

不同应力路径下上海地区软黏土三轴试验研究

胡立明

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:在深基坑工程中,土体的开挖是个逐渐卸荷的过程。在这一过程中,土体的应力状态不断变化。为考虑应力路径对土体的影响,采用GDS三轴仪对上海深隧工程的原状软黏土进行三轴试验,研究不同应力路径下土体的应力-应变关系、孔隙水压力变化规律、有效应力路径和变形特性。结果显示:土的峰值强度、孔压、有效应力路径和变形等特性均受到应力路径的显著影响,在实际工程中应考虑这一因素。另外,需特别注意开挖卸荷过程中较小的变形就可能导致的破坏,应防范骤然破坏情况的出现。

关键词:应力路径;三轴试验;应力-应变关系;孔隙水压力;开挖卸荷

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)04-0186-04

0 引言

随着城市化的快速推进,地下空间的开发变得如火如荼,开发深度不断增大,由此也产生了很多工程难题,其中之一便是开挖卸荷导致的土体力学性质的变化。对深基坑工程而言,挡土结构在施工和开挖阶段都会引起应力变化。其变化程度取决于初始应力、施工方法和开挖深度等,是一个复杂的问题。

既有研究已经表明,土的力学性质不仅取决于土体在最初和最终状态下的应力水平,还受到应力路径和应力历史等因素的影响^[1-2]。为此,相关学者在研究和工程实践中开始考虑这一因素。杨光等^[3]开展了粗粒料的大型三轴试验,考虑了常规三轴、等P和等应力比等不同类型的应力路径,通过试验研究了应力路径对粗粒料应力-应变和强度的影响规律。在已有研究的基础上,迟明杰等^[4]从细观角度出发,分析应力路径对砂土变形的影响。应宏伟等^[5]考虑主应力轴的旋转,在此基础上分析了基坑开挖中的应力路径情况。曾玲玲等^[6]通过试验方法分析了应力路径对天然沉积土的压缩特性的影响规律。李校兵等^[7]基于GDS三轴仪开展了不同应力路径下原状温州软土的 K_0 固结试验,并基于试验数据建立了不同应力路径下孔压与应变的关系。李保平等^[8]利用自行改造的三轴仪对侧向卸荷情况下的原状黄土开展试验,并通过与常规试验的对比,指出工程设计

中应选择与应力路径相符的土体参数。孔亮等^[9]开展了常剪应力路径下含气砂土中的三轴试验。郭玉良等^[10]开展了不同基质吸力下的三轴试验,设置了加压和减压两种应力路径,得到了污染土的强度参数和强度公式。上述研究表明,在基坑工程开挖卸荷过程中,应力路径的影响必须考虑。

近年来,上海地区建造了众多深基坑工程,部分基坑深度已超过70 m,以往工程设计所采用的土体本构模型一般通过常规三轴试验得到,未考虑应力路径的影响。而实际上,如前所述,土体的开挖是个逐渐卸荷的过程,土体应力状态处在不断的变化过程中。鉴于此,本文拟采用GDS应力路径三轴试验系统,开展不同应力路径下土体应力-应变关系的研究,以便为相关工程提供参考。

1 试验步骤

1.1 试验系统

试验所采用的GDS系统由计算机自动控制,可以完成不同应力路径下的三轴试验。另外,还可以模拟实际工况中荷载的变化情况,且试验过程中的垂直向应力和水平向应力可以同时改变。试验系统主要包括分析和控制软件、应力路径三轴压力室、压力控制器等。其中,三个压力器分别用来控制轴向应力和位移、围压和施加反压,并测量体积的变化情况。

1.2 试验方案

试验过程中的应力路径如图1所示,其中AB和DE为常规的三轴压缩CTC路径,AC和DF为减压的三轴压缩RTC路径。路径的设计综合考虑了天然土

收稿日期:2020-11-25

作者简介:胡立明(1962—),男,本科,教授级高级工程师,从事岩土勘察专业相关工作。

层的各向异性和应力路径对土体应力 – 应变关系的影响。详细试验方案见表 1。

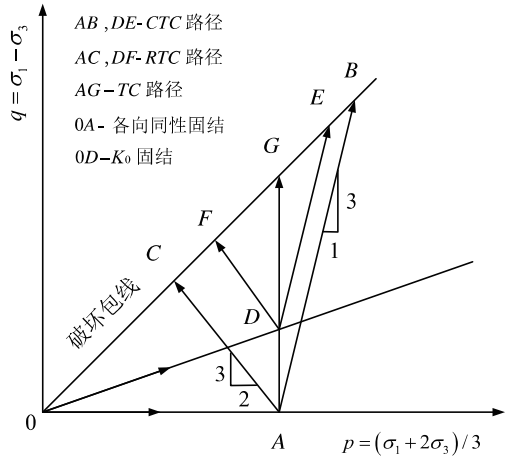


图 1 p-q 空间应力路径

表 1 试验方案

试样编号	试验类型	固结过程(排水)		剪切过程(不排水)		深度 /m
		围压 σ_3/kPa	应力 路径 $K_0=$ σ_3/σ_1	应力 路径 控制 方式	剪切速率	
CURTC _{0.6} ⁶⁰	CU	60	0.6	$\Delta\sigma_3 < 0$ $\Delta\sigma_1 = 0$	应力 σ_3 0.25 kPa/min	25
CURTC _{0.6} ⁹⁰		90				
CURTC _{0.6} ¹²⁰		120				
CURTC _{0.6} ¹⁸⁰		180				
CUCTC _{0.6} ¹²⁰	CU	120	0.6	$\Delta\sigma_3 = 0$ $\Delta\sigma_1 > 0$	应变 轴向变形 0.05 mm/min	
CURTC _{0.6} ⁹⁰	CU	240	0.6	$\Delta\sigma_3 < 0$ $\Delta\sigma_1 = 0$	应力 σ_3 0.25 kPa/min	50
CURTC _{0.6} ¹²⁰		300				
CURTC _{0.6} ¹⁸⁰		360				

1.3 试验步骤

试验主要包括以下步骤：

(1)土样采集与制备。试样取自上海深隧项目现场,两组试样的取样深度分别为 25 m 和 50 m。通过室内试验测得土样的一系列物理力学指标,分别为:含水率 32%,比重 2.70,液限 29.35%,塑限 25.30%,塑性指数 $I_p=4.05\%$,液限指数 $I_L=1.67$ 。

(2)开启系统,将围压和反压分别设置为 320 kPa 和 300 kPa,以便使试样饱和。

(3)在保持反压不变的基础上,增加 20 kPa 围压,并计算孔压系数 B 。若 B 值到达 0.93 以上,则视土样为饱和;否则需要重新进行试样饱和。

(4)将反压保持在 300 kPa,进行等向固结。随后根据应力比设置围压进行非等向固结,直至固结度达到 98%。

(5)关闭排水阀门,开展三种应力路径下的不排水试验。试验中对常规三轴和减压三轴应力路径分别采取标准三轴试验模块和 Advance loading 试验模块。

(6)试验结束后,描述试样在破坏后的性状,并测定试样的含水量。

1.4 计算参数选取

该深基坑周围土体的物理力学参数根据工程勘察资料确定,设定的试验参数见表 1。且由于开挖之前已经进行了降水作业,故忽略地下水的影响。

2 试验结果

采用 GDS 三轴仪开展试验,试验数据处理后,可得到土体峰值强度、孔压、有效应力路径和变形规律。同时进行了深层原状黏性土在开挖应力路径下的试验,分析了加载和卸载两种情况下土体的变形与强度的关系,并据此对卸载状态下的土体本构模型进行了修正。

2.1 不排水试验时的峰值强度和孔压

2.1.1 常规三轴试验

通过常规三轴试验得到的应力 – 应变 ($q-\varepsilon_a$) 关系曲线、孔隙水压力 – 应变 ($u-\varepsilon_a$) 关系曲线如图 2 所示。由图 2(a)可知, $q-\varepsilon_a$ 关系曲线为非线性,在试验前期,基本呈应变硬化的规律,而后期则呈现出较为轻微的应变软化。试验过程中由于体积不变,试样通过内部压力的调整来减小有效围压。由图 2(b)可知,试验初期的孔压迅速增大,其后基本保持稳定,而试验后期则又有所减小。

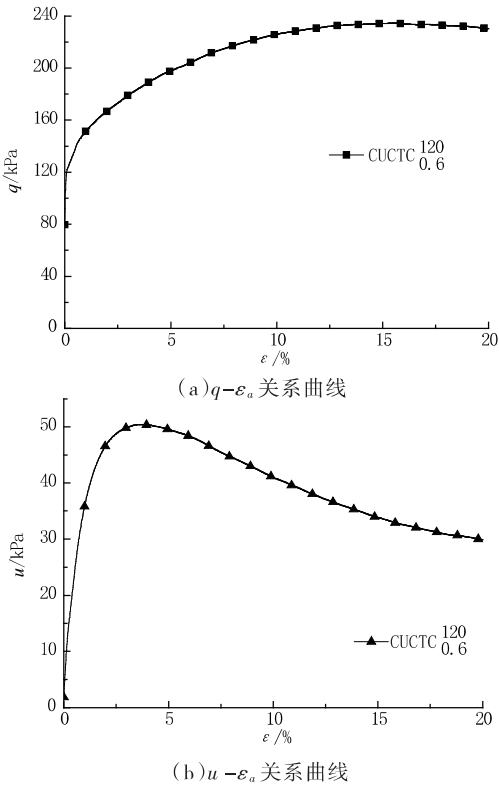


图 2 CUCTC 试验的 $q-\varepsilon_a$ 与 $u-\varepsilon_a$ 关系曲线

定义峰值强度 $q_{\max}$ 为所能承受的最大剪应力, $\sigma_{m0}=(\sigma_{a0}+\sigma_{r0})/3$ 为平均固结压力,则常规三轴不排水试验的参数见表2。经对 $q_{\max} \sim \sigma_{m0}$ 进行线性拟合,发现两者存在如下关系: $q_{\max}=1.6\sigma_{m0}$ 。另外,试验过程中最大孔压 $u_{\max}$ 随平均固结压力 σ_{m0} 的增加而增大,且大致呈如下线性关系: $u_{\max}=0.34\sigma_{m0}$ 。

表2 常规三轴不排水试验 $q \sim \varepsilon_a$ 参数表

试样编号	K_0	σ_a (轴压)	σ_r (围压)	σ_{m0}	$q_{\max}$
CUCTC _{0.6} ¹²⁰	0.6	200	120	146.7	234.8

2.1.2 减压三轴试验

减压三轴试验在非等向固结时的 $q \sim \varepsilon_a$ 关系曲线与 $u \sim \varepsilon_a$ 关系曲线如图3所示。由图3(a)可知, $q \sim \varepsilon_a$ 关系曲线具有明显的非线性特性,且呈应变硬化。由图3(b)可知,孔隙水压力为负值且随围压的增大而增大,由于产生的是负孔压,在试验结束的时候,即使侧向压力完全卸掉,仍然会保持一定的有效压力,因此,试样仍具有一定的强度。

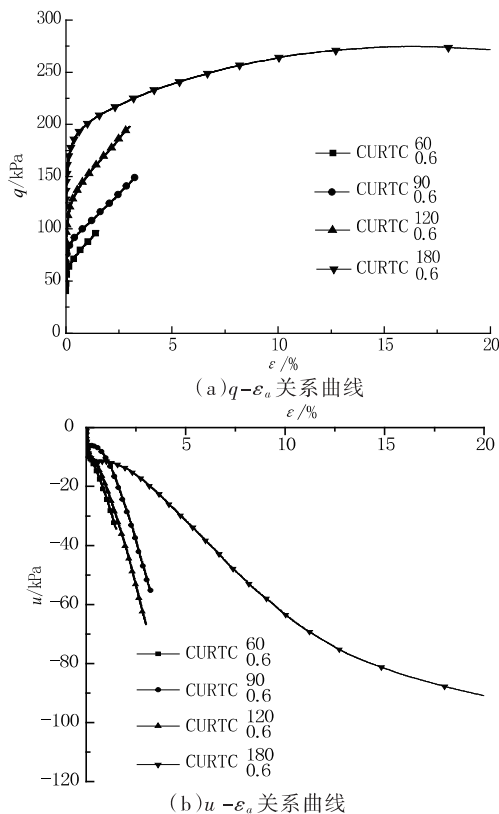


图3 CURTC试验的 $q \sim \varepsilon_a$ 与 $u \sim \varepsilon_a$ 关系曲线

减压三轴试验中的峰值强度 $q'_{\max}$ 也随着平均固结压力 σ'_{m0} 的增大而增大,经对 $q'_{\max} \sim \sigma'_{m0}$ 进行线性拟合,发现两者存在如下关系: $q'_{\max}=1.1\sigma'_{m0}$ 。

2.2 不排水条件下的有效应力路径

2.2.1 常规三轴试验

常规三轴试验中的应力路径如图4所示。由图4

可知,土体的峰值强度会随着所施加的平均固结压力 σ_{m0} 的增大而增大。在整个试验过程中, p' 逐渐增大,且增大趋势在后期更为明显。另外,不同 p' 所对应的有效应力路径非常类似,基本都呈S形。

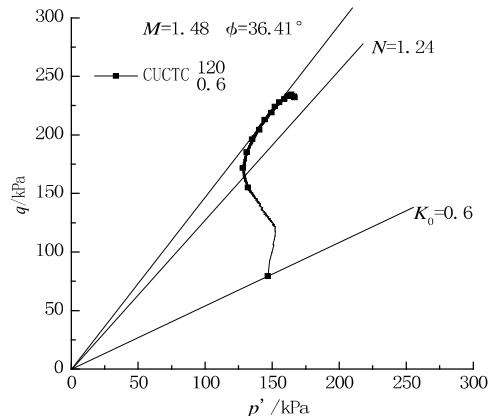


图4 CUCTC试验的有效应力路径

2.2.2 减压三轴试验

减压三轴试验中的应力路径如图5所示。由图5可知,若固结条件相同,得到的应力路径都是相似的。另外,随着平均固结压力 σ_{m0} 的增大,非等向固结下得到的土样峰值强度逐渐增大。这是土体压硬性影响的结果。

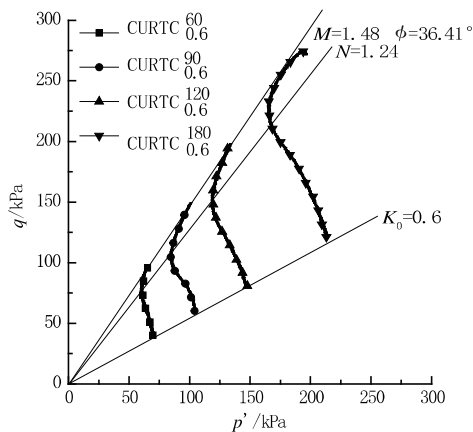


图5 CURTC试验中的有效应力路径

综合图4和图5的结果可知,常规三轴试验与减压三轴试验的应力路径因孔压和应力的不同而表现出明显的不同。具体而言,应力路径在常规三轴试验中呈现S形,有两个拐点;而在减压三轴试验中则呈现出倒L形,且仅有一个拐点。孔压在有效应力路径的形成中发挥关键性作用,上述两类试验分别产生正孔压和负孔压。由此可知,有效应力路径在其形成的过程中受到加卸荷情况和先期固结压力等因素的综合作用。

2.3 不排水条件下试样的变形规律

2.3.1 常规三轴试验

常规三轴试验的 $\varepsilon_a \sim p'$ 与 $u \sim \varepsilon_a$ 关系曲线如图6

所示。由图 6(a)可知,在常规三轴试验中, ε_a-p' 曲线近乎呈 S 形,有两个拐点,一个出现在试验初期(此时应变很小,约为 0.29%,),在此之前 p' 迅速增大,此后 p' 逐渐减小直至到达第二个拐点,之后 p' 又逐渐增大直至试样破坏。由图 6(b)可知,孔压随着应变的增大先迅速增大,达到最大值后逐渐减小并趋于稳定。

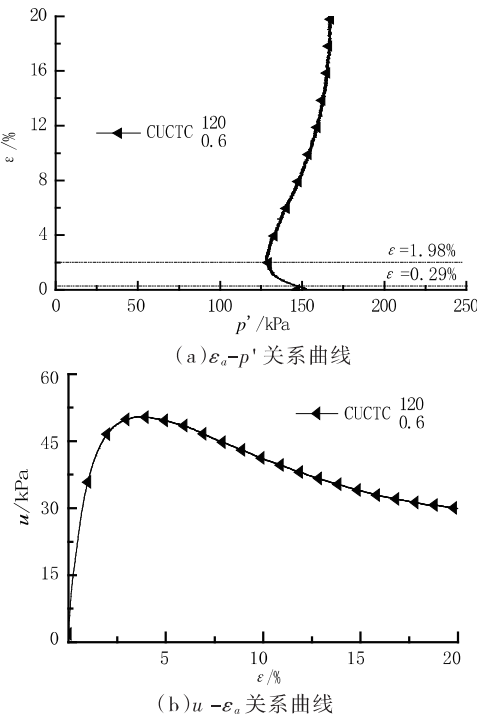


图 6 CUCTC 试验的 $u-\varepsilon_a$ 与 ε_a-p' 关系曲线

2.3.2 减压三轴试验

减压三轴试验由应力控制,试验初始阶段,有效应力 p' 逐渐降低且孔压基本为负值;当应变大于 2% 时, p' 才会逐渐趋于稳定,如图 7 所示。

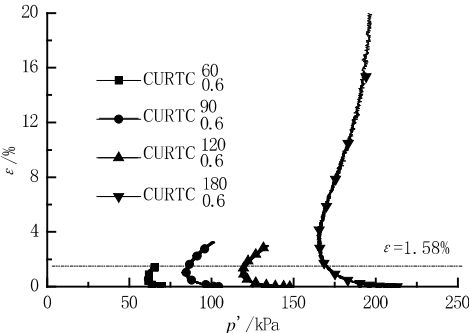


图 7 CURTC 试验的 ε_a-p' 关系曲线

3 结 论

(1)在不排水条件下,常规三轴试验和减压三轴

试验的 $q-\varepsilon_a$ 关系曲线均表现出明显的非线性特性,且后者还呈现出明显的应变硬化的规律。

(2)常规三轴试验与减压三轴试验的应力路径明显不同,其中前者呈明显的 S 形,有两个拐点,产生的是正孔压;而后者则呈倒 L 形,只有一个拐点,且产生的是负孔压。

(3)在常规三轴试验中, ε_a-p' 曲线近乎呈 S 形,有两个拐点。在减压三轴试验中,试验初始阶段,有效应力 p' 逐渐降低且孔压基本为负值;当应变大于 2% 时, p' 才会逐渐趋于稳定。

(4)由于减压三轴试验破坏时的应变一般较常规三轴试验小,因此,需特别注意开挖过程中较小应变下的土体破坏。

(5)加卸荷情况下土体的应力状态存在明显区别,基坑开挖是典型的卸荷过程,因此,减压三轴试验的结果更符合基坑内的应力状态,在卸荷区尤其是严重卸荷区进行评估预测时应采用减压三轴试验得到的参数。

参考文献:

[1] 张云军.考虑卸荷效应时开挖对周围环境的影响与评估研究[D].南京:南京工业大学,2006.

[2] 李栋伟,陈军浩,周艳.复杂应力路径人工冻土三轴剪切试验及本构模型[J].煤炭学报,2016,41(S2): 407-411.

[3] 杨光,孙逊,于玉贞,等.不同应力路径下粗粒料力学特性试验研究[J].岩土力学,2010,31(4): 1118-1122.

[4] 迟明杰,李小军,赵成刚,等.应力路径对砂土变形特性影响的细观机制研究[J].岩土力学,2010,31(10): 3081-3087.

[5] 应宏伟,李晶,谢新宇,等.考虑主应力轴旋转的基坑开挖应力路径研究[J].岩土力学,2012,33(4): 1013-1017.

[6] 曾玲玲,洪振舜,刘松玉,等.应力路径对天然沉积土压缩特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(7): 1250-1255.

[7] 李校兵,郭林,蔡袁强,等. K_0 固结饱和软黏土的三轴应力路径试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(5): 1820-1825.

[8] 李宝平,郭兴峰,张玉,等.侧向卸荷条件下黄土的变形特性试验[J].土木工程与管理学报,2018,35(6): 87-93,100.

[9] 孔亮,刘文科,袁庆盟,等.常剪应力路径下含气砂土的三轴试验[J].岩土力学,2019,40(9): 3319-3326.

[10] 郭玉良,曹丽文,霍攀.两种应力路径下非饱和污染土强度与微观结构研究[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(3): 602-611.