

文章编号:1006-2467(2021)04-0372-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.296

# 三轴仪 $K_0$ 系数测量与应力路径试验功能的研发

潘 上, 刘谨豪, 张 琪, 叶冠林

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

**摘 要:** 上海交通大学自行研制组装的高精度小应变新型三轴仪(以下均简称为新三轴仪)采用了内置轴压三轴室,集成了程序自动控制的应力、应变式加载功能以及线性差动变压器(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)测量小应变功能. 本文在此基础上进一步进行拓展,使其具备了测量土样  $K_0$  系数和沿  $q$ - $p$  ( $q$  为偏应力,  $p$  为平均主应力)应力空间任意方向进行应力路径剪切试验的功能. 首先简要介绍三轴仪的研发历史,然后对  $K_0$  系数测量和应力路径试验两大新功能的控制程序算法进行详细说明,接着对上海深部软土进行  $K_0$  系数测量与应力路径试验并对结果进行简要分析,对新功能的可靠性进行了验证. 所研发新三轴仪的经验可为土工仪器设备的研发提供参考.

**关键词:** 三轴仪; 静止土压力系数( $K_0$ ); 应力路径试验; 上海深部土

**中图分类号:** TU 43

**文献标志码:** A

## Development of $K_0$ Coefficient Measurement and Stress Path Test Function of Triaxial Apparatus

PAN Shang, LIU Jinhao, ZHANG Qi, YE Guanlin

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The high accuracy small strain triaxial apparatus (hereinafter inferred to as the new triaxial apparatus) developed and assembled by Shanghai Jiao Tong University adopts a built-in pressure chamber by integrating the stress and strain loading function automatically controlled by the program and the linear variable differential transformer (LVDT) function of measuring small strain. In this paper, the new triaxial apparatus is further expanded. Now it has the function of measuring  $K_0$  coefficient of undisturbed soil sample and performing stress path loading along any direction of  $q$ - $p$  ( $q$  is the deviatoric stress and  $p$  is the average principal stress) stress space. First, the development history of the new triaxial apparatus is briefly introduced and the control program algorithm of  $K_0$  coefficient measurement and stress path test for the two new functions are described in detail. Then, the  $K_0$  coefficient measurement and stress path test for deep soft clay in Shanghai are conducted, and the results are analyzed to verify the reliability of the new functions. The experience of the new triaxial apparatus can provide reference for the development of geotechnical instruments.

**Key words:** triaxial apparatus; coefficient of earth pressure at rest ( $K_0$ ); stress path test; Shanghai deep clay

收稿日期: 2019-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(41727802, 41630633)资助项目

作者简介: 潘 上(1993-), 男, 江西省赣州市人, 硕士生, 主要从事黏土力学特性以及隧道工程相关研究.

通信作者: 叶冠林, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 17321257957; E-mail: ygl@sjtu.edu.cn.

土工试验是对岩土工程领域理论进行探索与验证的重要手段,而精准的试验数据的获取需要可靠仪器设备的支撑。目前,国内的土工试验仪器尤其是大型仪器如真三轴仪、空心圆柱扭剪仪及离心机中的许多核心零部件都基本依赖从国外进口。近年来,在高校、科研院所和企业的努力下,我国土工试验仪器的自研能力有了一定的提高。对既有仪器设备进行改造、开发,实现新功能的扩充和老功能的精准化改进,既是对资源的最大化利用,节约了大量经费,又有助于国内科研人员掌握核心研发技术,降低进口依赖程度。

静止土压力系数  $K_0$  的定义是无侧向变形条件下水平有效应力与竖向有效应力的比值<sup>[1]</sup>,它是岩土工程领域的一个基本参数,确定了土体的  $K_0$  就可以找到土体的原位初始应力状态,土体的初始应力状态直接影响边坡、基坑稳定性的计算,也是进行有限元模拟计算所必须的参数。另外,  $K_0$  还对地铁等地下工程的设计和桩基工程中开挖卸载工况下桩基的承载力有很大影响<sup>[2]</sup>,因此测定土体的  $K_0$  系数有着十分重要的工程意义。  $K_0$  获取一般可通过3种方法:①借助专门的  $K_0$  固结仪,如 Abdelhamid 等<sup>[3]</sup> 研制的大直径固结仪适用于软黏土的  $K_0$  系数测定。杨熙章等<sup>[4]</sup> 研制的  $K_0$  系数自动测试仪适用于砂土、黏土或人工制备土样。②借助三轴仪,不断给试样施加轴压,同时通过增大围压来限制侧向变形,保持试样的直径不变,此过程试样的有效围压  $\sigma'_r$  与有效轴压  $\sigma'_a$  的比值会逐渐趋于稳定,以该稳定值作为正常固结土的  $K_0$  系数(以  $K_{0NC}$  表示),若要获得超固结土的  $K_0$  值(以  $K_{0OC}$  表示),可以在上述过程轴压施加完毕后进行卸载,使土样进入超固结状态,逐步减小轴压,同时也减小围压以保持试样直径不变,卸载过程的超固结系数 OCR 可以实时计算,这样便得到  $K_{0OC}$ -OCR 关系,再由土体的实际 OCR 值便可找出相应的  $K_{0OC}$  值。③通过经验公式对其进行估算<sup>[5]</sup>:

$$K_{0NC} = 1 - \sin \varphi' \quad (1)$$

式中:  $\varphi'$  为土的有效内摩擦角。该式适用于正常固结土。Schmidt<sup>[6]</sup> 提出的超固结土  $K_0$  经验公式为

$$K_{0OC} = K_{0NC} (\text{OCR})^m \quad (2)$$

式中:  $m$  为系数。  $K_{0NC}$  可由式(1)计算得到。该式提出后关于  $m$  的取值存在不同看法,研究人员通常会根据他们所用土样实测  $K_0$  值对  $m$  进行不同的取值表达,较为著名的有 Mayne 等<sup>[1]</sup> 提出的公式:

$$K_{0OC} = K_{0NC} (\text{OCR})^{\sin \varphi'} \quad (3)$$

Watabe 等<sup>[7]</sup> 对世界范围内的典型海相黏土做

了大量  $K_0$  固结试验并与土体现场实测  $K_0$  值进行对比,发现经验公式(1)的计算结果与实测值较为接近,提出  $\varphi'$  若是通过临界应力比  $(q/p)_{\max}$  确定,式(1)计算得到  $K_0$  值相比于实测值平均偏低 0.05,依此对其进行了修正。

综合比较上述3种方法,借助三轴仪对  $K_0$  进行测定有其特定的优势,测量结果相比于专门的  $K_0$  固结仪测量结果更加准确,更接近经验值,并且可以在  $K_0$  阶段结束后继续对试样进行三轴压缩或拉伸试验,得到一个完整剪切过程,研究内容和数据量的获取更加丰富。它的缺点是操作更加复杂,耗时较长。

应力路径试验的应用也十分广泛。土体在开挖、堆载等各种工况下都会经历特定的应力路径,通过室内试验为土样构造出所需应力路径的过程中,土样体现的力学特性可以为实际工程提供重要的参考,并且应力路径试验也是对土体的变形和屈服特性等本构特性进行研究的重要手段。常规三轴试验可以认为是应力路径试验的一种,常规三轴试验在剪切阶段围压保持恒定,而用新三轴仪进行应力路径试验时,试验人员通过在控制程序中设定一条  $q$ - $p$  空间中任意方向的直线应力路径,电动调压阀就会自动调整围压与轴压的大小,使得试验沿设定的路径剪切,该过程中围压值可以不断变化。目前较常见的应力路径试验仪器是英国 GDS 公司生产的 GDS 三轴仪,它的特点是自动化、精度较高,但是造价高且操作软件不开源,不便于仪器的二次开发。

本研究在上海交通大学新三轴仪<sup>[8]</sup>的基础上,充分利用现有硬件资源,编写了新的控制程序算法并对其进行详细介绍,实现了  $K_0$  的测定以及应力路径试验两大新功能并对其进行验证。新三轴仪已经成为一台多功能、高性能、可玩性强的精准土工试验设备。

## 1 上海交通大学新三轴仪研发历史

上海交通大学岩土工程科研团队对土工试验设备的自主拓展和研发始于2009年对一台常规三轴仪(1989年购)进行的自动化改造,成功将原本的手动剪切系统改造为简单可靠的自动空气压力控制系统,又于2012年对其测量和数据采集系统进行了精准化升级。基于以上经验及对世界范围内先进土工试验设备的发展情况的调研,上海交通大学科研人员结合自身研究需求开始了对土工试验设备的自主研发及改造工作,新三轴仪是其中的突出成果。

新三轴仪硬件部分各个模块均是自主采购的,

保证了精度的同时还注重了经济性,再由研究人员自行搭建,并编写了控制程序,实现了压力和测量功能的自动化.从设计上,新三轴仪相对于旧三轴仪有了很大的进步,采用的是更大空间的三轴室,轴力传感器可以内置在其中,并且采用的是空气轴承,大大减小了摩擦力,提高了试验精度.它的两大核心系统是测量系统和加荷系统,通过自主编写的控制程序实现了测量和加载的自动化、精准化.武朝军<sup>[8]</sup>总结了影响常规三轴仪测量精度的缺陷并针对这些缺陷逐一进行了改进,如采用霍尔效应传感器或制作自平衡试样帽子在轴压传感器与试样帽之间增设传感

器导杆等,大大提升了测量精度.陈超斌等<sup>[9]</sup>进一步为新三轴仪安装了精度更高的 LVDT 传感器,用于测量局部位移,并且采用了中值滤波法减小数据波动,使得新三轴仪能够成功测量土体在  $0.001\% \sim 0.1\%$  小应变范围内的割线模量变化情况.杨同帅等<sup>[10]</sup>利用新三轴仪对上海软土进行了小应变三轴试验,揭示了上海软土的非线性特性以及土体剪切模量衰减规律.本文对其进行了进一步拓展,新增了  $K_0$  系数测量和应力路径试验功能,实现该两大功能的控制程序算法是本研究的主要内容,将在第 2 节进行详细介绍.目前新三轴仪的结构如图 1 所示.

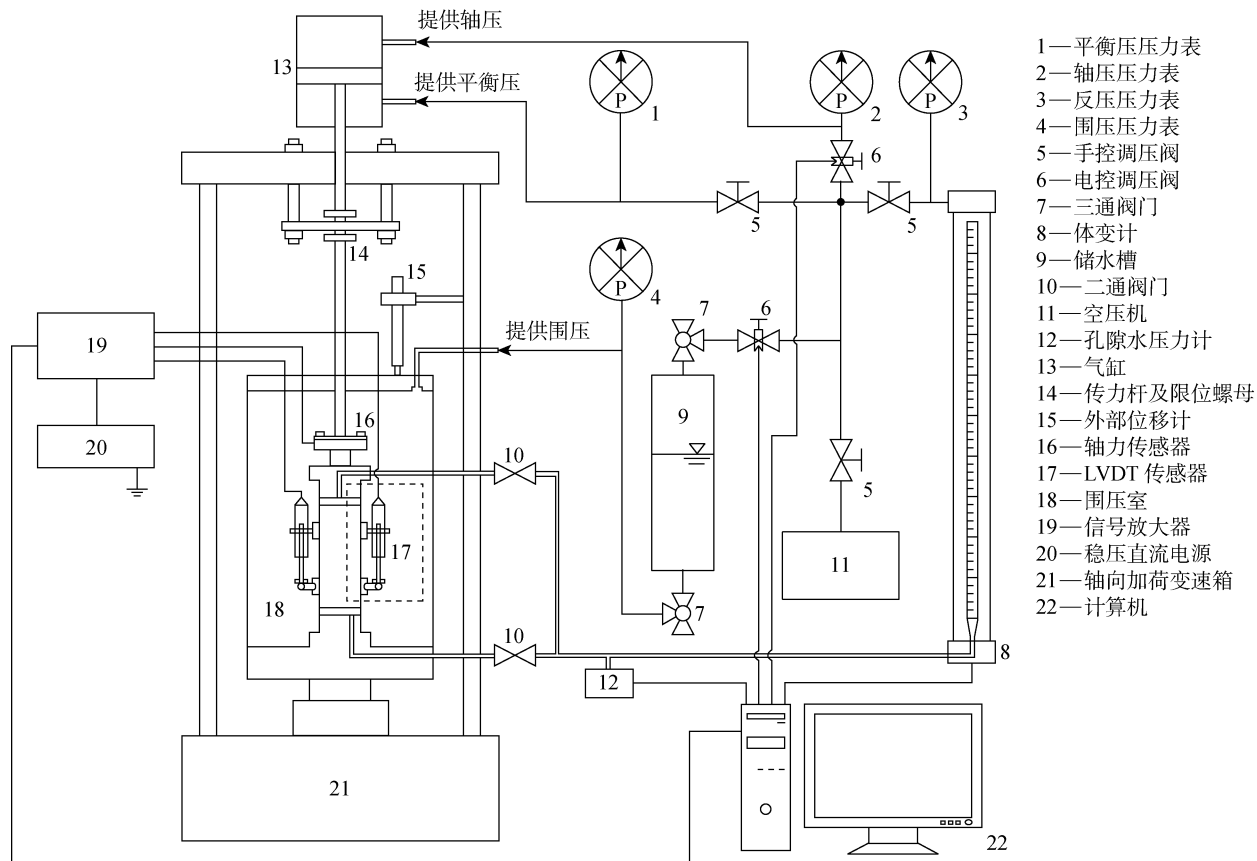


图 1 新三轴仪结构示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Structure diagram of new triaxial apparatus<sup>[9]</sup>

## 2 新增功能的控制程序算法

新三轴仪的加荷系统由以下 3 大子系统组成:

(1) 轴压施加子系统. 对试样施加轴压有两种方式:一是将顶部气缸固定,三轴室在底部变速箱的带动下每分钟以恒定高度抬升或下降,使试样轴向应变匀速增大,实现应变控制式加载;二是底部变速箱不开启,三轴室与底座静止不动,顶部气缸在程序控制下对试样进行压缩或拉伸,使试样轴向应力匀速或以其他规律变化,实现应力控制式加载.

(2) 围压施加子系统. 试验过程中三轴室腔体注满了水,电控调压阀按照程序的设定将围压自动施加在液面上,从而把气压转换为作用在试样上的液压.与常规三轴试验的围压保持恒定不同, $K_0$  系数测量和应力路径试验两大新功能实现的核心就是对围压大小进行自动控制.

(3) 反压施加子系统. 反压大小通过手动阀门调节,剪切过程中一般不改变它的值.

新功能的控制程序算法是围绕轴压施加和围压施加两个子系统进行编写的.

2.1  $K_0$  系数测量算法

利用新三轴进行  $K_0$  系数的测量,就是对土样施加逐渐增大的轴压,同时通过增大围压来限制侧向变形,保持试样的直径不变,此过程试样有效径向应力  $\sigma'_r$  与有效轴向应力  $\sigma'_a$  的比值会逐渐趋于稳定,该稳定值就是试验土样的  $K_0$  系数值. 具体实现方式如图 2 所示. 图中: $\sigma_a$  为轴向应力, $\sigma_r$  为径向应力, $\epsilon_r$  为径向应变.

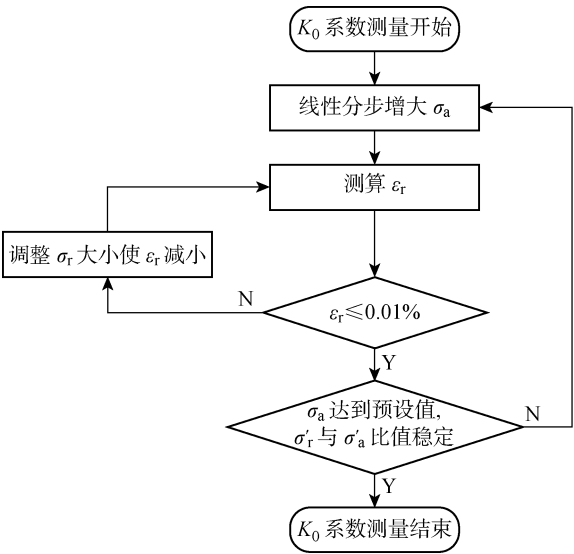


图 2  $K_0$  系数测量功能算法

Fig. 2 Algorithm of  $K_0$  coefficient measurement function

2.2 应力路径试验算法

常规三轴试验中偏应力  $q$  通常表示为

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \tag{4}$$

在三轴压缩的情况下由于  $\sigma_1 = \sigma_a, \sigma_3 = \sigma_2 = \sigma_r$  ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为第 1、第 2、第 3 主应力),上式变为

$$q = \sigma_a - \sigma_r \tag{5}$$

在三轴拉伸的情况下,由于  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r, \sigma_3 = \sigma_a$ ,上式变为

$$q = \sigma_r - \sigma_a = -(\sigma_a - \sigma_r) \tag{6}$$

可见,若沿用弹性力学中  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  的规定, $q$  必定是不小于 0 的值,这会导致在  $q-p$  应力空间中不能区分拉伸和压缩. 故本文采用式(5)统一表示有效偏应力,当  $q$  值为正时,表示试验沿轴向是压缩的,其值为负时,表示试验沿轴向是拉伸的.

三轴试验平均主应力  $p$  的表达式为

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3} \tag{7}$$

将式(5)、(7)联立后,可反解出:

$$\sigma_a = p + \frac{2}{3}q \tag{8}$$

$$\sigma_r = p - \frac{1}{3}q \tag{9}$$

应力路径试验剪切阶段,首先控制程序会根据试样的应力状态定位出剪切起始点  $A(q_0, p_0)$ ,接着试验人员可以直接设定剪切终点  $B(q_0, p_0)$  或设定应力路径的斜率  $K = \Delta q / \Delta p$ ,这样就构造出了一条直线应力路径. 应力路径一旦设定,根据式(8)、(9)可求出从剪切起点到剪切终点所需的轴压增量和围压增量分别为

$$\Delta \sigma_a = \Delta p + \frac{2}{3} \Delta q \tag{10}$$

$$\Delta \sigma_r = \Delta p - \frac{1}{3} \Delta q \tag{11}$$

应力路径试验剪切的过程实际就是将上述两个增量分步施加到试样上的过程,增量的施加分为应力控制和应变控制两种方式. 应力控制式加载是将  $\Delta \sigma_a$  及  $\Delta \sigma_r$  各自分成微小的增量,并由程序控制调压阀在每个荷载步同时将上述增量施加在试样上. 应变控制式加载则是借助匀速上抬(或下降)的电机对试样进行轴向匀速压缩(或拉伸),同时轴力传感器实时读取轴力值并计算出试样轴向应力的增量,进而根据设定的应力路径计算出所需的围压增量并施加到试样上. 具体算法如图 3 所示.

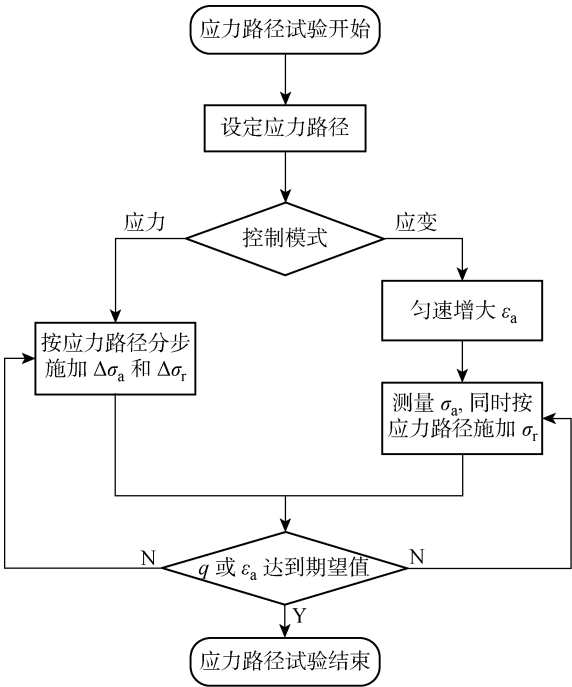


图 3 应力路径试验功能算法

Fig. 3 Algorithm of stress path test function

3 功能验证

下文通过对上海地区深部土进行相关试验,来

对新三轴两大新增功能进行验证,制作的试样尺寸高 80.0 mm,直径 39.1 mm.

3.1  $K_0$  系数测量验证

对取自上海某地下工程的两组原状土进行  $K_0$  系数测量试验,取土深度分别为 53 m 和 90 m,具体土层参数见表 1,测试结果如图 4 和 5 所示. 图中  $t$  为时间,  $\epsilon_a$  为轴向应变.

表 1  $K_0$  系数测量土样基本物理力学特性  
Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of soils used in  $K_0$  coefficient measurement

| 编号 | 深度/m | 天然含水率/% | 初始孔隙比 | 超固结比 | 临界应力比 |
|----|------|---------|-------|------|-------|
| 1# | 53   | 27.0    | 0.53  | 2.9  | 1.35  |
| 2# | 90   | 32.0    | 0.88  | 1.0  | 1.00  |

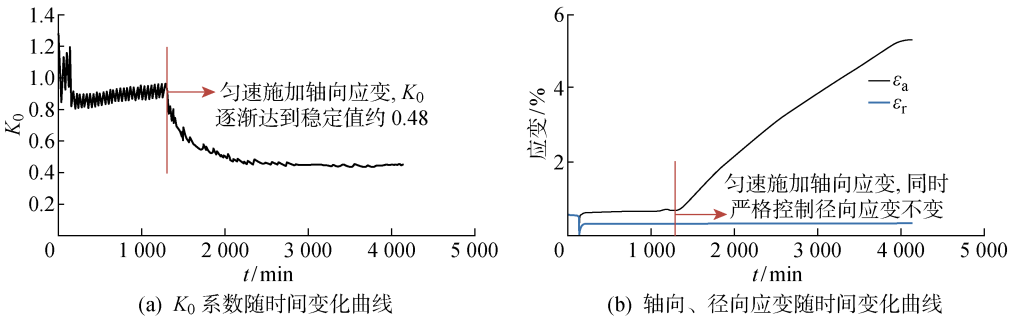


图 4 53 m 埋深土样  $K_0$  固结结果  
Fig. 4  $K_0$  consolidation results of sample at a depth of 53 m

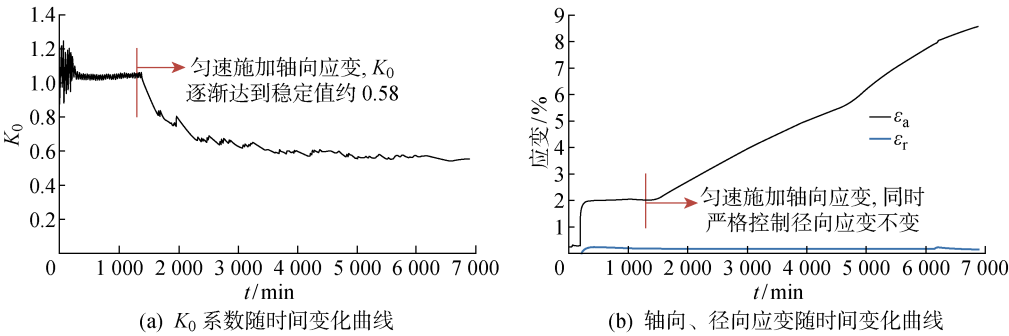


图 5 90 m 埋深土样  $K_0$  固结结果  
Fig. 5  $K_0$  consolidation results of sample at a depth of 90 m

1# 土样原埋深 53 m,固结试验得到其超固结比 OCR 约为 2.9,为超固结土;2# 土样原埋深 90 m,其 OCR 约为 1.0,为正常固结土. 剑桥模型的临界状态剪切应力比与有效内摩擦角的关系<sup>[11]</sup>为

$$M_t = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \tag{12}$$

进而可以反解出:

$$\varphi' = \arcsin\left(3 - \frac{18}{M_t + 6}\right) \tag{13}$$

对于 1# 超固结土样,将  $M_t = 1.35$  带入式 (13),即可求得  $\varphi' = 33.44^\circ$ ,将该值代入式 (1) 得到  $K_{0NC} = 0.45$ ,而新三轴仪测量得到的  $K_{0NC} = 0.48$ . 在得到 OCR、 $K_{0NC}$ 、 $\varphi'$  等值之后,便可由式 (3) 求出超固结土样的  $K_{0OC} = 0.79$ . 对于 2# 正常固结土样,先通过式 (13) 算出  $\varphi' = 25.38^\circ$ ,再由式 (1) 求得  $K_{0NC} = 0.57$ ,而新三轴仪测量得到  $K_{0NC} = 0.58$ .

得到土样  $K_0$  系数的新三轴仪测量值及经验公式计算值后,用 GDS 应力路径三轴仪分别对 1# 和 2# 土样进行测量,得到  $K_0$  系数分别为 0.53 和 0.60,将结果整理得到表 2.

表 2  $K_0$  系数测量结果  
Tab. 2 Results of  $K_0$  coefficient measurement

| 土样 | 新三轴仪测量值 | 经验公式(1)计算值 | GDS 测量值 |
|----|---------|------------|---------|
| 1# | 0.48    | 0.45       | 0.53    |
| 2# | 0.58    | 0.57       | 0.60    |

图 4、5 表明,新三轴仪使土样轴向应变增大的同时,能严格控制其径向应变不变,最终得到稳定的  $K_0$  值,在只加载不卸载的条件下该值实际为  $K_{0NC}$ . 若要获得  $K_{0OC}$  的值,只需在加载结束后减小轴压,同时减小围压以保持试样直径不变,便能得到一条

高出加载段的卸载  $K_0$  曲线,即为  $K_{0OC}$ 。由于有效第 1 主应力的最大值  $\sigma'_{1max}$  已知,卸载过程中任一点的 有效第 1 主应力  $\sigma'_1$  又可测得,因此卸载过程土样超 固结系数  $OCR=\sigma'_{1max}/\sigma'_1$  可以实时计算出来,这样就 得到  $K_{0OC}$ -OCR 关系曲线,进而可由土体的实际 OCR 值找出对应的  $K_{0OC}$ ,这是国内外广为采用的 三轴仪测量  $K_0$  系数方法。此外,新三轴仪测得的  $K_{0NC}$  值介于经验公式(1)计算值和 GDS 三轴仪测量 值两者之间,与经验公式计算值偏差分别为 6.7% (1# 土样)和 1.8%(2# 土样),与 GDS 三轴仪测量值 偏差分别为 9.4%(1# 土样)和 3.3%(2# 土样),较 为接近,因此,可以认为新三轴仪的  $K_0$  系数测量功 能是可靠且准确的。

3.2 应力路径试验

进行了 4 组固结排水(CD)应力路径剪切试验,

土样同为取自上海某地下工程的原状土,其塑性 指数如表 3 所示,取土深度分别为 41、53、103 及 103 m。

表 3  应力路径试验土样塑性指数

Tab. 3  Plasticity index of soils used in stress path test

| 深度    | 塑限/% | 液限/% | 塑性指数 | 黏粒含量/% |
|-------|------|------|------|--------|
| 41 m  | 21.3 | 36.9 | 15.6 | 8.0    |
| 53 m  | 18.9 | 32.6 | 13.7 | 7.6    |
| 103 m | 20.1 | 37.4 | 17.3 | 21.7   |

(1) 有效应力路径分析。土样的设定剪切应力 路径在  $q$ - $p$  空间中与  $p$  轴正向的夹角分别为  $-90^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $30^\circ$  及  $150^\circ$ ,用于对不同应力路径下的土体力学 特性做初步研究。均采用  $K_0$  固结,固结-剪切全过程 的有效应力路径如图 6 所示。

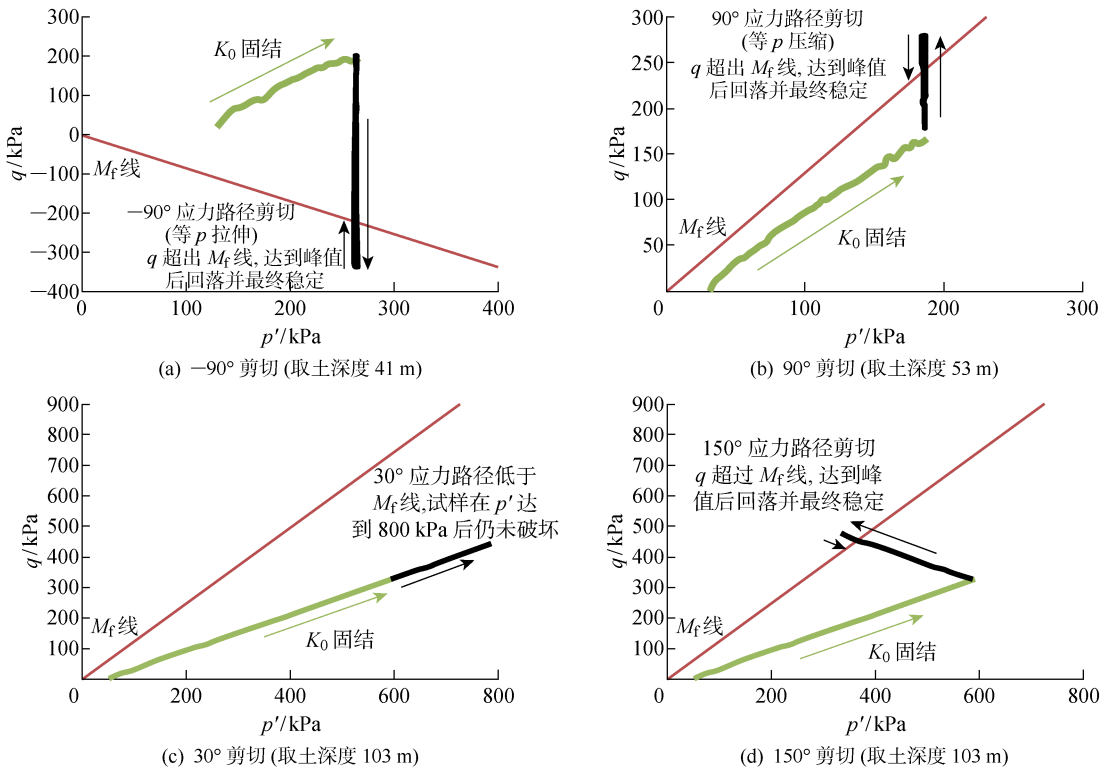


图 6 不同有效应力路径固结-剪切结果

Fig. 6 Consolidation-shear results of different effective stress paths

从图 6 可以看出,在  $K_0$  固结阶段结束后进行 剪切的过程中,新三轴均能很好地对土样按照设定 的应力路径进行剪切。其中,  $90^\circ$  应力路径下土样最 先破坏,其次是  $150^\circ$  应力路径下土样,接着是  $-90^\circ$  应力路径下土样,  $30^\circ$  应力路径处于  $M_f$  线下侧,土 样未发生破坏。考虑到以上几组试验土样是取自不 同深度的,为了弱化埋深对试验结果影响,突出应力 路径角度的影响,现将发生剪切破坏的  $-90^\circ$ 、 $90^\circ$  及

$150^\circ$  应力路径试验的偏应力  $q$  与  $\epsilon_a$  的关系曲线用 土样固结阶段的最大轴向应力<sup>[7]</sup>  $\sigma'_c (= \sigma'_{1max})$  进行归 一化处理,结果如图 7 所示。

可见,在上述 3 个应力路径角度下,土样均存在 应力峰值点,并且发生了不同程度的应变软化,其中  $-90^\circ$  条件下的应变软化现象尤其明显,不同应力 路径角度下土样体现了不同的力学特征,利用新三 轴仪可以进行进一步深入研究。

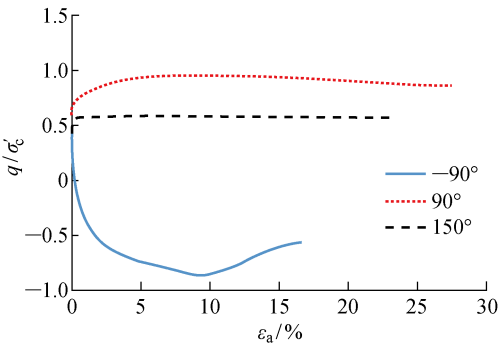


图 7 各应力路径方向条件下  $q/\sigma'_c$  与  $\epsilon_a$  关系  
Fig. 7  $q/\sigma'_c$  versus  $\epsilon_a$  in different stress path directions

(2) 屈服面分析. 对 103 m 埋深土样进行了  $150^\circ$  和  $30^\circ$  应力路径试验,  $q-\epsilon_a$  关系如图 8 所示, 由图 8 中标出的特征屈服点, 可以大致做出土样的相应屈服面, 如图 9 所示. 其中, 屈服点 1 为应变发展过程弹性段与塑性段的交点, 标志着土样进入塑性阶段; 屈服点 3 则为应力的峰值点, 标志着土样进入软化阶段; 屈服点 2 是通过对  $q-\epsilon_a$  关系曲线作垂线来得到的, 该点标志着土样的总应变有了较大发展, 将  $q-\epsilon_a$  曲线上屈服前后的直线段部分进行延伸得到交点, 过交点作  $q-\epsilon_a$  曲线垂线, 垂足即为屈服点 2<sup>[12]</sup>.

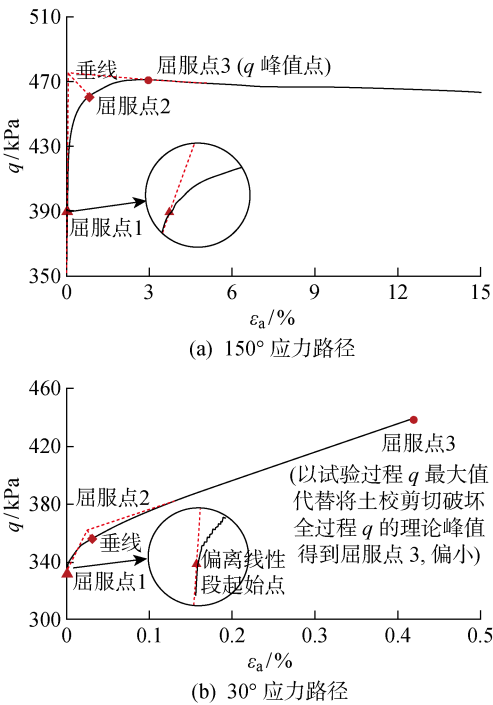


图 8  $q-\epsilon_a$  关系曲线及特征屈服点

Fig. 8  $q-\epsilon_a$  relationship curve and characteristic yield points

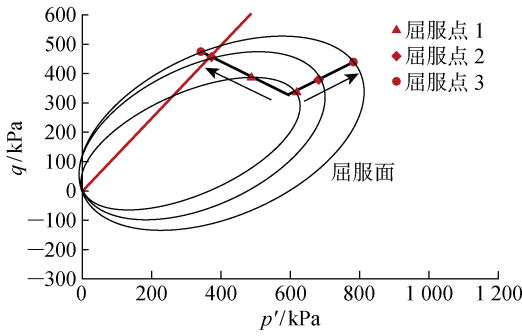


图 9 103 m 深度土样屈服面示意  
Fig. 9 Schematic diagram of soil yield surface (103 m depth)

结合图 8、9 可知, 借助新三轴仪开展不同角度条件下的应力路径试验可以得到一系列的土样屈服面, 由屈服点 1 的集合形成的屈服面反映的是土样弹性变形与塑性变形的界限, 由屈服点 3 的集合形成的屈服面反应的是土样开始发生应变软化的界限, 而由屈服点 2 的集合形成的屈服面反映的是土样总应变得到一定的发展时的界限. 本例中由于  $30^\circ$  应力路径试验直到加载结束也未能使土样破坏, 便以剪切终点也即是  $q$  的试验最大点代替理论峰值点, 根据  $q-\epsilon_a$  关系曲线走势可以推断该点相比峰值点是偏小的. 由此可以大致做出土样在不同阶段对应的屈服面示意图, 即上图 9. 若对同一埋深下的土样再补充进行其他不同方向的应力路径剪切试验, 便能得到更加真实详尽的屈服面, 利用新三轴仪可以对这一问题进行进一步深入研究.

## 4 结论

本文介绍了上海交通大学自主研发的高精度小应变三轴仪发展历程, 对  $K_0$  系数测量及应力路径试验两个新功能的算法进行了介绍, 并用上海深部土的试验结果验证了新功能的可靠性. 主要得出以下结论:

(1) 提出了测量  $K_0$  值的控制算法, 通过线性增大轴压, 同时调节围压来保持试样直径不变, 即可得到稳定的  $K_0$  值, 所得  $K_0$  值十分接近经验公式计算值以及 GDS 三轴仪测量值, 验证了本文方法的可靠性.

(2) 提出了应力路径的控制算法, 并对上海深部土进行的 4 组  $q-p$  空间中不同角度的应力路径试验, 使得试样始终按照设定的应力路径进行剪切, 验证了新三轴仪对试样应力状态具有精准的控制能力. 通过进行不同角度的应力路径试验, 得到屈服面

形状及其变化规律,对于土体本构模型的开发和验证具有重要意义.

(3) 本文经验可为土工试验设备的自主研发提供参考.新三轴仪作为一台高性能、多功能、可扩展性强的精准土工试验设备,可为众多的科研项目提供支撑.

参考文献:

[ 1 ] MAYNE P W, KULHAWY F H.  $K_0$ -OCR relationships in soil[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1982, 108(6): 851-872.

[ 2 ] 纠永志,黄茂松.超固结软黏土的静止土压力系数与不排水抗剪强度[J]. **岩土力学**, 2017, 38(4): 951-957.

JIU Yongzhi, HUANG Maosong. Coefficient of earth pressure at rest and undrained shear strength of overconsolidated soft clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 951-957.

[ 3 ] ABDELHAMID S, KRIZEK R J. At-rest lateral earth pressure of consolidation clay[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1976, 102(7): 721-738.

[ 4 ] 杨熙章,魏道埭.土的静止侧压力系数自动测试仪的研制[J]. **同济大学学报**, 1981, 9(3): 98-103.

YANG Xizhang, WEI Daoduo. Development of an automatized measuring apparatus for the at-rest earth pressure coefficient[J]. **Journal of Tongji University**, 1981, 9(3): 98-103.

[ 5 ] JAKY J. The coefficient of earth pressure at rest[J]. **Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers**, 1944, 10: 355-358.

[ 6 ] SCHMIDT B. Earth pressures at rest related to stress history[J]. **Canadian Geotechnical Journal**,

1966, 3(4): 239-242.

[ 7 ] WATABE Y, TANAKA M, TANAKA H, *et al.*  $K_0$ -consolidation in a triaxial cell and evaluation of in situ  $K_0$  for marine clays with various characteristics [J]. **Soils and Foundations**, 2003, 43(1): 1-20.

[ 8 ] 武朝军.上海浅部土层沉积环境及其物理力学性质[D].上海:上海交通大学,2016.

WU Chaojun. Depositional environment and geotechnical properties for the upper Shanghai clays [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.

[ 9 ] 陈超斌,叶冠林.基于 LVDT 的小应变三轴仪研制及其软土试验应用[J]. **岩土力学**, 2018, 39(6): 2304-2310.

CHEN Chaobin, YE Guanlin. Development of small-strain triaxial apparatus using LVDT sensors and its application to soft clay test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(6): 2304-2310.

[10] 杨同帅,叶冠林,顾琳琳.上海软土小应变三轴试验及本构模拟[J]. **岩土工程学报**, 2018, 40(10): 1930-1935.

YANG Tongshuai, YE Guanlin, GU Linlin. Small-strain triaxial tests and constitutive modeling of Shanghai soft clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(10): 1930-1935.

[11] 张锋.计算土力学[M].北京:人民交通出版社,2007.

ZHANG Feng. Computational soil mechanics [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[12] HUANG M S, LIU Y H, SHENG D C. Simulation of yielding and stress-stain behavior of Shanghai soft clay[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(3): 341-353.

(本文编辑:陈晓燕)