

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.05.003

# 土工平面应变仪压力室的改进

邵龙潭<sup>1,2</sup>, 阎崇超<sup>1,2</sup>, 曾飞涛<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116085; 2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116085)

**摘 要:** 现有的平面应变试验仪都不能很好地解决接触摩擦的问题, 试验中土样与约束面板之间存在较大的摩擦力影响变形测量的准确性。在总结平面应变仪发展历程的基础上, 根据加载方式将平面应变仪分为 4 类, 分析了现有的平面应变试验仪的特点和存在的问题; 介绍了一种改进的平面应变仪的压力室。改进后的压力室在前、后约束面板与土样之间分别增设一层厚约 3 mm 的密封水膜。在试验过程中, 包裹土样的橡皮膜与密封水膜的硅胶膜紧密贴合而不直接与面板贴合, 可以消除土样与面板之间的摩擦。同时, 新型的压力室还可应用于土样变形数字图像测量系统, 实时测量土样表面的变形分布, 可以比较精确地测量土样的表面变形、剪切带的形成过程及特征。分别使用改进的压力室和未改进的压力室对福建标准砂进行平面应变试验, 前者测得的应力-应变关系曲线的峰值比后者低约 60%。制备相同干密度的土样分别进行不同围压条件下的三轴试验和平面应变试验测取土样的抗剪强度, 使用改进压力室得到的抗剪强度参数与三轴试验测得的结果很接近, 而使用未改进的压力室测得结果则明显不合理。

**关键词:** 平面应变仪; 新型压力室; 土样与面板的摩擦; 数字图像测量

中图分类号: TU 415

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)05-1251-08

## Improvements of loading chamber of plane-strain apparatus

SHAO Long-tan<sup>1,2</sup>, YAN Chong-chao<sup>1,2</sup>, ZENG Fei-tao<sup>1,2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116085, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116085, China)

**Abstract:** The existing plane-strain apparatuses can not avoid the friction between the soil specimen and the constraint panel, which influences greatly the accuracy of soil deformation measurement. This paper presents a brief review of the plane-strain apparatuses. The plane-strain apparatuses are classified into four types according to their loading models. The advantages and disadvantages are discussed for each type of the plane-strain apparatus. A newly developed plane-strain apparatus with modified loading chamber uses the special designed front and rear panels with 3 mm water film to reduce the friction. Friction between soil sample and panel can be eliminated during the test, since the rubber film touches the water-sealing silicone membrane instead of touching the panel. A digital image measurement system is integrated into the apparatus to measure the deformation distribution on soil specimen surface with high accuracy and capability of identifying shear band and its characteristics. The improved and conventional chambers are employed to measure the deformation of Fujian standard sand, respectively. The peak values of the stress-strain curves obtained by the new plane-strain apparatus can be reduced by 60%. Both triaxial and plain-strain tests on the soil specimen with same dry density under different confining pressures measure the soil's shear strength. It is shown that the shear parameters obtained by using the new type of loading chamber are closed to that of the triaxial test. However, the results by using the old one are obviously unreasonable.

**Keywords:** plane-strain apparatus; new type of loading chamber; friction between soil specimen and constraint panel; digital image measurement

## 1 引 言

平面应变试验是土力学和岩土工程中的一种

重要试验。它可以模拟实际工程的平面应变条件, 研究土的应力-应变和强度性质, 也可以在特定的受力和变形条件下为土的应力-应变本构关系研究提

收稿日期: 2015-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51309047)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51309047).

第一作者简介: 邵龙潭, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学基础理论、土工结构稳定分析和土工试验测试技术与仪器研发等方面的研究工作。E-mail: shaolongtan@126.com

供数据支持和验证本构模型。同时,因为在平面应变条件下,土样的受力变形问题是二维问题,边界条件和荷载条件明确、简单,便于数值模拟,所以平面应变试验也是研究土体局部破坏和土体剪切带形成机制等问题的重要手段。

平面应变试验一般采用方形或长方形试样,试验过程中土样在中主应力方向的变形保持为0。最大和最小主应力方向上的变形通常用位移传感器测量。测得的变形是土样的整体变形,不能反映土样的局部变形形态,并且变形的测量精度一般也不够高。另一方面,与三轴试验类似,平面应变试验中也存在一些问题,如方形土样制备困难,存在端部约束效应, $\sigma_1$ 方向的加载块与 $\sigma_2$ 方向的约束之间存在摩擦等问题。为了保证平面应变仪的试验结果合理可信,还需要对仪器作进一步的改进。

有很多文献介绍土工平面应变试验和试验仪器。现有的平面应变仪器按照加载和土样约束方式大体可以分为4类。①刚性加载式平面应变仪<sup>[1]</sup>。压力室采用3组相互平行的刚性板,其中1组刚性板为 $\sigma_2$ 方向的约束,另外2组作为土样的加载边界。②混合边界式平面应变仪<sup>[2-7]</sup>。一般是土工三轴试验仪为基础,增加一套能对长方体土样在 $\sigma_2$ 方向施加固定约束的装置, $\sigma_3$ 方向仍然用压力室中的水进行加载, $\sigma_1$ 方向的加载方式不变。③真三轴式平面应变仪是在真三轴试验仪的基础上开发的<sup>[7-9]</sup>。 $\sigma_2$ 方向的约束板在加载过程中可以随轴向加载板上、下移动,保持与土样的中央高度一致。④ $\sigma_3$ 水囊加载平面应变仪。这类平面应变仪在 $\sigma_2$ 方向上采用两块刚性板来约束试样的变形,在 $\sigma_3$ 方向上用柔性水囊进行加载。

本文首先总结了国内外平面应变仪的发展过程及试验中存在的问题,然后介绍作者对平面应变试验仪的压力室部分所做的改进,主要是显著减小了中主应力方向的土样约束面板与包裹土样的橡皮膜间的摩擦以及应用数字图像测量系统测量土样的表面变形分布。

## 2 平面应变仪的发展及存在的问题

最早发展的是第1类平面应变仪,即刚性加载式平面应变仪。Kjellman<sup>[1]</sup>在首先介绍了1种采用3组互相平行的刚性板做成的平面应变仪,其试样为立方体。Wood<sup>[2]</sup>在此基础上对平面应变压力室进行了改进,通过加长 $\sigma_2$ 方向的尺寸,来尽可能达到 $\varepsilon_2 = 0$ 这一约束条件。这种3组互相平行的刚性板式的平面应变仪是最早开发出的平面应变仪,主要

存在以下缺点:①在加载过程中会出现边角效应,即在加载过程中,相邻的刚性板运动会相互影响;②刚性加载板限制土样的变形。试验过程中,即使受力均匀,土样的变形也可能不均匀,而刚性加载板强制保证土样在加载边界上的变形均匀;③安装试样比较困难。

第2类混合边界加载式平面应变仪通常是由土工三轴试验仪改制而成的。一般是通过螺栓固定两块刚性板之间的距离,即保证 $\sigma_2$ 方向上的 $\varepsilon_2 = 0$ 。而在 $\sigma_3$ 方向仍然采用土工三轴仪器的加载方式,即 $\sigma_3$ 由三轴试验压力室中的水压提供。Drescher等开发出了这种混合边界加载式的平面应变仪<sup>[3]</sup>。Han对该平面应变仪做了改进<sup>[4]</sup>。

Chu和Wanatowski<sup>[5-6]</sup>开发了一种新的混合边界式平面应变仪。在 $\sigma_2$ 方向用两块刚性板固定试样。与Vardoulakis的平面应变仪相比,Wanatowski的平面应变仪能够观察到试样在 $\sigma_3$ 方向上的变化,而且能够测量 $\sigma_2$ 。

Alshibli等<sup>[7-9]</sup>也开发出了一种混合边界式平面应变仪。该平面应变仪采用两块聚碳酸酯板作为 $\sigma_2$ 方向的刚性约束,并且在其中一块的表面刻画网格。与前面的两种混合边界型平面应变仪相比,该平面应变仪的优点是可以透过聚碳酸酯板用照相机拍摄到试样在 $\sigma_2$ 方向的图像。

这类通过刚性板夹具来提供 $\varepsilon_2 = 0$ 约束的混合边界型平面应变仪有以下问题:①因为在 $\sigma_1$ 方向加载时 $\sigma_2$ 方向的刚性板不能被压缩,所以 $\sigma_1$ 方向的加载块会与 $\sigma_2$ 方向的刚性板产生摩擦影响轴向力的测量;②在试验过程中,随着 $\sigma_2$ 方向应力的增大,试样与约束面板之间的摩擦力越来越大,以至于影响试验结果。研究人员早已发现这一问题,并且大多采用在约束面板与橡皮膜间涂抹润滑剂的方式来减小摩擦。但试验研究表明,采用涂抹润滑剂的方法并不能使约束面板与橡皮膜间的摩擦减小到可以忽略的程度。

第3类平面应变仪是在土工真三轴试验仪的基础上改进,或者直接采用真三轴试验仪来完成平面应变试验。这类平面应变仪在加载过程中有独立的加载装置来提供 $\sigma_2$ 方向的 $\varepsilon_2 = 0$ 约束。这类平面应变仪中最有代表性的是日本大阪市立大学的真三轴压缩试验装置<sup>[10]</sup>和香港理工大学的混合边界真三轴仪<sup>[11]</sup>。此外,同济大学、西安理工大学和西北农林科技大学在自行研制的真三轴试验仪的基础上改制成的平面应变仪<sup>[12-14]</sup>。这类平面应变仪主要存在以下问题:①因为在 $\sigma_2$ 方向上有加载装置,所以一般

难以从 $\sigma_2$ 方向实时观察试样剪切带；②与第 2 类平面应变仪一样，试样与 $\sigma_2$ 方向上的约束板之间存在较大的摩擦力。

第 4 类平面应变仪与之前 3 类平面应变仪在结构特点和工作原理上有区别。其最大的特点是 $\sigma_3$ 方向采用柔性水囊进行加载， $\sigma_1$ 方向采用刚性板加载，在 $\sigma_2$ 方向采用刚性板约束。大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室研制的土工平面应变仪采用的是这种加载方式。其最大的特点是应用数字图像测量技术从 $\sigma_2$ 方向上观测试样剪切带的特征<sup>[15]</sup>。这一类柔性水囊加载式平面应变仪主要存在以下问题：①轴向加载刚性板与 $\sigma_2$ 方向刚性板存在摩擦，影响试样的变形；②加载过程中试样与约束刚性板之间同样存在较大的摩擦力，对变形测量结果影响很大。

综上所述，4 种类型的平面应变仪的优缺点可归纳为表 1。

表 1 4 种类型平面应变仪的特点和存在的问题  
Table 1 Characteristics and disadvantages of four types of plane-strain apparatuses

类别	特点	存在问题	摩擦解决方式
刚性加载式	3 组平行的刚性板	相邻加载板之间存在干涉	不详
混合边界式	在三轴试验基础上增加一套刚性约束	$\sigma_2$ 方向存在摩擦	涂抹润滑脂
真三轴式	真三轴仪在一个方向提供约束，另外两个方向进行加载	无法从 $\sigma_2$ 方向观测剪切带	涂抹润滑脂
水囊加载式	用水囊在 $\sigma_3$ 方向进行挠性加载	$\sigma_2$ 方向存在摩擦力	涂抹润滑脂

### 3 改进的平面应变仪压力室结构

现有 4 种类型的土工平面应变仪都存在不同的问题，为了克服这些问题，特别是减小 $\sigma_2$ 方向的摩擦力，笔者设计了 1 种新型的平面应变仪压力室，如图 1 所示。

这种新型的平面应变仪的压力室的基本结构与上述第 4 类柔性水囊加载式平面应变仪相似，即 $\sigma_3$ 方向由一对柔性水囊加载，轴向采用刚性板加载。传统平面应变仪采用前、后面板直接对试样在 $\sigma_2$ 方向施加刚性约束，而改进的平面应变压力室在 $\sigma_2$ 方向提供约束的刚性板与包裹试样的橡皮膜间填充一层 3 mm 厚的水膜，用来减小 $\sigma_2$ 方向上的摩擦力。

改进后的平面应变仪原理图如图 2 所示，试验过程中的轴向力通过连接在轴向加载块上的轴向传



图 1 新型平面应变仪压力室

Fig.1 A new pressure chamber of plane-strain apparatus

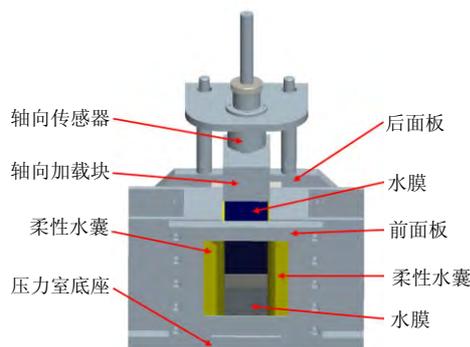


图 2 新型平面应变仪压力室三维图

Fig.2 3-D sketch of new pressure chamber of plane-strain apparatus

感器测得。该平面应变压力室的结构组成和特点如下：

(1) 带水膜的压力室前、后面板。在刚性板靠近试样一侧开一个深为 3 mm 的槽用来充水形成一层水膜，并用高透明度的硅胶膜和压板密封水膜。新的平面应变仪压力室的面板上留有通水孔和排气孔，同时留有密封用的 O 型槽。在平面应变试验过程中，硅胶膜和包裹试样的橡皮膜贴合在一起，二者随试样的压缩变形而变形。由于水的不可压缩性和低抗剪切性，在试验过程中硅胶膜不会贴合到压力室前、后面板上，并且可以减小压力室前、后面板与试样在 $\sigma_2$ 方向上的摩擦力。压力室前、后面板结构如图 3 所示。

(2) 土样尺寸为 100 mm×60 mm×120 mm（长×宽×高），与传统平面应变试样的正方形截面相比，增加了试样在 $\sigma_2$ 方向的尺寸，将正方形截面变成长方形截面(100 mm×60 mm)，来满足平面应变 $\epsilon_2 = 0$ 的约束条件。

(3) 聚四氟加载块。新型平面应变仪压力室轴向采用聚四氟块作为加载块，在试验过程中，聚四氟加载块与 $\sigma_2$ 方向的刚性板之间摩擦力较小，可以有效地减小 $\sigma_2$ 与 $\sigma_1$ 方向之间的摩擦。

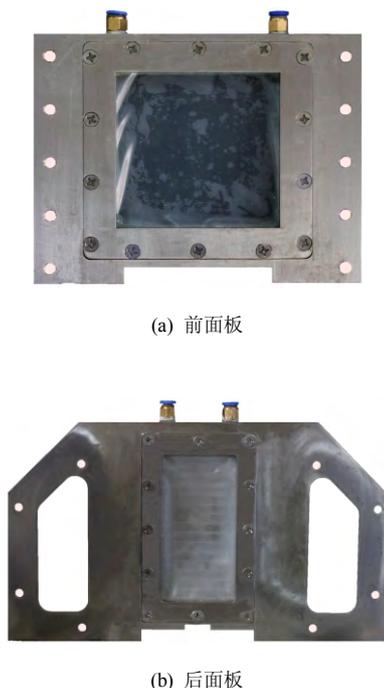


图3 压力室前、后面板

Fig.3 Front and rear panels of plane-strain apparatus

(4) 柔性水囊加载。采用一对柔性水囊对土样的 $\sigma_3$ 方向进行加载,并且可以调节加载速率和载荷大小,同时在试验过程中始终保持围压的稳定,最大载荷达 600 kPa。乳胶水囊的尺寸大小为 148 mm×95 mm×40 mm,厚度为 2 mm,必须保证压力室内不能有任何空隙,因为任何小的缝隙或者尖角都会导致水囊破裂。此外,还需要将乳胶水囊和水压力发生器连接到一起的连接件,该部件既要保证水压力发生器中的水引入到水囊中,又要保证水囊的密封性。

(5) 能从 $\sigma_2$ 方向对试样进行直接观察和监测试样的变形过程。新型平面应变仪在压力室前表面增加一个钢化玻璃板,水膜的密封采用弹性和透明度都很好的硅胶膜,在强度满足要求的前提下,可以从 $\sigma_2$ 方向观测到剪切带形成的全过程。

(6) 将数字图像测量技术应用于平面应变土样的变形测量。数字图像测量是非接触式测量,对试样无扰动,其精度也优于传统的测量方法。同时可以完整直观地得到试样变形破坏的全过程,更便于剪切带问题的研究。

(7) 特殊的试样底座设计,可以对试样抽负压。试样底座连接试样和平面应变压力室底板,保证试样的密封,并且还要完成通水、通气的功能。

(8) 数据的自动采集。所有的传感器均连到一个数据采集卡上,数据采集卡与下位机相连,可以

实时对试验数据进行采集。

#### 4 平面应变土样变形数字图像测量

新型平面应变仪采用数字图像测量技术来测量试样的变形<sup>[16]</sup>。数字图像测量系统由 CMOS 相机、带有视窗的压力室、LED 光源、印有白色方格的试样膜、图像采集卡和计算机处理软件等组成,如图 4 所示。平面应变的试样膜印刷成黑色,并带有白色方块。膜上印有 8 行 4 列 6 mm×6 mm 的白色方格,方格间距为 6 mm。数字图像测量采用亚像素角点识别方法<sup>[17]</sup>,实现平面应变试验中试样表面的变形场测量。测量系统通过 CMOS 相机捕捉试样膜上白色方块标志的角点跟踪测量节点位移,如图 5 所示。然后把角点作为有限元节点,采用 4 节点等参数单元计算应变分布。这种测量方法具有较高的应变测量精度<sup>[18]</sup>。在平面应变试验中引入数字图像测量技术有着重要意义,它可以实时监测试样前表面的变形分布,从而观察剪切带形成的全过程,并对剪切带特征进行研究。试验过程中测得的试样表面的剪切带实物图如图 5 所示,试样表面变形分布如图 6(a)、6(b)所示,从图中可以清晰地看到形成了单一剪切带。



图4 平面应变数字图像系统组成

Fig.4 Component of digital image measurement system

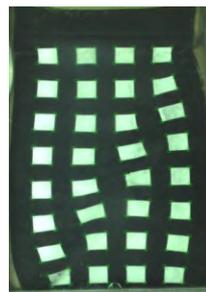
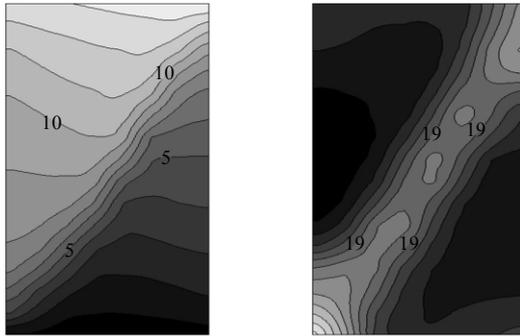


图5 试样剪切带实物图

Fig.5 Image of the shear band



(a) 轴向位移等值线图(单位: mm) (b) 轴向应变等值线图(单位: %)

图 6 试样表面变形/应变等值线图

Fig.6 Deformation/strain contours of the specimen surface

### 5 试验结果分析

为了验证新的平面应变仪压力室前、后面板的设计是否能消除包裹试样橡皮膜和刚性面板之间的摩擦力，分别进行了没有水膜的面板（新压力室）和有水膜的面板（旧压力室）的平面应变试验。在相同的试验条件下进行完全相同的试验。

试验采用福建标准砂，其粒径分布如表 2 所示，控制土样的干密度为  $1.55 \text{ g/cm}^3$ ，围压  $\sigma_3$  为 50 kPa，加载速率为  $0.2 \text{ mm/min}$ ，变形测量采样间隔为 5 s。试验得到的土样的应力-应变关系曲线如图 7 所示。从图中可以明显地看到，前、后面板和土样之间有水膜和没有水膜得到的试样应力-应变曲线形状形态相似，但是在增加了水膜后，与仅涂抹润滑脂的旧平面应变试验数据相比，曲线峰值大大降低，就此例来说降低约 60%。这说明在平面应变试验中，刚性板和土样的橡皮膜间的摩擦会极大地影响试验结果，使得测得的土样强度明显偏大。造成这种结果的原因是，在缓慢加载过程中，由于试样在  $\varepsilon_2$  方向的膨胀，使得橡皮膜与刚性面板之间的摩擦力急剧增大。垂直轴向荷载中包含了土样橡皮膜与刚性板间的摩擦力。将这部分轴力也算作试样承载使得试验结果不合理。采用带水膜的新型平面应变压力室既能在  $\varepsilon_2$  方向对土样施加约束，又能减小甚至消除在加载过程中刚性板与土样橡皮膜间的摩擦力，垂直轴向向上的载荷只是使得土样变形，而不再包括摩擦力，使得试验结果更准确。

表 2 测试土的粒径分布

Table 2 Particle size distribution of tested soils

土名	土体 相对 密度 $G_s$	不同粒径(mm)下土粒组成/ %						$C_u$	$C_c$
		0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.025	0.025~0.005	<0.005			
福建标准砂	2.65	30.10	64.30	5.60	0.00	0.00	0.00	1.73	0.93

注:  $C_u$  为不均匀系数,  $C_c$  为曲率系数。

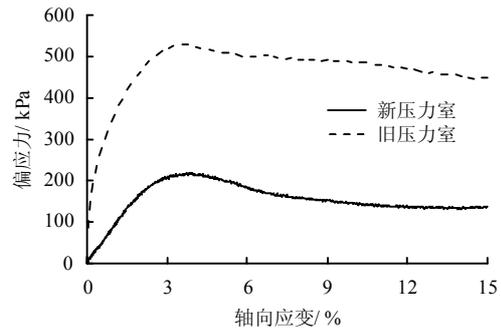


图 7 50 kPa 围压下新、旧压力室试验结果对比图

Fig.7 Comparison of the test results between new and old pressure chambers under confining pressure of 50 kPa

图 8 显示了轴向应变小于 1% 时土样的应力-应变关系曲线。从图中可以清晰地看出，没有水膜时得到的应力-应变关系曲线在加载初期存在一个明显的急剧上升段，表明在此阶段应力增加明显，而应变变化很小。而在有水膜时得到的曲线在此阶段是光滑的。这说明，即使在加载初期，侧向应力比较小的情况下面板和土样橡皮膜间也存在摩擦力。土样的变形是通过图像测量得到的，图 8 中没有水膜的试验曲线表明，在加载初期基本测量不到土样的变形，说明橡皮膜和刚性板之间的摩擦对试验结果影响十分显著。

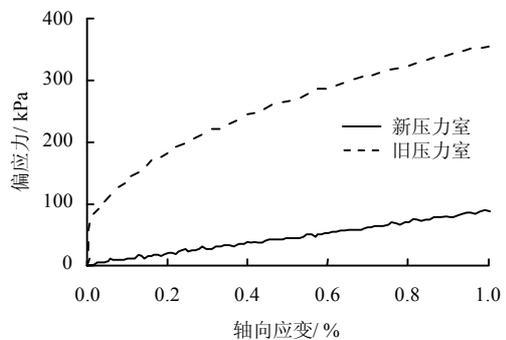


图 8 试验初始段新、旧压力室结果对比图

Fig.8 Comparison of test results in initial segment between the new and old pressure chambers

在围压为 100、150 kPa 条件下分别采用新、旧压力室对相同密度条件下的福建标准砂进行平面应变试验，试验结果如图 9、10 所示，由图可知，曲线峰值均大大降低。上述试验结果表明，在平面应变试验过程中面板与包裹土样的橡皮膜间的摩擦力对试验结果影响很大。摩擦力的存在使得测得的土样应力-应变关系曲线的斜率偏大、强度偏高。而在面板和橡皮膜间增设水膜则能有效地降低甚至消除橡皮膜和面板之间的摩擦力。而且采用无气水充满透明的硅胶膜，不影响相机的拍摄和角点的识别。

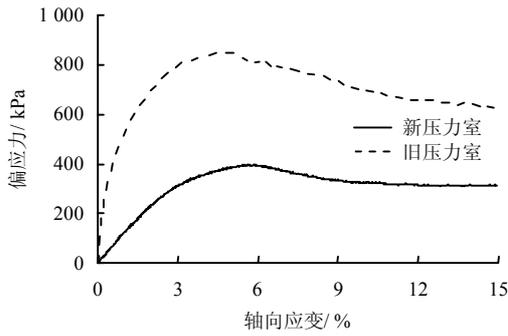


图9 围压为 100 kPa 时新、旧压力室试验结果对比图  
 Fig.9 Comparison of the test results between new and old pressure chambers under confining pressure of 100 kPa

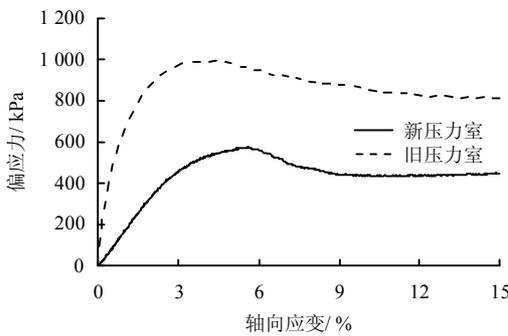


图10 围压为 150 kPa 时新、旧压力室试验结果对比图  
 Fig.10 Comparison of test results between the new and old pressure chambers under confining pressure of 150 kPa

图 11 是试验开始时土样图像,图中的圆圈表示图像识别到的角点<sup>[12, 16]</sup>。从图中可以看出,加装带水膜的面板后,依然可以成功识别土样橡皮膜的网格角点,不影响图像测量,照样可以应用图像测量系统观察土样剪切带的形成过程,研究平面应变条件下土样的剪切带的特征。

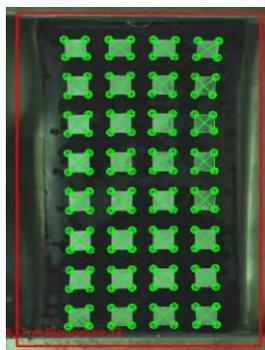


图 11 试样表面方格角点的识别  
 Fig.11 Identification of capturing angular points

用改进后的平面应变仪做了 3 组不同围压条件下的平面应变试验,其应力-应变关系曲线如图 12 所示。将这一试验数据与同等条件下的三轴试验、

应用没有水膜的平面应变仪所进行的试验结果进行对比,根据不同的围压得到的抗剪强度包线如图 13~15 所示。结果表明,采用新型平面应变仪压力室,福建标准砂的内摩擦角为 39°,稍大于在相同试验条件下由三轴试验数据整理得到的内摩擦角(36°),结果合理。

而在没有加装水膜的情况下得到的强度包线存在以下问题:首先是强度线不经过原点,显现出较大的黏聚力,这对于砂土来说是不合理的;其次是所画的切线无法与 3 个摩尔圆均很好地相切,说明试验数据不是很合理;最后是由此得到的内摩擦角为 45°,抗剪强度参数明显不合理。

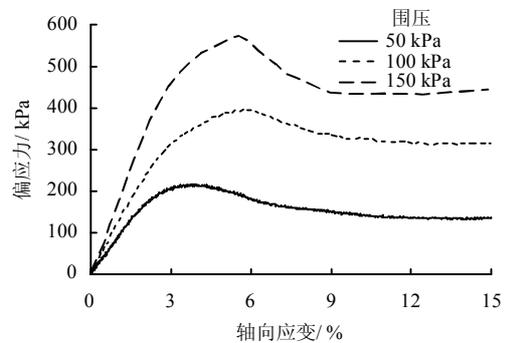


图 12 3 组试验的应力-应变曲线  
 Fig.12 Three groups of stress-strain curve

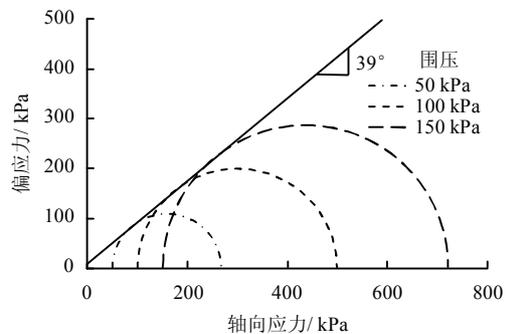


图 13 新平面应变试验数据  
 Fig.13 Test data from the new plane-strain apparatus

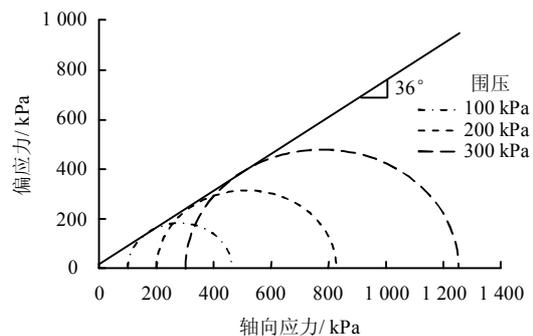


图 14 三轴试验数据  
 Fig.14 Test data from the triaxial apparatus

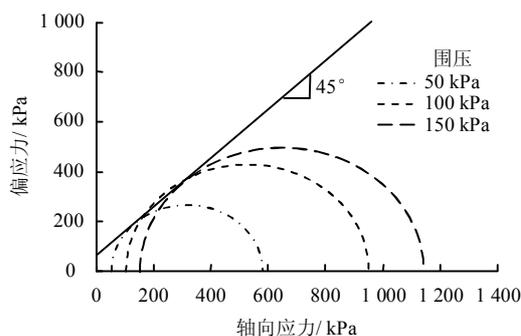


图 15 旧平面应变试验数据

Fig.15 Data from the old plane-strain apparatus

综上所述, 在平面应变仪的刚性面板与土样橡皮膜间增加一层水膜基本上能够消除刚性板与土样橡皮膜间的摩擦影响, 可以得到合理的试验结果。

## 6 结 论

(1) 本文介绍了一种改进的平面应变仪压力室。在土样的约束面板和土样橡皮膜间加装薄层水膜, 减小了面板和土样橡皮膜间的摩擦力; 同时采用数字图像测量系统测量土样的表面变形分布。

(2) 对福建标准砂进行的试验表明, 面板和橡皮膜间的摩擦对测量土的应力-应变关系以及强度试验结果影响很大, 造成了不合理的测量结果, 而加装薄层水膜可以显著减小面板与橡皮膜间的摩擦, 可以获得合理的试验结果。

### 参 考 文 献

- [1] KJELLMAN W. Report on an apparatus for consummate investigation of the mechanical properties of soils[C]// Proceedings of the First Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Boston: Harvard University Publication, 1936: 16—20.
- [2] WOOD C. Shear strength and volume change characteristics of compacted soil under conditions of plane strain[D]. London: University of London, 1958.
- [3] DRESCHÉ A, VARDOULAKIS I G, HAN C. A biaxial apparatus for testing soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1990, 13(3): 226—234.
- [4] HAN C, VARDOULAKIS I G. Plane-strain compression experiments on water-saturated fine-grained sand[J]. *Geotechnique*, 1991, 41(1): 49—78.
- [5] CHU J, WANATOWSKI D. Instability conditions of loose sand in plane strain[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(1): 136—142.
- [6] WANATOWSKI D, CHU J. Strain softening and instability of loose sand in plane-strain compression tests[C]//Geo-Shanghai 2010 International Conference Soil Behavior and Geo-Micromechanics. Shanghai: Geotechnical Special Publication, 2010: 28—34.
- [7] ALSHIBLI A, STURE S. Shear band formation in plane strain experiments of sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(6): 495—503.
- [8] ALSHIBLI A, BATISTE SUASAN N, STURE STEIN. Strain localization in sand: Plane strain versus triaxial compression[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(6): 483—494.
- [9] ALSHIBLI A, STURE S. Sand shear band thickness measurements by digital imaging techniques[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1999, 13(2): 103—109.
- [10] 马险峰, 望月秋利, 温玉君. 基于改良型平面应变仪的沙土特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(9): 1745—1754.  
MA Xian-feng, AKITOSHI MOCHIZUKI, WEN Yu-jun. Study on properties of sand based on improved plane strain test apparatus[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9): 1745—1754.
- [11] 殷建华, 周万欢, 克姆泽曼. 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 Jian-hua, ZHOU Wan-huan, KUMRUZZAMAN M D. New mixed boundary true triaxial loading device for testing study on 3-D stress-strain-strength behavior of geomaterials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(4): 493—499.
- [12] 钟邑桅. 上海软黏土平面应变条件下剪切带形成的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.  
ZHONG Yi-zhi. Study on the shear band of Shanghai soft clay under plain strain condition[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [13] 马林, 邵生俊, 陈昌禄. 黄土结构性对挡土墙土压力的影响分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(3): 596—602.  
MA Lin, SHAO Sheng-jun, CHEN Chang-lu. Impact of loess structural properties on earth pressure of retaining wall[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(3): 596—602.

- [12] 赵文. 岩石力学[M]. 长沙:中南大学出版社, 2010: 149—150.  
ZHAO Wen. Rock mechanics[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 149—150.
- [13] 长江水利委员会长江科学院. 水电水利工程岩石试验规程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 14—15.  
Yangtze River Scientific Research Institute. Code for rock tests of hydroelectric and water conservancy engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007: 14—15.
- [14] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865—875.  
HE Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, et al. Experimental study of rock burst processes of granite specimen at great depth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 865—876.
- [15] 谭以安. 岩爆形成机制研究[J]. 水文地质工程地质, 1989, (1): 34—38.  
TAN Yi-an. Research on the mechanism of rock burst[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 1989, (1): 34—38.
- [16] 贾雪娜. 应变岩爆试验的声发射本征频谱特征[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.  
JIA Xue-na. Experimental study on acoustic emission eigen-frequency spectrum features of strain bursts[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013.
- [17] NOBUKATSU T, YUTO M. Digital watermarking by a holographic technique[J]. **Applied Optics**, 2002, 41(5): 865—873.
- [18] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(2): 286—298.
- [19] SHIOTANI T, OHSTU M, IKEDA K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation[J]. **Construction Building Materials**, 2001, 15(5/6): 235—246.
- [20] 宫宇新, 何满潮, 汪政红, 等. 岩石破坏声发射时频分析算法与瞬时频率前兆研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 787—798.  
GONG Yu-xin, HE Man-chao, WANG Zheng-hong, et al. Research on time-frequency analysis algorithm and instantaneous frequency precursors for acoustic emission data from rock failure experiment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(4): 787—798.
- [21] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(4): 550—564.
- [14] 付中原. 真三轴仪的平面应变改造及黄土平面应变实验研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2009.  
FU Zhong-yuan. Research on the plain strain transformation of true triaxial equipment and plane strain test on loess[D]. Xi'an: Northwest A. & F. University, 2009.
- [15] 祝恒驰. 新型土工平面应变仪的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
ZHU Heng-chi. The exploitation and design of new plane strain apparatus[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [16] 邵龙潭, 孙益振, 王助贫, 等. 到数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 1(1): 30—34.  
SHAO Long-tan, SUN Yi-zhen, WANG Zhu-pin, et al. Study on shear band of fly ash triaxial specimen based on digital image processing technique[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 1(1): 30—34.
- [17] 邵龙潭, 董建军, 刘永禄, 等. 基于亚像素角点检测的试样变形图像测量方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1329—1333.  
SHAO Long-tan, DONG Jian-jun, LIU Yong-lu, et al. Digital image measurement method of measuring triaxial specimen deformation based on sub-pixel accurate corner locator[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1329—1333.
- [18] 刘潇, 邵龙潭, 郭晓霞, 等. 土工三轴试验试样全表面变形数字图像测量系统的精度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 2881—2887.  
LIU Xiao, SHAO Long-tan, GUO Xiao-xia, et al. Accuracy analysis of digital image processing system for triaxial specimens' whole surface deformation measurement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(1): 2881—2887.