

文章编号: 1006-4710(2013)01-0050-07

基于新型真三轴仪的非饱和土试验研究

许萍, 邵生俊, 李佳坤

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于西安理工大学研制和开发的真三轴仪, 针对现有压力室密封性差以及试样的孔隙水压力、孔隙气压力、试验过程中液压囊加载侧向变形的准确控制和量测等缺陷, 研发了一种轴向刚性加载、侧向柔性加载的真三轴仪压力室试样密封和侧向变形量测装置, 实现了试样有效密封, 试样孔隙水、气压力和侧向变形的独立控制和量测。开展了非饱和重塑黄土在不同固结应力、不同中主应力比控制基质吸力条件下的真三轴试验, 其结果验证了该技术具有良好的应用价值。

关键词: 真三轴仪; 试样密封; 孔隙水、气控制与量测; 侧向变形量测; 非饱和土试验

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A

Experimental Study of Unsaturated Soil by True Tri-Axial Apparatus

XU Ping, SHAO Shengjun, LI Jiakun

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the research and development of the true tri-axial apparatus in Xi'an University of Technology, aiming at the poor sealing of existing pressure chamber, being difficult to controlling and measuring the pore-water pressure, pore-air pressure of the specimen and lateral deformations in the two principal stress direction during testing, a true tri-axial pressure cell sealing and lateral deformation measuring device with rigid axial loading and lateral flexible loading has been developed. The device can achieve the specimen tightly sealed, independently-controlled and independently-measured on pore-water pressure, pore-air pressure and lateral deformations in the two principal stress direction. Also, the true tri-axial tests of unsaturated heavy plastic loess in the case of controlling matrix in different consolidated stresses and different middle principal stress ratios is carried out, and the results verifies that this technology is of better practical application value.

Key words: true tri-axial apparatus; sealed specimen; pore-water pressure and pore-air pressure controlling and measuring; lateral deformation measuring; unsaturated soil shear-test

现今国内外对土的力学特性的认识途径早已超越了直剪仪、单向压缩仪、常规三轴仪等传统的测试仪器的局限, 真三轴试验仪的出现可实现对土体进行复杂应力条件下的试验研究。该类仪器具有全面、真实地反映土单元的三维主应力状态等优势, 是被公认为模拟应力条件最复杂的试验仪器。自国外学者 Kiellman 于 1936 年首次成功设计真三轴以来^[1], 国内外研究者便致力于开发和改进功能更加完善、更能够真实可靠地模拟土体受荷条件的真三轴试验仪。同时国内外先后设计了多种不同类的真三轴试验仪, 尽管设计思路不同, 但其核心思想均着

眼于三个主应力和主应变分量的独立控制和量测^[2], 以及压力室密封以保证非饱和土真三轴试验孔隙水、气控制和量测问题的有效解决。

现有的真三轴仪一般采用圆形橡皮圈固定试样、特制方形橡皮圈以及钢圈与橡胶垫片固定三种方案解决压力室密封问题。三种方案具有良好的可操作性, 但均存在密封不完全或刚柔接触产生摩擦等问题, 从而对试验结果带来干扰, 尤其对非饱和土进行孔隙水、孔隙气压力的控制和量测具有局限性。对于试样在加载剪切过程中应力边角效应的消除和应变的准确量测两方面虽然也已有显著的发

收稿日期: 2012-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272320); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20106118110011)。

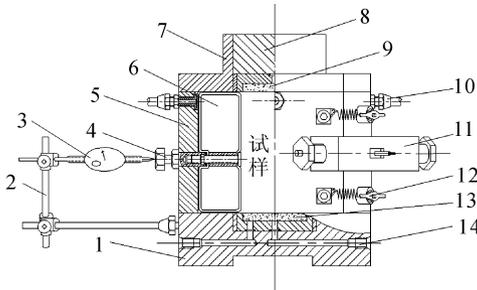
作者简介: 许萍, 女, 博士生, 研究方向为黄土力学与工程。E-mail: 49510489@qq.com。

邵生俊, 男, 教授, 博导, 研究方向为土动力学与黄土力学。E-mail: sjshao@xaut.edu.com。

展^[3-4],但依旧存在试样侧向变形量测范围小^[5]以及测量不准确等缺陷。对于基质吸力量测问题,胡再强等^[6]通过离心模型试验测定一定范围的基质吸力从而对土的非饱和特性进行研究,刘奉银等^[7]针对 GCTS 土水特征曲线仪进行改进,从而解决基质吸力准确量测问题。因此本文将基质吸力的测试与真三轴仪有机地结合,主要针对现有真三轴压力室存在的问题,提出一种新型真三轴试验的密封和侧向变形量测新技术,旨在改善真三轴试样密封装置,既能准确进行水、气控制和量测,又能准确地进行侧向变形的量测,使真三轴试验仪在非饱和土测试方面具有实际的应用价值。

1 新型真三轴仪压力室机构

本文涉及一种轴向刚性加载、侧向柔性加载的真三轴仪压力室结构(参见图1)。



1.压力室底座; 2.电子百分表固定架; 3.电子百分表; 4.侧向位移收缩导杆; 5.压力室外壁; 6.侧向柔性液压囊; 7.压力室顶盖; 8.试样帽; 9.上透水石; 10.液压连通管; 11.压力室柔性囊隔离板转动弹性约束机构; 12.压力室柔性囊隔离板转动弹性约束机构; 13.下透水石; 14.孔隙水压力连通管。

图1 新型真三轴仪压力室结构立面图

Fig. 1 Pressure cell elevation of true tri-axial apparatus

该压力室主要由固定底座、压力室顶盖及压力室侧壁构成^[8]。压力室底座的下端连接有轴向压力活塞,活塞与压力源连接,压力室顶盖上表面轴向传力柱对试样进行轴向刚性加载;压力室底座开设有孔隙水压力连通管,在固结或剪切过程中试样孔隙水可通过下透水石与压力连通管进行试验过程中孔隙水的控制和量测;该压力室结构是通过两对柔性液压囊对试样进行侧向加载,压力室侧壁内对称设置有四个侧压力腔,每个压力腔都放置一个与侧向压力源连接的侧向柔性液压囊,相邻液压囊之间设置压力室柔性囊隔离板,并在压力室侧壁外安装压力室柔性囊隔离板径向运动弹性约束机构以及转动弹性约束机构,该约束机构使试样在试验过程中实现侧向互不干扰加载和变形。压力室侧壁设置有侧向位移收缩导杆以及电子百分表采集装置,在剪

切试验过程中对试样侧向变形进行准确量测。

2 新型真三轴仪压力室试样密封机构

2.1 压力室密封机构的组成

新型真三轴试验仪的立方体试样密封机构,主要包括试样侧壁密封、下透水板密封和上透气板密封,具体涉及固定底座、下透水板、乳胶膜,上透气板、顶盖、压力室外罩以及压力室顶盖等部件。

1) 试样侧壁密封。参见图2,立方体试样内置于正方形断面的特制上、下端半开口的乳胶膜内,乳胶膜自下向上包裹内嵌有陶土板的下透水板、试样和内嵌有多孔玻璃板的上透气板,以此形成试样的侧壁密封。

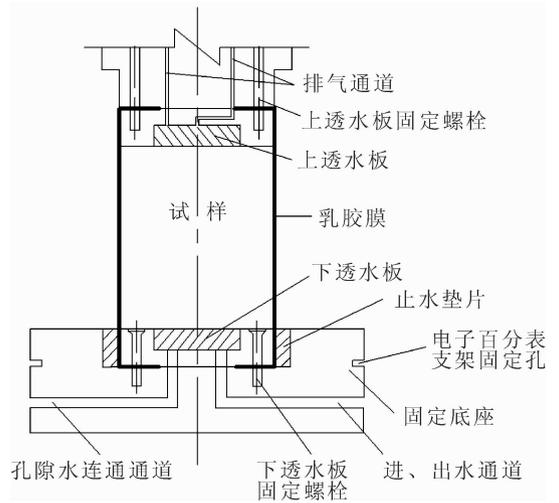


图2 压力室密封机构

Fig. 2 Airproof framework of pressure cell

2) 下透水板密封。参见图3、4,将内置下透水板的乳胶膜放于固定底座凹槽内,同时采用螺栓固定下透水底板于底座凹槽,用条形钢板填补底板与底座缝隙,下透水板预留排水通道与固定底座通道密封对接,在连通道出口处设有控制进、出水阀门,也可与大气连通;排水通道同样与固定底座通道密封对接,关闭排水阀门,出口处连接高精度的液压力变计控制器,即可实现非饱和土样内孔隙水压力的控制。

3) 上透气板密封。参见图2、5,压力外罩与固定底座采用螺栓连接,同时将包裹完成的立方体试样的乳胶膜置于其中,加盖内置有机玻璃板的上透气板,乳胶垫片置于上透气板和试样帽之间,并采用螺栓将其固定,此时将完成上顶板的密封。立方体乳胶膜包裹上透水板并与开设有排气通道的试样帽密封,气压力传感器安装在试样帽开口处,向内与主机部分排气通道相连通,向外与带有压力表和气压

力调节阀的气压表盘、气源处理器及气压源连接,即可实现非饱和土试样内孔隙气压力的控制。

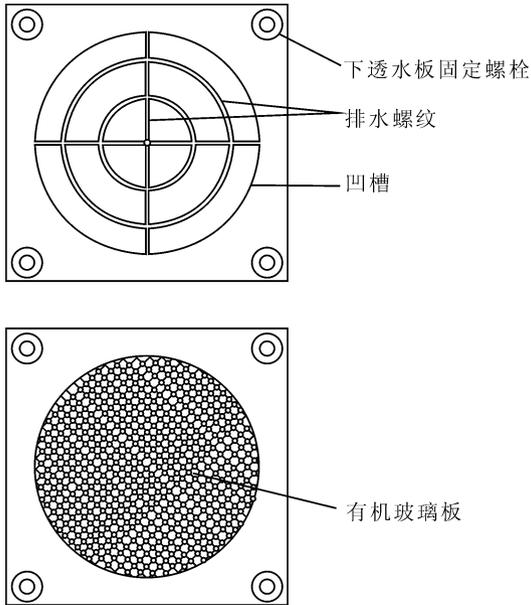


图3 密封透水板示意图

Fig. 3 Permeable pan of the sealing mechanism

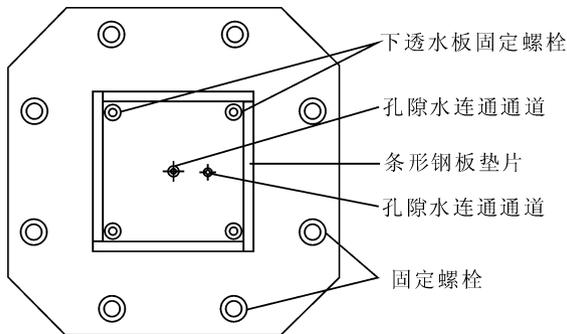


图4 密封底座示意图

Fig. 4 Base of the sealing mechanism

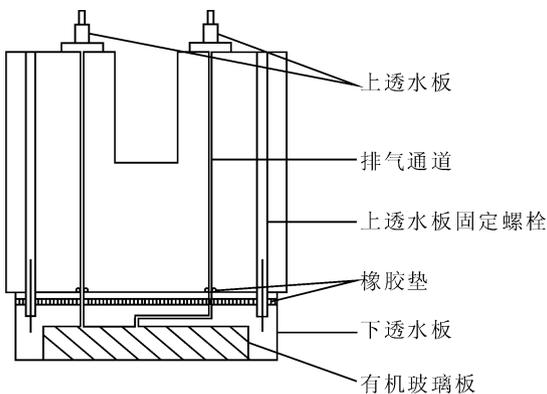


图5 密封试样帽示意图

Fig. 5 The sealed cap of new pressure cell

2.2 工作过程

要保证试验密封良好,首先需要在试验开始前

进行严格安装操作。下透水板的上端内置有陶土板且下端开有环形排水通道和透水中心槽,在下透水板和压力室底座之间放置用于向上包裹试样的乳胶膜和环形的密封垫片,下透水板通过下透水板固定螺栓安装在压力室底座上。

在下透水板与压力室底座凹槽之间,沿透水板四边放置成样膜安装试样,采用抽气孔抽气形成负压的方法,使乳胶膜与成样膜之间紧贴,原理与常规三轴装样方法类似。此时,试样顶部放置多孔有机玻璃板,多孔有机玻璃板置于上透水板中心凹槽内且上端开有环形排气通道,半开口的乳胶膜包裹上透水板,依次放置止水垫圈和试样帽,并用螺栓密封,由包裹的乳胶膜和止水垫片密封上透气板和顶盖之间的缝隙。同时,密封连接上透气板和顶盖排水、排气通道。

安装压力室侧壁外罩和压力室顶盖,用螺栓连接。试样密封、安装完成。对于饱和固结排水剪切试验,三向施加均等压力,打开上、下排水通道,排水固结,剪切过程亦打开上、下排水通道。对于饱和固结不排水剪切试验,三向施加均等压力,打开上、下排水通道,排水固结。剪切过程中关闭上、下排水通道。

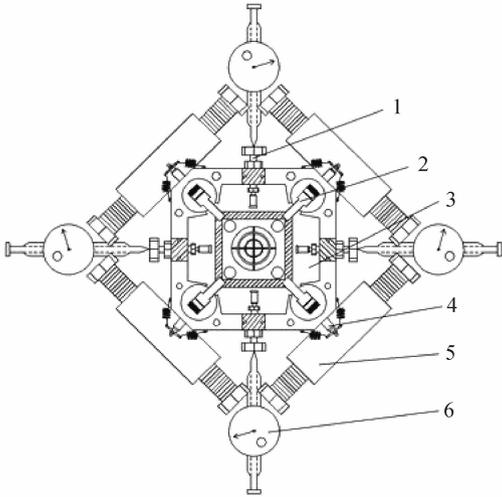
3 新型真三轴仪压力室侧向变形量测机构

3.1 压力室侧向变形量测机构的组成

新型真三轴仪侧向变形量测机构,主要由三个部分构成:包括侧向位移伸缩导杆的连接装置、乳胶膜的密封装置以及电子百分表的采集装置。

1) 侧向位移伸缩导杆的连接装置。参见图1、6,侧向位移伸缩导杆是传递试样变形的核心,伸缩导杆可实现径向自由伸缩,其本身不发生变形,导杆一端连接内端板,试验初始,内端板应紧密完好贴合试样,此时另一端连接的电子百分表记录初始位移;试验过程中,随着三个方向的不同加载,试样分别在大、中、小主应力方向发生变形,侧向柔性液压囊与伸缩导杆一体运动,其伸长或收缩量通过伸缩导杆传输给电子百分表,从而完成试样变形量的记录。

2) 乳胶膜的密封装置。参见图7,乳胶膜密封装置包括置于乳胶膜液压内的刚性密封筒、密封螺栓以及橡胶垫。刚性密封筒包裹于伸缩导杆前段,该段伸缩导杆为浸入侧向柔性液压囊加压液体段,以此避免伸缩导杆长期置于侧向柔性液压囊加压液体中发生锈蚀而影响其使用;伸缩导杆与T型乳胶膜外壁采用密封螺栓连接,使其保证两者结合一体;T型乳胶膜外壁与密封螺栓接口处置有橡胶垫,其目的是避免刚性螺栓摩擦致使T型乳胶膜破损。



1.侧向位移伸缩导杆; 2.压力室柔性囊隔离板; 3.压力腔; 4.压力室柔性囊隔离板转动弹性约束机构; 5.压力室柔性囊隔离板转动弹性约束机构; 6.电子百分表。

图6 压力室整体结构俯视图

Fig.6 The top view of new pressure cell

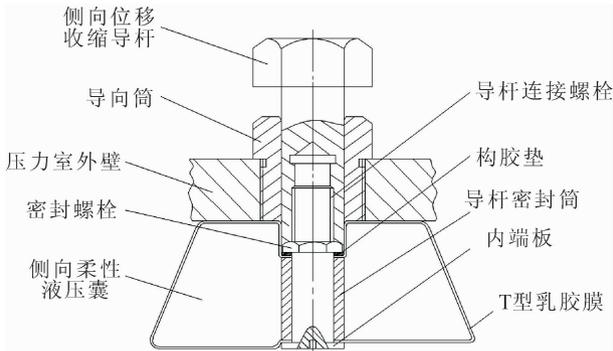


图7 侧向变形量测机构详图

Fig.7 Detail view of the lateral deformation measurement

3) 电子百分表的采集装置。参见图1、6,连接在伸缩导杆一端的电子百分表通过导杆发生径向伸长或收缩变形,指针发生偏转,通过数据采样器,再经过 A/D 转换传输给计算机,从而实现侧向变形的数据采集。

3.2 工作过程

该侧向变形量测结构同样需要在试验开始前进行严格安装操作,首先需将连接有内端板的侧向位移伸缩导杆和导杆密封筒小心地穿过侧向柔性液压囊,导杆密封筒置于侧向液压囊内,内端板与 T 型乳胶膜朝向试样一侧保持同一平面;其次将装有侧向位移伸缩导杆和导杆密封筒的侧向柔性液压囊依次平整地放入四个压力腔;此时将橡胶垫置于 T 型乳胶膜外壁与密封螺栓接口处,橡胶垫主要防止密封螺栓摩擦致使侧向液压囊破损;采用密封螺栓连接侧向位移伸缩导杆与侧向柔性液压囊,以保证两者结合一体;最后将侧向位移伸缩导杆通过导杆连

接螺栓与压力室侧壁外导杆连接。

待上述安装工作做好之后,小心置试样于压力腔内,进而手动调节侧向位移伸缩导杆,使得内端板紧密完好贴合试样,此时 T 型乳胶膜、内端板均匀同时贴紧试样四周;侧向位移伸缩导杆外侧连接电子百分表指针记录初始位移。

试验过程中,随着三个方向的不同加载,试样分别在大、中、小主应力方向发生变形,侧向柔性液压囊与伸缩导杆一齐运动,其伸长或收缩量通过伸缩导杆传输给电子百分表,指针发生偏转,通过数据采样器,再经过 A/D 转换传输给计算机,从而实现侧向变形的数据采集,完成试样变形量的记录。

4 新技术在非饱和土试验中的应用

4.1 试验土样的基本性质

本文试验所采用的土样为陕西省西安市东郊 Q₂ 黄土,取土深度约为 3.0 m。经室内试验测定,此黄土主要物理指标如表 1 所示。

表 1 黄土的主要物理力学指标

比重 G_s	干密度 $\rho/$ (g/cm^3)	天然含 水量/ $\%$	孔隙比 e_0	液限 $\%$	塑限 $\%$	塑性 指数
2.7	1.35	16.5	1	37	23	14

4.2 试验方案与计划

4.2.1 方案设计

本次试验需有效验证新型真三轴仪压力室的密封与侧向变形量测技术的实用性,实现非饱和土控制基质吸力的真三轴试验研究,基质吸力 ($s = u_a - u_w$) 和中主应力比 b 是反映土非饱和特性的两个重要参数,本文控制基质吸力为 100、150 kPa,控制应力路径的 b 值为 0、0.25、0.5、0.75、1.0,固结净应力为 50、100、150、200 kPa。试验计划见表 2。

表 2 试验计划

含水 量/ $\%$	基质 吸力/ kPa	孔隙 气压/ kPa	固结 净应力/ kPa	b 值				
21	100	100	50	0	0.25	0.5	0.75	1
	100	100	100	0	0.25	0.5	0.75	1
	100	100	150	0	0.25	0.5	0.75	1
	100	100	200	0	0.25	0.5	0.75	1
	150	150	50	0	0.25	0.5	0.75	1
18	150	150	100	0	0.25	0.5	0.75	1
	150	150	150	0	0.25	0.5	0.75	1
	150	150	200	0	0.25	0.5	0.75	1

4.2.2 控制条件

1) 固结阶段

通过非饱和土固结试验,控制孔隙气和孔隙水压力改变试样内部原有的吸力状态,待孔隙气压力完全稳定,可认为试样内部吸力分布均匀,试验发现,吸力达到稳定需要 20 h 左右,参考试验规范设定真三轴试验试样均压固结时间为 4 h,故固结阶段时间设定 24 h,即可认为试样完成均压固结和内部吸力稳定。固结阶段,打开底部排水阀门,使得孔隙水压力始终保持与大气相通,此时控制孔隙气压力值为试验设定的吸力值并使其保持不变,固结围压则以较低速率逐渐施加到设定值。

2) 剪切阶段

通过等吸力排水剪切试验进行非饱和土特性分析,即剪切过程中容许试样排水排气但需通过控制外部气压和水压及时补充,使试验过程中吸力保持恒定。

剪切速率设定为 0.005 mm/min,设定试样轴向应变达到 12%,即认为发生破坏,试验过程历经 28 h,符合非饱和土水相气相运动缓慢而且突变小的试验条件,具有合理性^[9]。

4.3 试验结果分析

4.3.1 应力应变关系曲线

在不同中主应力比 b 、不同固结净应力、不同基质吸力条件下,非饱和和重塑黄土的真三轴应力应变曲线如图 8、图 9 所示。

试验结果表明:

非饱和和重塑黄土在干密度为 1.35 g/cm^3 和基质吸力为 150 kPa、100 kPa 条件下应力应变关系曲线变化规律明显,可以发现,由于该黄土颗粒之间存在较强的胶结作用,大、小主应力差均随大主应变关系曲线没有出现明显的峰值点,曲线总体变化趋势呈硬化型,且随着固结围压的增大硬化型趋势愈明显;

同样地,体应变随大主应变的关系曲线总体呈现剪缩趋势,且随着固结围压的减小,中主应力比 b 的增大,体变发展得越快,而后趋于平稳,这是由于土体之间存在孔隙,初始加载的围压作用,引起土颗粒的重新排布,而后土颗粒排布稳定,变形不再产生较大发展。

同时,固结围压一定时,随着 b 值的增大,应力应变曲线总体呈现上升趋势,即随着 b 值的增大,广义剪应力随之增大,土体的抗剪强度增大;

基质吸力为 150 kPa ($w = 18\%$) 其抗剪强度大

于基质吸力为 100 kPa ($w = 21\%$) 的抗剪强度,这是由于大基质吸力条件下使得土颗粒之间的联结作用增强,结构性增强,抗剪强度增大。

所得结论与以往真三轴试验及非饱和直剪试验所得结论基本一致^[10-13]。由此,进一步说明了测试结果的合理性,并验证了该技术的可靠性。

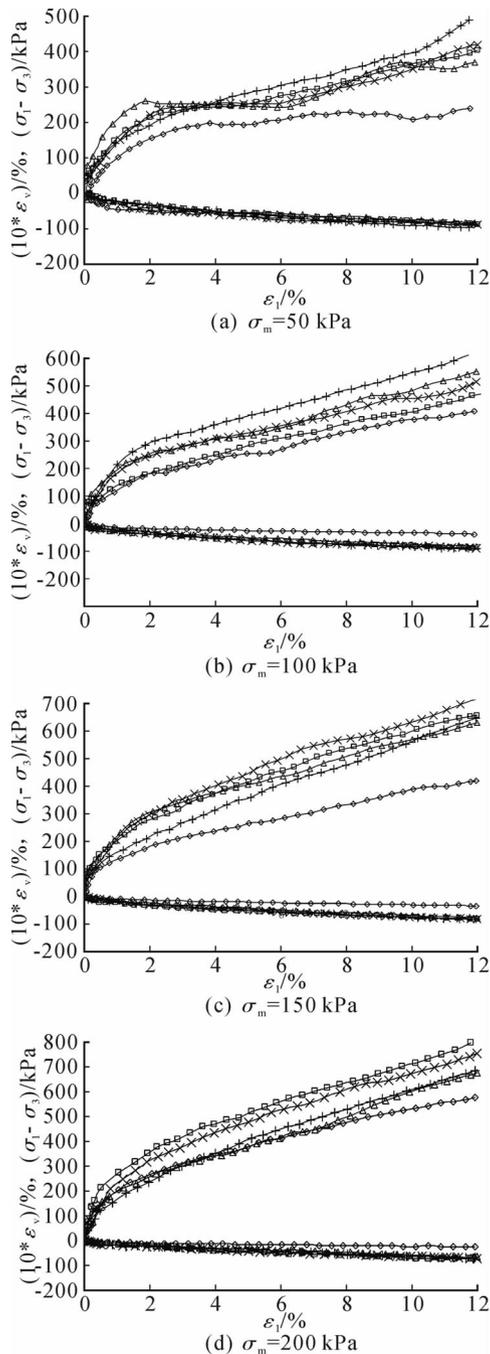


图 8 $w = 18\%$, $s = 150 \text{ kPa}$ 相同固结净应力不同 b 值的应力应变曲线

Fig. 8 $w = 21\%$, $s = 150 \text{ kPa}$ the stress-strain curves of remold loess under same confining net stress and various b values

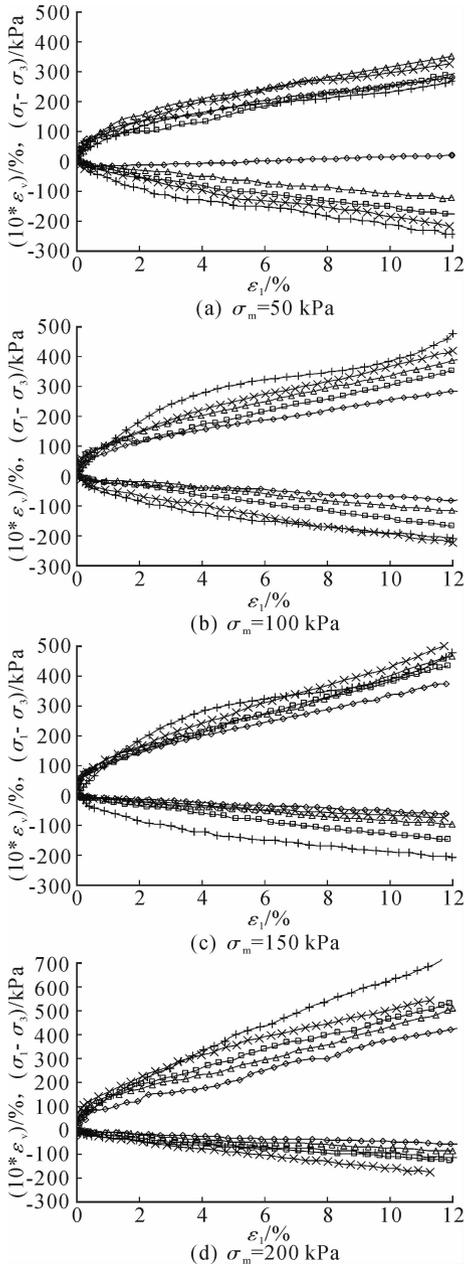


图9 $w = 21\%$, $s = 100\text{kPa}$ 相同固结净应力不同 b 值的应力应变曲线
 Fig.9 $w = 21\%$, $s = 100\text{kPa}$ the stress-strain curve of remold loess under same confining net stress and various b values

4.3.2 非饱和土有效应力强度特性分析

依据 Bishop 有效应力原理,应用饱和度确定基质吸力作用参数,有效应力状态的大、小主应力 σ'_1 、 σ'_3 表达式为:

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= \sigma_1 - u_a + S_r(u_a - u_w) \\ \sigma'_3 &= \sigma_3 - u_a + S_r(u_a - u_w) \end{aligned}$$

式中, σ_1 、 σ_3 为试验峰值破坏点对应的大、小主应力值; u_a 、 u_w 为试验孔隙气压力、孔隙水压力值; S_r 为试样饱和度,吸力为 150 kPa 和 100 kPa 时对应的

饱和度 S_r 分别为 0.48 和 0.56。

以有效大、小主应力确定抗剪强度,得到不同中主应力比 b 条件下有效应力抗剪强度指标 c' 和 φ' , 如图 10、11 所示。

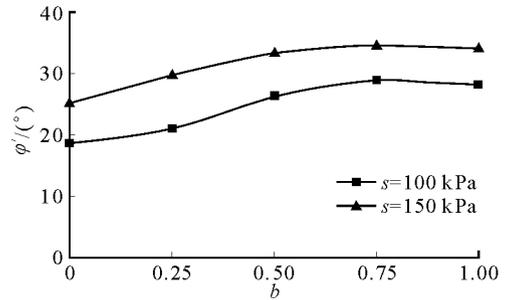


图 10 φ' 随中主应力比 b 的变化图
 Fig.10 The relations between φ' and b

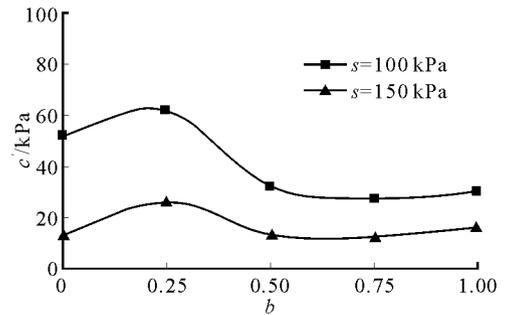


图 11 c' 随中主应力比 b 的变化图
 Fig.11 The relations between c' and b

不同基质吸力条件下有效粘聚力 c' 和有效摩擦角 φ' 随 b 值的变化规律基本一致。不同基质吸力条件下有效粘聚力差异较大,且具体表现在基质吸力越大,有效粘聚力反而小,这是因为吸力的作用,颗粒间的胶结物质溶解,其相互粘结作用减弱;不同基质吸力条件下有效摩擦角差异亦较大,且具体表现在基质吸力越大,有效摩擦角越大,这是因为吸力的作用,促使颗粒间摩擦作用的增强,从而增大了有效摩擦角。

依据土的极限平衡条件,可以得到轴对称三轴应力条件下非饱和土的有效应力极限平衡条件:

$$\sin\varphi' = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c' \cot\varphi' - 2u_a + 2S_r(u_a - u_w)}$$

5 结 论

1) 针对西安理工大学研制的新型真三轴仪压力室机构试样密封问题,提出了适应新型真三轴仪压力室机构加载和试样孔隙水、气控制与量测的密封技术,以及试样侧向变形直接量测技术。

2) 针对真三轴试样密封和侧向变形量测技术,给出了实施原理,研制了配套装置。

3) 在非饱和和重塑黄土的真三轴实验中,实现了试样孔隙水、气控制与量测,完成了控制非饱和土基质吸力的真三轴剪切试验,验证了本文压力室机构中试样密封技术的合理性,并对试验结果进行了简要分析。

参考文献:

- [1] Kiellman W. Report on an apparatus for consummate investigation of the mechanical properties of soils[J]. 1st IC-SMFE, 1963,2:667-669.
- [2] 姜朴. 现代土工测试技术[M]. 北京:中国水利电力出版社,1997.
- [3] Pierre-Yves Hicher, Lade P V. Rotation of principal directions in K_0 -consolidated clay[J]. JGED, ASCE, 1987, 113(7):774-788.
- [4] Wright D K, Gilbert P A, Saada A S. Shear devices for determining. Dynamic Soil Properties; Proceedings of ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics[C]. Pasadena, Calif, 1978.
- [5] 徐志伟. 土体各向异性变形特性真三轴试验研究[D]. 南京:河海大学,2003.
XU Zhingwei. Study on the characteristic of soil anisotropic deformation by true triaxial test[D]. Nanjing: Hohai University,2003.
- [6] 胡再强,谢定义,沈珠江. 非饱和和黄土渠道浸水变形的离心模型试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(3):244-247.
Hu Zaiqiang, Xie Dingyi, Shen Zhujiang. Centrifugal model test on unsaturated loess canal inundation deformation [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(3): 244-247.
- [7] 刘奉银,张昭,周东,等. 影响 GCTS 土水特征曲线仪试验结果的因素及曲线合理性分析[J]. 西安理工大学报,2010,26(3):320-325.
Liu Fengyin, Zhang Zhao, Zhou Dong, et al. Debugging of

GCTS-Type SWCC device and analysis of the corresponding technical indexes[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(3):320-325.

- [8] 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]. Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8):1172-1179.
- [9] 石建刚,邵生俊,陶虎,等. 非饱和土的真三轴试验及强度变形特性分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2011, 33(1):85-90.
Shi Jiangang, Shao Shengjun, Tao Hu, et al. True triaxial tests and strength deformation behaviors of unsaturated soils [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 33(1):85-90.
- [10] 邓国华. 真三轴条件下黄土的结构性参数及结构性本构关系研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
Deng Guohua. Research on structure parameter of loess and structure constitutive relations under true tri-axial condition [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [11] 许萍. 黄土各向异性的真三轴试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2012.
Xu Ping. Study on the loess anisotropy by true tri-axial test[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- [12] 石建刚. 新型真三轴仪的改进及非饱和和重塑黄土强度变形特性分析[D]. 西安:西安理工大学,2011.
Shi Jiangang. Improving on an new true tri-axial apparatus and research on stress-strain relation and strength characteristics of unsaturated remold loess [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [13] 李小林. 黄土非饱和和力学特性的试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2011.
Li Xiaolin. Testing research on unsaturated mechanical properties of loess [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.

(责任编辑 王卫勋)