

端部效应对土体三轴扭剪试样应力分布的影响

郭万里^{1,2}, 席欢³, 宋秋璐¹

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 南京工程高等职业学校 建筑工程系, 江苏 南京 211135)

摘要:利用 ABAQUS 模拟 6 个不同壁厚、不同高度的空心试样的扭剪过程, 总结在柱坐标系下六个应力分量及三个主应力的分布规律, 并重点对端部效应影响下应力分布不均匀的性质进行分析。结果表明, 径向应力 σ_r 和中主应力 σ_2 在两端部各约 10% 的高度范围内, 环向应力 σ_θ 、轴向应力 σ_z 、横截面上的扭剪应力 $\tau_{z\theta}$ 以及主应力 σ_1 和 σ_3 在两端各约 20% 的高度范围内受端部效应影响而分布不均匀; 试样端部的真实应力与中间段应力相比存在误差, 其中端部的 σ_r 和 σ_θ 相对于中间段会减小, 减幅分别约为 20%、30%, σ_z 和 $\tau_{z\theta}$ 产生的误差大小则与试样的厚度成正比相关; 为减小端部效应的影响, 对空心扭剪试样建议的高宽比为 2.5, 内外径比值为 0.8。

关键词:扭剪试样; 端部效应; 土体; 有限元; 应力分布

中图分类号: TU431

文献标识码: A

Influences of end - effect on stress of soil specimens in hollow cylinder test

GUO Wan - li^{1,2}, XI Huan³, SONG Qiu - lu¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Jiangsu

Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China;

3. Department of Architectural Engineering of Nanjing Engineering Vocational college, Jiangsu Nanjing 211135, China)

Abstract: ABAQUS is used to simulate 6 different hollow specimens with different wall thickness and height, six stress components and three principal stress in a cylindrical coordinate system were summed up, and the end effect of stress distribution of properties were analyzed. Results showed that, the intermediate principal stress σ_2 and radial stress σ_r within each of the height of about 10% at the ends, circumferential stress $\tau_{z\theta}$, axial stress σ_1 and σ_3 of about 20% at each end are under the influence of end effect. There are errors between real stresses of the sample end and middle, the decrease extent of σ_r and σ_θ are about 20%, 30%, respectively, and the errors of σ_z and $\tau_{z\theta}$ are positively correlated with the thickness of the specimen. In order to reduce the effect of end - effects, the ratio of height to width is recommended to be 2.5, the ratio of inner to outer diameter is 0.8.

Key words: hollow cylinder test; end effect; soil; finite element analysis; stress distribution

目前, 土体较复杂应力状态下应力应变性质的试验研究成为热点, 空心圆柱扭剪仪 (Hollow Cylinder Apparatus, 简称 HCA) 是目前可以实现包括主应力轴旋转变在内的多种复杂应力条件的最先进的土工试验设备, 能更真实地再现实际工程中土体的受力过程及受力状态, 使得研究成果更加切合实际。因此, 越来越多学者利用 HCA 研究土体复杂应力状态下的力学性质及变形特征^[1-5]。

然而该仪器对于土样两端的约束作用无法避免, 导致土样在剪切过程中会出现不均匀的变形^[6-8]。不均匀的变形在土样两端更为明显, 可见应力及应变在两端的分布其实是不均匀的。已有研究表明, 选取合适的内外径比及高宽比可以减小端部效应所带来的误差, 但端部效应对应力分布的影响程度有多大, 端部效应影响的高度范围有多大, 至今鲜见相关研究。因此对其进行深

入研究,综合考虑端部效应和尺寸因素等对应力分布的影响,具有重要的理论意义及应用价值。基于此,本文利用 ABAQUS 有限元软件模拟计算了不同试样的扭剪过程,根据后处理结果,总结了各试样在柱坐标系下六个应力分量的分布规律,并对端部效应影响的大小及范围进行了分析。

1 模型建立

通过总结国内科研单位常用的空心扭剪试样的尺寸^[4-8],试样高宽比 m 约为 2,内外径比 n 通常为 0.6 ~ 0.8,因此确定了本文将要模拟计算的试样尺寸组合如表 1。有限元网格沿环向均分为对称的 48 等分;沿径向内外径比分别为 0.9、0.8、0.6 的空心试样分别被分为 1、2、4 围单元;沿高度方向上土体单元等分为 50 个单元层。此外,在顶端外加一层刚性层,用于模拟实际试验中传递荷载的钢板,试样 2 如图 1 所示。

表 1 试样尺寸及荷载组合

Tab. 1 The size and load combinations of samples

编号	r_0/m	r_1/m	h/m	m	n
1	0.5	0.45	2.5	2.5	0.9
2	0.5	0.4	2.5	2.5	0.8
3	0.5	0.3	2.5	2.5	0.6
4	0.5	0	2.5	2.5	0
5	0.5	0.4	2.0	2.0	0.8
6	0.5	0.4	1.5	1.5	0.8

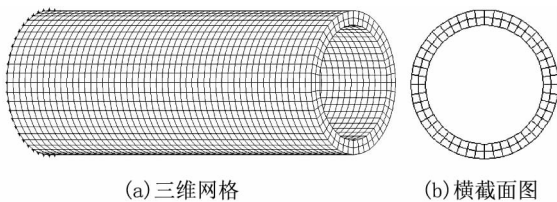


图 1 试样 2 三维网格及横截面图

Fig. 1 3-D mesh and cross-sectional of sample 2

利用邓肯 $E - \nu$ 模型对试样进行有限元模拟加荷计算和后处理^[9-12],其模型参数根据文献[11]对某软土进行的三轴固结排水剪试验确定,如表 2。

表 2 邓肯 $E - \nu$ 参数

Tab. 2 Parameters of Duncan $E - \nu$ model

K	n	R_f	C/kPa	$\varphi_0/^\circ$	G	D	F	K_{ur}
47.3	0.8	0.73	13.5	25.1	0.2	3.3	0.05	100

2 端部约束对应力分布的影响

2.1 正应力在两端的分布规律

在圆柱坐标系下将轴向应力 σ_z 、径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 称为正应力。通过有限元模拟施加的荷载稳定而均匀,在扭剪试样的几何结构和受力都是关于圆心对称的条件下,可以推断在同一个横截面上同一围的单元体,应力和应变分量在环向是无变化的,计算结果也与推断相符。

下面将只需在应力环向均匀分布的基础上,具体研究单元的各个应力分量在径向和轴向的分布规律。由于各试样的应力应变分布规律类似,以邓肯模型计算的试样 2 为例,其应力分布如图 2 所示。

图中各围单元的正应力的曲线基本重合,且曲线近似于上下对称分布。这是由于模拟时,顶端为刚性层,底端为三向约束,两端对于土体的作用近似相等,与实际试验中端部约束相符。对于同一个试样,在试样的中间段 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ 沿高度方向上基本保持在一个定值,且该值与式(1)~(3)的计算值分别对应。

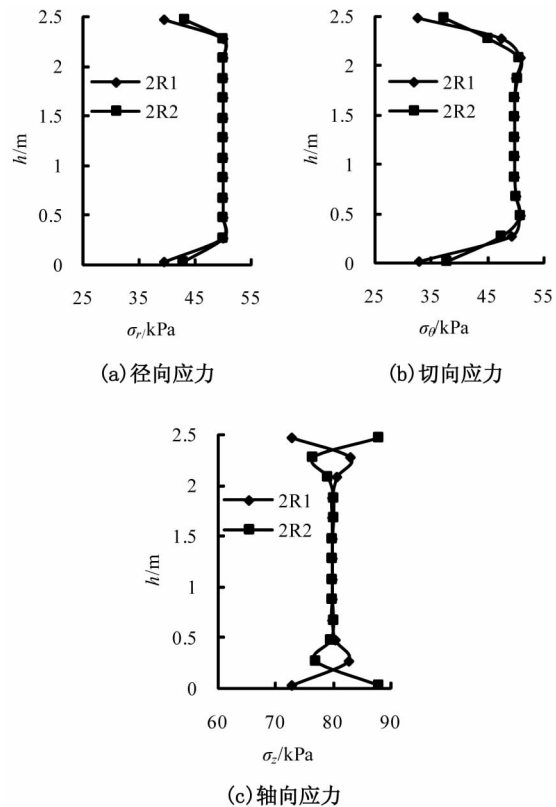


图 2 邓肯模型下正应力的分布

Fig. 2 Distribution of normal stress in Duncan's model

其中,2R1 和 2R2 分别表示试样 2 径向的第 1 层、第 2 层单元,单元中心与圆心的距离分别为 0.475 m 和 0.425 m,以下类似。

在试样的两端受端部效应影响明显,端部约束的存在,限制了试样在径向和环向的变形,因此两端部的 σ_r 和 σ_θ 相对于中间段会减小,且越靠近端部减小的幅度越大。

端部受影响的范围占试样总高度的比值叫做端部效应的影响高度;而端部应力变化的大小相对于中间段的比值叫做相对误差。显然处于顶端和底端最末端的单元层受到的约束作用最大,则应力变化幅度最大,称为最大相对误差。表3给出了端部约束对径向应力 σ_r 和环向应力 σ_θ 影响的高度范围及最大相对误差。

表3 各试样端部效应对 σ_r 和 σ_θ 的影响高度及最大相对误差

Tab. 3 Parameters of influence of end - effect on σ_r and σ_θ						
试样编号	1	2	3	4	5	6
应力	σ_r					
高度范围/%	9.5	10.2	10.4	12.1	9.5	9.8
最大误差/%	-14.6	-17.5	-21.6	-25.4	-17.2	-18.5
应力	σ_θ					
高度范围/%	17.4	20.5	21.2	23.1	20.2	20.8
最大误差/%	-28.5	-29.3	-29.6	-29.8	-28.8	-29.1

比较高度相同壁厚不同的试样1、2、3和4之间的规律,以及壁厚相同高度不同的试样2、5和6之间的规律如下:

- (1) 端部效应对 σ_r 的影响在两端各约10%的高度范围内,而对 σ_θ 的影响高度范围在两端各约为20%,与试样的壁厚和高度没有明显的关系。
- (2) 试样高度对应力的最大相对误差影响不大, σ_r 和 σ_θ 的最大相对误差因试样厚度变大而略有增大,其中 σ_r 的最大相对误差约为-20%, σ_θ 则约为-30%。
- (3) 轴向应力 σ_z 在两端部各约20%的高度范围内,在横截面上的分布不均匀,且最大相对误差约为10%,但横截面上 σ_z 的平均值等于施加的轴向荷载。

2.2 剪应力在两端的分布规律

垂直于试样径向的切平面上剪应力 $\tau_{r\theta}$ 、 τ_{rz} 通常被认为为0,若将扭剪空心试样作为刚体分析,则剪应力 $\tau_{r\theta}$ 、 τ_{rz} 可以忽略不计。但是对于扭剪试样而言,土的重要性质是非线性,因此也需要对 $\tau_{r\theta}$ 、 τ_{rz} 的分布规律特别是在两端部是否可以视为0作研究,如图3为 $\tau_{r\theta}$ 和 τ_{rz} 的示意图。

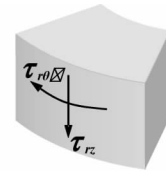


图3 单元体 $\tau_{r\theta}$ 和 τ_{rz} 示意图

Fig. 3 Sketch map of $\tau_{r\theta}$ and τ_{rz}

图4给出了剪应力的分布。其中(a)、(b)显示 $\tau_{r\theta}$ 和 τ_{rz} 在两端各约20%的高度范围内不为0,可以说明端部约束的存在影响了各个应力分量的分布,且由于内外室压力差的作用,空心试样墙面外发生弯曲也使应力的分布不均。 $\tau_{r\theta}$ 和 τ_{rz} 在两端部的值较小,对主应力 σ_1 和 σ_3 的贡献不大,可以忽略不计。

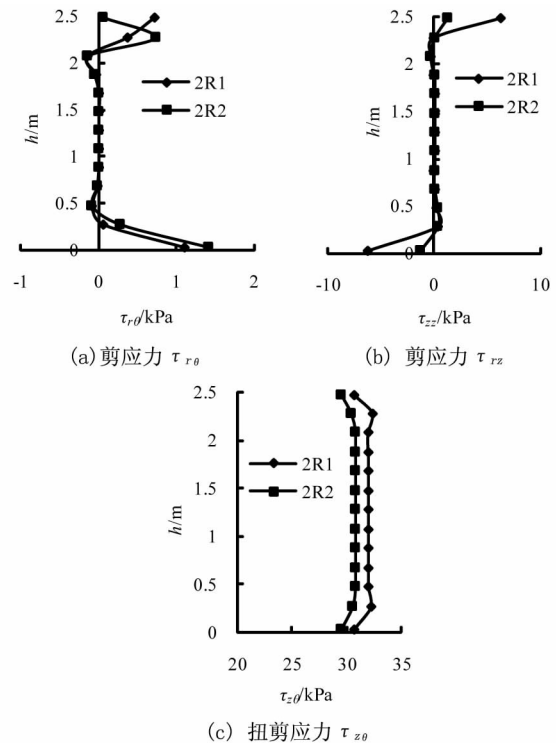


图4 邓肯模型下剪应力的分布

Fig. 4 Distribution of shear stress in linear elastic model

图4(c)显示横截面上的扭剪应力 $\tau_{z\theta}$ 径向分布呈现出与单元到圆心的距离成正相关的规律,但在合适的试样尺寸时可以利用平均值进行代替。两端各约20%的高度范围内 $\tau_{z\theta}$ 的不均匀性也很明显,且最大相对误差在10%左右。

2.3 主应力在两端的分布规律

在平均应力和平均应变的基础上,试验中采用如下公式计算试样的主应力。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2}{4} + \tau_{z\theta}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{p_o r_o + p_i r_i}{r_o + r_i} \quad (2)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2}{4} + \tau_{z\theta}^2} \quad (3)$$

图5给出了邓肯模型计算的试样2的主应力分布图。

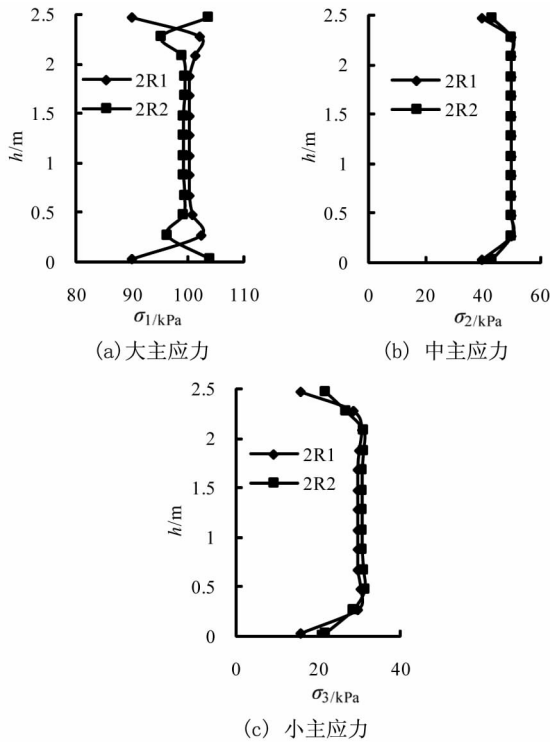


图5 邓肯模型下主应力的分布

Fig. 5 Distribution of primary stress in linear elastic model

经对比,主应力在中间段的模拟值与由公式(1)~(3)的计算值相近,而 σ_1 和 σ_3 受端部效应影响的高度范围在两端分别约为20%; σ_2 与 σ_r 近似相等,在两端受端部效应影响的高度范围各约为10%。 σ_1 和 σ_3 的相对误差则需根据施加的荷载组合即正应力 σ_r 、 σ_θ 及 σ_z 和横截面上的扭转应力 $\tau_{z\theta}$ 的相对误差进行估计。

3 结论

1) 空心扭剪试样在两端部的应力分布不均匀,各应力分量及大中小主应力都受到端部效应的影响,且影响的高度和产生相对误差与试样的高度没有明显的关系。

2) 端部效应对 σ_r 和 σ_2 的影响在两端各约10%的高度范围内,而对 σ_θ 、 σ_z 、 $\tau_{z\theta}$ 及主应力 σ_1 和 σ_3 则为20%。

3) 端部约束的存在,限制了试样在径向和环向的变形,因此两端部的应力相对于中间段会减小,其中 σ_r 的减幅最大为20%, σ_θ 约为30%。 σ_z 和 $\tau_{z\theta}$ 产生的误差大小则与试样的厚度成正相关。

4) 综合考虑端部效应的影响范围以及壁厚对 $\tau_{z\theta}$ 的影响,为减小试验中利用应力平均值代替真实值所产生的误差,建议空心扭剪试样的高宽比取为2.5,内外径比值取为0.8。

参考文献:

- [1] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils [J]. Geotechnique, 1983, 33(4): 25-31.
- [2] ISHIHARA K, TOWHATA I. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads [J]. Soils and foundations, 1983, 23(4): 11-26.
- [3] SAADA A S, TOWNSEND F C. State of the art: laboratory strength testing of soils [J]. Laboratory shear strength of soil, ASTM STP, 1981, 740: 7-77.
- [4] LIN H, PENUMADU D. Experimental investigation on principal stress rotation in Kaolin clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 633-642.
- [5] 周成, 殷建华, 郑俊文. K0固结海洋粘土的三轴仪与空心扭剪仪试验及各向异性粘弹塑性数值模拟[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集:上册, 2003: 241-247.
- [6] 沈扬. 考虑主应力方向变化的原状软粘土试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [7] 刘汉龙, 周云东, 高玉峰, 等. 多功能静动三轴仪研制及在液化后大变形中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(5): 48-51.
- [8] VAID Y P, SAYAO A, et al. Generalized stress-path-dependent soil behaviour with a new hollow cylinder torsional apparatus [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(5): 601-616.
- [9] SAYÃO A, VAID Y P. A critical assessment of stress non-uniformities in hollow cylinder test specimens [J]. Soils and Foundations, 1991, 31(1): 60-72.
- [10] 费康. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [11] 秦秀娟. 土体应力路径试验及邓肯模型在开挖土体中适用性研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- [12] 李作勤. 扭转三轴试验综述[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 80-93.

(特约编辑 李军)