

文章编号: 1000-7598 (2009) 10-3200-09

新型数控岩石节理剪切渗流试验台的设计与应用

王 刚^{1,2}, 蒋宇静^{2,3}, 王渭明¹, 李廷春¹

(1. 山东科技大学 土木建筑学院, 青岛 266510; 2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 青岛 266510;
3. 日本长崎大学工学部, 日本 长崎 852-8521)

摘 要: 岩石节理的应力渗流耦合性质对工程结构稳定性的影响普遍存在于各种岩体工程中, 而进行岩石节理的室内剪切-渗流耦合试验, 是一种有效的研究手段。采用新型数控岩石节理剪切渗流耦合试验台, 应用全数字伺服控制系统, 实现了对试验进程的平稳控制以及试验数据的多路同步实时采集和处理; 通过剪切盒的精细设计, 提高了剪切盒可承受的渗透压力值, 并保证试验过程密封性能良好的同时实现了柔性边界条件。在恒定渗透压力作用下, 分别进行了不同边界条件下的剪切渗流耦合试验, 试验结果验证了该试验装置的可靠性和实用性, 将能为岩体工程的合理设计提供有效数据依据。该试验台可以应用于地下核废料储存、水利水电地下洞室、水下隧道、采矿等工程有关问题的研究中。

关 键 词: 岩石节理; 剪切盒; 高渗透压力; 恒定法向刚度; 全数字伺服控制

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Development and application of an improved numeric control shear-fluid coupled apparatus for rock joint

WANG Gang^{1,2}, JIANG Yu-jing^{2,3}, WANG Wei-ming¹, LI Ting-chun¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, SUST, Qingdao 266510, China; 2. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 3. Department of Civil Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan)

Abstract: The hydraulic and mechanical properties of rock fractures are of considerable interest in several areas of rock engineering, such as radioactive waste, dam foundations, excavation of tunnels and caverns, geothermal energy plants, oil and gas production. Coupled shear-flow test is an effective measure researching the Hydro-Mechanical (HM) coupling character of rock joint. The experimental device was designed for a fracture to be subjected to normal loading and shear displacement by placing the fracture in a shear box. In order to retain a water seal between the lower and upper shear boxes and less friction resistance during shear, special rubber loop and silica sealant are installed between the lower and upper shear boxes. Through nice design, the shear box could keep favorably sealed under higher seepage pressure. In the meantime, a whole number-controlled computer control system has been developed to automatically accommodate the change in stress and displacement under CNL, CNV and CNS boundary conditions and also described to present performance of instrument control, data acquisition and storage operations of the novel apparatus. A series of tests using the artificially prepared joint specimens is conducted on the apparatus under different boundary conditions. The results of the conducted shear-fluid tests validate its reliability and practicability.

Key words: rock joint; shear box; high seepage pressure; constant normal stiffness; whole numeric servo-controlled control system

1 引 言

在石油矿山开采、核废料埋藏、水利水电、交通、边坡等工程中, 地下水对岩体工程的稳定性有着重要影响。一方面地下水可改变岩体的应力和变形, 另一方面岩体结构面的几何特征及其物理力学性质对地下水渗流起决定性作用。岩体中节理裂隙

的渗透和变形模量都远大于岩石基质, 因此, 岩体中各类结构面与地下水的相互作用往往直接决定着工程结构的稳定与安全, 例如, 在煤矿生产中, 工作面顶板或底板涌水, 由于开采活动改变了开采区域附近岩体的渗透性质, 地下水沿岩体结构面进入采矿作业空间; 在海底隧道建设中, 隧道开挖改变了隧道围岩内节理裂隙分布及其渗透性, 引起涌水

收稿日期: 2008-12-28

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助。

第一作者简介: 王刚, 男, 1976年生, 博士, 主要从事岩体裂隙渗流特性及锚固节理岩体稳定性研究方面的工作。E-mail: wanggang1110@gmail.com

量等的升高,甚至地下洞室的突水垮塌、采矿工程中的巷(隧)道突涌水、核废料储存区域的泄漏等灾难性事故也与节理岩体变形和渗透性质的恶化密切相关。分析和研究裂隙岩体的水力学特性已成为水文地质、岩体力学、水工结构、采矿工程等许多学科和工程领域的重要课题。

岩石节理面变形主要表现为节理面闭合和节理剪胀,两者共同改变和影响着节理的渗透特性。剪胀是节理面沿着粗糙和起伏表面做切向滑动时产生的法向膨胀,它与节理岩体的渗透性密切相关,因此,要对节理的剪切-渗流耦合特性进行研究,而进行岩石节理的室内剪切-渗流耦合试验,是一种有效的研究手段。岩石节理剪切渗流耦合试验中的关键技术是试验边界条件的实现,即位移、荷载边界条件和渗流边界条件。在岩石节理的剪切过程中,当上、下节理面在剪切力作用下产生相对位移时,通过在剪切盒进水口和出水口之间设定一定的水压差,即渗透水压力,来实现岩石节理内的水沿指定路径流动,同时要保证剪切盒在垂直水流方向边界上不发生水流渗漏,因此必须对剪切盒做良好的密封。

国内外学者在各种条件下进行了剪切渗流耦合试验的试验研究^[1-5]。最初的一致剪切情况下的流动试验是 Sharp 和 Maini 在板岩的劈裂面上进行的。剪切试验中没有施加法向外载,只有试件本身的自重,因此节理面的剪胀不受制约。当剪切位移达到大约 0.7 mm 时,节理裂隙面的传导性增长了 2 倍。Makurat^[6]在 NGI (norwegian geotechnical institute) 进行了大于自重的法向应力作用下的节理剪切渗流耦合试验,试验在片麻岩节理裂隙上进行。在 2.8 m 的恒定水压和 0.82 MPa 的有效法向荷载条件下,当剪切位移达到大约 1 mm 时,节理渗透性升高了 2~3 倍。A. Makurat 等^[7]应用改造的双轴应力试验机,进行了自重条件下的剪切渗流耦合室内试验研究,研究表明,节理试件的较小剪切位移可以使节理的渗透系数增加几个数量级,该设备存在剪切位移较小和无法施加法向力荷载的缺点。Esaki T. 等^[8], I. W. Yeo 等^[9]和刘才华等^[10-11]所用的节理剪切-渗流耦合试验机,可以同时施加法向力、剪切力和渗透水压,但该渗透水压的施加是采用注水方式来实现的,即从节理面的中间注水,向四周流的辐射流,这种方式与真实情况存在一定的偏差。H. S. Lee, T. F. Cho^[12]应用自行研制的密封剪切盒,并将其安装在 MTS815 试验机上,分别对大理岩和花岗岩的拉断节理进行了剪切渗流耦合试验分析研究,但该

设备所能承受的渗透水压较小。R. Olsson, N. Barton^[13]利用试验设备进行了一系列的剪切渗流耦合试验分析研究,并提出了改进的渗流应力耦合模型,该试验通过上下水阀来施加水头渗透压力,其水头也仅有几米大小。蒋宇静等^[14-16]等应用自行研制开发的数控剪切-渗流耦合试验机,进行了剪切渗流耦合试验研究,取得较好新颖的试验效果和创新性。夏才初等^[17]进行了岩石节理剪切-渗流耦合试验系统的开发和研制研究,对其结构组成和功能进行详细介绍,并取得了较好的试验成果,但其渗透压力也只达到 0.5 MPa。

由于试验条件的限制,特别是渗透密封手段,国内关于岩石节理剪切-渗流耦合试验的试验设备还比较缺乏,已有设备的剪切盒所能承受的渗透压力也往往比较低。基于已有研究基础,笔者联系生产厂家并对剪切渗流耦合试验台进行了改良设计,开发了新型数控剪切渗流耦合试验台,着重对试验机的剪切盒单元及数控部分进行了改进设计。应用特殊材料和密封技术对剪切盒进行了改良设计,实现了良好的柔性边界条件,能保证剪切盒在高渗透压力作用下(高达 3 MPa)正常稳定运转;采用自动化数控技术及虚拟仪器,实现了对试验过程和试验参数的精细控制,以及试验数据的有效充分采集。并通过一系列剪切渗流耦合试验验证了该试验台的良好性能。

2 试验系统的主要功能与技术参数

2.1 试验系统主要功能

在节理试件法向方向上,试验台有 3 类可控边界条件:恒定法向应力(CNL)、恒定法向位移(CNV)和恒定法向刚度(CNS)。平行节理剪切方向,可施加剪切力或位移、渗透压力。在 3 种边界和荷载条件下可进行节理剪切试验、节理渗透试验、闭合应力-渗透耦合试验、剪切应力-渗透耦合试验、岩石节理的剪切渗流流变试验和岩石节理的辐射流试验。

2.2 试验机主要技术指标

试验机关键技术指标主要体现在垂直加载单元、水平加载单元及其伺服控制部分、渗流加载单元及其伺服稳压系统。试验台主要技术指标为垂直加载单元,最大垂直荷载达 600 kN,作动器最大行程达 400 mm,位移传感器量程达 20 mm,测量控制精度达到示值的 $\pm 1\%$;水平加载单元,最大水平荷载达 600 kN,作动器最大行程达 400 mm,位移传感器量程达 50 mm,变形控制取多支位移传感器平

均值, 测量控制精度达到示值的 $\pm 1\%$; 垂直和水平向伺服控制部分, 荷载加载速率最小最大分别达 0.01 kN/s 和 100 kN/s , 位移加载速度 (位移控制) 最小最大速率分别达 0.01 mm/min 和 100 mm/min , 位移控制稳定时间为 10 d , 其测量控制精度达到示值的 $\pm 1\%$ 。渗透压力伺服稳压系统 (稳态法和瞬态法), 最大水压力 (渗透压力) 能达 3 MPa , 渗透压力稳压时间为 10 d , 水的流量测量量程最小和最大分别为 0.001 mL/s 和 2 mL/s , 相关测控精度达示值的 $\pm 1\%$ 。渗透试验密封剪切盒, 上下剪切盒剪切位移达到沿渗流方向试件长度的 25% , 仍能保持剪切盒密封, 并在进水口和出水口分别设置流量测量装置, 精确测量不同水压下的流量。试验机有足够的刚度, 保证机架刚度大于等于 6 MN/mm 。

试验机较高的性能指标使其能够进行高渗透压力、高荷载或高刚度等边界条件下的岩石节理剪切渗流耦合试验。

3 试验机工作原理及说明

本试验台参照国内外现有技术和设备, 应用全数字伺服控制器、传感器技术、PID 控制技术和机械精细加工技术等软硬件技术开发而成的。整体由轴向加载框架、横向加载机构、轴向和横向蠕变控制系统、渗流子系统、剪切盒及数控系统组成, 如图 1 所示。

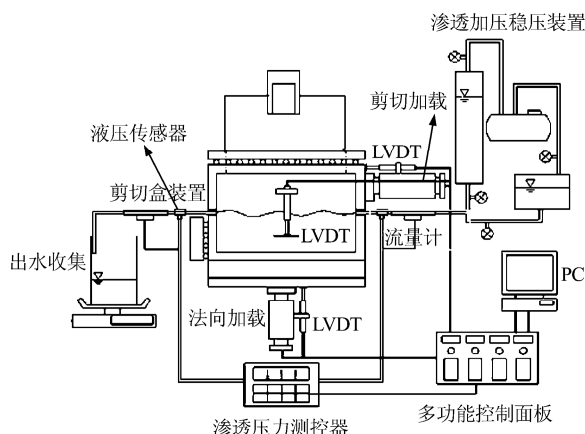


图 1 剪切渗流耦合试验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of coupled shear-flow test system

3.1 试验机各主要组成部分及其工作原理

轴向加载框架包括加载油缸、主机框架、力传感器、上下压板等。主机采用框架结构形式, 加载油缸倒置固定在上横梁上, 力传感器安装在活塞上。

横向加载机构包括加载油缸、剪切加载框架、力传感器、位移传感器等。剪切加载框架采用四框组合式, 油缸座和承压梁及两面的侧板均采用高标号球墨铸铁, 使其框架刚度大 (5000 kN/mm), 工作平稳可靠; 剪切加载框架放置在导轨上, 在进行剪切试验时安装好试样后将其推到主机框架内, 设定其他边界条件后, 即可以进行相应的剪切试验。

横向和轴向控制系统采用德国 DOLI 公司原装进口 EDC 全数字伺服控制器, 该控制器是国际领先的控制器, 具有多个测量通道, 每个测量通道可以分别进行荷载、位移、变形等的单独控制或几个测量通道的联合控制, 而且多种控制方式间可以实现无冲击转换。在 EDC 中可以设置一个刚度控制通道, 将根据测量得到的法向应力与法向变形计算的法向刚度值作为控制参数反馈给 EDC 控制输出通道, 这样就可以实现常法向刚度控制。这种功能在其他的控制器中是无法实现的。EDC 的测控精度高、操作简便、保护功能全, 可以实现自动标定、自动清 0 及故障自诊断。

渗流子系统包括渗透加压系统、日本进口松下伺服电机和控制器、EDC 测控器。采用该系统可以实现多级可控的恒渗透压力和渗透流量控制。在剪切盒的出水口设置一套液压传感器、流量测量装置和稳压装置, 并在 EDC 控制系统软件中设置一个压差控制通道, 来测量进口压力和出口压力的差值, 实现剪切盒进、出口渗透压力差的闭环控制。而且可以实现稳态和瞬态渗透压力控制。

剪切盒内部尺寸为 200 mm (水渗透方向) $\times 100 \text{ mm}$ (渗透宽度) $\times 100 \text{ mm}$ (高度)。渗流剪切盒由上下剪切盒组成, 上剪切盒由上剪切体、上密封圈、上刀体垫块组成; 下剪切盒由下剪切体、下密封圈、下刀体垫块组成。密封圈是本方案的特点及关键部件, 它是由弹性及硬度适中的聚氨脂制成液体橡胶, 浇注模压成型。聚氨脂橡胶具有既软又硬, 摩擦小等特点。密封圈是中空的, 当试样装好之后, 空腔内将注入一定压力的液体塑料, 上密封圈在压力下紧紧贴到试样上半部的四周, 而下密封圈在压力下紧紧贴到试样下半部的四周实现了密封, 同时上密封圈和下密封圈的接触面也受到了压力紧密接触, 实现了密封。当上下剪切盒产生相对移动时, 上密封圈和下密封圈的接触面在滑动状态下仍然保持压缩密封, 直到密封圈脱离接触。上刀体中有一个进水孔用以向岩样剪切面渗水, 另一孔为排气孔; 下刀体中有一个出水孔, 用以排出渗入岩样剪切面中的水。

3.2 节理法向刚度的评价办法

本试验台可进行 3 类主要法向边界条件下的节理剪切渗流试验：恒定法向荷载（CNL）、恒定法向位移（CNV）和恒定法向刚度（CNS）。恒定法向应力和法向位移的控制较为简捷，可应用控制器直接对应力和位移进行伺服控制实现；恒定法向刚度的控制，把根据测量得到的法向应力与法向变形计算的法向刚度值作为控制参数反馈给控制器来实现控制。恒定法向刚度剪切试验（CNS）适用于大深度地下岩体结构等工程问题。反映周围围岩的变形特征的法向刚度 K_n 公式为

$$K_n = E / (1 + \nu) r \quad (1)$$

式中： E 、 ν 为围岩的弹性模量和泊松比； r 为围岩内受影响范围。

3.3 数控装置的构成和原理

数控系统主要有全数字多通道闭环测控仪、荷载传感器和位移传感器组成，其构成包括荷载和位移测控单元、渗流系统测控单元、全数字伺服控制系统单元以及剪切节理试样组成，如图 2 所示。荷载和位移测控单元包括应力传感器和 LVDT 变位计。垂直位移由设置于剪切箱上的 LVDT 变位计进行综合测定；剪切位移由沿剪切方向设置的变位计来测定。全数字伺服控制系统单元包括 3 个独立的数控单元，由闭回路通过微机控制垂直荷载、剪切荷载和渗透压力。垂直荷载由 2 台独立伺服的液压顶提供。本装置使用 32 位的 AD/DA/DIO 转换板，提供了更快的运行速度，缩短了伺服的反馈时间，提高了测控精度。

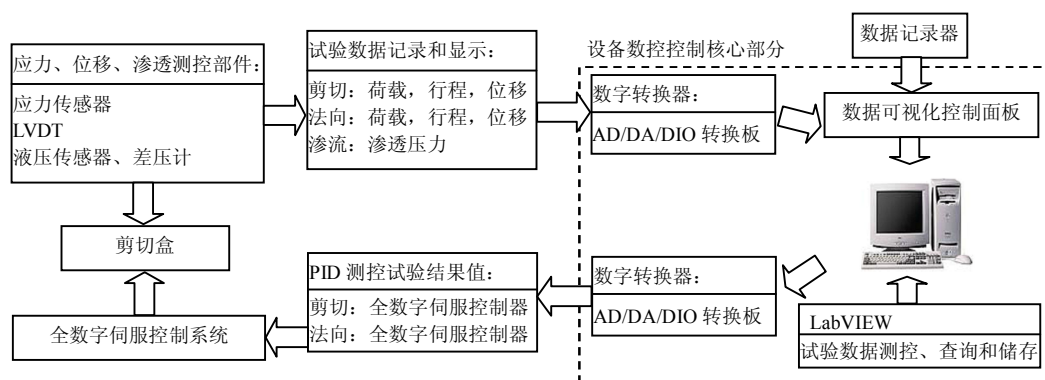


图 2 数控系统控制图

Fig.2 Schematic diagram of numeric control system

根据测控数据，基于电脑和 I/O 部件，采用 LabVIEW 图形化编程语言构建了一个测控直接剪切试验的虚拟仪器，对垂直荷载和剪切荷载的闭环电液伺服回路系统进行统一监控，同时进行多路数据采集、存贮、数据处理和曲线显示。LabVIEW 采用强大的图形化语言编程，具有强大的数据可视化分析和仪器控制能力等特点。数控系统使用了参数自调节的 PID 控制技术实现了非线性的前馈预测。PID 为 P（比例）、I（积分）、D（微分）控制的简称。系统采用位移型 PID 控制，以剪切速度恒定控制为基础。垂直荷载的高精度液压同步控制采用位移型 PID 控制实现；渗透压力差值的高精度控制同样采用位移型 PID 控制实现。剪切试验装置通过接受反馈信号值使负载侧的动作能跟进指令值，从而实现高速实时数据采集与复杂控制。与弹簧式垂直刚度一定（CNS）直接剪切试验相比较，新型数控直接剪切试验机有如下特点：提高了试验结果的精度；垂直刚度值的设定和变更可简易便利地通过微机输入；可随时中断进行中的试验，然后继续执行。

更可在执行途中变更控制条件，如 CNL、CNS、CNV 控制之间的任意切换，亦可实现多阶段垂直刚度非线性 CNS 控制，由于有 2 台独立伺服的垂直加载液压装置，可实现节理剪切长度为 50 mm 的直接剪切试验。

试验台虚拟控制器包含两个部分：前面板和流程图。前面板是控制和显示对象的集合，包含旋钮、按钮、图形和其他的控制与显示对象等；通过鼠标和键盘输入数据、控制按钮。同时，可在计算机屏幕上同步监测试验结果数据。流程图窗口用以编辑虚拟仪器的图形化源代码，通过连线将输出、接收数据的对象连接起来创建流程图，就能实现特定的功能，控制和执行相应的流程。

4 剪切渗流耦合试验

为了验证新型数控岩体节理剪切渗流试验装置的可靠性，在恒定渗透压力作用下，本次分别进行了不同边界条件下的剪切渗流耦合试验，得出节理面力学性质和渗透性质随节理剪切位移变化的情况。

4.1 岩石节理试件的制作

进行试验的人工粗糙节理面形状取自某水利水电地下厂房洞室的施工现场，制作方法为用石膏材料流入制作模中拓取粗糙面，如图 3 所示，从中选取 2 个特征粗糙面用于试验。经激光测定装置（图 4）的测试后，运用 Z2 计算方法^[18-19]，计算粗糙面的 JRC 值，其值分别确定为 1.5（试件 S1），5.5（试件 S2）。依据拓取的粗糙面进行节理试件的制作，节理试样的尺寸均为 200 mm（长）×100 mm（宽）×100 mm（高），如图 5 所示。节理试件采用特殊的树脂混凝土制成，其力学特性见表 1，相当于硬岩的自然节理的剪切试验。

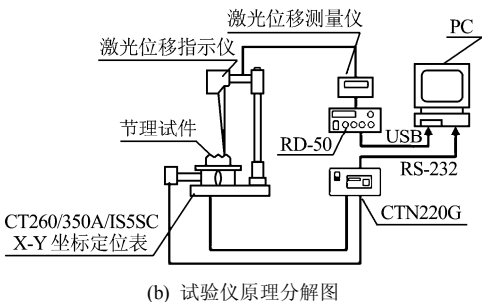
为了全面把握试验机性能，在恒定渗透压力作用下进行剪切渗流耦合试验。试验的渗透压力为 2.5 MPa，设定剪切加载速率为 0.5 mm/s，试验各工况具体边界条件见表 2。



图 3 拓取自然节理粗糙面
Fig.3 Molding the surface profile of nature joint



(a) 试验仪照片



(b) 试验仪原理解图

图 4 岩石节理表面形状激光测试仪
Fig.4 Testing instrument on the surface profile of rock joint

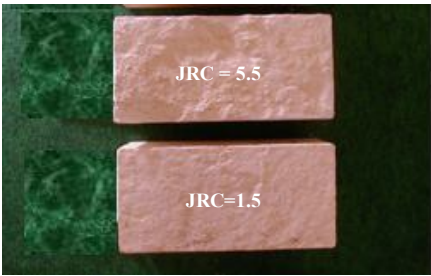


图 5 自然节理粗糙面试样
Fig.5 Photograph of three sample replicas

表 1 树脂混凝土的材料特性

Table 1 Properties of rock-like material

密度 /(kg/m ³)	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	泊松比	弹性模量 /MPa	抗拉强度 /MPa	压缩强度 /MPa
2 247	15.9	57	0.24	27 100	2.15	24.38

表 2 CNL 和 CNS 边界条件下试验工况

Table 2 Experimental cases under CNL and CNS boundary condition

试件 编号	工况	断裂节理表面 粗糙度 JRC	边界条件		
			初始法向应力 / MPa	法向刚度 / (GPa/m)	
S1	CNL	1.5	4.0		
			7.0		
			11.5		
	CNS		4.0	5.0	
			7.0	5.0	
			11.5	5.0	
S2	CNL	5.5	4.0		
			7.0		
			11.5		
	CNS		4.0	5.0	
			7.0	5.0	
			11.5	5.0	

4.2 试验结果

4.2.1 应力和位移结果

图 6~9 给出了试验中节理试件 S1、S2 在不同边界条件下的力学变形性质随剪切位移的相关变化曲线。从图中观察出，所有试验中剪切应力在剪切位移约 1 mm 以内的初始剪切阶段都以近似线性关系很快增加到峰值，接着随剪切位移的继续增加，在 CNL 加载条件下剪切应力逐渐降低，约在 3 mm 以后趋近残余剪切应力。但在 CNS 加载条件下，随剪切位移的继续增加，垂直应力以近似曲线关系缓慢增加；节理面粗糙度（JRC 值）越高，增加幅度越大。观察剪切应力和剪切位移的曲线发现，剪切应力在达到峰值后的变化趋势与节理粗糙面的 JRC 值相关。从剪胀曲线中可以看出，随着剪切位移增加，CNS 和 CNL 试验均发生了剪胀。由于垂直应力的增加，CNS 的试验剪胀率出现了大幅减少。由此，新型数控直接剪切试验装置的性能和精度得到

了考察和验证。明确了边界条件对岩体节理力学变 形特性影响的重要性。

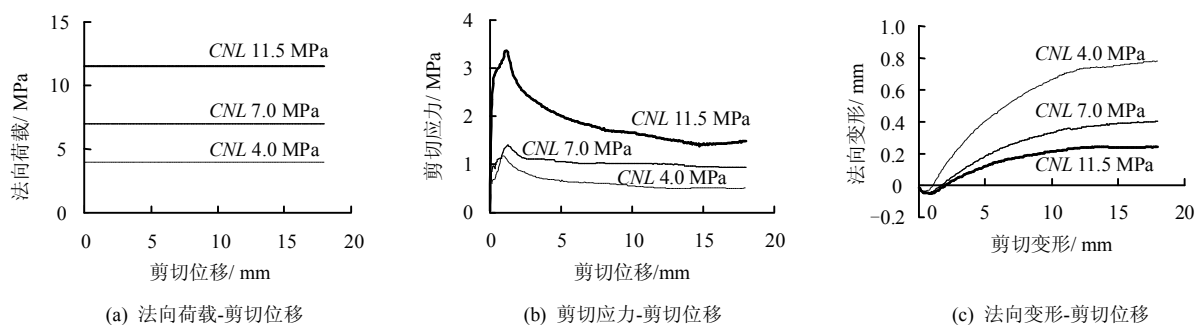


图 6 试件 S1 恒定法向荷载边界条件下结果
Fig.6 Test results of Specimen S1 on condition of CNL

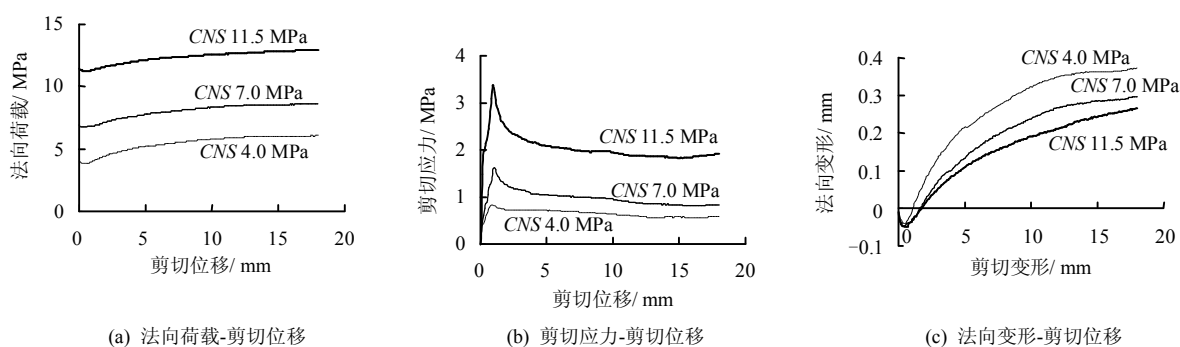


图 7 试件 S1 恒定法向刚度边界条件下试验结果
Fig.7 Test results of Specimen S1 on condition of CNS

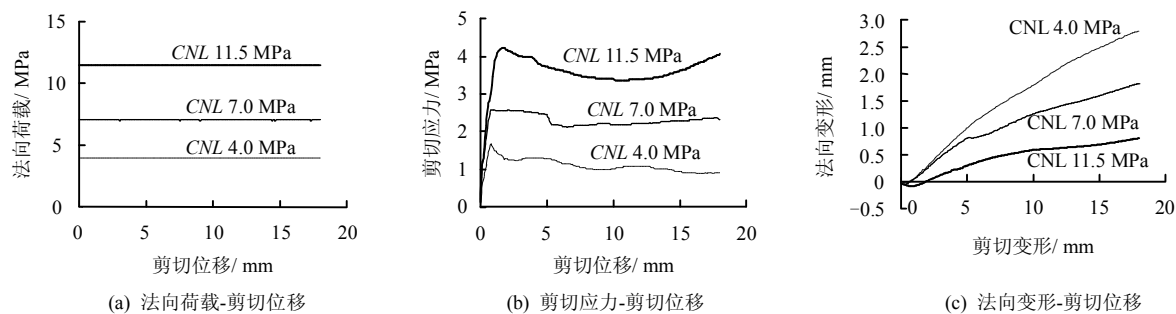


图 8 试件 S2 恒定法向荷载边界条件下试验结果
Fig.8 Test results of Specimen S2 on condition of CNL

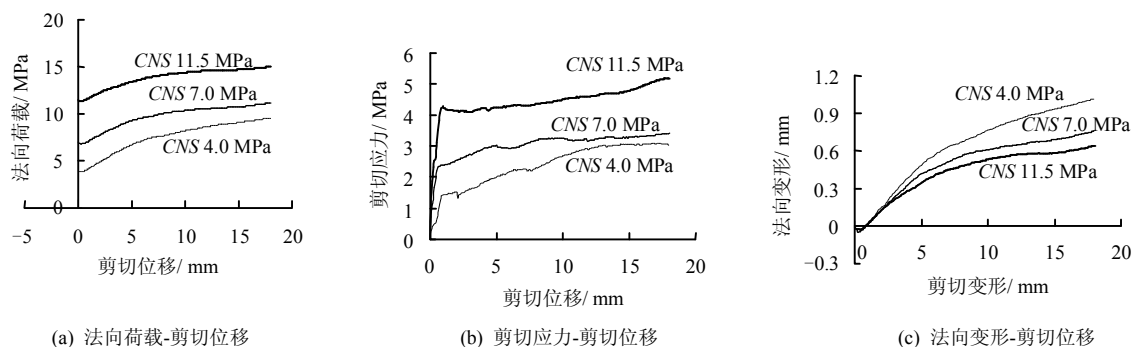


图 9 试件 S2 恒定法向刚度边界条件下试验结果
Fig.9 Test results of Specimen S2 on condition of CNS

4.2.2 渗流结果

剪切渗流耦合试验中, 根据试验条件和测得的试验数据, 应用立方准则来计算反求各个试验试件的水力开度, 来描述节理渗透特性的变化规律。立方准则可以表示为

$$Q = \frac{g}{v} \frac{we^3}{12} i \quad (2)$$

式中: Q 为水的渗流量; g 为重力加速度; e 为水力开度; v 为动黏度系数; w 为流动区域宽度; i 为量纲 1 的单位水力梯度。

图 10~13 分别为在恒定法向荷载 (CNL) 和恒定法向刚度 (CNS) 边界条件下, 节理试件 S1 和 S2 在试验剪切过程中, 水力开度值随剪切位移的变化。初始阶段, 剪切位移引起节理剪胀, 随剪切位移增加节理水力开度值迅速增加; 在第 II 阶段, 随剪切位移增加, 节理剪胀变小, 节理水力开度变化变缓, 几乎不再发生变化, 达到残余水力开度值。图中的试验结果比较也反映了断裂节理试件的表面形态对节理开度分布及演化规律的影响, 试件 S1 的表面比较平滑, 试件 S2 中有较大的凸出, 在较大程度上降低了其接触比, 在发生部分剪切位移后节理间将产生较大的孔隙空间; 试件 S2 的 JRC 值大于试件 S1, 其水力开度值也明显大。

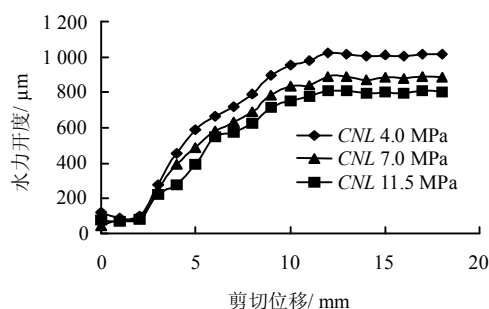


图 10 试件 S1 恒定法向荷载边界条件下试验结果
Fig.10 Test results of specimen S1 on condition of CNL

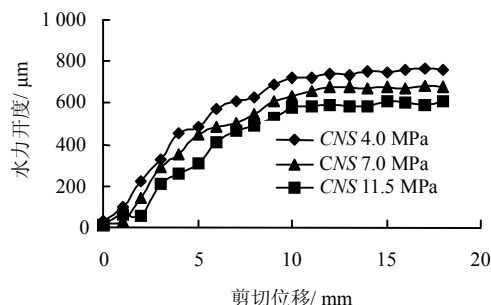


图 11 试件 S1 恒定法向刚度边界条件下试验结果
Fig.11 Test results of specimen S1 on condition of CNS

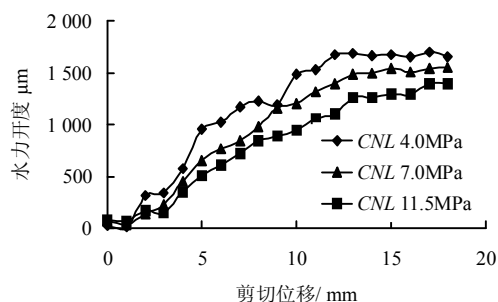


图 12 试件 S2 恒定法向荷载边界条件下试验结果
Fig.12 Test results of specimen S2 on condition of CNL

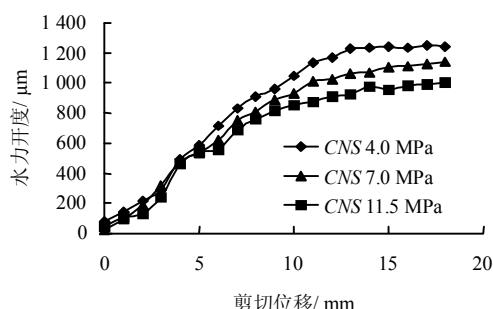


图 13 试件 S2 恒定法向刚度边界条件下试验结果
Fig.13 Test results of specimen S2 on condition of CNS

随着剪切位移增大, 因剪胀作用, 裂隙开度值显著增大。剪切位移由 0 增加到 10~14 mm 时, 受剪胀作用影响, 裂隙水力开度值达到最大值, 而后随剪切位移的增加水力开度值基本持平, 保持在残余水力开度值。由试验结果可知, 节理面剪切位移引起节理面剪切应力较大改变。

5 结 论

采用机械精密加工和自动化数控技术, 适应岩石节理的变形特点, 笔者等研制了新型数控岩体节理剪切渗流试验台, 具有高精度、宽量程、多功能等特点。试验台的可靠性和实用性在一系列剪切试验中得到了验证。

(1) 新型数控岩体节理剪切渗流试验台, 基于虚拟仪器技术, 设计了用于数据监测, 采集与处理的虚拟仪器; 应用全数字伺服控制系统, 实现了对试验进程的平稳控制以及试验数据的多通道实时采集和处理; 通过剪切盒的精细设计, 提高了剪切盒可承受的渗透压力值, 并在保证试验过程的良好密封性能的同时实现了良好的柔性边界条件。

(2) 在恒定渗透压力作用下, 分别进行了不同边界条件下的剪切渗流耦合试验研究, 得出节理面力学变形性质和渗透性质在节理剪切过程中的变化情况。试验结果验证了试验台良好的实用性能。

(3) 本试验台可以应用于地下核废料储存、水利水电地下洞室、水下隧道、采矿等工程中, 模拟研究工程岩体(甚至深部岩体)内节理裂隙在(高)渗透压力作用下的变形强度及渗透性质。为岩体工程的合理设计提供数据依据。

(4) 由试验结果可知, 在试验剪切过程中, 随着剪切位移的发生, 剪切应力明显呈现 3 阶段的变化。岩石节理渗透性呈现两阶段的变化过程: 岩石节理剪切初始阶段, 随剪切位移增大, 因剪胀作用, 裂隙开度和水力传导系数均显著增大; 剪切位移增加至 10~14 mm 时, 受剪胀作用影响, 裂隙开度和水力传导系数达到最大值, 而后随剪切位移的增加水力开度值基本持平。而且, 由试验结果可知, 节理面较小的剪切位移引起节理面渗透性产生较大改变。

参 考 文 献

- [1] KRANZ R L, FRANKEL A D, ENGELDER T, et al. The permeability of whole and jointed barre granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts**, 1979, 16: 225—334.
- [2] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2005, 38: 317—329.
- [3] OLSSON W A, BROWN S R. Hydromechanical response of a fracture undergoing compression and shear[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1993, 30: 845—851.
- [4] LEE H S, CHO T F. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2002, 35: 299—318.
- [5] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1985, 22(3): 121—140.
- [6] MAKURAT A. The effect of shear displacement on the permeability of natural rough joints, *Hydrogeology of rocks of low permeability*[C]//Proceedings of the 17th International Congress on Hydrogeology, Tucson, Arizona, USA: [s. n.], 1985: 99—106.
- [7] MAKURAT A, BARTON N, RAD N S, et al. Joint conductivity variation due to normal and shear deformation[C]//BARTON N, STEPHANSSON O ed. *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990: 535—540.
- [8] ESAKI T, DU S, MITANI Y, et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(5): 641—650.
- [9] YEO I W, DE FREITAS M H, ZIMMERMAN R W. Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1998, 35(8): 1051—1070.
- [10] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 充填砂裂隙在剪切位移作用下渗流规律的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(10): 1457—1461.
LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FU Shao-lan. Testing study on seepage characteristics of single fracture with sand under shear displacement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1457—1461.
- [11] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 二维应力作用下岩石单裂隙渗流规律的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(8): 1194—1198.
LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FU Shao-lan. Testing study on seepage characteristic of a single rock fracture under two-dimensional stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1194—1198.
- [12] LEE H S, CHO T F. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load[J]. **Rock Mechanics Rock Engineering**, 2002, 35(4): 299—318.
- [13] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock

- joints[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2001, 38: 317—329.
- [14] JIANG Y, XIAO J, TANABASHI Y, et al. Development of an automated servo-controlled direct shear apparatus applying a constant normal stiffness condition[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41: 275—286.
- [15] 蒋宇静, 王刚, 李博, 等. 岩石节理剪切渗流耦合试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2253—2259.
- JIANG Yu-jing, WANG Gang, LI Bo, et al. Experimental study and analysis of shear-flow coupling behaviors of rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(11): 2253—259.
- [16] 王刚. 节理剪切渗流耦合特性及加锚节理岩体计算方法研究[博士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [17] 夏才初, 王伟, 王筱柔. 岩石节理剪切-渗流耦合试验系统的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1285—1291.
- XIA Cai-chu, WANG Wei, WANG Xiao-rou. Development of coupling shear-seepage test system for rock joints[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1285—1291.
- [18] 孙洪泉, 谢和平. 岩石断裂表面的分形模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 347—352.
- SUN Hong-quan, XIE He-ping. Fractal simulation of rock fracture surface[J]. **Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 347—352.
- [19] 王谦源, 李晔. 分形节理岩体强度与变形尺度效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1325—1328.
- WANG Qian-yuan, LI Ye. Experimental study of scale effects in strength and deformation of fractal-joint rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1325—1328.

岩土力学新进展学术研讨会在郑州召开

2009 年 8 月 24 日至 26 日, 由中国力学学会岩土力学专业委员会组织的“岩土力学新进展学术研讨会”在郑州国际会展中心举行的 2009 中国力学学会学术大会分会场顺利召开。来自全国各地 60 余名专家学者欢聚一堂, 其中包括近 20 位专业委员会委员, 共同交流探讨近年我国岩土力学学科的研究进展。

岩土力学新进展学术研讨会作为 2009 中国力学学会学术大会 S05 分会场, 共收到入选中国力学学会学术大会'2009 论文摘要集的论文 32 篇, 于会代表围绕岩土力学基础理论、分析方法与测试技术进行了深入的交流。在 8 月 24 日与 25 日 2 个下午的学术交流中, 16 位专家做了报告发言, 他们是郑颖人院士(地震边坡破坏机理与稳定性分析探讨 II-地震边坡稳定性分析探讨)、白世伟研究员(薄层状砂围岩中深埋隧道应力及变形特性研究)、孔令伟研究员(水分迁移速率对膨胀土工程性状的影响)、王乐华博士(开挖卸荷岩体稳定分析的基本方法)、杨光华教授(变模量强度折减法及其应用)、陈正汉教授(非饱和土力学的基本理论研究)、蔡袁强教授(双向循环荷载作用下饱和和软黏土动力特性试验研究)、黄茂松教授(基于组构张量的砂土各向异性本构模型)、江巍博士(基于互补理论的非连续变形分析方法)、蒋明镜教授(宏微观土力学研究进展与困惑)、余飞博士(通透肋式拱梁傍山隧道受力变形特征分析)、陈晓平教授(珠江三角洲软土的力学特性研究)、吴梦喜研究员(饱和和非饱和非稳定渗流数值模拟的一种有限元方法)、李欢秋研究员(岩土中结构表面动压力测量及其分析)、韦昌富研究员(高孔隙率介质的弹粘塑性有限应变本构模型)与魏群教授(岩土工程中图形计算力学方法的研究及应用)。会议代表认真听取了报告, 并进行了认真的讨论, 会议气氛活跃。

分会场负责人、岩土力学专业委员会主任委员孔令伟研究员对分会场会议作了简要小结, 并主持召开了专业委员会 2009 年工作会议, 于会委员重点讨论了“第十届岩土力学数值分析与解析方法学术会议”事宜, 并决定于 2010 年 11 月在温州举行, 承办方代表蔡袁强教授报告了筹备会议计划。

《岩土力学》2009 年第 7 期被 EI 收录论文 (58 篇, 收录率 100 %)

No.	论文题名	作者	页码
1	一种简单的岩体地下洞室地震安全评价方法	李海波, 刘 博, 吕 涛, 等	1873—1882
2	土建筑遗址表面结皮形成与剥离机制研究	张虎元, 刘 平, 王锦芳, 等	1883—1891
3	无临空面深层岩体爆破增渗模型试验相似律研究及相似条件的实现	王 伟, 李小春	1892—1898
4	双电层理论与高庙子膨润土的体变特征	叶为民, 黄 伟, 陈 宝, 等	1899—1903
5	Gibson 大变形固结理论的一种连续介质力学表述	袁大军, 丁洲祥, 朱合华, 等	1904—1908
6	岩石蠕变变形的混沌特性研究	侯公羽	1909—1914
7	软土流变的物质基础及流变机制探索	谷任国, 房营光	1915—1919
8	地基沉降大变形计算方法的关键问题研究	丁洲祥	1920—1926
9	不同应力路径下饱和黏土耦合循环剪切特性	栾茂田, 聂 影, 杨 庆, 等	1927—1932
10	缓倾角层理各向异性岩体隧道稳定性的物理模型试验研究	李 丹, 夏彬伟, 陈 浩, 等	1933—1938
11	饱和砂土地震液化判别的可拓聚类预测方法	刘勇健	1939—1943
12	提速列车荷载作用下铁路路基动力特性的研究	陈建国, 肖军华, 李前进, 等	1944—1950
13	水泥垃圾土强度特性试验研究	施建勇, 冒 俊	1951—1954
14	地层数字制图中纵、横分界线控制搜索新算法	朱凤贤, 周翠英	1955—1959
15	粗粒土的破碎耗能计算及影响因素	贾宇峰, 迟世春, 杨 峻, 等	1960—1966
16	混凝土喷层支护节理岩体等效力学模型及其应用	付成华, 周洪波, 陈胜宏	1967—1973
17	单轴荷载下冻土的导电性及机敏性能试验研究	付 伟, 汪 稔, 李志清, 等	1974—1980
18	三轴压缩岩石动静组合强度及变形特征的研究	叶洲元, 李夕兵, 周子龙, 等	1981—1986
19	考虑损伤阈值影响的碳纤维混凝土损伤本构模型研究	薛云亮, 李庶林, 林 峰, 等	1987—1992
20	水下岩质边坡稳定性的模型试验研究	姜海西, 沈明荣, 程 石, 等	1993—1999
21	采用环剪仪对超固结黏土抗剪强度特性的研究	孙 涛, 洪 勇, 栾茂田, 等	2000—2004
22	搅拌桩加固挤土效应及在地铁隧道保护中的应用	付艳斌, 廖少明, 朱合华	2005—2010
23	基于图像测量技术的非饱和黄土固结变形试验研究	姚 涛, 邵龙潭	2011—2015
24	饱和砂层驱水渗透注浆分析	黄红元, 荣 耀	2016—2020
25	双洞隧道洞口段抗减震模型试验研究	孙铁成, 高 波, 王峥峥	2021—2026
26	钙质砂声发射特征的三轴试验研究	陈清运, 孙吉主, 汪 稔	2027—2030
27	考虑坑壁位移和土压力方向的直撑力学特性	宋明健, 汤连生, 胡 辉, 等	2031—2036
28	软土地基桶形基础循环累积变形研究	刘 锟, 赵春风, 王建华, 等	2037—2042
29	颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究	张家铭, 蒋国盛, 汪 稔	2043—2048
30	基于判别分析法的地震砂土液化预测研究	颜可珍, 刘能源, 夏唐代	2049—2052
31	锚杆静压桩技术在既有建筑物增设地下空间中的应用	贾 强, 应惠清, 张 鑫	2053—2057
32	大断面宽幅盾构管片三维内力分布分析	张建刚, 何 川, 杨 征	2058—2062
33	钉形水泥土双向搅拌桩加固软土地基的效果分析	朱志铎, 刘松玉, 席培胜, 等	2063—2067
34	气候影响下膨胀土工程性质的原位响应特征试验研究	李雄威, 孔令伟, 郭爱国	2069—2074
35	软土地基上路堤填筑的破坏性状分析	刘开富, 谢新宇, 张继发, 等	2075—2080
36	柔性加筋注浆现场模型试验研究	李 亮, 赵炼恒, 邹金锋, 等	2081—2086
37	土钉支护结构极限支护深度的研究	屠毓敏, 王士宏	2087—2090
38	软土地基工后沉降预测模型的研究	吕秀杰	2091—2095
39	装配式型钢基础抗压抗拔承载力的试验及计算	张大长, 蒋 刚, 林致添, 等	2096—2100
40	某矿石码头堆场矿石分级压载的地基沉降预测	周 健, 白彦峰, 贾敏才, 等	2101—2104
41	甘南某金矿地球物理探测与冒顶事故分析	沈彦谋, 高 谦, 潘旦光	2105—2108
42	修正 SMR 法在红层软岩边坡中的应用	邱恩喜, 谢 强, 石 岳, 等	2109—2113
43	黄土高边坡稳定性影响因素分析——以宝鸡峡引水工程为例	王俊卿, 李 靖, 李 琦, 等	2114—2118
44	岩体裂隙中渗流场有限元随机模拟分析	李守巨, 刘迎曦, 冯文文, 等	2119—2125
45	核废物地质处置中热-水-应力耦合对迁移影响的三维有限元模拟	张玉军	2126—2132
46	非饱和土化学-塑性耦合本构行为的数值模拟	周 雷, 张洪武	2133—2140
47	古构造应力场数值模拟及危险性预测研究	周春梅, 章泽军, 徐大杰, 等	2141—2146
48	挤压墙工法对面板堆石坝应力变形影响规律研究	侯文峻, 张 嘎, 张建民	2147—2152
49	杂交边界点方法求解动态断裂力学问题	苗 雨, 危保明, 李竟成	2153—2157
50	降雨入渗对流变介质隧道边坡稳定性的分析	王 军, 曹 平, 李江腾, 等	2158—2162
51	Hoek-Brown 准则参数在边坡工程中的敏感性分析	黄高峰, 李宗利, 牟声远	2163—2167
52	负乘幂本构模型的切线模量	殷德顺, 王保田	2168—2172
53	层状盐岩力学和变形特性数值试验研究	王安明, 杨春和, 黄 诚, 等	2173—2178
54	天津港土性相关距离的计算研究和统计分析	闫澍旺, 朱红霞, 刘 润	2179—2185
55	基于混沌理论的煤与瓦斯突出前兆时序预测研究	赵志刚, 谭云亮	2186—2190
56	复信号分析技术在地质雷达预报岩溶裂隙水中的应用研究	刘 斌, 李术才, 李树忱, 等	2191—2196
57	基于 ARCGIS 的矿山开采沉陷灾害预警系统	张春会, 赵全胜	2197—2202
58	岩爆等级判定的距离判别分析方法及应用	王吉亮, 陈剑平, 杨 静, 等	2203—2208