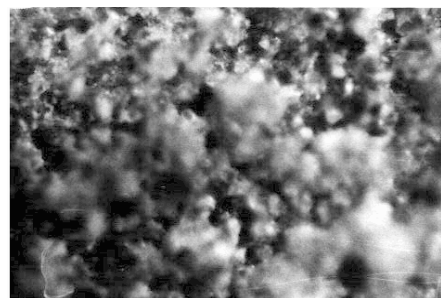


图 10 经历侧向卸荷试验后土样的微观结构

Fig.10 Microstructure of soil sample in lateral unloading CU triaxial test



图 11 常规三轴试验后土样的微观结构

Fig.11 Microstructure of soil sample in conventional CU triaxial test

表 3 ⑨号粉质粘土的孔隙率统计
Table3 Porosity of silty clay No.9

孔隙率/ %		
原状土	经历侧向卸荷试验	常规三轴试验
35.07	26.80	23.03

但是, 经过侧向卸荷过程的三轴试验与常规三轴试验后土样的孔隙变化率明显不同。经过侧向卸荷过程三轴试验后土样的孔隙率较常规三轴试验大, 土样的密实程度介于原状土及常规三轴试验土样之间。这一结果表明, 经历了侧向卸荷过程的土体其抵抗剪切破坏的能力必然不同于常规三轴试验。