

真三轴软岩非线性力学试验系统研制

孙晓明¹, 何满潮¹, 刘成禹¹, 顾金才², 王树仁¹, 明治清², 景海河³

(1. 中国矿业大学(北京校区) 岩土工程研究所, 北京 100083; 2. 中国人民解放军总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023;
3. 黑龙江科技学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要: 根据深部软岩非线性力学行为研究的需要, 针对目前的试验系统不能进行三向拉压、拉剪复合应力试验及加卸载过程模拟的不足, 研制了一套能进行三轴拉压、拉剪等多种组合试验和对不同加卸载过程进行模拟的试验系统。介绍这一试验系统的主要结构、技术标准、功能和为取得满意的试验效果所研制和采用的减摩、传力和应力集中消除等技术, 所述的试验系统为深入研究深部工程岩体的力学行为提供新手段。

关键词: 岩石力学; 深部软岩; 复合应力状态; 力学试验系统; 关键技术

中图分类号: TU 455

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)16-2870-05

DEVELOPMENT OF NONLINEAR TRIAXIAL MECHANICAL EXPERIMENT SYSTEM FOR SOFT ROCK SPECIMEN

SUN Xiao-ming¹, HE Man-chao¹, LIU Cheng-yu¹, GU Jin-cai², WANG Shu-ren¹, MING Zhi-qing², JING Hai-he³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
2. The Third Science and Technology Institute of Engineers Corps, General Staff of PLA, Luoyang 471023, China;
3. Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: In consideration of the requirements for nonlinear mechanical behaviors of soft rock at depth, the development of a new experimental system for rock mechanics is discussed, which can perform the multiple composite tests of tension-compression and tension-shearing under the conditions of different loading processes including the common function such as uniaxial tension, shearing, uniaxial and triaxial compression tests. To overcome the deficiency of the current experimental system (for rock mechanics) that cannot perform the composite tests of tension-compression, tension-shearing, and different loading or unloading process simulations, the main structures and functions of the system, the technical indexes, and the key technologies to achieve satisfactory experimental results such as reduction of friction force technology, equal-transmitting force technology, and stress-concentration elimination technology, etc., are introduced. The presented new experiment system can provide a new method to further study of mechanical behavior of rock mass at depth.

Key words: rock mechanics; deep soft rock; composite stress state; mechanical experiment system; key technology

1 引言

对工程岩体进行现场试验是对其力学行为进行

深入研究的重要手段^[1,2]。深部岩体的受力及其作用过程所属的力学系统不再是浅部工程所属的线性力学系统, 其力学行为与加载过程有十分密切的关系^[3,4]。然而, 目前常规的岩体力学试验系统均不

收稿日期: 2005-05-09; **修回日期:** 2005-06-16

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490270); 国家基金委创新群体基金资助项目(50221402); 教育部科学技术研究重大项目(10405)

作者简介: 孙晓明(1970-), 男, 博士, 2002年于中国矿业大学(北京校区)岩土工程专业获博士学位, 主要从事岩土工程与软岩工程力学方面的研究工作。E-mail: xiaoming_s@263.net。

能反映深部岩体的这种与加载过程有关的力学行为。为此,本文作者研制了一种能模拟不同加载过程,对深部岩体的力学行为进行深度研究的试验系统,该系统的研制具有十分重要的理论意义和现实意义。

工程岩体的受力状态在实际工程中是十分复杂的^[5,6]。在洞室和边坡工程中,除洞室和边坡表面外,其余各点均处于三向受力状态。此外,随着边坡开挖和洞室掘进的进行,各点的受力状态也在不断改变。因此,研究工程岩体的力学性质,仅仅采用单轴拉、压试验是远远不够的。目前广泛采用的常规三轴或真三轴仪虽然比单轴试验前进了一大步,但也不能全面、真实地反映工程岩体的受力状态。因为这2种试验的结果虽然考虑了三向受力的情况,但3个主应力均为压力,没有考虑主应力为拉力的情况。在实际工程中,某些点主应力出现拉应力是客观存在的,也是比较危险的,如地下洞室的拱顶;当埋深很大时,在巨大的竖向压力作用下,环向应力就有受拉的可能^[7]。因此,研制一套能对工程岩体进行复合应力试验的真三轴仪,据以对工程岩体在拉压、拉剪复合状态的强度特性、本构关系和施工过程中的应力状态进行深入研究,不仅具有很高的学术价值,而且具有重要的工程意义^[8,9]。

为此,根据何满潮教授提出的真三轴软岩非线性力学试验方法的构思,中国矿业大学(北京校区)岩土工程研究所与中国人民解放军总参工程兵科研三所和黑龙江科技学院合作共同研制了一套能模拟不同加载过程的试验系统,其不仅能对工程软岩进行常规的单向拉压、剪切、三向压缩试验,还能进行拉压及多种组合试验。该系统具有荷载精度高、摩擦损失小、一机多用等特点。目前已投入使用并取得了较好的试验结果,可为深入研究深部开采条件下工程软岩的力学行为提供了新手段。

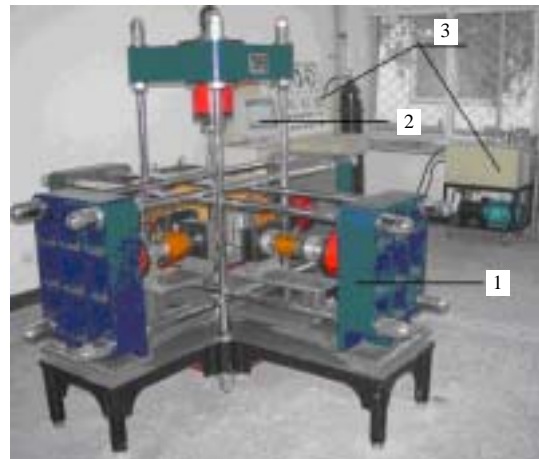
2 主要结构

试验系统由主机、液压控制系统和数据采集系统三大部分组成,如图1所示。

2.1 主机

主机由底板和三组加载系统组成。

每组加载系统由一个荷载支承结构、两个或一个荷载传感器(竖向)、两个压头或拉头和荷载传力结构组成。水平方向的两个荷载支承结构分别由一



1—主机;2—数据采集系统;3—液压控制系统

图1 试验系统照片

Fig.1 Photo of experimental system

对荷载支承梁和4根拉杆组成,其互相独立、正交安设。竖向荷载支承结构由上荷载支承梁和4根拉杆与底板组成,与水平方向的荷载支承结构正交、垂直安装。纵向结构的上荷载支承梁与水平方向的形式相同,下面为被动加载。下支承板可在竖向进行调节,当变换试件尺寸或者由于其他原因造成试件中面高出或低于油缸中心线时,可调节下支承板,以满足使用要求。此外,还在水平荷载支承梁下设置了2个定位槽。定位槽与滑动支承板上的定位条组合在一起,使荷载支承梁可以前后移动,但不能左右移动。这样既方便试件的安装与调整,又保证荷载支承结构的正交性。

荷载通过液压油缸来施加,油缸与加载压头(或拉头)之间为荷载传感器,用以精确测定作用在试件上的荷载。为减弱或消除压缩试验时试件侧面与压头间摩擦力给试验结果带来的不利影响,在加载压头上设计了减摩结构(详见第4.1节)。

在拉力爪与拉压传感器间设置了球铰连杆,施加拉力时,通过液压装置使可拉方向的油缸活塞退回,油缸调整螺杆通过连杆带动拉力爪使试件受拉。连杆的两端与相关件形成铰接,用来自动调整试件安装时在轴线方向产生的微量误差,防止试件承受弯矩和剪力,保证试件在该方向处于受拉状态(详见第4.2节)。

主机结构的所有部件均安装在一个整体的底板上,底板的下面有能对设备水平进行调整的支承螺杆。

2.2 液压控制系统

液压控制系统由液压控制器、油缸、压力表和高压软管等组成。在可拉和不可拉方向上各使用一

对加载油缸，4 个水平方向的油缸分别固定在荷载支承梁内侧中央部位，每对油缸并联在一条油路上，2 个方向的荷载分别独立控制，以满足不同侧压系数和复合应力试验及常规力学性能试验时的加载要求。纵向油缸安装在纵向上荷载支承梁内侧的中央部位，与水平方向的正交，单独使用一条油路，可独立控制荷载。

2.3 数据采集系统

试验数据采用 DH3818 静态应变测试系统进行采集和处理。该系统由数据采集箱、微型计算机及相关的支持软件组成，可动态地对大量的测试数据进行准确、可靠的采集和编辑处理。

3 主要技术指标及可实现功能

3.1 主要技术指标

(1) 试件尺寸

单、双和三向受压时为 150 mm×150 mm×150 mm 或 100 mm×100 mm×100 mm；在拉压、拉剪复合时，其尺寸为 450 mm×150 mm×150 mm。

(2) 最大加载能力

最大压力 450 kN，最大拉力 75 kN。

(3) 加载方式

三向荷载独立控制，可单向拉、压，亦可一向受拉、两向受压或三向受压。

(4) 荷载精度

施加荷载精度 < 0.5%；荷载对称性偏差 < 5%。

3.2 可实现功能

(1) 单轴、双轴、三轴压缩试验；

(2) 单向拉伸试验；

(3) 岩石或结构面剪切试验；

(4) 一向拉一向压、一向拉两向压等多种组合试验；

(5) 可先预设初始应力状态，然后根据施工过程中卸载(先三向加载然后两向卸载或一向卸载；先两向加压然后一向卸载)，观察施工过程中一点的应力状态变化，以获得真正能反映实际情况的工程岩体的力学参数和本构模型。

4 关键技术

为使试样在试验时真正地处于拉压、拉剪复合受力状态并便于试件加工，在系统中研制并采用了下列关键技术。

4.1 减摩技术

在试验中，当试样与压头间有相对位移时，试件与压头接触的侧面将产生摩擦力，这一摩擦力将使受压的侧面不再是主平面，将给试验结果带来负面影响。为消除这一影响，本文在加载压头上设计了减摩结构，如图 2~4 所示。

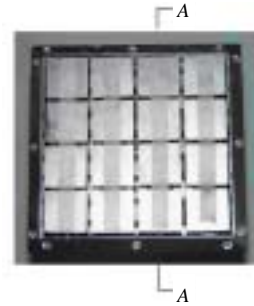
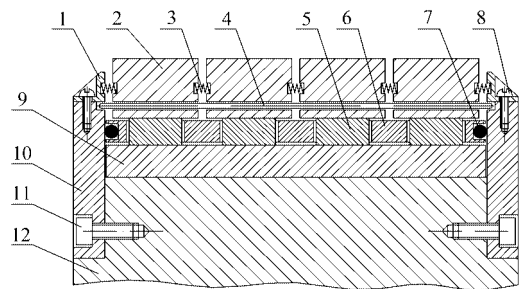


图 2 压头减摩结构俯视图

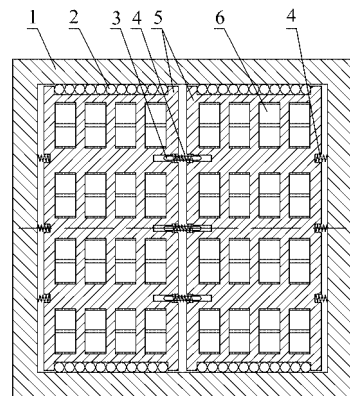
Fig.2 Top view of friction-reduction structure in pressure head



1—压条；2—承载块；3—弹簧；4—滑杆；5—滚子；6—保持器；7—钢球；8—螺钉；9—承载板；10—承载板框架；11—六角螺栓；12—压头

图 3 A-A 剖面

Fig.3 Cross-section A-A



1—承载块框架；2—钢球；3—滑杆；4—弹簧；5—保持器；6—圆柱滚子

图 4 圆柱滚子保持器结构图

Fig.4 Structural scheme of cylindrical roller keeper

加载压头为由 16 组承载块和 64 个圆柱滚子组合而成的传力结构。每个承载块四周装有 2 个圆柱

形螺旋弹簧, 承载块与承载块之间的缝隙约 3 mm。为了防止承载块脱落, 每 4 个承载块用一组由铜条制成的滑杆串在一起, 并用压条限制在承载块框架的滑槽内。每个承载块下安设 4 个 $\phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱滚子(由轴承钢制作), 所有圆柱滚子(64 个)组装在 2 块保持器板上, 2 块保持器之间装有 3 个圆柱形螺旋弹簧, 圆柱滚子可在弹簧的伸缩范围内移动。保持器与承载块框架之间分别装有圆柱形螺旋弹簧(平行于两块保持器的合缝)和一排 $\phi 5 \text{ mm}$ 滚珠。承载块和承载板均用轴承钢制作, 要求材料热处理后的硬度很高。试验时再在试件的压头间放入双层聚四氟乙烯塑料薄膜作减摩片^[10]。这种结构在不影响荷载传递的情况下, 起到了很好的减摩作用。经测试, 采用这种减摩结构, 试样与压头间的摩擦系数小于 0.01, 取得了很好的减摩效果。

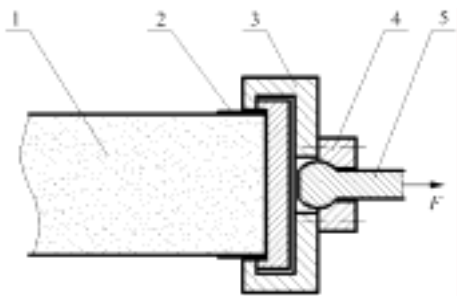
4.2 均匀传力技术

4.2.1 均匀传压技术

由一台油缸产生的集中荷载, 需要经过一定的传力结构才能使作用于试件表面的荷载成为均布荷载, 且还要能够适应试件表面的变形不同步问题。为此, 本文采用了如图 3, 4 所示的传力结构。先将油缸产生的荷载经过传力柱传给 16 个均布的承载块, 使荷载变为均布状态。当试件表面不平或变形不均匀时, 某一块或多块承载块就会随着试件的变形而移动, 使试件在变形不同步的情况下, 表面的荷载仍然是均匀一致的。

4.2.2 均匀受拉技术

在复合试验时, 为保证试件处于轴向拉伸状态, 在拉力爪与油缸之间设置了双球铰连杆(如图 5 所示)。施加拉力时, 通过液压装置使可拉方向 2 个油缸活塞退回, 油缸调整螺杆通过连杆带动拉力爪使试件受拉。因为连杆的两端与相关件铰接, 可自动调整试件安装时在轴线方向产生的微量误差, 以防止试件承受弯矩和剪力, 保证试件在该方向处于



1—试件; 2—加强板; 3—拉力爪; 4—连杆压盖; 5—双球铰连杆

图 5 拉头结构图

Fig.5 Structural scheme of pulling head

受拉状态。采用这种结构形式, 试件受到的是纯粹的拉力。在进行复合试验时, 因为试件长度(450 mm)是宽或高度(150 mm)的 3 倍, 受压的只是中间的 1/3。因此, 试件中部受到的拉力是均匀的。实测结果也证明了这一点。

4.3 应力集中消除技术

为便于试件加工, 复合试验时, 试件加工成 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 的棱柱体。试验前, 先在试件两端用环氧树脂将其与加工好的凹形抗拉连接钢板粘好, 待环氧树脂达到强度后再放入燕尾形拉力爪内拉伸(如图 5 所示)。由于粘接板处应力集中较严重, 试件每次都在粘接板附近拉断, 为消除试件端部的应力集中, 改善端部的受力状态, 保证试件在受压区域拉断, 将试件与抗拉连接板的粘接改为先在试件两端的两侧各粘上一层 $150 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的薄钢板后, 再粘上“凹”形抗拉粘接板。结果破坏部位转移到了试件受压部位的边缘, 说明此处也有应力集中现象。为了获得试件中部在复合应力作用下的破坏特性, 除了在试件端部按上述作了处理和加载压头的传力和减摩结构按本文 4.1, 4.2 节做了处理后, 还在试件中部沿试件四周锯了一条宽 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 、深 15 mm 的窄缝, 使该处的受拉面积减小。为了使受拉面积达到一个渐变效果, 在中间一条缝的两侧相距 35 mm 处, 又各锯出一条宽 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 、深 10 mm 的窄缝。采取这些措施后, 拉断面转移到了试件中间缝处(如图 6, 7 所示)并取得了比较理想的试验效果。

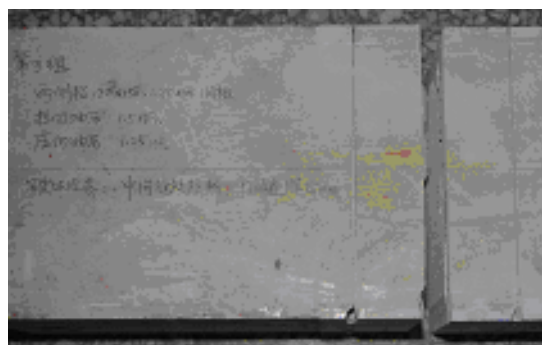


图 6 拉压试验破坏后试件

Fig.6 Broken sample of uniaxial tension and uniaxial compression

5 部分试验结果及结论

为检验试验系统是否满足研制要求, 本文用石膏做了一组试件, 用这些试件在不同组合应力条件下做了强度试验, 试验结果见表 1。



图 7 一拉两压试验破坏后试件

Fig.7 Broken sample of uniaxial tension and two-way compression

表1 不同组合应力条件下石膏试件的强度

Table 1 Strengths of gypsum test specimens in the condition of different composite stresses MPa

受力方式	σ_1	σ_2	σ_3
单压	2.56	0.00	0.00
双向压	4.10	2.00	0.00
三向压	8.60	3.00	1.50
单拉	0.00	0.00	- 0.42
一向先压另一向再拉	0.00	3.00	- 0.25
两向先压另一向再拉	2.00	2.00	- 0.20

上表数值以压应力为正，拉应力为负。表中数据说明，同一种材料的试件，由于加载方式的不同，试件的强度明显不同，因此加载方式对材料力学性质有较大影响。除此之外，应用本系统还对其他模型材料进行了试验，均取得了较好的试验效果。

对工程软岩在复合应力及不同加载过程下的强度特性、本构关系以及施工过程中应力状态的变化进行研究具有十分重要的意义。本文所介绍的试验系统为其试验研究提供了新的手段。系统在传力结构中研制和应用了良好的减摩技术和均匀传力技术，在试件加工和粘接中采用了应力集中消除技术，从而保证试件在复合受力区域破坏和试验结果的准确性。使用证明，系统能取得较好的试验结果并具有荷载精度高、摩擦损失小、一机多用等特点。

参考文献(References)：

[1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(Cai Meifeng ,He Manchao ,Liu Dongyan. Rock Mechanics and Engineering[M]. Beijing : Science Press , 2002.(in Chinese))

[2] Schultz R A. Limits on strength and deformation properties of jointed basaltic rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering , 1995 , 28(1) : 1 - 15.

[3] 何满潮. 深部开采工程岩石力学现状与展望[A]. 见: 西部大开发中的岩石力学与工程问题, 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 2004. 88 - 94. (He Manchao. Present situation and forecast of rock mechanics in exploitation engineering at depth[A]. In : The Rock Mechanics and Engineering Problems in Large-scale Development of West China. Symposium of the 8th Rock Mechanics and Engineering in China[C]. Beijing : Science Press , 2004. 88 - 94.(in Chinese))

[4] 何满潮, 景海河, 孙晓明, 等. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.(He Manchao , Jing Haihe , Sun Xiaoming , et al. Engineering Mechanics of Soft Rock[M]. Beijing : Science Press , 2003.(in Chinese))

[5] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 岩土工程多功能模拟试验装置的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004 , 23(3) : 372 - 378.(Chen Anmin , Gu Jincai , Shen Jun , et al. Development and application of multifunctional apparatus for geotechnical engineering model tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(3) : 372 - 378.(in Chinese))

[6] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(Zhu Weishen , He Manchao. Stability of Surrounding Rock in Complex Condition and Dynamic Construction Mechanics of Rock Mass[M]. Beijing : Science Press , 1996.(in Chinese))

[7] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.(Sun Guangzhong. Structural Mechanics of Rock Mass[M]. Beijing : Science Press , 1988.(in Chinese))

[8] 顾金才, 陈安敏. 岩体加固技术之展望[J]. 隧道建设, 2004 , 24(1) : 2 - 5.(Gu Jincai , Chen Anmin. View of rock mass reinforcement technologies[J]. Tunnel Construction , 2004 , 24(1) , 2 - 5.(in Chinese))

[9] 吴刚, 孙钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998 , 17(6) : 615 - 621.(Wu Gang , Sun Jun. Deformation and strength characters of jointed rock mass under unloading stress states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1998 , 17(6) : 615 - 621.(in Chinese))

[10] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫. 一种新型真三轴巷道模型试验台的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004 , 23(21) : 3 727 - 3 731.(Jiang Yaodong , Liu Wengang , Zhao Yixin. Design and development of a new type of triaxial system for roadway model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(21) : 3 727 - 3 731.(in Chinese))