

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.011

土体真三轴仪的边界效应试验

施维成¹,朱俊高²,代国忠¹,史贵才¹,朱建群¹

(1.常州工学院常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室,江苏 常州 213002;
2.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)

摘要: 为了研究刚性、半刚性、柔性3种边界对试验结果的影响,使用河海大学TSW-40型真三轴仪对粗粒土试样进行保持水平向应力不变、竖直向应力增加的单向加荷试验。结果表明:对高宽比为1:1的立方体试样,刚性边界对试样的约束作用很明显;在试样顶部使用竖向刚性、水平向柔性的半刚性边界可显著减小边界对试样的约束作用;增大试样高度与底边的比值可有效减小刚性边界对试样端部的约束;半刚性复合加压块及柔性气囊对试验结果的影响很小。
关键词: 真三轴仪;土样与加压系统边界;刚性边界;半刚性边界;柔性边界;边界效应试验
中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)01-0077-05

Boundary effect tests of true triaxial apparatus for soil

SHI Weicheng¹, ZHU Jungao², DAI Guozhong¹, Shi Guicai¹, Zhu Jianqun¹

(1. Changzhou Key Laboratory of Structure Engineering and Material Properties, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influences of rigid, half-rigid, and flexible boundaries on test results, unilateral loading tests on coarse-grained soil, with invariable horizontal stress and increasing vertical stress, were performed using the TSW-40 true triaxial apparatus developed by Hohai University. The results show that the restriction of the rigid boundary is clear on a cubic sample with the depth-width ratio of 1 : 1; using a half-rigid boundary on the top of a sample, with the rigid boundary in the vertical direction and the flexible boundary in the horizontal direction, can remarkably decrease the restriction of the boundary on the sample; the restriction of the rigid boundary on a sample can be effectively decreased by increasing the depth-width ratio of the sample; and half-rigid compound blocks and flexible water bags have a lesser influence on the test results.
Key words: true triaxial apparatus; boundaries of soil sample and loading system; rigid boundary; half-rigid boundary; flexible boundary; test on boundary effect

真三轴仪^[1-2]对试样的每个面单独施加压力,可以进行各种复杂应力路径的试验,是研究土体强度和变形性质的重要仪器^[3]。但其各个方向的加压系统与土样的边界处都会存在摩擦^[4],容易对试验结果产生影响。为了减小试验仪器对试样的端部摩擦,学者们常在试样与加压系统的边界处放上垫片或薄膜。尤明庆等^[5]研究岩石试样的长度对试验的影响时,在岩石试样端部使用柔性垫片(如聚四氟乙烯垫片)来减小试样的端部摩擦。叶冠林等^[6]将特氟龙薄膜贴于加压钢板的表面来减小摩擦。
几十年来,各国学者^[7-13]所研制的真三轴仪边界情况大致可以归为以下几类:刚性+刚性+刚性;柔性+

柔性+柔性;刚性+半刚性+柔性;刚性+柔性+柔性;刚性+刚性+柔性。长春市朝阳试验仪器有限公司与河海大学联合研制的 TSW-40 型真三轴仪采用刚性加压板加压、复合加压块(半刚性)加压和柔性水囊加压相结合的加压方式,边界条件属于刚性+半刚性+柔性。笔者将利用该真三轴仪对刚性、半刚性及柔性这 3 种边界条件的影响进行试验研究。

为了研究刚性边界对试验结果的影响,利用 TSW-40 型真三轴仪分别进行立方体试样、减小顶面端部约束的立方体试样、长方体试样在相同应力路径下的试验。为了研究半刚性及柔性边界对试验结果的影响,分别进行无复合加压块及水囊盒、有复合加压块及水囊盒这 2 种情况在相同应力路径下的试验。

1 试验土料与试验方法

1.1 试验土料

试验所用土料为双江口心墙堆石坝的堆石料,粒径 10~5 mm 的颗粒质量分数为 70%,粒径小于 5 mm 的颗粒质量分数为 30%,试验土料的级配曲线如图 1 所示。试样干密度 $\rho_d=1.91\text{ g/cm}^3$ 。

1.2 试验仪器

TSW-40 型真三轴仪(图 2)对 3 个方向的主应力分别采用 3 种不同的加压系统控制,竖直向应力采用刚性加压板加压;水平向应力中,一个方向采用半刚性的复合加压块(水平向刚性,竖直向可压缩)加压,另一个方向采用柔性水囊加压。

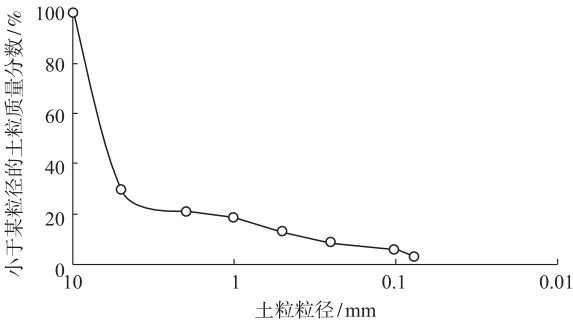


图 1 试验土料的级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve for soil samples

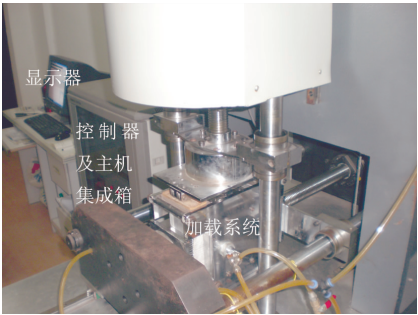


图 2 TSW-40 型真三轴仪

Fig. 2 TSW-40 true triaxial apparatus

刚性加压板加压是使用刚性板对试样在上、下方向加压,刚性板的底面及底座的顶面上固定有滚轴,滚轴上有滚轮,滚轮以该滚轴为轴,可自由转动;在刚性加压板向下压试样的同时,滚轮向下压复合加压块,带动复合加压块压缩,从而保证试样与复合加压块的压缩量始终一样,避免试样变形后受到侧向干扰。

复合加压块是在一层金属板上粘贴 3 根空心橡皮管形成一个组合单元,再将若干组合单元黏结起来所形成的。空心橡皮管可以压缩膨胀,从而复合加压块在竖向可以随试样一起压缩膨胀;金属板是刚性的,从而复合加压块在水平向是刚性的。因此,复合加压块是在竖向可以压缩、水平向不可压缩的半刚性加压块。

柔性水囊加压是使用水囊临空面对试样加压,水囊装在金属水囊盒中,金属水囊盒只是在试样面一侧临空,因此水囊仅在与试样接触的 1 个面上可以自由膨胀,其余 5 个面都被金属水囊盒约束,不能膨胀。2 个金属水囊盒由穿过其 4 个角上孔洞的 4 根连杆固定在试样左右两侧,从而水囊的膨胀量即反映试样在左、右方向上的压缩量。

刚性加压板加压、复合加压块加压、柔性水囊加压这 3 种加压方式对试样来讲,分别为刚性、半刚性及柔性边界,本文拟探讨这 3 种边界对试验结果的影响。

1.3 试验方法

制样时在橡皮膜里 4 个侧面上各放 1 块土工布,防止在制样击实及试验加压时土颗粒棱角将橡皮膜刺破。土样分 5 层击实,控制干密度为 1.91 g/cm^3 ,相对密度为 0.90。为简单起见,制样和试验时的试样都为干样。

试样制完后放到仪器上,用真空泵从橡皮膜里面抽真空,使其气压小于外界大气压,从而在试样内、外形成压差。在试样施加到一定的初始应力状态(本文为 3 个方向的主应力均为 20 kPa)之前要保持这个压差,避免试样坍塌。

试验时,在复合加压块与试样之间放置一层较薄的软玻璃和薄土工布。软玻璃的作用是减小复合加压块与试样间的粗糙度,薄土工布的作用是保护水囊,防止复合加压块刺破水囊。

真三轴仪 3 个方向的加压系统与试样的边界都有可能影响试验结果,笔者为研究刚性边界的影响进行了 3 个试验,为研究半刚性及柔性边界的影响进行了 2 个试验,这 5 个试验的试样尺寸及试验方法见表 1。需要说明的是,此处仅为研究边界对试验结果的影响,故应力路径较为简单。编号 1、2、3 的试样应力路径如下:在 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 的初始应力状态下,保持 σ_2 、 σ_3 不变,增加 σ_1 直至破坏;编号 4、5 的试样应力路径如下:在 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 50 \text{ kPa}$ 的初始应力状态下,保持 σ_2 、 σ_3 不变,增加 σ_1 直至破坏。

表 1 试验方法及应力路径

Table 1 Testing methods and stress paths

编号	边界影响	试样尺寸(长×宽×高)	试验方法
1	刚性	120 mm×120 mm×120 mm	使用完全刚性的透水板,即试样端部为完全刚性边界
2	刚性	120 mm×120 mm×120 mm	将试样顶部的透水板用 36 个硬币代替,即试样顶部边界由完全刚性转为竖向刚性,水平向柔性的半刚性边界
3	刚性	120 mm×60 mm×120 mm	使用完全刚性的透水板,即试样端部为完全刚性边界
4	半刚性及柔性	120 mm×60 mm×120 mm	不使用复合加压块及水囊盒,使用真空泵对试样内部抽真空,形成试样内外 50 kPa 的应力差
5	半刚性及柔性	120 mm×60 mm×120 mm	使用复合加压块及水囊盒

1.3.1 刚性边界的影响

为了研究刚性加压板对试样的端部约束影响,使用 TSW-40 型真三轴仪分别对立方体试样、减小顶面端部约束的立方体试样、长方体试样做了相同应力路径的试验:初始应力状态为 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 100 \text{ kPa}$,然后保持水平向应力 σ_2 、 σ_3 不变,竖直向应力 σ_1 增加的单向加荷试验。

这里减小顶面端部约束的立方体试样是指在立方体试样顶部不放透水板,而用 36 个直径为 2 cm 的一角钱硬币平铺在试样顶部,并在每个硬币与试样帽之间涂硅脂增加润滑。这样,试样顶面的一层硬币就组成了一个竖向为刚性,水平向为柔性的半刚性边界。竖向刚性使试样在竖向不会产生附加的变形,水平向柔性使试样在水平向膨胀时边界可以随着试样一起膨胀,而不是阻止试样膨胀,这时的试样端部约束由原先试样顶面与透水板之间的摩擦转换为硬币与试样帽之间的摩擦,而后者是金属与金属之间的摩擦,且有硅脂润滑,摩擦相对较小,加之硬币与硬币之间是点接触,相互之间干扰较小,水平向随试样一起膨胀的阻力较小,可以减小试样顶面的端部约束。

1.3.2 半刚性及柔性边界的影响

为研究半刚性及柔性边界对试验的影响,做了以下 2 个试验进行对比:(a) 无半刚性及柔性边界(即无复合加压块及水囊盒)的试验(图 3、图 4),表 1 中编号为 4;(b) 有半刚性及柔性边界(即有复合加压块及水囊盒)的试验,表 1 中编号为 5。

无半刚性及柔性边界的试验是指试验时不使用复合加压块及水囊盒,而是用真空泵对试样抽真空,试验

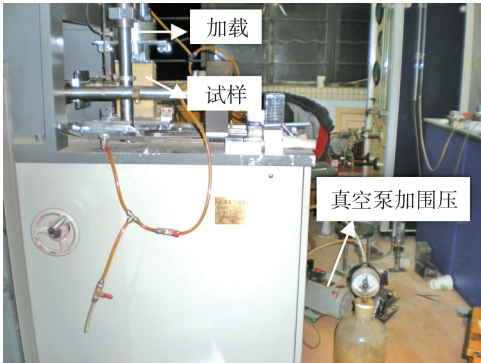


图 3 无半刚性及柔性边界试验装置

Fig 3 Testing apparatus without half-rigid and flexible boundaries

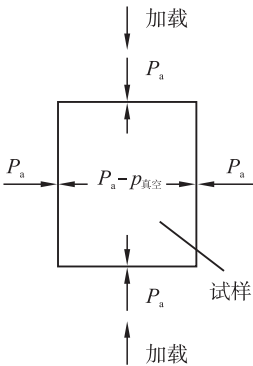


图 4 无半刚性及柔性边界试验示意图

Fig. 4 Sketch of test without half-rigid and flexible boundaries

装置如图3所示。试样内、外都有大气压力 P_a (如图4所示),真空泵还在试样内部形成50 kPa的真空负压 $p_{真空}$,从而试样内部的气压为 $P_a - p_{真空}$,这样施加在试样上的围压相当于 $P_a - (P_a - p_{真空})$,即为 $p_{真空}$ 。本文真空泵的真空负压为50 kPa,因此施加在试样上的围压为50 kPa,然后利用真三轴仪上、下方向的加压装置对试样进行单向加荷试验。有半刚性及柔性边界的试验是指利用真三轴仪的复合加压块及水囊盒来施加水平向的50 kPa应力,然后竖向加压直至试样破坏。

2 试验结果与分析

2.1 刚性边界的影响

使用TSW-40型真三轴仪对立方体试样、减小顶面端部约束的立方体试样、长方体试样所做的试验得到的 $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \varepsilon_1$ 关系曲线分别如图5中的①、②、③所示。

图5结果表明,立方体试样的破坏应力 σ_{1f} 最大,达到2.39 MPa。说明对高宽比为1:1的立方体试样,刚性加压板对试样的端部约束作用明显。减小顶面端部约束的立方体试样破坏时的 σ_{1f} 为1.52 MPa,减小了870 kPa,说明在试样端部铺一层竖向刚性、水平向柔性的半刚性边界可以显著减小刚性加压板对试样的端部约束。长方体试样破坏时的 σ_{1f} 为1.10 MPa,比减小顶面端部约束的立方体试样又小了420 kPa,说明增加试样高度与底边的比值可有效减小刚性加压板对试样的端部约束。

按照莫尔-库仑理论,试样的破坏面与大主应力面的夹角为 $45^\circ + \varphi/2$,而岩土材料摩擦角 φ 一般在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内,那么破坏面与大主应力面的夹角就在 $60^\circ \sim 75^\circ$ 之间。当试样高度与底边的比例为1:1时,破坏面穿过大主应力面,即破坏面穿过刚性加压板,刚性加压板的整体性及其与试样顶面之间较大的摩阻力阻止了试样的破坏,造成试样端部约束过大。在试样端部铺一层竖向刚性、水平向柔性的半刚性边界,相当于减小了试样顶面的摩阻力,可减小端部约束。当增加试样高度与底边的比值时,相当于减小了破坏面穿过刚性加压板的概率,可有效减小端部约束。

2.2 半刚性及柔性边界的影响

图6是有、无半刚性及柔性边界(即有、无复合加压块和水囊盒)的2个试验结果对比。这2个试验的结果相当接近,说明半刚性及柔性边界(即复合加压块及水囊盒)对试验的影响很小。因为水囊盒里与试样接触的水囊是一种柔性边界,基本不会对试样产生端部约束;复合加压块是一种半刚性边界,在竖向可以变形,对试样的端部约束也比较小。

3 结 论

- a. 对高宽比为1:1的立方体试样,刚性边界对试样的约束作用很明显,导致破坏时的竖向应力很大。
- b. 在试样顶部使用竖向刚性、水平向柔性的半刚性边界(本试验使用的是36个硬币)可显著减小边界对试样的约束作用。
- c. 增大试样高度与底边的比值(本试验是将高宽比为1:1的立方体试样改为高宽比为2:1的长方体试样)可有效减小刚性边界对试样端部的约束。
- d. 半刚性及柔性边界(本试验是复合加压块及水囊盒)对试验结果的影响很小。

致谢:感谢江苏省高校“青蓝工程”资助!感谢江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研修计划资助!感谢江苏高校品牌专业建设工程资助!

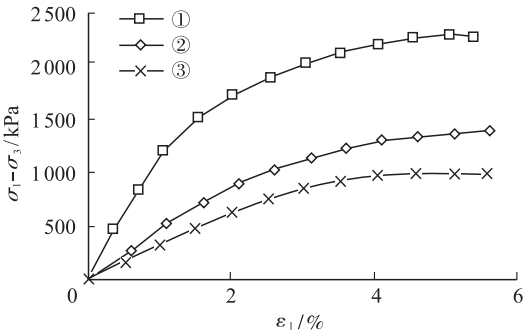


图5 不同试样在相同应力路径下的 $\sigma_1 - \sigma_3 \sim \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 5 Relationships between $\sigma_1 - \sigma_3$ and ε_1 for various soil samples with same stress path

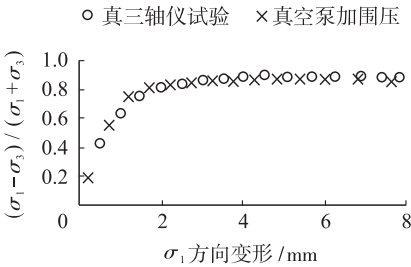


图6 有、无半刚性及柔性边界的试验结果对比图

Fig. 6 Comparisons of test results with and without half-rigid and flexible boundaries

参考文献:

[1] KHALID A A, HEATH S W. A true triaxial apparatus for soil testing with mixed boundary conditions[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, 28(6) : 534-543.

[2] CHOI C H, PEDRO A, MICHAEL D H. Development of a true triaxial apparatus for sands and gravels[J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, 31(1) : 32-44.

[3] 殷宗泽, 朱俊高. 真三轴仪的改进[C]// 中国力学学会. 中国力学学会第一届全国岩土本构理论研讨会论文集. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 1-5.

[4] 石露, 李小春. 真三轴试验中的端部摩擦效应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4) : 1159-1164. (SHI Lu, LI Xiaochun. Analysis of end friction effect in true triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4) : 1159-1164. (in Chinese))

[5] 尤明庆, 苏承东. 大理岩试样的长度对单轴压缩试验的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22) : 3754-3760. (YOU Mingqing, SU Chengdong. Effect of length of fine and coarse crystal marble specimens on uniaxial compression tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22) : 3754-3760. (in Chinese))

[6] 叶冠林, 盛佳韧, 武朝军, 等. 自动控制真三轴仪的研制及验证[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3) : 380-385. (YE Guanlin, SHENG Jiaren, WU Chaojun, et al. Design and verification of automatic true triaxial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3) : 380-385. (in Chinese))

[7] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983: 429-435.

[8] 袁聚云, 杨熙章, 赵锡宏, 等. K_0 固结真三轴仪的研制及试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1995, 19(3) : 28-32. (YUAN Juyun, YANG Xizhang, ZHAO Xihong, et al. Development and experiment of K_0 -consolidation true triaxial apparatus[J]. Dam Observation and geotechnical tests, 1995, 19(3) : 28-32. (in Chinese))

[9] 张坤勇, 殷宗泽, 徐志伟. 国内真三轴试验仪的发展及应用[J]. 岩土工程技术, 2003(5) : 289-293. (ZHANG Kunyong, YIN Zongze, XU Zhiwei. Development and application of true triaxial apparatus in China[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003(5) : 289-293. (in Chinese))

[10] 殷建华, 周万欢, KUMRUZZAMAN M D, 等. 新型混合边界真三轴仪加载装置及岩土材料试验结果[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4) : 493-499. (YIN Jianhua, ZHOU Wanhuan, KUMRUZZAMAN M D, et al. New mixed boundary true triaxial loading device for testing study on 3-D stress-strain-strength behaviour of geomaterials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4) : 493-499. (in Chinese))

[11] 唐仑. 关于砂土的破坏条件[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(2) : 1-7. (TANG Lun. The failure criterion of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1981, 3(2) : 1-7. (in Chinese))

[12] KO H Y, SCOTT R F. A new soil testing apparatus[J]. Geotechnique, 1967, 17(4) : 40-57.

[13] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8) : 1172-1179. (SHAO Shengjun, LUO Aizhong, DENG Guohua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8) : 1172-1179. (in Chinese))



· 简 讯 ·

河海大学主办的 4 种科技期刊荣获 2016 年度中国高校期刊奖

2016 年度中国高校杰出· 百佳· 优秀科技期刊评选揭晓, 河海大学主办的 4 种科技期刊获奖。其中,《河海大学学报(自然科学版)》和《水利水电科技进展》获“中国高校百佳科技期刊奖”,《水资源保护》获“中国高校优秀科技期刊奖”,《水利经济》获“中国高校编辑出版质量优秀期刊奖”。

此次评选活动旨在坚持正确的出版导向, 不断提高高校科技期刊的学术影响力和编辑出版质量, 对高校科技期刊在科研活动和学术交流中所起的作用及其质量做出客观的、全面的评价。评委会经过严格的编辑出版质量审读, 结合考察期刊荣誉、行业影响力、国际影响力、传播与利用效能、影响因子、基金论文比、出版差错率等指标进行综合评价, 最终评出杰出科技期刊 20 种、百佳科技期刊 104 种、优秀科技期刊 254 种、编辑出版质量优秀期刊奖 69 项。

(本刊编辑部供稿)