

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.10.042

# 不同应力路径下黏性土的力学特性研究

丁国洪

(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:**对上海地区⑤<sub>1</sub>层软黏土进行了常规三轴、减压三轴试验,以研究考虑不同应力路径的力学特性。分析了初始固结状态对软黏土应力路径的影响,比较了不同应力路径下土体的应力-应变关系特征和孔隙水压力变化规律,计算了土体抗剪强度指标。研究表明,应力路径对土的峰值强度、孔压、有效应力路径等特性影响很大,软黏土的应力-应变关系具明显的非线性,且基本呈应变硬化型;常规三轴试验中孔隙水压力为正值,减压三轴试验中总体为负值;初始固结状态对黏土的抗剪强度有一定的影响,且影响主要来自对黏聚力值上,对内摩擦角值影响较小。

**关键词:**三轴固结不排水试验;应力路径; $K_0$ 固结;力学特性

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)10-0150-04

## 0 引言

Lambe<sup>[1]</sup>于1967年提出了应力路径概念,在土性分析中考虑应力路径的影响。早期的研究对象多集中于无黏性土(Lade和Duncan)<sup>[2-3]</sup>,成果证明砂土的应力-应变状态与应力路径有关。曾国熙等<sup>[4]</sup>的研究指出,软黏土的应力-应变关系不但具有非线性特点,正常固结饱和黏土的应力-应变曲线可以按双曲线拟合,而且受应力路径的影响。

在基坑开挖过程中,周围土体应力场在卸载工况下,不同部位的应力路径不同,其力学行为也不相同的。对于卸荷条件下软土特性的研究,曾玲玲等<sup>[5-6]</sup>通过固结不排水剪切试验考虑不同应力路径对南沙软土在不同固结条件下的力学特性进行了研究。CHARLES<sup>[7]</sup>对基坑开挖中的应力路径进行分析,刘国彬<sup>[8]</sup>研究了上海软土的卸荷模量。上述研究成果从不同角度揭示了应力路径对黏性土力学特性的影响,但由于软黏土具有明显的沉积特点,对于具有明显区域性特点的土体,探讨应力路径对软黏土特性的影响还有很多工作要做。

依托上海苏州河深隧工程,选取有代表性海相沉积的黏性土进行研究,采用应变控制式三轴仪和GDS应力路径三轴仪考虑不同固结条件和应力路径进行三轴固结不排水剪试验,探讨了固结状态和应力路径对软土的应力-应变特性、孔压特性和强度特性的影响,以期通过试验成果的积累,为工程应用提供基础依据。

收稿日期: 2020-05-26

作者简介: 丁国洪(1973—),男,硕士,高级工程师,从事岩土工程勘察设计工作。

## 1 试验方案

### 1.1 试样制备

试样为第⑤<sub>1</sub>层灰色黏土,取自地表下25 m。通过室内常规物理试验测得指标平均值:含水率为37.8%,比重为2.74,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。

### 1.2 应力路径

多数基坑开挖可近似视为平面应变问题,可将基坑影响区域划分成3个部分:侧向卸荷区、竖向卸荷区和过渡区。随着基坑的开挖,侧向卸荷区水平向应力减小,竖向应力基本保持不变;竖向卸荷区上覆压力逐渐减小,竖向应力减小;过渡区土单元体水平及垂直方向应力都发生了变化,主应力方向发生了转动。对基坑变形影响的显著区域是侧向卸荷区、竖向卸荷区。

试验设计的应力路径见图1,固结过程分别采用应力比( $K=\sigma_3/\sigma_1$ )为1.0的等向固结和应力比为0.6的非等向固结两种应力路径(OA、OD);剪切过程分别采用常规三轴压缩应力路径(AB、DE)与减压三轴压缩应力路径(AC、DF)。

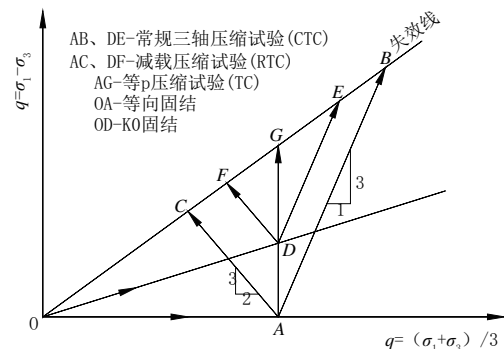


图1  $p$ - $q$  空间应力路径

### 1.3 试验方案

先进行试样饱和, 根据孔压变化值计算孔压系数  $B$ , 当  $B$  值达 0.98 以上即视土样为饱和。

#### (1) 固结方案

应变控制三轴仪围压  $\sigma_3$  分别为 100、200、300 kPa; GDS 应力路径三轴仪固结过程分别采用等压固结和偏压固结两种方式, 考虑到地区经验, 静止侧压力系数  $K_0$  取 0.6, 侧向固结压力终值分别为 100、200、300 kPa。

#### (2) 剪切方案

常规三轴应力路径应变控制的剪切过程采用  $\Delta s=0.05$  mm/min 的剪切速率; 减压三轴应力路径应力控制的剪切过程分别采用模拟开挖过程侧向卸荷的减  $p$  路径, 卸荷速率  $\Delta q=0.25$  kPa/min, 为保证土样的饱和, 试验过程中均施加了反压(见表 1)。

表 1 试验剪切方案

试验编号	固结方式		剪切方式			
	固结方式	围压 $\sigma_3$ /kPa	应力比 $K$	应力路径	控制方式	剪切速率
CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>100</sup>	等压固结	100	1.0	$\Delta\sigma_3 < 0$ $\Delta\sigma_1 = 0$	应力	0.25 kPa/min
CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>		200	1.0			
CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>300</sup>		300	1.0			
CURTC <sub>0.6</sub> <sup>100</sup>	$K_0$ 固结	100	0.6			
CURTC <sub>0.6</sub> <sup>200</sup>		200	0.6			
CURTC <sub>0.6</sub> <sup>300</sup>		300	0.6			
CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>100</sup>	等压固结	100	1.0	$\Delta\sigma_3 = 0$ $\Delta\sigma_1 = 0$	应变	轴向变形 0.05 mm/min
CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>		200				
CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>300</sup>		300				

注: CU 表示固结不排水试验; CTC 表示常规三轴试验; RTC 表示减压三轴试验; 右上标为围压  $\sigma_3$ ; 右下标为固结应力比  $K=\sigma_3/\sigma_1$ 。

## 2 试验结果及分析

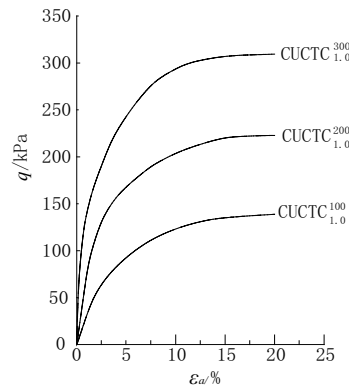
### 2.1 不同应力路径下应力 - 应变关系

不同应力路径下土体应力 - 应变规律见图 2。

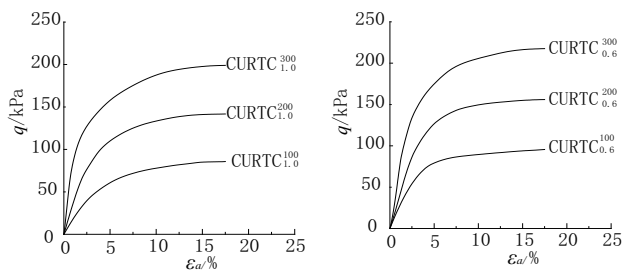
图 2 结果表明, 软黏土在不同应力路径下的力学性状是不同的。

(1) 不同应力路径所获得的剪应力峰值随固结压力依次递增, 且当固结压力增加时, 递增幅度亦有所加大。

(2) 常规三轴试验(CUCTC)表明其应力 - 应变关系具明显的非线性, 且基本呈应变硬化型, 试验后期表现出微弱的应变软化。减压三轴试验(CURTC)得到的应力 - 应变关系同样具明显的非



(a) 常规三轴



(b) 减压三轴(左  $K_0=1.0$ , 右  $K_0=0.6$ )

图 2 不同应力路径下应力 - 应变曲线

线性, 呈应变硬化型。

(3) 在同一剪应力下, 常规三轴试验的剪应变略大于减压三轴试验。

(4) 减压三轴试验峰值小于常规三轴试验的剪应力峰值, 幅度约在 60% ~ 70% 之间; 减压三轴试验中, 等压固结后的剪应力峰值略小于  $K_0$  固结, 幅度约在 10% ~ 20% 之间。

### 2.2 不同应力路径下孔压 - 应变关系

不同固结条件和不同应力路径下孔压 - 应变关系见图 3。

由图 3 可见, 不同的固结状态和固结压力, 孔压表现性状表现明显不同。

(1) 常规三轴试验中孔隙水压力在加载初期会迅速上升, 其后基本保持一段稳定, 试验后期略有下降, 试验产生正超静孔隙水压力, 孔隙水压力随固结围压增加而增加, 表明剪切过程中土体呈现剪缩特性。

(2) 减压三轴试验中孔隙水压力随固结围压增加而增加。但不同固结状态, 孔压表现不同, 等向固结试样中观察到的孔压均为负值;  $K_0$  固结试样中在剪切初期孔压表现为正值, 其大小随固结围压的增大而减小, 当变形超过 2% 之后孔隙水压力均为负值; 对于减压路径下孔压为负的原因是侧向压应力减小降低了土体的侧向约束, 造成了侧向弹性膨胀和剪切引起的塑性变形的综合反映, 表明土在剪切过程中呈现剪胀特性。

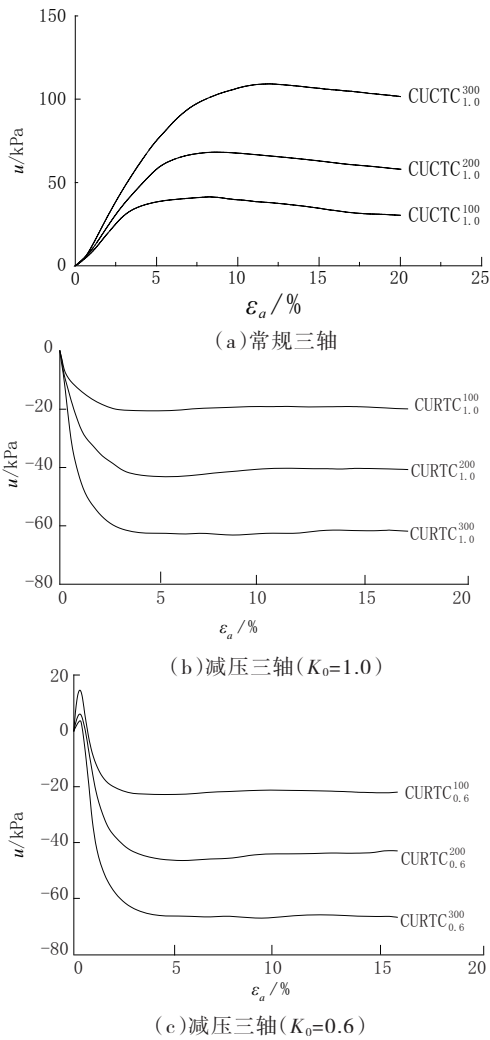


图3 不同应力路径下孔压一应变曲线

### 2.3 总应力路径与有效应力路径

图4为不同固结条件下总应力路径与有效应力路径在p-q坐标系中的关系。

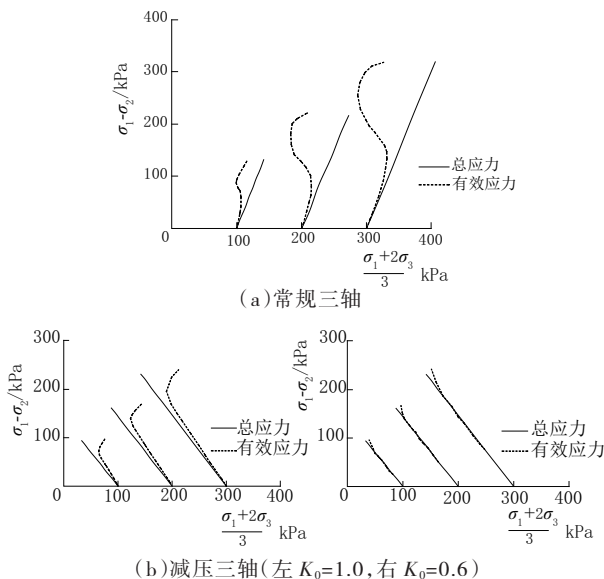


图4 不同应力路径下应力路径

结果表明,不同工况下应力路径性状不同。

(1)常规三轴试验路径下,随固结围压 $\sigma_3$ 的增大,土的峰值强度随之提高,但不同围压下的有效应力路径形态都呈S形,具有明显相似性;即在土体屈服前,有效应力路径随着偏应力的增大与总应力路径差值增加,变化规律接近线性;而在土样屈服后有效应力路径发生偏转并呈非线性,反映了土的剪胀特性,试验后期孔压下降也反映了这一现象。

(2)减压路径下有效应力路径变化与固结状态有关,相同固结条件下有效应力路径形态具有相似性。等压固结时,土样在弹性变形阶段有效应力路径与总应力路径基本重合;土样屈服后由于孔压下降至负值,造成有效应力路径偏转到总应力路径右边。 $K_0$ 固结时,有效应力路径与总应力路径基本重合,仅在尾部略有偏离现象。此外,无论是等向固结还是非等向固结试样,其峰值强度都随固结围压的增加而提高,但 $K_0$ 固结试样的峰值强度要略大于等向固结试样的强度。

(3)结果表明,土样在所设定的不同总应力路径下进行固结不排水剪切试验时,同一固结条件下有效应力路径一致,无论是等压固结还是偏压固结都服从这一规律。

### 2.4 不同应力路径下的强度特征

图5为不同试验路径下土体的总应力包线和有效应力包线。

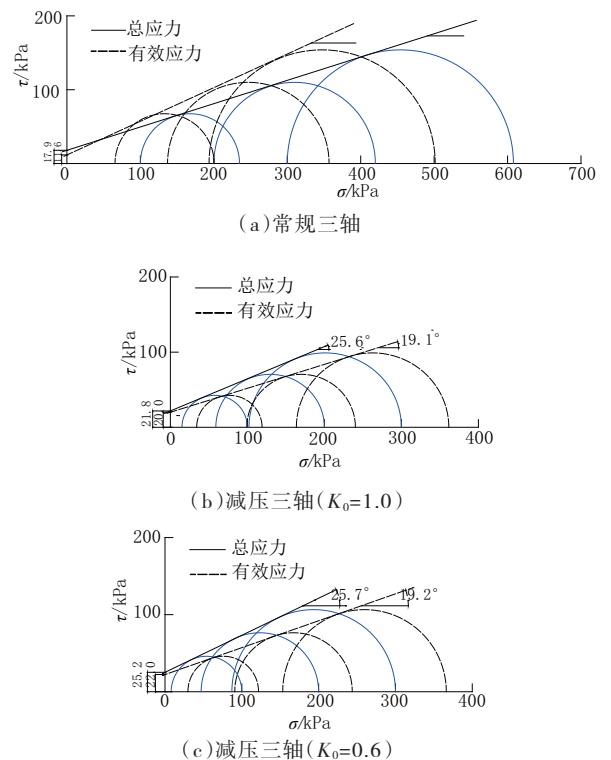


图5 不同应力路径下剪切强度包线

结果显示,不同应力路径下,土体的强度指标  $c$  值和  $\varphi$  值不尽相同(见表2)。

表2 不同应力路径下抗剪强度指标

试验类型	应力路径	总应力强度		有效应力强度	
		$C/kPa$	$\varphi/(^\circ)$	$C'/kPa$	$\varphi'/(^\circ)$
CUCTC	常规三轴	17.9	17.5	11.6	24.5
	等压固结	21.8	25.6	20.0	19.1
CURTC	$K_0$ 固结	25.2	25.7	22.0	19.2

(1)减压路径下得到的  $C$  (含  $C'$ )  $\varphi$  值均大于常规三轴路径所得的值,而  $\varphi'$  值小于常规三轴路径得到的  $\varphi'$  值。

(2)在减压路径下,两种固结方式下,  $\varphi$  值与  $\varphi'$  值均比较接近,而  $K_0$  固结下  $c$  值、 $c'$  值较等压固结路径稍大。这说明黏土的结构性对其力学强度特性影响大,  $K_0$  固结不同于等压固结,前者使得土体的颗粒排列更加稳定,结构性增强,即初始固结状态对黏土的抗剪强度有一定的影响,且影响主要来自对粘聚力值上,对内摩擦角值影响较小。

### 3 结论

通过一系列室内对比试验,从试验成果可以对所研究的软土得到下述认识:

(1)在不同应力路径下,软粘土的应力—应变关系具明显的非线性,且基本呈应变硬化型。不同应力路径所获得的剪应力峰值均随固结压力依次递增,但减压三轴试验小于常规三轴试验,幅度约在 60% ~ 70% 之间;减压三轴试验中,等压固结后的剪应力峰值略小于  $K_0$  固结,幅度约在 10% ~ 20% 之间。

(2)孔隙水压力随固结围压增加而增加。常规三轴试验中孔隙水压力在加载初期会迅速上升,其后基本保持一段稳定,试验后期略有下降,试验产生正超静孔隙水压力,表明土体呈现剪缩特性。减压三轴试验中,等向固结下孔压均为负值;  $K_0$  固结下孔压初始表现为正值,表明土在剪切过程中

存在剪胀特性。

(3)常规三轴试验路径下,随固结围压  $\sigma_3$  的增大,土的峰值强度随之提高,但不同围压下的有效应力路径形态均呈 S 形,且具有明显相似性;在土体屈服前,有效应力路径随着偏应力的增大与总应力路径差值增加,变化规律接近线性;而土样屈服后有效应力路径发生偏转并呈非线性,反映了土的剪胀特性。减压路径下相同固结条件的有效应力路径形态具有相似性,等压固结时土样在弹性变形阶段有效应力路径与总应力路径基本重合;土样屈服后由于孔压下降至负值,造成有效应力路径偏转到总应力路径右边。  $K_0$  固结时,有效应力路径与总应力路径基本重合,仅在尾部略有偏离现象。

(4)减压路径下得到的  $C$  (含  $C'$ )  $\varphi$  值均大于常规三轴路径所得的值,而  $\varphi'$  值小于常规三轴路径得到的  $\varphi'$  值。在减压路径下,两种固结方式下  $\varphi$  值与  $\varphi'$  值均比较接近,而  $K_0$  固结下  $c$  值、 $c'$  值较等压固结路径稍大,这说明黏土的结构性对其力学强度特性影响大。

#### 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] 孙岳裕,李广信.不同应力路径对砂土应力—应变关系的影响[J].岩土工程学报,1987,9(6):78-87.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] CHARLES W W N.Stress paths in relation to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1999,125(5):357-363.
- [8] 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.

## 《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

电话:021-55008118 传真:021-55008850 投稿及联系邮箱:cdq@smedi.com