

# 应力方向效应对原状软黏土孔压特性试验研究

翁小波

浙江中水工程技术有限公司

**摘要:** 应力作为一个矢量,其基本特性包含应力的方向和大小,传统土力学理论主要关注应力的方向作用对土体应力应变及孔压的影响,而没有考虑应力方向效应的影响,本文采用空心圆柱扭剪仪对原状黏土开展了系列主应力方向纯旋转条件下的不排水试验,对应力方向效应引起的孔压变化规律进行了系统研究。试验结果表明,应力方向单纯旋转条件下黏土孔隙压力也会出现逐渐累积,同时中主应力系数和初始剪应力对孔隙压力的变化规律均有一定的影响。

**关键词:** 主应力轴旋转; 中主应力系数; 孔隙压力; 原状黏土

## 一、前言

饱和土体在荷载作用下,由土骨架和孔隙水共同承担,当所有的外部荷载都转由孔隙水来承担,则土体就会发生液化而破坏,即使对于黏土虽然不会液化破坏,但是孔压的累积也会使黏土的强度下降。基于土体的这一特性,太沙基提出了著名的有效应力原理,这一原理在土体强度和稳定分析中得到广泛应用。所以在岩土工程设计中准确计算土体中的孔隙水压力对设计至关重要。基于常规三轴试验结果,斯开普敦和亨克尔给出了孔压的计算公式,认为平均主应力或剪应力的变化是引起孔压变化的原因。但是这些公式是基于土体是各向同性材料假设得到的,不能考虑土体各向异性对孔压发展的影响。对砂土的不排水扭剪试验表明,即使在平均主应力和剪应力都保持不变仅主应力轴的旋转也会使土体产生孔压累积,而这正是由于土体各向异性引起的。沈瑞福等[1]对主应力轴循环旋转条件下砂土孔压的累积特性进行了研究。童朝霞等[2]研究了中主应力系数对主应力轴循环旋转条件下砂土孔压开展的影响。高彦斌等[3]提出了一个考虑土体各向异性的孔压公式,但是缺少相应的试验验证。聂影[4]对主应力轴循环旋转条件下原状黏土和重塑黏土的特性进行了研究,但试验时中主应力系数是不断变化的。传统的土体本构模型和孔压计算公式都不能很好的模拟这种复杂应力路径条件下土体的孔压特性。

目前关于主应力轴旋转条件下黏土孔压特性的研究还较少,此外对于主应力轴旋转条件下孔压的开展机理及影响因素的研究也较少。本文利用空心圆柱扭剪仪对杭州原状软黏土进行了系列不排水主应力轴纯旋转试验。研究主应力轴纯旋转条件下原状黏土孔压的开展特性,以及不同中主应力系数对孔压累积的影响。为进一步研究模拟土体孔压开展特性提供基础。

## 二、试验仪器和用土

### (一) 试验仪器介绍

本文所用的仪器为GDS空心圆柱扭剪仪,该仪器能通过电脑对空心试验施加独立控制的轴力、扭矩和内外围压,实现不同的设定应力路径。

### (二) 试验用土介绍

试验所用土样取自某一基坑工地,取土面位于地面以下约4m处的黏土层,在现场在木模板的保护下将黏土切成30cm\*30cm\*40cm的黏土块,所取得的土样较为均匀,常规土性试样测得的土体参数如表1所示。在实验室利用专用的切土工具将黏土块修剪成薄壁空心试样,试样的尺寸为100mm(外

径)\*60mm(内径)\*200mm(高)。

### (三) 试样的饱和与固结

试样本身基本处于饱和状态,待试样安装完成之后,对试样进行一段时间的反压饱和后,饱和系数都能达到0.97的水平。当试样饱和之后对试样进行150kPa有效应力下的等向固结,当试样每小时的排水量稳定小于100mm<sup>3</sup>时,认为试样完成固结。已有的研究结果表明等向固结完成后黏土仍然具有显著的各向异性。

## 三、试验方案设计

本文主要研究平均主应力和剪应力保持不变,主应力轴纯旋转条件下原状黏土孔压开展特性及其机理,以及中主应力系数和剪应力水平对孔压开展的影响。通过控制应力参数平均主应力p、剪应力q、中主应力系数b和大主应力方向角 $\alpha$ 来实现相应的应力路径。具体的试样方案参数设置参见表2。

试验应力路径分为3步完成,试样固结完成后,在保持 $p=150$  kPa,  $\alpha=0$ ,  $q=2.5$  kPa条件下调节中主应力系数b到达目标值(表2),然后在保持相应的中主应力系数和其他参数不变的条件下增加剪应力q到表2中的目标值,最后大主应力方向角从0开始增加到目标值。主应力轴旋转时的应力路径在偏应力平面内为一圆形,圆的直径即为剪应力q值。试验过程为应力控制方式:剪切速率为1kPa/min,主应力轴旋转速率为2/min,该加载速率下杭州黏土的孔压能够均匀开展,该应力路径为主应力轴的拟静态旋转。

表2 试验方案及参数设置

试验编号	剪应力 $q = (\sigma_1 - \sigma_3) : \text{kPa}$	中主应力 系数 b	主应力轴旋转 幅度 $p' : \text{kPa}$
RS75-0	75	0	420
RS75-02	75	0.2	420
RS75-05	75	0.5	420
RS75-075	75	0.75	420
RS75-1	75	1	420
RS50-05	50	0.5	420
RS75-05	75	0.5	420
RS100-05	100	0.5	206

## 四、试验结果与分析

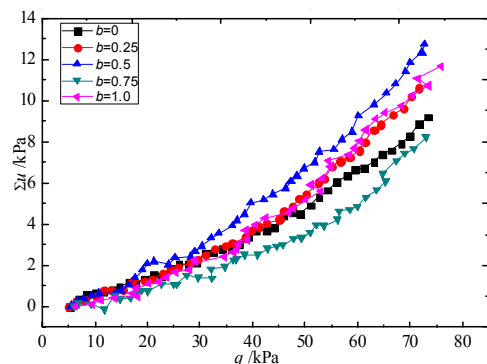
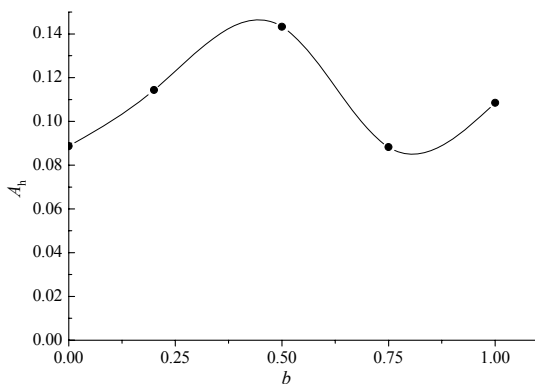


表1 土体基本物理参数

重度: $G_s$	液限: $w_l$ (%)	塑限: $w_p$ (%)	塑性指数: $I_p$	密度: $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	含水率: $w$ (%)
2.68	22.8	49.8	27	1.78	43.3



(一) 剪切阶段孔压变化规律

试验开始阶段剪应力增加过程中剪应力的变化规律如图1所示,从图中可以看到,随着剪应力q的逐渐增加,超净孔压也单调增加。对比不同中主应力条件下孔压的变化规律,可以看到中主应力系数对孔压随剪应力增加规律有较显著的影响,当b=0.5时,孔压随剪应力的增加而增加最快,而b=0.75时,孔压随剪应力的增加而增加最慢。剪应力增加过程中不同b值条件下根据Henkel孔压公式计算得到的孔压系数如图2所示,从图中可以看到考虑中主应力系数影响的孔压系数仍然不是一个常数。当主应力轴纯旋转时,主应力保持不变,平均主应力也保持不变,广义剪应力也不变,按照Henkel的孔压公式,此时孔压不会增加。但是试验结果表明不排水条件下,主应力轴纯旋转时试样的孔压会随着主应力轴的纯旋转而逐渐累积。所以至少在该应力纯旋转路径条件下,Henkel孔压公式不适用。由于土体的各向异性,土体不同方向的孔压系数也存在显著差异。传统的孔压计算方法理论都不能很好的解释主应力轴纯旋转条件下孔压的累积。中主应力系数对土体孔压发展的影响也是土体各向异性的一种表现。

(二) 主应力轴旋转阶段孔压变化规律

主应力轴旋转阶段原状黏土孔隙压力随主应力轴旋转的累积如图3-4所示。原状黏土不排水条件下孔压随着主应力轴的旋转而波动上升,在主应力轴旋转完成一周时孔压的累积值达到峰值(即主应力轴旋转至180°位置时)。对比图中各孔压曲线的变化规律,可以看到中主应力系数和剪应力的值对原状黏土孔压开展的特性都有显著影响。这一试验结果与砂土基本相同。

图3中每个应力旋转循环中(180°)孔压变化曲线以90°为界基本可以分为两个阶段,大主应力方向角小于90°时,随着主应力轴的旋转孔压的增加比较缓慢,而当主应力轴在90°到180°间旋转时,孔压的增长速度很快,其增量约为0°到

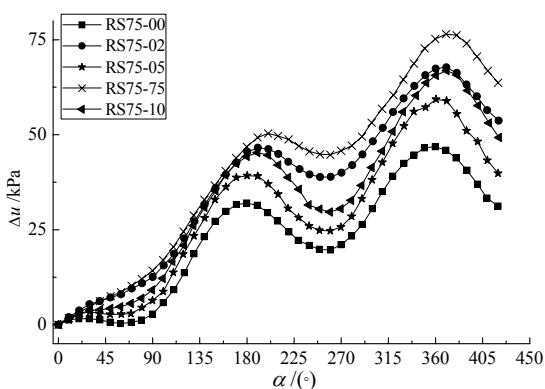


图3 不同b值条件下主应力轴纯旋转条件孔压变化规律

90°的3倍。在第二个循环的第一阶段和第三个循环初期,孔压都是随着主应力的旋转而减小的,而第二阶段中孔压同样有一个显著的增加。所以主应力轴旋转初期原状黏土表现为剪胀,当大于90°之后则表现为剪缩。这一试验现象在砂土的试验中也同样存在。

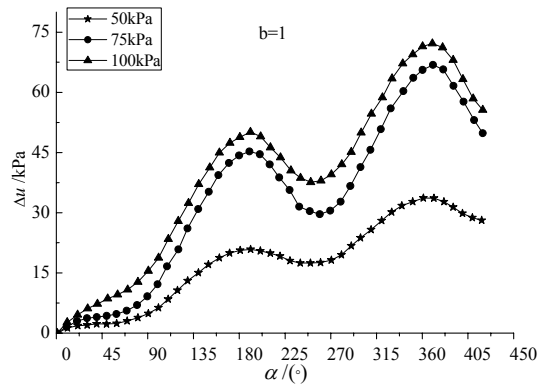


图4 不同b=1条件下条件不同剪力条件下主应力轴纯旋转引起孔压变化规律

图4为b=1条件下条件不同剪力条件下主应力轴纯旋转引起孔压变化规律,从图中可以看到不同剪应力条件下孔压随着大主应力方向的旋转也波动增加,随着剪应力的增加,应力方向单纯旋转引起的孔隙压力更加显著。

五、结论

本文采用空心圆柱扭剪仪对原状黏土开展了系列主应力轴纯旋转条件下的空心圆柱扭剪试验,对不同中主应力系数和不同剪应力条件下超孔隙水压力的变化规律进行了研究,通过对试验结果的分析,主要得到以下结论:

1. 大主应力方向为0时,不同中主应力b值条件下黏土超孔隙压力随着剪应力q值增加而单调增加,中主应力系数b对孔压增加规律有一定影响,b=0.75时,孔压随剪应力增加累积的速率最快。
2. 大主应力方向单纯旋转条件下,原状黏土随着主应力轴的旋转而波动上升,在主应力轴旋转完成一周时孔压的累积值达到峰值。
3. 本文试验研究结果表明,应力方向单纯旋转条件下黏土的孔隙压力也会显著增加,且该影响随着初始剪应力的增加而更为显著,而随着孔压的增加,土体的强度也会降低,因此在实际工程中忽律应力方向旋转的影响可能导致设计偏于不安全。

参考文献

[1] 沈瑞福,王洪瑾,周景星. 动主应力轴连续旋转下砂土的动强度[J]. 水利学报, 1996,(1):27-33.  
 [2] 童朝霞,张建民,于艺林,张嘎. 中主应力系数对应力主轴循环旋转条件下砂土变形特性的影响.[J]. 岩土工程学报. 2009, 31(6):946-952.  
 [3] 高彦斌,朱合华. 土的宏观各向异性研究进展[J]. 岩土工程界, 2004(z1):163-167.  
 [4] 聂影. 复杂应力条件下饱和重塑黏土动力特性试验研究[D]. 大连:大连理工大学博士学位论文, 2008.