

# 柔性边界加载试验机研制\*

孟祥跃 李世海 张均锋

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要** 现有的土力学试验机都是刚性边界加载,也就是等位移边界加载。这种试验机基本上是以研究均匀材料为目的,并且,它主要用于研究材料内部一点的应力-应变状态和强度准则。而实际的土石混合体和破碎岩体内部包含有结构面和节理面等,它们是非均匀、非连续的,在外力的作用下其内部的应力分布是不均匀的。对于这种材料,其真正的受力条件是等应力边界条件。为此,介绍了一种自行研制的三轴试验机——柔性边界加载试验机。该试验装置可以更好地从均匀加载的角度研究非均匀、非连续介质的变形及破坏规律。对这种试验机的原理和设计作了说明;推导出了轴压、围压、平衡压之间的协调关系;同时,还介绍了超声波位移测量系统以及压制试样的装置和压制过程。

**关键词** 岩土力学, 试验机, 柔性边界, 轴压, 围压, 平衡压, 超声波位移测量

**分类号** TU 415

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2004)10-1760-05

## STUDY AND MANUFACTURE OF FLEXIBLE BOUNDARY LOADING TESTING MACHINE

Meng Xiangyue, Li Shihai, Zhang Junfeng

(*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China*)

**Abstract** Existing testing machines for rock and soil mechanics and geo-engineering are all under stiff boundary loading, that is, all the displacements at every point of boundary surface are equal. These kinds of testing machines are aimed at homogeneous materials. The existing testing machines are mainly used to study stress-strain state and strength criterion at a point inside homogeneous materials. This does not correspond with the fracture patterns of rock and soil mixture or fractured rock. The reason is that these materials contain structural faces and joint faces, and they are inhomogeneous and discontinuous. While external forces are applied on them, the stress distribution inside materials is uneven. For these materials, the real state is that stresses acting on every point of boundary surface are equal. In order to study the mechanical behaviour of rock and soil mixture or fractured rock, a new type of triaxial compressive test machine is developed, namely flexible boundary loading testing machine. This testing machine is good at studying the deformation and failure of inhomogeneous and discontinuous media from the angle of loading equability. The working principle and design thought of this machine are illustrated. The correlation among axial pressure, confining pressure and balance pressure is derived. At the same time, the application of ultrasonic displacement measuring system to flexible boundary loading testing machine and the making process of test sample are also presented.

**Key words** rock and soil mechanics, testing machine, flexible boundary, axial pressure, confining pressure, balance pressure, ultrasonic displacement measurement

2003 年 10 月 26 日收到初稿, 2004 年 1 月 17 日收到修改稿。

\* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJ971-A1-01)和国家“973”项目(2002CB412703)资助课题。

作者 孟祥跃 简介: 男, 41 岁, 硕士, 1988 年毕业于中国矿业大学矿山建设专业, 现任副研究员, 主要从事岩土力学试验方面的研究工作。E-mail: mengxy@imech.ac.cn.

## 1 引言

我国正在实施西部大开发战略,并在进行许多大型基础设施的建设,这就要求必须解决好在此过程中造成的地质灾害问题,因此,必须对岩土体的力学性质进行深入的研究<sup>[1~3]</sup>。但由于相关的科学问题没有解决,工程技术的发展受到了很大的制约。无论是工程设计的依据,还是对各种数值计算结果的合理性和可靠性的判断<sup>[4]</sup>,均依赖于岩土体的力学参数。不解决这个关键问题,灾害防治只能是在经验判断和定性分析的水平上徘徊。长期以来,岩体或土石混合体的力学参数的确定,是通过地质钻孔取出试样,或者用土石混合体压制出试样,然后通过做室内土工试验得到的<sup>[5]</sup>。大量的实践证明,该方法给出的试验结果,不能客观地反映地质体的破坏强度。最根本的原因就是现有的土力学试验机都是刚性边界加载条件,即等位移边界加载条件,这不符合实际的破坏条件。真正的破坏条件应该是等应力边界条件。因此,有必要研制出一套等应力边界条件试验机——柔性边界加载试验机。中国科学院力学研究所正在进行中国科学院重要方向性项目“滑坡灾害防治中的关键工程力学问题”的研究,其主要研究任务是:不同条件下山体变形、破坏机理研究;地质力学参数动态测试方法研究;库水涨落引起的山体内部渗流场变化规律研究。这套柔性加载试验机将在该研究项目中发挥重要作用。

材料试验机按照试验条件分为:压缩试验机、拉伸试验机和剪切试验机<sup>[6]</sup>。加载形式包括:动态加载和静态加载。加载条件又分为:单轴加载和三轴加载。一些土工试验中,还可以给试样内部施加孔隙水压力。控制加载的形式包括:控制应力速率和控制位移。通常除了土工试验的三轴试验机的围压边界可以变化以外,材料试验机加载的边界都是刚性的。也就是说,无论试样怎么变形,加载的边界总保持为平面,定义它为刚性边界加载,而对于加载边界随着试样的变形而变化的,则称之为柔性边界加载。

国内外的材料试验机一般都采用刚性边界加载。目前,国内从国外引进的产品包括清华大学、中国矿业大学的可加至 2 000 kN 的刚性边界加载试验机,中国科学院地质与地球物理研究所引进的动态加载试验机,国内生产的有水利水电科学院联合

几个单位研制的三轴试验机等,其加载形式都是刚性边界加载。在国外,一些著名大学(如 MIT 等)的实验室采用的材料试验机也都是刚性边界加载的材料试验机。这种材料试验机的试验目的是给出材料的本构关系和破坏强度,其基本假设是认为材料是均匀的,给出的试验结果可以代表材料中任一点的应力状态。对于金属材料和其他的一些均匀材料,试验可以给出令人满意的结果。而对于像含结构面岩体或土石混合体这类介质,这种给定位移边界的试验,相当于施加了约束条件,当达到一定荷载时,试样的某一部分可以发生破坏,但由于另一部分没有破坏,边界的约束就会阻止破坏发生。因此,这种材料试验机在进行岩体或土石混合体的压缩试验时不能很好地反映客观实际。

美国著名的岩土试验设备公司 ATT(Advanced Terra Testing, Inc.)目前生产的设备中也没有柔性边界加载的材料试验机。从发展趋势来看,材料试验机仍然是向大尺度、高载荷、动态加载、自动伺服控制系统控制的方向发展。但是,这种发展却不能很好地用于研究非均质、非连续介质,由此可以看出研制柔性边界加载试验机的重要性。本文详细介绍笔者所研制的柔性边界加载试验机的原理、设计与试样制备过程,与岩土工程界的同行切磋交流。

## 2 柔性边界加载试验机的原理

岩土体(或称地质体)是指在特定地质构造环境下由岩石、结构面、充填物或土石混合体构成的介质,有着复杂的“初始”状态,它具有非连续、非均匀、流固耦合的特性。岩体内复杂的结构具有随机性,而宏观破坏特性是其内部破坏的统计意义下的结果。目前材料试验机基本上是以研究均质材料为目的,加载边界是刚性的,该类试验主要是研究材料内部一点的应力-应变状态和强度准则,不能满足对岩体进行客观研究的要求。同时,对非均匀的材料而言,采用刚性边界加载方式,会导致边界上作用力的分布不均匀和不确定,这给分析试验结果的规律性带来很大的困难。实际上,岩土体内部是非均质的,其力学参数在各点是不同的<sup>[7]</sup>。试验研究也发现,非均匀、非连续介质在外力作用下其内部应力的分布也是不均匀的。光弹试验已经发现松散砂粒中有“力链”现象,近期中国科学院力学

研究所离散元数值模拟土石混合体的结果也给出了类似的结论。具体表现为：试样内某些区域块体或颗粒之间的作用力很大，而另外的区域受力很小甚至不受力。在试验研究中，如果采用刚性边界加载，力的不均匀性就会反映在边界上，导致边界条件的不确定性。解决该问题的正确办法，就是建立一套试验装置，确保试验中施加的边界力是均匀的，这就要研制的柔性边界加载试验机。为此，采用如下的方法实现柔性边界加载：

(1) 采用高压液体胶囊实现轴向的柔性加载。因为静态流体内部压力处处相等，因此，作用在试样表面上的力是均匀的，但由于土石混合体试样有一定的不均匀性以及非连续性等特点，试样表面上各点的位移可以是不相等的。因此，可以从均匀加载的角度更好地研究非均匀、非连续介质的变形及破坏规律。

(2) 为了保证在试样变形和破坏过程中压力保持不变，加载液体的压力可以通过对密闭的气液容器加压来实现。其原理是：对一定容量的气体而言，固体变形引起的体积变化对气体的压力变化影响可以忽略。

(3) 如果要想测量试样的变形破坏过程，可采用轴向柔性边界加载系统中全部为液体而不包含气体，这样在试样发生变形和破坏过程中，可以近似地认为液体是不可压缩的，那么轴压就会下降，从而可以记录下试样发生变形和破坏的全过程。

(4) 围压的施加与普通三轴试验机相同<sup>[8]</sup>，即围压采用液体或气体作为传力介质，保持围压为某一常压进行试验。

### 3 柔性边界加载试验机的设计

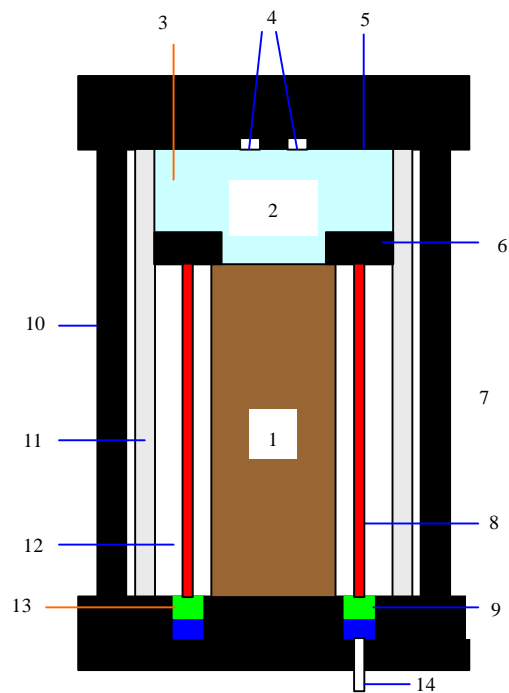
柔性边界加载试验机及测量系统原理图如图 1 所示。它主要由以下几个部分及系统组成：试验机框架、压力室缸体、轴压与围压隔离环、平衡压活塞环、平衡压传力杆、轴压加载胶囊、平衡压加载胶囊；另外，还有轴压伺服加载控制系统、围压伺服加载控制系统、平衡压伺服加载控制系统、超声波位移测量装置等。下面分别给予介绍：

(1) 轴压伺服加载控制系统。这是柔性边界加载试验机实现柔性加载的关键部分，它通过轴向加压液体对试样进行加载。由于流体内部压力处处相等，因此，作用在试样表面上的力是均匀相等的，但试样表面上各点的位移可以不相等。根据需要，

可实现等应力加载，也可实现等位移加载。

(2) 围压伺服加载控制系统。这一部分所实现的功能与普通的三轴试验机相同，即通过压力室内的气体或液体，对试样周围施加某一固定不变的围压。

(3) 平衡压伺服加载控制系统。这一部分控制系统是普通三轴试验机上没有的。由于轴向加载采用了柔性加载，轴向加压液体具有可流动性，因此，必须用刚性的东西把轴压压力室与围压压力室隔开。设计中采用一个活塞环，该环内径向外的一小部分压在试样上表面的外边缘上，从而把轴压和围压的压力室隔开。由于轴向压力大于围压，作用在试样上表面的外边缘上的应力大于作用在试样上表面中间部分的应力，因此，必须有一个压力平衡系统来抵消掉轴向压力作用在轴向加压活塞环上力的一部分，使得作用在试样上表面的外边缘上的应力等于作用在试样上表面中间部分的应力。设计中采用一个平衡压伺服加载控制系统，并通过平衡压加载胶囊、平衡压活塞环以及平衡压传力杆，来抵消掉轴向压力作用在轴向加压活塞环上的部分力。



1 试样 2 轴向加压液体 3 轴压伺服加载控制系统  
4 超声波位移测量装置 5 轴压加载胶囊 6 轴压与围压隔离环  
7 围压伺服加载控制系统 8 平衡压传力杆 9 平衡压活塞环  
10 试验机框架 11 压力室缸体 12 围压压力室  
13 平衡压加载胶囊 14 平衡压伺服加载控制系统

图 1 柔性边界加载试验机及测量系统原理图  
Fig.1 Principle drawing of testing machine

假设轴压为  $P_z$ ，围压为  $P_w$ ，平衡压为  $P_p$ ；轴向加压活塞环面积与压在试样上环的面积之差为  $S_{zh}$ ，平衡压活塞环的面积为  $S_{ph}$ ，平衡压传力杆的面积为  $S_g$ 。为了满足上面提到的压力平衡条件，可以列出下面的平衡方程：

$$P_p S_{ph} - P_w (S_{ph} - S_g) + P_w (S_{zh} - S_g) = P_z S_{zh} \quad (1)$$

即

$$\frac{P_z - P_w}{P_p - P_w} = \frac{S_{ph}}{S_{zh}} \quad (2)$$

或

$$P_p = P_w + (P_z - P_w) \frac{S_{zh}}{S_{ph}} \quad (3)$$

当  $S_{ph}$  与  $S_{zh}$  一定的条件下，轴压  $P_z$ 、围压  $P_w$  与平衡压  $P_p$  之间满足上面的关系式，就可以使试样上表面上每一点的应力都相等。在试验的过程中，围压  $P_w$  为某一常数值， $S_{ph}$  与  $S_{zh}$  也是固定不变的。因此，随着轴压  $P_z$  的增加，平衡压  $P_p$  按照上面的关系式增加，就可满足必要的压力平衡条件，从而测出试样的力学参数。

(4) 超声波位移测量装置。在普通的三轴试验机上，试样的轴向位移测量比较简单。这是因为试样上表面的加载是刚性的，为位移边界条件，每一点的位移都是一样的。而在柔性边界加载试验机上，试样上表面的加载是柔性的，为应力边界条件，每一点的位移都可能不一样，需要测量出上表面的位移分布。在设计中，采用了超声波的方法来测量位移<sup>[9]</sup>。其基本原理就是，波在某种介质(例如水)中的传播速度相等，通过发出和接收信号的时间差即可计算出距离。由于超声波的波长非常短，因此，距离的测量精度比较高。现在，超声测厚仪已被广泛地应用于各个领域。在柔性边界加载试验机上，超声波传感器被布置在试样上方的试验机框架上盖板下表面上。在试验过程中，超声波传感器与试样之间的水层厚度不断变化(增加)，超声波传感器就可以测量出这一厚度的变化过程。该厚度变化就是位移的变化量。对于岩体或者土石混合物，由于有一定的不均匀性和非连续性，各点的位移变化是不相同的。如果布置了许多超声波传感器，就可以测量出不同点上位移变化的分布，使测量出的力学参数更符合实际。图 2 为一小尺寸柔性边界加载试验机的实物图。



图 2 柔性边界加载试验机实物图  
Fig.2 Photo of testing machine

#### 4 试样的制备

在一般土工试验中，试样的制备都是采用击实的方法<sup>[10]</sup>。试样的压实程度与含水量、压实功能和压实方法等有着密切的关系。而本研究中，试样制备是用柔性压实的方法制作的，这种方法压制出的试样更加均匀。试样压制装置原理如图 3 所示，它主要由模具、加压胶囊、传力胶囊、加压装置等组成。

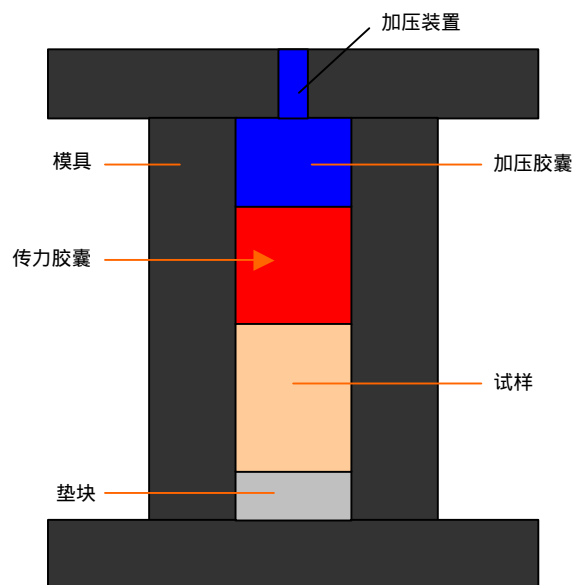


图 3 试样压制装置原理图  
Fig.3 Principle drawing of sample pressed

在压制试样时,首先,把垫块放在模具的底部,然后加进去一定量的要压制试样的材料(如土石混合物)。通过加压胶囊、传力胶囊和加压装置进行加压。第1层压制完毕后再压制下1层;在压制下1层之前,要先把压制试样的上表面弄松,以保证试样的均匀性;直到压制出所需高度的试样。图4为压制试样实物图。



图4 压制试样模具实物图

Fig.4 Photo of mould for making testing sample

## 5 结 论

(1) 提出了柔性边界加载试验机的概念。通过

对柔性边界加载试验机与普通三轴试验机的对比,可以发现:柔性边界加载试验机可以从等应力均匀加载的角度更好地研究非均匀、非连续介质的变形及破坏规律。

(2) 给出了柔性边界加载试验机的工作原理及其设计。

(3) 加工出了小尺度柔性边界加载试验机。

(4) 给出了试验过程中轴压  $P_z$ 、围压  $P_w$  与平衡压  $P_p$  之间满足的协调关系。

(5) 介绍了试样位移的测量方法——超声波位移测量系统。

(6) 介绍了试样的制作方法,并加工出了压制试样的模具。

## 参 考 文 献

- 1 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:水利电力出版社,1983
- 2 于学馥,郑颖人,刘怀恒等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京:煤炭工业出版社,1983
- 3 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社,1980
- 4 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利电力出版社,1996
- 5 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998
- 6 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1994
- 7 胡小荣,魏雪英,俞茂宏. 三轴压缩下岩石强度与破坏角角度的双剪理论分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(7):1 093~1 098
- 8 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,2000
- 9 建筑工程部技术情报局. 超声波在建筑工业中的应用[M]. 北京:建筑工程出版社,1960
- 10 中华人民共和国行业标准编写组. 土工试验规程(SL237-1999)[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999