

双联动软岩渗流 - 应力耦合流变仪的研制

陈卫忠¹, 于洪丹¹, 王晓全², 贾善坡³, 郝庆泽⁴, 黄 胜¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 3. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023; 4. 长春朝阳试验仪器有限公司, 吉林 长春 130507)

摘要: 为研究软岩的长期力学特性, 研制双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪。该仪器特别适用于软岩、硬土在不同应力条件下的流变特性。仪器采用先进的伺服控制、滚珠丝杠和液压等技术组合, 能自动稳压、自动记录应力 - 位移曲线、温度历时曲线。设备除了能够实现普通三轴试验机的功能, 由于其独特的设计形式, 还可以同时对 2 个试样实现相同轴压、不同围压、相同水压的力学试验; 可以进行围压控制、孔隙水压力控制, 同时可以测量孔隙水压力等等。使用情况表明, 该试验装置结构简单, 稳定性好, 精度高, 是一套功能齐全、使用方便的试验装置。

关键词: 岩石力学; 软岩; 流变; 渗流 - 应力耦合; 三轴流变仪

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)11 - 2176 - 08

DEVELOPMENT OF A DOUBLE LINKAGE TRIAXIAL TESTING MACHINE FOR HYDRO-MECHANICAL COUPLING IN SOFT ROCK

CHEN Weizhong¹, YU Hongdan¹, WANG Xiaoquan², JIA Shanpo³, HAO Qingze⁴, HUANG Sheng¹

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *China Water Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin, 300222, China*; 3. *School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China*; 4. *Rising Sun Testing Instrument Co., Ltd., Changchun, Jilin 130507, China*)

Abstract: In order to study the long term mechanical properties, the double-linkage triaxial testing machine for hydro-mechanical coupling in soft rock is developed. This machine is particularly applicable to study the rheological characteristics of soft rock and hard soil under various stress conditions. Using the technology of servo-controlled, ball screw and hydraulic pressure, this machine can automatically stabilize voltage and record stress-strain variation curve and temperature duration curve. In addition to the function of ordinary triaxial device, because of the unique design form of this machine, it not only can implement the mechanical tests simultaneously of two samples with same axial pressure, different confining pressures and same water pressure but also execute confining pressure control, pore water pressure control and its survey, etc.. The service condition shows that it is a convenient machine with complete functions, simple structure, good stability and high precision.

Key words: rock mechanics; soft rock; rheology; hydro-mechanical coupling; triaxial rheometer

收稿日期: 2009 - 04 - 21; **修回日期:** 2009 - 07 - 24

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(50720135906); 国家自然科学基金资助项目(40772184); 国家高科技研究发展计划(863)项目(2007AAZ108)

作者简介: 陈卫忠(1968 -), 男, 博士, 1990年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

1 引言

软岩是世界上分布最广泛的一类岩石, 软岩工程问题已成为当今岩石工程中最复杂工程问题之一^[1]。软岩在复杂的力学环境下表现出来的特性中, 大变形和非线性流变特性表现得尤为突出, 且工程流变发生的持续时间长。迄今, 对软岩非线性流变特性的研究成果尚未全面掌握其变形破坏规律, 许多软岩巷道在生产过程中出现底板鼓起、顶板下沉、开裂、破裂以致冒落现象。工程实践表明, 地下硐室开挖后, 岩体的应力调整和变形破坏是随时间变化发展的, 对于软岩工程而言, 其应力 - 应变的时间效应就更为显著, 因此, 在地下工程尤其是软岩工程围岩稳定性分析中, 必须考虑岩石的流变特性, 而室内试验是获得软岩的流变特性最直接、最有效的方法之一。

很多岩土工程中遇到的软岩问题, 比如核废料地质处置问题, 泥岩作为一种软岩由于其均质和低渗透性而被国际上众多国家作为可以储存核废料的 3 种备选场地之一(花岗岩、盐岩、泥岩)。核废料贮存都选在较深的地下, 当泥岩作为被选场地时, 泥岩往往处于渗流 - 应力耦合作用下, 长期力学特性更加复杂, 对其力学特性进行研究是十分必要的, 室内试验研究是获得泥岩力学特性的重要途径之一。试验中, 为了更好地模拟泥岩原场应力状态, 要求试验过程要使得其应力状态尽量接近其初始应力, 而该过程对试验设备有很高的要求。比如: 通常泥岩在取出岩芯加工成样后, 已并非原来的饱和状态, 这就要求在试验过程中, 对泥岩先进行饱和, 通常的做法是将泥岩试样在真空罐内抽真空后进水饱和, 对有些试样这种方法是可行的, 但是对于有些试样(譬如比利时进行核废料贮存的 Boom 泥岩)在真空罐中饱和取出后已经不能成样, 且此方法并非在泥岩的初始应力状态下饱和, 要使泥岩在一定的有效应力下饱和, 普通的试验机是很难做到的, 因为这要求对围压和水压都要进行精确的控制, 才能达到试验要求, 另外, 有些泥岩饱和时间长, 工序复杂, 如何能找到一种合适的方法, 一台合适的试验设备, 来解决这些复杂软岩工程问题已成为迫切的需要。

国外的试验领域发展较快, 早在 20 世纪 50 年代英国英斯特朗公司已应用测力传感器, 60 年代美

国 MTS 公司、德国申克公司生产了液压伺服试验机和计算机控制的试验机, 70 年代日本岛津公司开发了计算机控制的大型结构试验机, 申克公司制造了大型疲劳试验机和结构模拟等一系列涉及到工况力学的试验仪器。目前, 电液伺服试验机在岩石力学领域已得到相当广泛的应用。国际上生产这类试验装置的以 MTS 公司、Instron 公司和岛津公司等最为著名。图 1 为澳大利亚 CSIRO 研制的新三轴应力 - 渗透仪。中国科学院武汉岩土力学研究所目前已有多个进口设备, 其中有英国 GDS 公司生产的 GDS, 法国 TOP Industrie 公司生产的流变仪(见图 2)以及美国 MTS 公司生产的 MTS 等。



图 1 新三轴应力渗透仪

Fig.1 New triaxial stress permeameter



图 2 流变仪

Fig.2 Rheological machine

国内试验领域的新仪器和新设备研制起步较晚, 直到 20 世纪 70 年代, 长春试验机厂研制出 50 t 力动静万能试验机, 长春试验机研究所以及济南、天水红山试验机厂研制出电液伺服试验机, 才把我国动态试验机水平提高了一大步^[2]。近年来国内试验机行业正加快步伐, 广泛采用计算机控制、电液伺服、高精度测力和测变形技术, 研制出各种金属

和非金属的疲劳试验仪器和工况动态力学试验设备，填补了国内空白，很多设备达到了国际先进水平，同时，也使我国的试验领域得到了进一步扩展。图 3、4 分别给出了由长春朝阳试验机场研制生产的微机控制岩石三轴流变仪和 TAW - 2000 岩石三轴试验机。



图 3 微机控制岩石三轴流变仪

Fig.3 Triaxial rock rheological apparatus with microcomputer control



图 4 TAW - 2000 岩石三轴试验机

Fig.4 TAW - 2000 triaxial rock test machine

自 1981 年以来，中国科学院武汉岩土力学研究所、武汉大学水利水电学院、长江科学院、兰州冰川冻土研究所等单位与长春朝阳试验机场进行合作，先后研制成功了 RYS - 7 型岩石三轴流变仪、RYJ - I5 型岩石剪切流变仪、RTJ - 200 型冻土剪切流变仪、RLW - 2000 岩石三轴流变试验系统^[3]、RLW - 20 软岩三轴流变仪等，均较理想地解决了

岩石的流变问题，基本实现了岩石蠕变试验仪器必须具备的基本条件。但是，目前专门针对岩石渗流 - 应力耦合流变力学特性研究的试验设备较少，尤其是软岩渗流 - 应力耦合作用下的流变问题。图 5 给出了土和软岩三轴试验以往经常使用的 SJ - 1AG 三轴仪，其主要存在以下缺点：该仪器不能在载荷控制和位移控制之间进行切换，对于以载荷形式控制的试验仪，主要是通过施加砝码来实现，很难实现一定速率下的载荷加载，而以位移方式控制的试验仪，其位移加载的变速箱范围为 0.002 2~4.14 mm/min，共 15 种速度，很难满足对位移加载要求较高的试验；与此同时，试样的径向变形不能通过传感器测量，只能通过试样的排水体积进行测量；此外，其围压加载范围为 0.0~1.6 MPa、反压加载范围为 0.0~1.6 MPa、孔压测量范围(0.0~1.0 MPa)均较低；并且仪器的采集频率不能人为设定，存在一定的局限性。以上这些缺点都给要求较高的试验(如要求加载方式进行切换或者具体载荷加载速度具有较高要求)带来了麻烦。



图 5 SJ - 1AG 三轴仪

Fig.5 SJ - 1AG triaxial test machine

本文所介绍的双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪(见图 6)正是为软岩的研究而设计的，它是由中国科学院武汉岩土力学研究所和长春朝阳试验机场^[4]联合研制的。双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪是一套功能多样化、体积小量化的岩石力学试验系统，它特别适用于软岩的单轴及三轴力学特性研究。仪器除了克服了 SJ - 1AG 型试验仪的缺点外，可以实现对 2 个岩石试样同时进行相同轴压、不同围压的三轴试验；可同时通过传感器量测环向变形或者排水法测量体积等。本文对该仪器的研制及主要技术性能进行说明，并将其应用于工程实际，最后对试验得到的部分试验成果进行介绍说明。

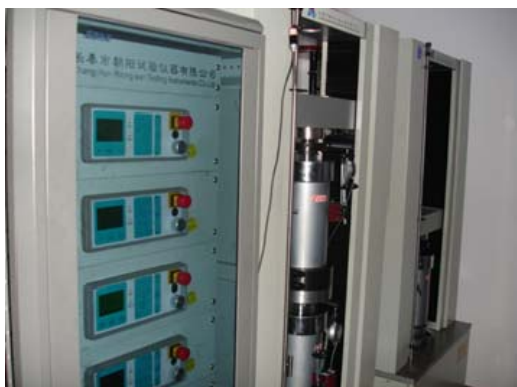


图 6 双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪
Fig.6 Double-linkage triaxial testing machine for hydro-mechanical coupling in soft rock

2 仪器的主要技术性能和特点

2.1 实现功能

双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪除了能够实现普通三轴试验机的功能：如单轴、三轴压缩试验等，该试验机还可以同时对 2 个试样实现相同轴压、不同围压、相同渗透压的力学试验。可以进行轴向压力控制、轴向位移控制、轴向变形控制，并且这 3 种控制方式可以平滑切换；可以进行围压控制、孔隙水压力控制，同时可以测量孔隙水压力，检查试样的饱和程度；可以做轴向恒压力试验、恒速率加压试验、恒位移试验、恒速率位移试验、恒变形试验、恒速率变形试验；可以做恒围压试验、恒速率围压试验；还可以做孔隙水的恒压试验、恒流量试验、恒速率水压试验、恒速率流量试验等。

2.2 仪器组成

双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪系统原理如图 7 所示。仪器主要由以下 4 部分组成来实现上述功能，它们分别是：轴向加载部分(主机)、围压加载部分(压力室和加载装置)、孔隙水压加载部分、控制部分(计算机和控制器)，上下 2 个三轴压力室间通过垫块均匀传力。下面分别介绍各部分的工作原理：

(1) 轴向加载部分：这部分包括了门式加载框架、加载机构(包括伺服电机、齿型带轮减速机构、滚珠丝杠传动机构等)。其工作原理是：伺服电机通过减速机构带动滚珠丝杠，在滚珠丝杠上的移动横梁对试样施加加试验力，移动横梁上的试验力传感器(见图 8)把力的大小检测出来并传送到控制器内，控制器把试验力的测量信号进行处理，并与设置试验力数据进行比较，然后给出纠偏信号，使施加的力值与设置的力值趋于一致，这个过程就是轴向加载系统的闭环控制。

(2) 围压加载部分：围压部分里的压力室是放试样和给试样加压的装置，密封好的试样放在压力室内，然后加上高压油使压力室内达到需要的压力，围压的加载是通过一个油缸来实现的，用伺服电机来调整油缸内的压力，也就是压力室内的压力，安装在油缸出油端的压力传感器检测油压，传送到控制器内，控制器把压力的测量信号进行处理，并与设置的压力数据进行比较，然后给出纠偏信号，使施加的压力值与设置的压力值趋于一致，这个过程就是围压加载系统的闭环控制。

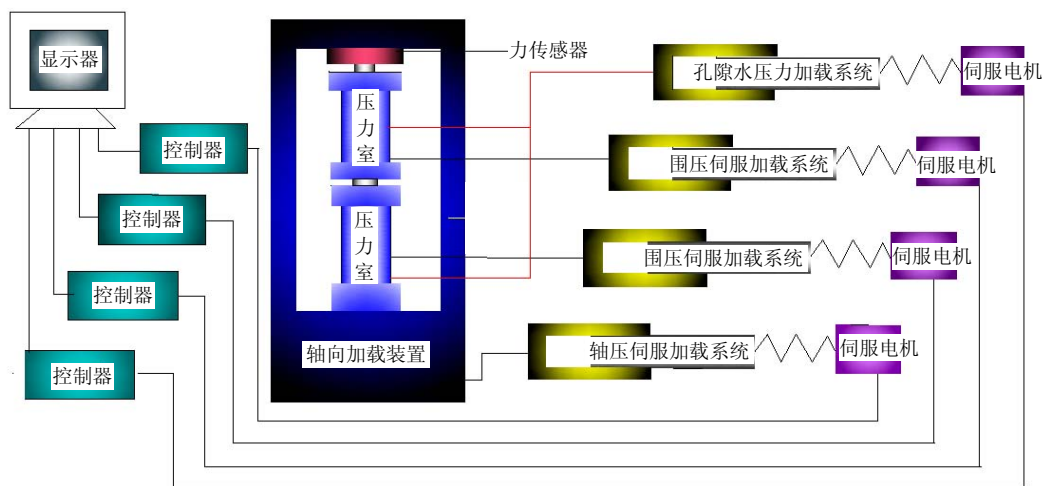


图 7 双联动渗流 - 应力耦合流变仪系统原理图

Fig.7 Schematic diagram of double linkage triaxial testing machine for hydro-mechanical coupling in soft rock



图 8 HBM 力传感器
Fig.8 HBM force sensor



图 9 计算软件及试验曲线
Fig.9 Calculation software and test curve

(3) 孔隙水压力加载部分：孔隙水压力加载系统是由控制器来控制伺服电机，通过减速机及齿型带带动齿轮旋转，推动活塞后面的滚珠丝杠，使活塞做往复运动，在水压缸内对水进行加压。活塞的位移量由编码器检出，并变成脉冲信号送到控制器中，水的压力值经压力传感器变成电信号送到控制器。这一加载部分亦是渗流试验的渗流控制部分，在进行渗流试验时，渗流量控制器可按设定的参数来控制水压或流量，并且 2 种控制方式可以平滑切换。水压控制器也是采用 DOLI 公司的 EDC60 全数字控制器。具体的渗流流量可通过控制器的活塞行程或者用流量计进行量测控制。

(4) 控制部分：这部分包括了计算机和控制器两部分。计算机内的控制软件可以设置各部分的全部数据，同时管理着控制器传送过来的数据，把传过来的数据进行储存、显示、计算等，还负责实时画出多种试验曲线(见图 9)；控制器选用了德国 DOLI 公司的 EDC60 原装全数字闭环控制器(见图 10)。这种控制器体积小、功能全、可靠性强、操作简便、可塑性强而且控制精度高，可单独工作，也可由计算机联机工作。在联机状态下，可以实时地绘出多种试验曲线。控制器把全部的测量信号进行放大、转换、传送，同时控制器还控制各个执行部分伺服电机控制器从而控制了伺服电机，使其按指令运行。这部分是机器的核心，这部分决定了机器的主要技术参数。

另外，在试验过程中对于变形的监测，可以通过位移传感器和径向变形传感器来分别进行轴向和径向变形的测量，还可通过孔隙水压加载部分的活塞行程或者流量计得到排水试样的排水体积。对于更复杂的温度 - 渗流 - 应力耦合问题，该仪器内部留有预留接口，如果有需要，可以安装加温系统后进行进一步的 THM 耦合问题研究。



图 10 控制柜及控制器 EDC
Fig.10 Control cabinet and controller EDC

2.3 主要技术指标和参数

双联动渗流 - 应力耦合流变仪主要技术指标和参数如表 1 所示。

2.4 仪器主要特点

双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪具有下面突出的特点：

(1) 由于该设备采用压力室串联的形式，仪器可同时对 2 个试样实现相同轴压、不同围压、相同水压的三轴流变试验，在既能节省试验时间的同时，又能保证 2 试样加载、变形及外界条件的同步性，又能降低试验成本。

(2) 由于仪器可对孔压和围压充分控制，使得岩土试样可以实现在保持一定有效应力的情况下，通过围压和孔压控制，对试样进行饱和或其他试验操作。

(3) 轴向、围压和孔隙水压加载系统的控制部分采用全数字 EDC 控制器控制，EDC 控制器加载分辨率高，加载平稳，控制波动度较小；可以采用力控制或变形控制，也可以在试验过程中进行控制方式的平滑切换；在长时间的试验中，可以进行间断控制，控制的方式和间隔时间可以人为设置。

(4) 稳压系统采用交流伺服电机进行自动稳

表 1 双联动渗流 - 应力耦合流变仪主要技术指标和参数

Table 1 Main technical specifications and parameters of double linkage triaxial testing machine for hydro-mechanical coupling in soft rock

轴向加载部分				围压加载部分				孔压加载部分				其他					
最大试验力		位移测量		轴向变形测量		径向变形测量		最大围压		最大孔隙水压力		孔隙水流量测量		试样尺寸	功耗	噪声	工作时间
技术参数	精度	技术参数	精度	技术参数	精度	技术参数	精度	技术参数	精度	技术参数	精度	技术参数	精度				
20 kN	≤ ±0.1%	0~500 mm	≤ ±0.5%	0~12 或 0~25 mm	±0.001 mm	0~4 mm	≤ ±1%	5 MPa	≤ ±0.02%	4 MPa	≤ ±0.02%	0~150 mL	≤ ±1%	50 mm×100 mm 38 mm×76 mm 可任意选择	AC 380V 4 kW	≤45 dB	> 2 000 h

压, 长时间稳定性能良好。数据采集系统软件在 WINDOWS 操作平台上运行, 可以自动进行数据处理。

(5) 试验机还配置了 24 h 不间断电源 UPS, 能够保证在断电的情况下试验机仍能正常工作, 试验操作不受影响, 并保证试验数据的连续采集和存储。

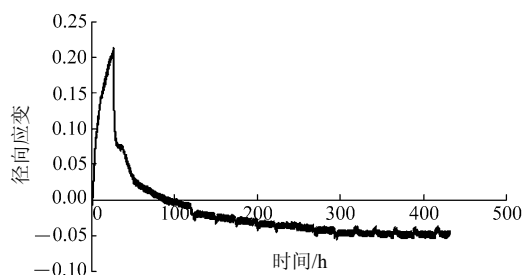
(6) 全方位的保护系统, 过载停机和液压油状态的提示等安全保护功能保证了设备可以长时间无人操作而自动工作。

3 相关试验成果

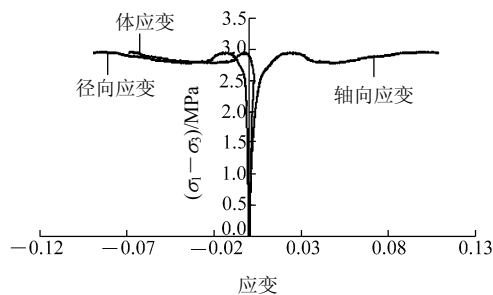
双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪已在国际合作项目——Boom 泥岩的渗流 - 应力耦合长期力学性质和国内厦门海底隧道强风化花岗岩、淮南煤矿巷道泥岩及大宁河溶崩角砾岩等的力学性质研究中得到了应用。

3.1 应用实例 1

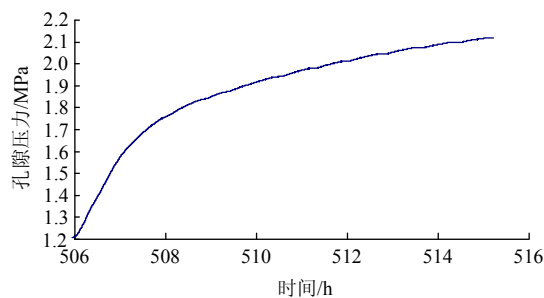
图 11 为该三轴流变仪用在 Boom 泥岩的三轴试验结果。Boom 泥岩力学特性研究是比利时为评价核废料库安全稳定性而设置的。该试验主要进行了 Boom 泥岩的渗流 - 应力耦合三轴力学特性研究, 以后还将通过该仪器进行 Boom 泥岩的长期流变特性研究。试验首先对 Boom 泥岩试样进行饱和, 其具



(b) 饱和过程中径向变形变化曲线



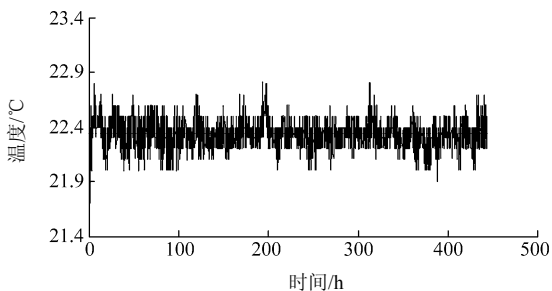
(c) 压缩过程中应力 - 应变变化曲线(剪切速率: 20 μm/min)



(d) 压缩过程中孔隙压力变化曲线

图 11 Boom 泥岩渗流 - 应力耦合三轴试验(不排水, 压缩为正, 膨胀为负)

Fig.11 Hydro-mechanical coupling triaxial test for Boom clay(undrained, compression is positive, swelling is negative)



(a) 试验过程中温度变化曲线

体操作过程包括: 先对试样施加 2.5 MPa 的各向相等压力后, 对试样进行饱和, 并每天通过检查孔压

系数 B 的变化情况来判断试样的饱和情况。试样饱和后, 将各向相等压力在原来的基础上以一定速率增加 1 MPa, 然后以 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ 的速率对试样进行压缩试验(其具体试验成果及本构模型建立将另文发表)。试验结果很好地反映了 Boom 泥岩渗流 - 应力耦合作用下的力学特性, 且试验后发现 Boom 泥岩具有一定的自愈合能力(与 M. V. Geet 等^[5]人的研究结果一致)。

3.2 应用实例 2

图 12 给出了厦门海底隧道强风化槽段强风化花岗岩渗流 - 应力耦合三轴试验结果。由于厦门海底隧道强风化槽段岩石力学性质复杂, 其主要的力学特征是强度低、压缩性高、自稳和自承能力差, 给衬砌结构的设计和施工工艺带来一系列特殊性问题^[6, 7]。因此, 通过本试验设备来进行强风化花岗岩力学特性渗流 - 应力耦合特性的研究。其具体的试验过程(包括饱和过程和压缩过程)与节 3.1 中 Boom 泥岩三轴试验相似: 首先施加围压 1.0 MPa、反压 0.5 MPa, 待试样饱和后在围压 1.0 MPa 下对强风化花岗岩试样在排水条件下以 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ 的剪切速率对试样进行剪切, 同时对试样排水进行检测。由图 12(a)可以看到通过变形传感器测得的体应变与排水体积测得的体应变较一致, 说明变形传感器量测准确可靠。图 12(b)中给出了通过排水测量得到的

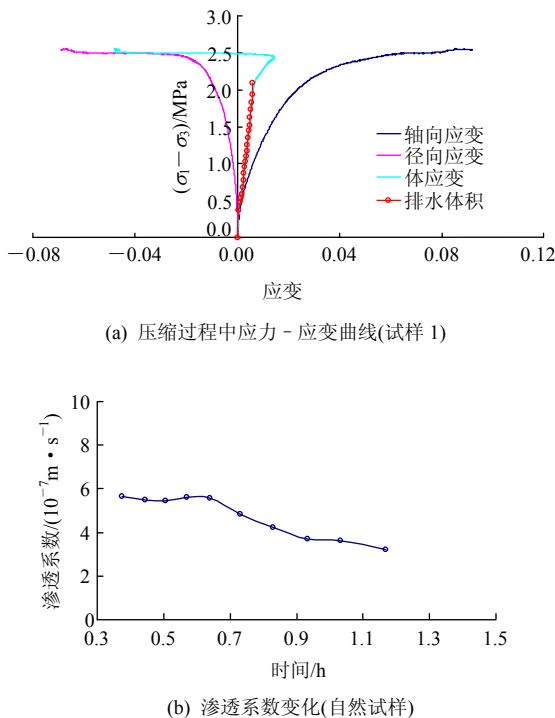


图 12 强风化花岗岩渗流 - 应力耦合三轴试验(排水)
Fig.12 Hydro-mechanical coupling triaxial test for strongly weathered granite(drainage)

试验初期试样的渗透系数变化。本试验研究结果已经在厦门海底隧道稳定性分析中得到应用。

3.3 应用实例 3

图 13 为双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪测得的淮南新集矿区泥岩流变试验结果。新集矿区泥岩室内流变试验是为了解决巷道围岩控制与支护问题而进行的, 软岩巷道围岩控制与支护一直是困扰煤矿井巷施工, 尤其是井深大、围岩软弱、破碎、松散、膨胀、地压大巷道的关键技术难题之一, 是煤矿工程技术重点关注的问题。新集矿区泥岩室内流变试验是在对试样施加 4.0 MPa 围压和 2.0 MPa 反压的情况下, 采用分级加载的方式(具体加载顺序参见图 13), 每级载荷流变一周左右, 试验完成后通过对试验曲线进行综合分析, 建立泥岩流变力学模型, 并将试验结果应用到软岩巷道围岩的稳定性分析中。图 13(a), (b)分别为双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪上压力室和下压力室测得的试验结果, 比较试验结果可以看到: 在 2 岩石材料较一致且试验条件相同的情况下, 上下压力室对同种岩石测得的结果一致性较好, 该仪器试验结果稳定可靠。

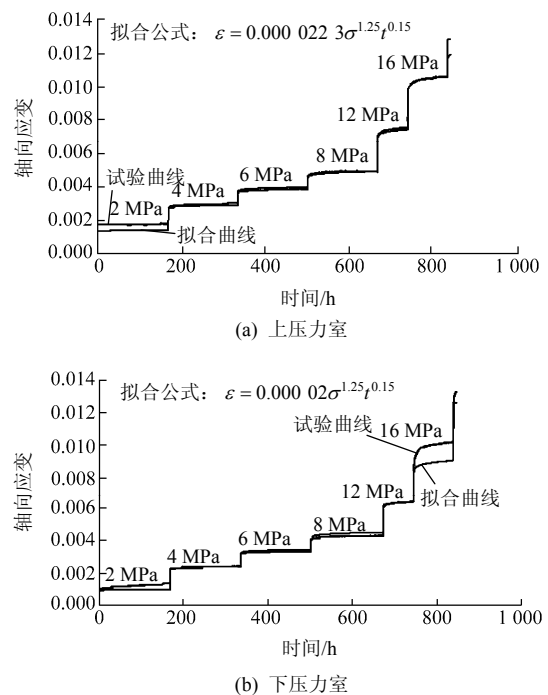


图 13 淮南泥岩三轴流变试验曲线(围压为 4 MPa)
Fig.13 Triaxial creep test curve for mudstone in Huainan (confining pressure 4 MPa)

3.4 应用实例 4

图 14(a)和(b)为双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪测得的大宁河溶崩角砾岩流变试验结果。

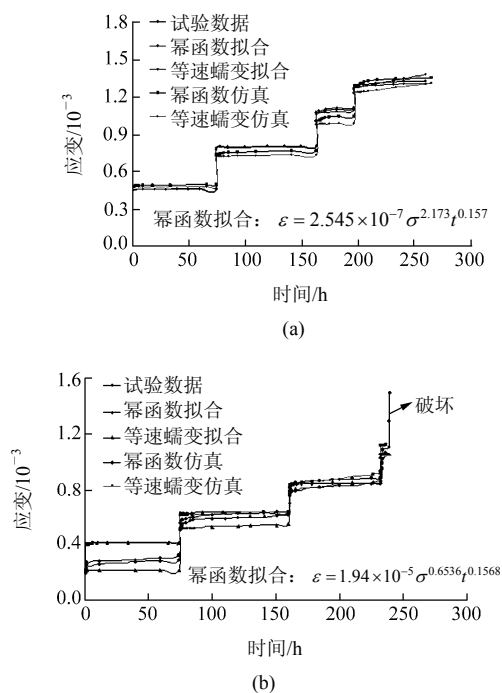


图 14 溶崩角砾岩流变试验结果

Fig.14 Creep test results for solution-collapse breccias

大宁河溶崩角砾岩流变试验是为了解决大宁河特大桥工程建设中遇到的溶崩角砾岩长期变形特性对拱座稳定性影响的关键难点问题而设置的。大宁河溶崩角砾岩流变试验亦采用分级加载方式, 其具体施加顺序为: 8, 12, 16, 20 MPa, 每级载荷流变 48 h 左右。通过系统地试验与理论研究, 得到溶崩角砾岩的力学性质并建立流变力学模型, 并将建立的流变力学模型与试验成果进行对比分析, 最后通过数值仿真对流变力学模型进行验证, 研究成果已在中国建设中最长的上承式钢管拱桥——巫山大宁河大桥长期稳定性分析中得到应用。

此外, 通过双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪新疆泥岩等进行了流变试验, 并将试验结果应用于工程实际。使用情况表明, 该三轴流变仪设计合理, 使用方便, 稳定可靠, 精度高, 是一套功能较全, 性能较好地适用于软岩的三轴流变仪。

4 结 论

本文介绍了一套特别适用于软岩的双联动渗流 - 应力耦合三轴岩石流变试验装置, 该设备除了能够实现普通三轴试验机的功能, 还具有其独特的创新点, 如:

(1) 由于其采用了串联的形式, 可以同时对 2

个试样实现相同轴压、不同围压、相同水压的力学试验。

(2) 可以进行轴向压力控制、轴向位移控制、轴向变形控制, 并且这 3 种控制方式可以平滑切换。

(3) 可以进行围压控制、孔隙水压力控制, 同时可以测量出水压力, 检查试样的饱和程度。

试验的全过程实现自动采集、自动记录、自动储存, 并自动绘制变形与时间等关系曲线。使用情况表明, 该装置结构简单, 稳定性好, 精度高, 能够很好地满足软岩工程中研究岩石渗流 - 应力耦合流变力学特性研究的需要。

参考文献(References):

- [1] 范秋雁. 膨胀岩与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2008.(FAN Qiuyan. Swelling rock and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008.(in Chinese))
- [2] 郝庆泽. 试验领域的进一步扩展[J]. 试验技术与试验机, 1992, 32(3): 6 - 7.(HAO Qingze. Further extended of test field[J]. Test Technique and Test Machine, 1992, 32(3): 6 - 7.(in Chinese))
- [3] 赵仁义. 岩石蠕变试验仪器的研制[J]. 试验技术与试验机, 1992, 32(3): 11 - 14.(ZHAO Renyi. Development of rock rheological apparatus[J]. Test Technique and Test Machine, 1992, 32(3): 11 - 14.(in Chinese))
- [4] 周火明, 郝庆泽, 钟作武, 等. RLW - 2000 岩石三轴流变试验系统研制[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(3): 55 - 57.(ZHOU Huoming, HAO Qingze, ZHONG Zuowu, et al. Development of RLW - 2000 rock triaxial creep testing system[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005, 22(3): 55 - 57.(in Chinese))
- [5] GEET M V, BASTIAENS W, ORTIZ L. Self-sealing capacity of argillaceous rocks: review of laboratory results obtained from the selffrac project[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008, 33(Supp.1): 396 - 406.
- [6] 陈卫忠, 于洪丹, 郭小红, 等. 厦门海底隧道海域风化槽段围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 873 - 884.(CHEN Weizhong, YU Hongdan, GUO Xiaohong, et al. Research on stabilities of the surrounding rock through the weathered strata for Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 873 - 884.(in Chinese))
- [7] 梁巍, 朱光仪, 郭小红. 厦门东通道海底隧道土建工程设计[J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 99 - 103.(LIANG Wei, ZHU Guangyi, GUO Xiaohong. Civil engineering design of Xiamen Dongtongdao subnazine tunnel[J]. Central South Highway Engineering, 2006, 31(1): 99 - 103.(in Chinese))