

侧向卸荷条件下上海灰色黏性土的三轴试验研究

汪中卫

[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:通过 K_0 固结条件下GDS常规三轴和侧向卸荷三轴试验分析了应力路径对上海地区⑤₁层灰色粘性土的强度与变形特性影响。试验结果表明不同围压条件下侧向卸荷三轴试验有效应力路径基本呈倒“L”形,而常规三轴试验则呈“S”形。侧向卸荷三轴试验的负孔压数值随围压减小而单调增加,其最终值与围压大小正相关;侧向卸荷三轴压缩试验应力应变关系与常规三轴压缩试验有较多相似,其峰值强度都随体积应力的增加而提高,但破坏时应变值明显较常规压缩试验偏低。归一化土体模量与应力水平呈幂次关系,其幂指数 m 值与《上海市基坑工程技术标准》中对浅层土建议值基本相同。

关键词: K_0 固结;侧向卸荷三轴试验;应力路径;负孔压;归一化刚度

中图分类号:TU411.3

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2022)05-0194-04

0 引言

自Lambe(1967)^[1]提出应力路径以来,土的应力应变关系已被大量试验证明与土的应力水平与有效应力路径直接相关^[2-7],经典如邓肯-张模型^[2]。曾国熙等(1988)^[3]指出正常固结黏性土的可通过双曲线拟合,曾玲玲等(2012)^[4-5]通过GDS三轴CU试验对南沙软土进行了应力路径试验研究。

对基坑工程而言,主动区与被动区土体在开挖过程中,其应力路径有着明显不同。主动区土体存在明显的侧向卸荷行为,同时天然海相黏性土具有明显的沉积特点,因此应力路径不同可能会对其强度与变形特征产生明显的影响。

刘国杉(1996)^[6]对基坑开挖回弹问题进行了一系列卸载试验研究,并提出了上海软土竖向卸荷时的卸荷模量计算方法;Ng(1999)^[7]对基坑开挖的应力路径变化进行了经典分析与探讨。

已有研究从不同角度研究与探讨了应力路径对沉积黏性土的强度与变形特征影响,但对区域性明显的黏性土仍需进一步研究。

随着上海城市开发向“深、大”方向发展,20 m以下土体对深基坑等地下工程受力和变形特性影响非常明显。现依托上海某深层地下空间工程,采用GDS三轴仪对上海灰色黏性土进行了 K_0 固结条件

下的侧向卸荷三轴CU应力路径试验和常规三轴CU试验,以分析应力路径对黏性土的孔压、有效应力路径、变形,以及归一化剪切刚度的影响,以便为工程设计与分析提供基本参数。

1 试验方案

上海灰色黏性土是指⑤₁层褐灰色黏性土,其地表埋深约为15~20 m,层厚约5~15 m,其状态为软塑-可塑。该项试验的土样取自地表下25 m左右,室内常规物理试验指标如下:液限为39.6%,塑限为22.3%,塑性指数 I_p 为17.3,液限指数 I_L 为0.91。

基坑开挖过程中按应力路径变化特征可分为侧向卸荷区(主动区)、侧向与竖向双向卸荷区(被动区),以及中间过渡区(围护结构底部从主动状态向被动状态过渡区域),从侧向卸荷区到双向卸荷区其大主应力方向逐渐从垂直向水平方向变化。对天然沉积黏土而言,其正常固结压力为 K_0 状态。该项试验 K_0 固结侧压力系数取0.6,侧向卸荷状态模拟采用侧向卸荷三轴试验。作为对比,同时也进行了一组常规三轴试验。不同类型三轴试验应力路径如图1所示。

试验采用GDS应力路径三轴仪,采用反压进行土样饱和,当孔压系数达0.95可认为饱和,满足要求。

对侧向卸荷试验, K_0 固结时各试样围压 σ_3 终值分别为60、90、120、180 kPa,剪切试验采用减小围压 σ_3 来模拟开挖时主动区侧向卸荷(见表1);对常规三轴试验,采用控制轴向应变速率来进行加载试验。

收稿日期:2021-12-13

作者简介:汪中卫(1972—),男,高级工程师,从事岩土工程勘察、设计、咨询及科研工作。

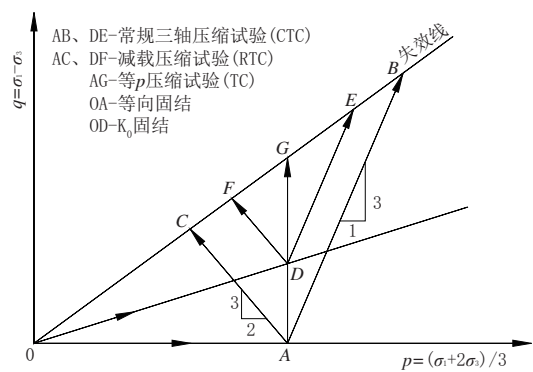


图 1 $p \sim q$ 空间应力路径图

表 1 剪切试验方案一览表

试样 编号	试验 类型	K_0 固结		剪切 (应力控制)
		围压 σ_3/kPa	应力路径 $K_0=\sigma_3/\sigma_1$	
CURTC _{0.6} ⁶⁰	CU	60	0.6	$\Delta\sigma_1=0$ $\Delta\sigma_3<0$ (0.25 kPa/min)
CURTC _{0.6} ⁹⁰		90		
CURTC _{0.6} ¹²⁰		120		
CURTC _{0.6} ¹⁸⁰		180		
CUCTC _{0.6} ¹²⁰	CU	120	0.6	轴向变形 0.05 mm/min

注:编号中 CU 表示固结不排水试验;RTC 表示侧向卸荷三轴试验,上标为固结围压 σ_3 ;下标为固结应力比 σ_3/σ_1 。

2 试验结果

2.1 孔压与有效应力路径变化分析

从图 2 可知,侧向卸荷三轴试验中的有效应力路径变化在不同围压条件下,除大小有区别外,其路径变化规律上基本一致,有很强的相似性,其有效应力路径则呈倒“L”形,只有一个拐点;而常规三轴压缩试验有效应力路径则呈“S”形,试验初期有效体积应力 p' 略有增加,但后期增加更明显。两种类型的有效应力路径变化特征区别主要表现为侧向卸荷三轴试验无明显第一拐点,而常规三轴试验第一、第二拐点均非常明显。

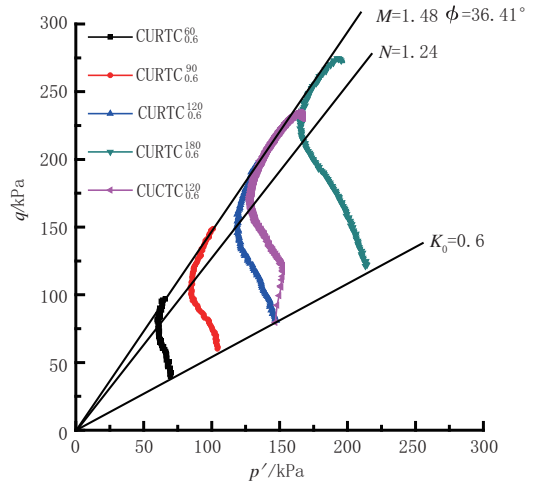


图 2 CUCTC 和 CURTC 试验的有效应力路径图

两种试验有效应力路径有所不同与土体的孔压反应有直接关系。常规三轴试验为正孔压,只是试验后期有所减小,而侧向卸荷三轴试验一直表现为负孔压,且随试验围压的减小而负孔压单调增加。

同时,从 $u \sim \varepsilon_a$ 曲线来看(见图 3),侧向卸荷三轴压缩试验中的孔压从一开始就表现为负值,其最终负孔压与土体围压大小呈正相关。而常规三轴压缩试验的孔压从一开始就表现正增长,只是达到强度峰值以后表现为弱剪胀导致孔压有小幅降低。

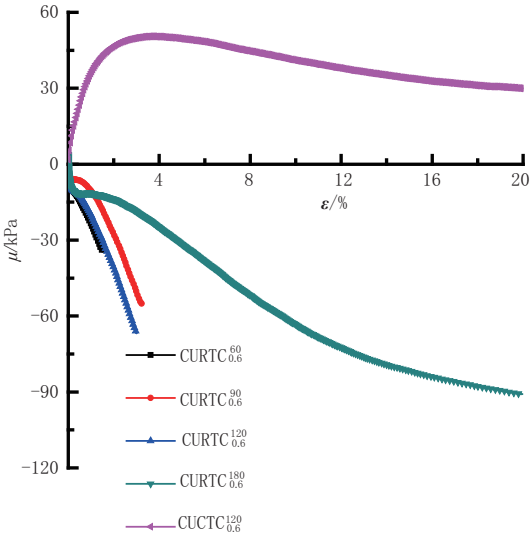


图 3 CUCTC 和 CURTC 试验的 $u \sim \varepsilon_a$ 曲线图

2.2 有效体积应力 p' - 轴向应变 ε_a 关系(见图 4)

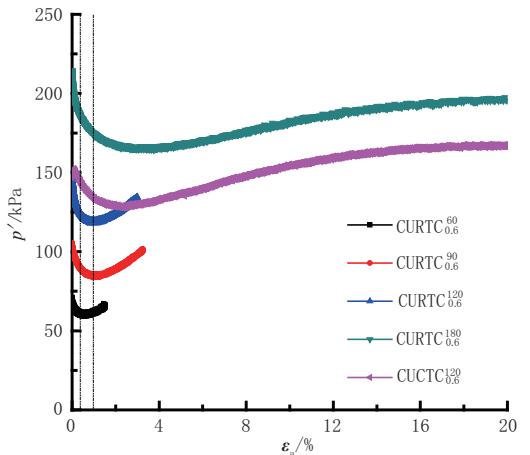


图 4 CUCTC 和 CURTC 试验的 $\varepsilon_a \sim p'$ 曲线图

从有效应力变化来看,侧向卸荷三轴压缩试验的有效应力 p' 均表现一开始降低,在应变达到某一拐点值又逐渐增大,其应变拐点值随着应力水平的提高而增大,试样 CURTC_{0.6}⁶⁰、CURTC_{0.6}⁹⁰、CURTC_{0.6}¹²⁰、CURTC_{0.6}¹⁸⁰ 的拐点值分别为 0.5%、1.0%、1.0% 和 2.0%;而常规三轴试验的有效体积应力 p' 前期稍有增加后再减小,到第二拐点后增加更为明显,其第二拐点应变值约为 2.0%。

从有效应力变化对应的应变拐点值来看,其值随着应力水平的增加而增大,但同时可以看出侧向卸荷三轴试验破坏时的应变值 ε_a 明显较常规三轴试验要小。从试验结果可以发现对基坑等开挖卸荷工程其破坏时应变明显要比常规加载工程(如路堤堆载)要小,这也从另外一个角度说明:在现行基坑变形控制容许值相对较小(如上海地区环境保护等级为三级时最大侧移控制值为 $0.7\%H$, H 为开挖深度)的理论合理性。

2.3 偏差应力 q -轴向应变 ε_a 关系(见图 5)

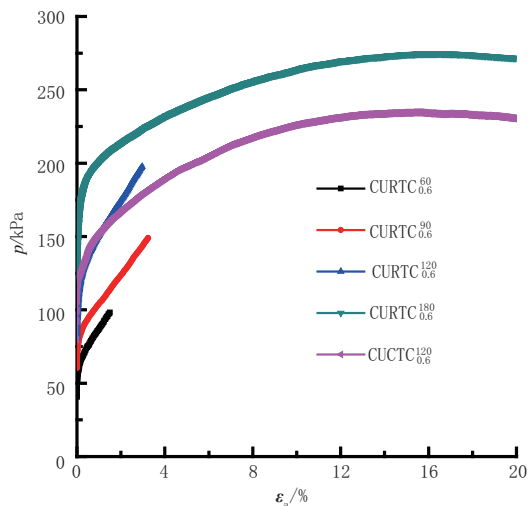


图 5 CURTC 和 CURTC 试验的 $q \sim \varepsilon_a$ 曲线图

从侧向卸荷三轴压缩试验的 $q \sim \varepsilon_a$ 曲线来看,其应力应变关系表现为明显的非线性,并呈硬化型特征。从曲线形态来看,在剪切阶段其应变硬化与非线性与常规三轴压缩试验有很多相似之处(如曲线 $CURTC_{0.6}^{180}$ 、 $CURTC_{0.6}^{120}$)。

但同时从四种侧向卸荷三轴试验来看,在初始围压应力水平较低时, $q \sim \varepsilon_a$ 曲线相对较为陡峭,衰减较慢,当 GDS 围压卸荷至 0 时(考虑到负孔压存在,土体实际有效围压值即为负孔压值),仍未出现明显峰值拐点。如曲线 $CURTC_{0.6}^{60}$ 破坏时的轴向应变仅约为 1.5%,曲线 $CURTC_{0.6}^{90}$ 和 $CURTC_{0.6}^{120}$ 破坏时的轴向应变仅约为 3.0%,而曲线 $CURTC_{0.6}^{180}$ 的应变硬化特征则基本与曲线 $CUCTC_{0.6}^{120}$ 相同,表现出较好的塑性变形特征。从峰值强度来看,三轴侧向卸荷试验的峰值强度都随体积应力的增加而提高。上述现象,反映了土的体积应力水平对土的刚度和强度的影响。

3 不同应力路径的归一化刚度

卸荷条件下的归一化刚度曲线与围压水平正相关。研究表明土体模量与应力水平呈一定幂次关系。

令 $\eta = q/p'$, 将 $q \sim \varepsilon_a$ 曲线进行归一化处理, 式中 q_0 为 K_0 固结时的剪应力, m 为幂指数, 其值按经验值进行试算最终确定。

图 6 为 $\eta \sim \varepsilon_a$ 曲线图。

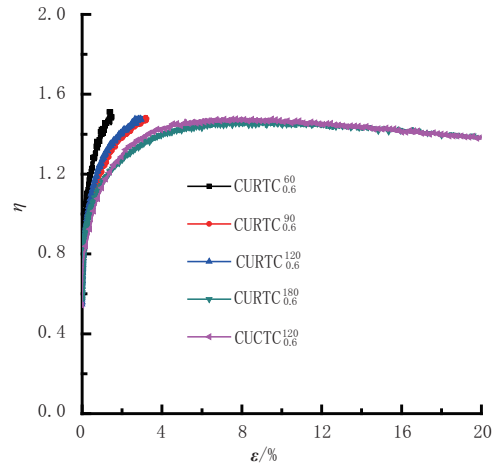


图 6 $\eta \sim \varepsilon_a$ 曲线图

从图 6 可以看出, 试样 $CURTC_{0.6}^{60}$ 、 $CURTC_{0.6}^{90}$ 、 $CURTC_{0.6}^{120}$ 、 $CURTC_{0.6}^{180}$ 的归一化剪切刚度呈递减变化趋势, 即总体剪切刚度随着体积应力水平而有所减小。 $CUCTC_{0.6}^{120}$ 与 $CURTC_{0.6}^{60}$ 、 $CURTC_{0.6}^{90}$ 、 $CURTC_{0.6}^{120}$ 相比, 其归一化剪切刚度又相对较大。

图 7 为 m 值取 0.8 时的归一化曲线, 减压试验条件下各组试验曲线基本接近。表明该项试验可以很好地用应力水平的幂次关系进行归一化拟合。同时, 幂指数 m 值也与上海市基坑工程技术标准(DJ/TJ 08-61-2018)中对上海地区典型土层 HSS 模型对与模量应力水平相关的幂指数 m 建议值相一致。

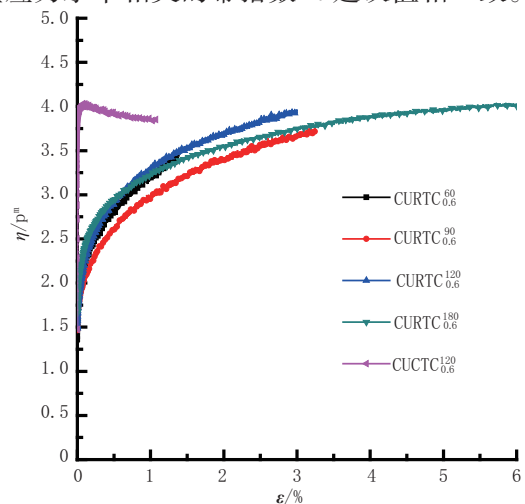


图 7 $\eta/p^m \sim \varepsilon_a$ 曲线图

4 结 论

通过试验成果分析与对比, 可得出如下结论:

(1) 在不同围压条件下, 侧向卸荷三轴试验有效应力路径变化规律上基本一致, 呈倒“L”形, 而常规

三轴压缩试验有效应力路径则呈“S”形。试验初期有效体积应力 p' 略有增加,但后期增加更明显。

(2)侧向卸荷三轴试验负孔压数值随试验围压的减小而单调增加,其最终负孔压与土体围压大小呈正相关,有效体积应力 p' 一开始降低,在应变达到拐点又逐渐增大;常规三轴压缩试验的孔压从一开始就表现正增长,达峰值强度后有小幅降低,其有效体积应力 p' 前期稍有增加后再减小,到第二拐点后明显增加。

(3)侧向卸荷三轴试验应力应变关系表现为明显的非线性,并呈硬化型特征,与非线性与常规三轴压缩试验有很多相似之处,但破坏时应变值明显较常规压缩试验偏低,从峰值强度来看,三轴侧向卸荷试验的峰值强度都随体积应力的增加而提高。

(4)三轴侧向卸荷条件下的归一化刚度曲线显示土体模量与应力水平呈一定幂次关系,幂指数 m 值与上海市基坑工程技术标准 (DJ/TJ 08-61—2018)

建议值基本一致。

参考文献:

[1] Lambe T W. Stress path method[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1967, 93 (SM6) : 309-331.

[2] LADE P V, DUNCAN J M. Stress-path dependent behavior of cohesionless soil [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, 102(GT1): 42-48.

[3] 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.

[4] 曾玲玲,陈晓平. 软土在不同应力路径下的力学特性分析[J]. 岩土力学,2009,30(5):1264-1270.

[5] 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.

[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.

[7] CHARLES W W NG. Stress paths in relation to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(5): 357-363.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smcdi.com