

一种双轴岩石平面应变仪的改进和应用*

黄 滚¹, 尹光志^{1,2}, 李东伟^{1,2}

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:改进制作了一种双轴岩石平面应变实验装置,并自行设计制作了侧向加力器。该装置不仅能施加合适的围压,而且能在实验过程中动态监控围压的变化。对砂岩的实验测试研究表明,这种改进后的双轴岩石平面应变仪能更好地模拟岩石平面应变的条件,具有较好的实用性。

关键词:双轴岩石平面应变仪;侧向加力器;刚度

中图分类号:TD315+.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)02-0043-04

Improvement and Construction of a Biaxial Plane - Strain Apparatus for Rock

HUANG Gun¹, YIN Guang-zhi^{1,2}, LI Dong-wei^{1,2}

(1. College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Hazards Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A biaxial plane - strain apparatus for investigating the deformation and failure features of rock is improved and constructed on a passive stiff - frame concept; furthermore, a new device inducing confinement on both sides of the prism specimen was designed and built, which can not only impose varying confining pressure on the specimen, but dynamically monitor the change in confinement due to deformation of the specimen during testing. Theoretical analysis and test results show that for rock specimens with Young's modulus below 14.16GPa, the apparatus can provide an acceptable plane - strain condition and be of practical use.

Keywords: biaxial plane - strain apparatus for rock; confinement inducing transducer; stiffness

平面应变问题是许多岩土工程中经常遇到的问题。如堤坝、岩体中开挖的巷道及构筑物等^[1]。为建立反映构筑物力学特性的模型,通常需要在实验室通过常规三轴或单轴实验来测定岩石的各种物理力学参数,并把这些参数运用到模型中去,从而预测构筑物的稳定性和安全性。但轴向压缩或拉伸实验所获得的参数并不能真实反映处于平面应变条件下的岩石材料的物理力学特性^[2]。因此,在实验室模拟岩石在平面应变条件下的变形和破坏特性无疑具有重要的理论和工程实际意义。

砂土由于其特殊的物理力学特性,如结构松散,杨氏模量较小,粘结力弱,强度低等特点,因而在实验室模拟平面应变条件更易施行,国内外关于土的平面应变的研究报道也较多。岩石不同于砂土介质,其结构致密,杨氏模量和强度都较大,使得实验室模拟工程岩

体实际受力状态比较困难,这也许是岩石平面应变实验研究少见报道的缘故,而通过理论分析、数值分析和常规三轴实验对岩石研究得较多^[3,4,5]。对于常规岩石试件,要模拟平面应变条件,要求实验装置具有很大的刚度,以抑制在平面应变方向上的变形。Labuz J. F., I. Vardoulakis 和 A. Drescher^[6]在1991年设计制作了一种测试软岩在平面应变条件下变形和破坏特性的实验装置。该装置能对单轴抗压强度低于40 MPa,杨氏模量低于15 GPa的软岩具有较好的实验效果。但该装置的制作和实验的操作均较为复杂,装置的加工制作和试件的制备要求的精度很高。在文献[7]基础上改进研制了一种简易的双轴岩石平面应变装置,实践表明,这种改进后的平面应变装置制作简单,造价低廉,拆装方便,大大地降低了原装置装配上的误差;自行设计制作的侧向加力器不但能准确地施加需要的围

* 收稿日期:2005-12-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50374084)

作者简介:黄 滚(1972-),男,重庆市铜梁人,博士生,主要从事非线性岩石断裂力学研究。

压,而且能通过动态应变仪实时监控围压在轴向加压过程中的变化,并通过调节螺钉来保持围压的稳定。由于改进后的平面应变装置具有更大的刚度,所以能更好地模拟岩石在平面应变条件下的受力状态,实验效果较为理想。

1 平面应变实验装置组成

1.1 平面应变实验装置的原理及类型

平面应变实验装置的原理主要是通过严格限制试件在一个方向上的变化,继而观察和测试试件在两个相互正交方向上加压条件下的变形破坏过程及相关的力学参数。

平面应变实验装置按其对于平面应变方向上变形控制的方式主要分为两大类^[8]。一类是主动式,这类装置主要通过液压装置施加合适的压力来精确控制试件在平面应变方向的变形,从而真实地模拟平面应变条件。其缺点是构造复杂,造价昂贵,实验程序较为繁琐;另一类是被动式的刚性实验装置,其对平面应变方向变形的控制主要是通过刚性构架的刚度来进行,平面应变条件实现的程度取决于试件和装置之间的相对刚度。由于任何刚性构架本身刚度都是有限的,所以不能完全限制试件在平面应变方向上的变形,只能近似模拟平面应变条件。由于这类实验装置主要是通过两个轴向加压来完成实验,故把这类装置又称为双轴平面应变仪。其优点是结构简单,制造容易,拆装方便,实验操作简单易行。

1.2 装置构成

1.2.1 原装置存在的不足 文献[7]所提出的双轴岩石平面应变试验装置构成主要包括两块厚30 mm的U型钢制刚性构架、两根双头螺杆、两块侧压钢板和四个加压螺杆及四个贴有应变片的,套在加压螺杆上的薄壁圆筒。实验时,将30 mm×30 mm×10 mm的方块试件放在U型构架之间,并同时拧紧两个双头螺杆,限制实验过程中试件在平面应变方向上的变形;随后将侧压钢板靠在试件的两个表面,通过四根螺杆来连接侧压钢板,每根螺杆的一端在螺母和钢板之间套有一个贴有应变片的薄壁圆筒,当拧紧螺母时,薄壁圆筒向钢板施压,继而形成试件的侧压,同时可通过标定后的薄壁圆筒上应变片来施加需要的侧压,并监控侧压在实验过程中的变化。

在采用类似的实验装置进行岩石平面应变实验研究中发现,该装置存在以下问题和不足:

1) 该装置相对于试件的刚度太低。该平面应变装置实际上起限制试件在平面应变方向变形的只是两根 $\Phi 10$ mm的双头螺杆,其模拟平面应变的效果值得

商榷:

2) 由于薄壁圆筒的厚度有限(约2 mm),并不能施加文[7]所称的达到10 MPa的侧向压力。实验还表明,如果侧压达到5个MPa,则根本不能观察到试件的变形破坏曲线,也不能得到破坏后的试件。因为试件变形的方向为刚性约束,约束太大,试件的变形不久就变为整个装置的变形,试件在测试过程中也被压为密实的齏粉与压板粘结在一起而无法观测到破坏面;

3) 实验精度要求很高,实验成功率低。装配时,为使试件在平面应变方向和侧压方向受压均匀,需同时拧紧平面应变方向的两个双头螺杆和连接侧压钢板的四个螺母。事实上,这在实际操作中是很难办到的,必然导致装配上的误差。笔者在实验过程中还发现,该装置对试件的加工精度要求很高。因此,种种因素对实验结果的影响极大,以至多数实验反映不出任何规律。

1.2.2 原装置的改进技术措施 针对以上问题和不足,对该实验装置进行了改进,重新设计了对试件平面应变方向变形的约束方式和侧向加压方式。对试件平面应变方向变形的约束通过一个厚型钢制 \square 型框和一对受压时相互闭锁的钢制楔子来完成。只要在试件和 \square 型框之间嵌入楔子即可实现对试件在平面应变方向上的限制,而不会产生由于不能均匀的拧紧螺杆所带来的装配上的误差。如图1所示。从图上可以看出,只要加厚 \square 型框厚度就可以改变其刚度,从而更好地模拟平面应变。设计制作的 \square 型框尺寸为100 mm×90 mm×35 mm,肋条横截面尺寸为35 mm×20 mm。所用试件尺寸为30 mm×30 mm×15 mm。

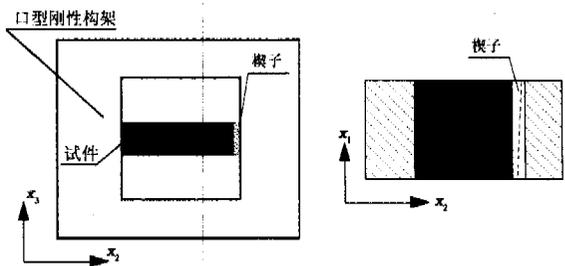


图1 \square 型框与试件的装配示意图

为减少原装置施加围压的不均匀型,设计制作了两个侧向加力器,并对其进行了标定。该加力器主要由一U型弹簧钢制成,并在其一臂上贴上应变片,通过导线连接在多通道动态应变仪上,如图2所示。根据笔者实验经验,由于采用的试件尺寸较小,在通过刚性方式施加很大侧压的情况下,端部摩擦对实验影响很大,试件被压为齏粉与加压板粘结在一起,无法观察到试件的破坏面,实验效果很不理想。所以该侧向加力器对改进制作的试验装置所用试件的最大加压能力

设计为 1.5 MPa。侧向加力器不但能精确的控制所施加的围压,还可以实时动态监控实验过程中由于试件侧向变形引起的围压变化,并通过调节传感器上的螺钉使围压保持不变。

图 3 是改进后的平面应变装置示意图。

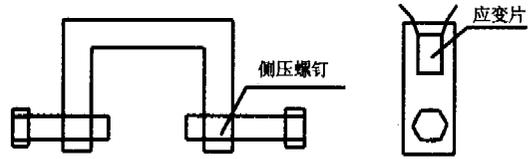


图 2 侧向加力器

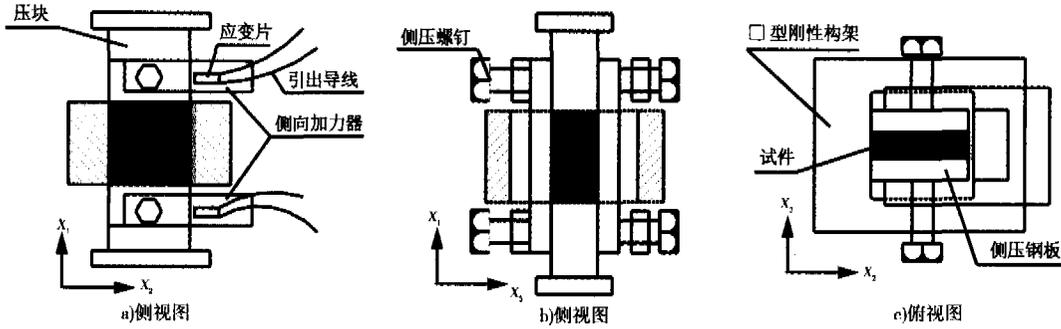


图 3 改进后的平面应变装置示意图

2 平面应变实验装置受力分析

设限制试件在平面应变方向上变形的刚性构架的刚度为 k_f, k_f 可表示为:

$$k_f = \frac{\sigma_{22}^i A}{u_2^i} \quad (1)$$

式中: A 为试件横截面积, σ_{22}^i 为刚性构架对试件的作用应力, $2u_2^i$ 为构架的位移, 等于试件在平面应变方向上的位移 $2u_2$, 则试件的应变可表示为:

$$\varepsilon_{22} = -\frac{u_2}{w} \quad (2)$$

式中: $2w$ 为试件的宽度, 负号表示试件侧向的变形为伸长。

在试件的弹性变形范围内, 根据广义虎克定律,

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] \quad (3)$$

E 和 ν 分别为岩石试件的杨氏模量和泊松比, 由力的作用力和反作用力的关系, 必然有 $\sigma_{22} A = \sigma_{22}^i A$, 则(3)式可表示为:

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E} [-E_r \varepsilon_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] \quad (4)$$

式中: E_r 为刚性构架的相对杨氏模量(相对于试件), 定义为:

$$E_r = \frac{k_f w}{A} \quad (5)$$

(5)式表明构架的相对杨氏模量与试件的尺寸和构架的刚度有关, 对于本装置, k_f 还可表示为:

$$k_f = \frac{2E_f A_f}{L_f} \quad (6)$$

式中 E_f, A_f 和 L_f 分别为刚性框架材料的杨氏模量、框架肋条横截面积和框架肋条长。

(4)式可改写为:

$$\varepsilon_{22} = -\frac{\nu}{E + E_r} (\sigma_{11} + \sigma_{33}) \quad (7)$$

由式(1)、(5)和(7)得:

$$\sigma_{22} = \frac{\nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})}{1 + E/E_r} \quad (8)$$

在平面应变条件下, $\varepsilon_{22} = 0$, 即 $\sigma_{22} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})$ 。因此, 从(8)式可以看出, 如果 $E_r \gg E, E/E_r \rightarrow 0$, 则可以认为达到了平面应变条件。

为考察实验装置对平面应变实验条件的实现程度, 设:

$$\alpha = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (9)$$

根据虎克定律和(7)式, 将 ε_{11} 和 ε_{22} 代入(9)式并化简得:

$$\alpha = \frac{\nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})}{\sigma_{11} - \nu\sigma_{33} + f(E')} \quad (10)$$

式中: $f(E') = \frac{1+\nu}{E'} [\sigma_{11}(1-\nu) - \nu\sigma_{33}]$, $E' = E/E_r$ 。

由(10)式可以看出, 如果框架为柔性的, 则 $E' \rightarrow \infty, f(E') \rightarrow 0, \alpha = \frac{\nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})}{\sigma_{11} - \nu\sigma_{33}}$; 如果框架是刚性的 $E' \rightarrow 0, f(E') \rightarrow \infty$, 则 $\alpha \rightarrow 0$ 。当 $\sigma_{33} = 0$, 框架为柔性时, $\alpha = \nu$, 即框架对平面应变方向完全没有限制作用; 当框架不为柔性时,

$$\alpha_x = \frac{\nu}{1 + (1 - \nu^2)/E'} \quad (11)$$

装置对平面应变条件的实现程度, 可由下式估计:

$$\beta = (1 - \alpha_x/\nu) \times 100\% \quad (12)$$

$\beta = 100\%$ 为理想的平面应变状态。通常 $\beta \geq 90\%$, 即构架限制了试件平面应变方向 90% 以上的变

形,就可以认为装置达到了平面应变的条件。如果试件的,由(5)、(6)、(11)和(12)式可以算出只要试件的杨氏模量 $E \leq 14.16 \text{ GPa}$, 则 $\beta \geq 90\%$ 。因此,对于 $E \leq 14.16 \text{ GPa}$ 的岩石,本装置均可以较好地模拟平面应变条件。

3 实验测试与结果分析

为验证装置的实验效果,对改进的装置进行了实验测试。由于侧向加力器的加压能力的限制,最大加压能力为 1.5 MPa , 测试共分 0 MPa 、 0.67 MPa 、 1.1 MPa 和 1.5 MPa 四个加压等级进行。

实验所用试件为砂岩,其在 MTS 上测得的全应力应变曲线如图 4 所示,同时测得其单轴抗压强度为 58.16 MPa ,杨氏模量为 12.54 GPa 。

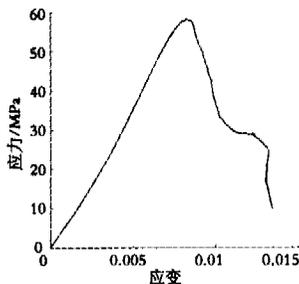


图 4 砂岩的全应力应变曲线

改进后的双轴平面应变装置所用的试件尺寸为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。实验时,在试件表面涂抹一层润滑脂以减小与实验装置间的摩擦。实验在日本生产的 AG - I 250 刚性压力机上进行,试验过程采用位移控制加载,加载速率为 1 mm/min 。图 5 为不同围压下试件的破坏情形。

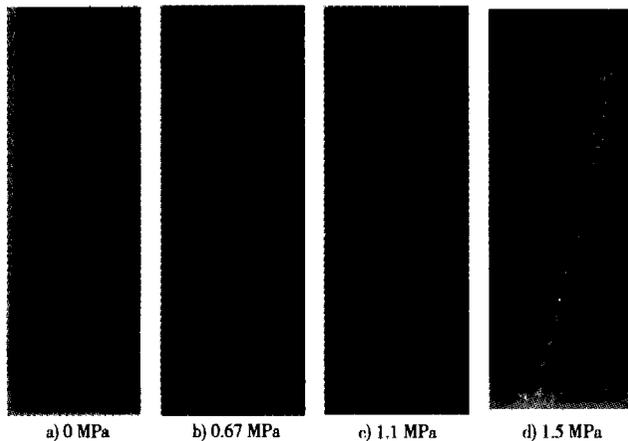


图 5 不同围压下破坏后的试件

进行了四个围压等级下的实验测试,每组实验 4 个试件,图 6 为不同围压等级下试件的典型荷载 - 位移曲线。

从单轴压缩下试件的全应力应变曲线可以看出,

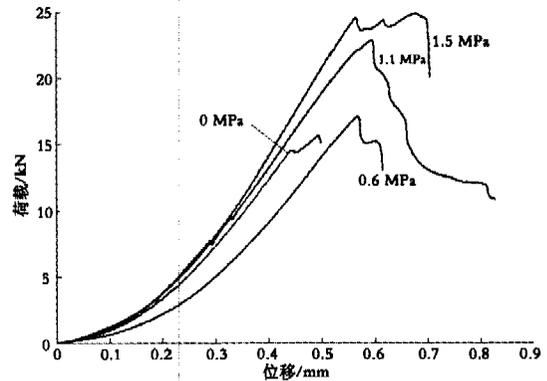


图 6 平面应变位移荷载曲线

在单轴压缩状态下,试件在峰前有一个塑性变形区,在此区间,变形持续增加,而强度的增加变缓直至为零,峰值后,破坏区域完全形成,试件形成贯通破坏。而平面应变的位移荷载曲线峰前塑性变形区间明显变窄或消失,破坏似乎没有任何先兆,具有突然性。我们在实验中观测到,监控围压变化的动态应变仪在破坏前变化很小,但在破坏发生的瞬间,原本呈线性变化的位移 - 荷载曲线陡降,动态应变仪显示围压变化的数字激增,破坏迅速发生。这是因为在实验过程中刚性构架在平面应变方向上限制了试件的变形,试件只能在 x_3 方向产生变形,这说明实验装置很好地抑制了试件在平面应变方向上的变形。实验结果与前人研究的结果相吻合^[8]。

4 结论与讨论

通过改进制作了一种双轴岩石刚性平面应变实验装置,自行设计制作了侧向加力器,讨论了实验装置模拟平面应变条件的力学机制,分析了其适用范围,并用砂岩进行了实验测试,所得实验结果表明该装置能较好地模拟低围压情况下平面应变条件,对于杨氏模量较小的岩石具有较好的适用性。

在改进制作和测试该实验装置的过程中认识到,为更好地模拟平面应变条件和使实验更具可操作性,还应当从以下几方面对平面应变实验装置进行进一步的研究和改进。

1) 进一步提高装置限制试件平面应变方向变形的刚度,适当加大实验装置和试件的尺寸,降低试件加工的困难,减小装配时的误差,使实验操作更简单;

2) 采用液压方式施加围压,减小端部效应的影响,提高施加围压等级。尽管试件在装配实验前都均匀的涂抹了一层润滑脂作为减磨剂以减小与装置的摩擦。但实验后,仍可以看见在试件侧压方向有薄薄的剥离层,这是由于侧压板对试件的端部效应作用的结果

(下转第 51 页)

管混凝土拱桥的地震响应分析中,几何非线性的影响不可忽略。

2) 几何非线性改变了地震内力的分布规律,拱脚截面不一定是控制截面, $l/4 \sim 3l/8$ 附近有可能控制抗震设计。

3) 几何非线性主要来自恒载内力和构形的影响,地震内力和变形的影响不大。

4) 几何非线性的影响随激励方向的增多而逐渐增大,纵向激励对大跨度钢管混凝土拱桥几何非线性性质的影响最大。

5) 在多点激励时,几何非线性显著增加了结构的位移,但对内力的影响却较位移要小。

6) 非线性分析中多点激励对内力的影响不如线性分析时明显。

参考文献

[1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京:人民交

(上接第46页)

果。实验装置侧向加力器最大加压能力只有 1.5 MPa,工程实际岩体的围压远大于此。因此,应当考虑通过液压的方式来给试件施加围压,一方面可以降低端部效应对实验结果带来的影响,又可以提高围压等级,而且在液压的环境中,试件的变形破坏不受刚性约束,利于破坏面的自由形成,实验更接近与实际情况。

3) 布设能精确测定实验过程中试件各方向应力应变变化情况的测量装置,便于对实验结果进行定量分析和评估。

参考文献:

[1] Jaeger C, Cook N. G. W. Fundamentals of Rock Mechanics, 3rd edition[M]. London: Chapman and Hall, 1979.
[2] Vardoulakis I. Shear - band inclination and shear modulus of sand in biaxial tests[J]. Int. J. Num. Anal. Meth. Geo-

通出版社, 1999.

- [2] 赵灿辉. 大跨度钢管混凝土拱桥的地震响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
[3] Aly S. Nazmy & Ahmed M. Abdel - Ghaffar. Non - linear earthquake - response analysis of long - span cable - stayed bridge[J]. EESD, Vol 19, 1990: 63 - 75.
[4] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
[5] Clough. R. W & Joseph Penzien. Dynamics of Structures Second Edition[M]. McGraw - Hill, Inc, New York, 1993: 356 - 397.
[6] 郑史雄, 周述华. 大跨度钢管混凝土拱桥的地震响应性能[J]. 西南交通大学学报, 1999, (3): 320 - 324.
[7] 赵灿辉. 大跨桥梁地震响应分析中的地震动模拟[J]. 西南交通大学学报, 2002, (3): 320 - 324.

mech, 1980, 4: 103 - 119.

- [3] 尹光志, 鲜学福, 王宏图. 岩石在平面应变条件下剪切带的分叉分析[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 364 - 367.
[4] 徐松林, 吴文. 岩土材料局部化变形分叉分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 430 - 3 438.
[5] 杨强, 陈新, 周维垣. 岩土类材料的分叉分析及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 403 - 406.
[6] Labuz J. F, I. Vardoulakis, A. Drescher(1991)[J]. Plane - strain apparatus. U. S. Patent 5,063,785.
[7] M Yumlu, M U Ozbay. A study of the behavior of brittle rocks under plane strain and triaxial loading conditions[J]. Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1995, 32(7): 725 - 733.
[8] Labuz J F, Papamichos E. Preliminary results of plane strain testing of soft rocks[J]. Rock mechanics as a Multi - disciplinary science. Balkema, Rotterdam, 1991.