

岩石三轴压缩强度实验教学改革研究

陈建峰,许铁欧,俞松波,沈明荣

(同济大学 地下建筑与工程系,上海 200092)

摘要:针对土木工程专业大多数本科生未能透彻理解摩尔-库伦强度理论的现状,提出采用伺服控制系统进行加载和卸载条件下岩石的应力应变全过程实验,而后建立三维数值模型模拟实验曲线,并以动画形式展现试样在受力过程中剪切面的形成及其贯通。实验教改成果对学生全面掌握摩尔-库伦强度理论实质,增强实验兴趣,提高对课程的认知能力,以及拓展数值分析知识水平等都具有重要意义。

关键词:教学改革;实验教学;土木工程;摩尔-库伦强度理论

中图分类号:TU45-4 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2012)01-0103-04

岩石力学是地质工程专业、土木工程专业岩土和地下建筑课群组本科生必修的专业基础课程之一。以学科而言,岩石力学是研究工程岩体在各种力场作用下变形破坏规律以及强度和稳定性问题的一门应用型学科,在工程实践中有着广泛的应用领域,而岩石力学实验是验证和发展岩石力学理论的必要途径;因此,岩石力学的实验课是教学环节中必不可少的一环,是锻炼学生独立工作能力、独立解决问题能力的重要培养手段。

在岩石力学中,贯穿了摩尔-库伦强度理论,其在岩石力学中的地位,如同贯穿土力学课程始末的“有效应力原理”,因此,能否充分理解摩尔-库伦强度理论,关系到学生能否学好岩石力学。

一、实验中存在的问题及原因

笔者在多年的教学实践中发现,很多土木工程专业学生尽管在大学一、二年级学过理论力学、材料力学和结构力学课程,但并不能真正理解简单的摩尔-库伦强度理论: $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$ (式中, τ_f 为抗剪强度; σ 为正应力; φ, c 分别为内摩擦角和内聚力)。学生对此公式通常的误解有以下几个方面。

第一,没有认识到该公式表达的是材料任意面上的抗剪强度,且任意面上的抗剪强度都不等的事实,以为一种材料的抗剪强度值只有一个。

第二,混淆抗剪强度与剪应力的概念,以为剪应力就是抗剪强度,没认识到只有当一个面上的剪应力达到这个面上的抗剪强度时该面才开始破坏。

第三,理解不了为何材料在受压时也会在材料内部产生剪应力,以为只有纯剪时才会产生剪应力。

第四,没有认识到正应力与剪应力或抗剪强度的确切关系,这三者都存在一个面上,正应力即为这个面上的法向应力。

收稿日期:2011-11-15

基金项目:第四批高等学校特色专业建设点(TS11385);同济大学第二期精品实验教改项目

作者简介:陈建峰(1972-),男,同济大学地下建筑与工程系教授,博士,主要从事地质工程专业的教学与研究,(E-mail)jf_chen@tongji.edu.cn。

造成学生对摩尔-库伦强度公式误解的主要原因是力学课程配套的实验教学方案和手段不完善。材料抗压强度试验采用的是单轴抗压强度试验,而不是三轴压缩强度试验,材料在单向受压下呈劈裂破坏,不显示剪切面,而材料抗剪强度试验采用的是纯剪试验,沿着指定剪切面破坏;因此,学生在实验过程中对材料在受压情况下剪切面的发生、发展直至破坏过程并无感性认识,导致学生对摩尔-库伦强度理论理解得不充分、不深刻,而造成认识上的偏差。

以前配套岩石力学课程的三轴压缩强度实验,只是简单地测定岩石试件在不同围压下的强度值,而后根据不同围压和强度值绘制摩尔应力圆及其公切线,以此获得岩石的两个强度参数:内摩擦角 φ 和内聚力 c 。尽管岩石的三轴压缩强度实验比大学一、二年级的力学课程中的实验进了一步,可以确切地实现材料在三向受力下的剪切破坏,但是,这样的实验过程仍存在以下不足。

其一,在实验过程中,试样放在密闭的不透明压力室中,试样的剪切过程并不可见。有时候,试样存在微裂缝,试样破坏后的剪切面并不明显。

其二,实际工程中的岩石可在加载情况下破坏,但更多的是在开挖卸载过程中破坏。而卸载时的破坏是否符合摩尔-库伦强度理论还有待进一步研究。

其三,实验没能记录应力应变关系曲线,特别是不能实现岩石的应力应变全过程曲线。岩石在峰值应力后仍然具有承载力,由于试验机刚度问题造成的峰值应力时岩石的突然破坏是个“假象”^[1],而目前的岩石三轴压缩强度实验仅做到峰值应力后即结束。

另外,过去的三轴压缩强度实验成果整理过于简单,没能直观、形象地反映摩尔-库伦强度理论的实质,学生未能结合实验成果来很好地理解岩石力学数值分析中采用的摩尔-库伦强度本构关系。现在数值分析作为一种强有力的模拟和分析手段,已在岩石力学的理论研究和实际应用中不可或缺,然而,目前大学阶段课程设置中缺少入门级的数值分析训练,学生要到研究生阶段才开始接触数值分析软件,因此,有必要让学生在实验成果进行分析整理的过程中初步认识数值分析方法和应用软件,并进一步理解摩尔-库伦强度本构关系,以及其衍生模型——硬化-软化本构关系。

鉴于上述存在的问题,此次实验教改项目拟增

加和完善岩石三轴压缩强度实验内容,采用伺服控制系统进行加载和卸载条件下岩石的应力应变全过程实验,而后选用岩土工程界常用的FLAC3D软件编制简单的有限差分程序,分别以摩尔-库伦和硬化-软化本构关系模拟实验曲线,并通过三维数值模拟动画形式展现岩石试样在受力过程中剪应力的发展、剪切面的形成及其贯通。通过实验让学生真正全面掌握摩尔-库伦强度理论的实质及基本的数值分析方法,并能增强学生实验兴趣、提高对课程的认知能力。

二、实验教改案例

(一) 实验设备和试件

实验所采用的主要仪器设备有:(1) 钻石机、锯石机、磨石机、车床;(2) 测量平台;(3) 伺服改造后的5 000 kN岩石三轴应力试验机(长江-500型)。试验机的轴向最大荷载为5 000 kN,示值精度为0.2 kN;侧向最大围压为150 MPa,示值精度0.2 MPa。

实验采用的岩石试件为四川锦屏一级水电站大理岩,试件尺寸采用5 cm×10 cm(直径×高度)的标准尺寸。

(二) 实验内容与步骤

1. 实验内容

(1) 进行1组加载条件应力应变全过程实验,并与1组卸载条件应力应变全过程实验进行对比。

(2) 每组实验施加的围压分别为50 MPa,75 MPa,100 MPa。

2. 加载实验步骤

(1) 以0.05 MPa/s的加载速度同时加围压和轴压至50 MPa。

(2) 保持围压不变,以0.5 MPa/s加载速度增大轴压至试件完全破坏。

(3) 同样进行75 MPa,100 MPa围压加载实验。

3. 卸载实验步骤

(1) 以0.05 MPa/s的加载速度同时加围压和轴压至50 MPa。

(2) 保持轴压不变,以0.5 MPa/s速度卸围压至试件完全破坏。

(3) 同样进行75 MPa,100 MPa围压卸载实验。

(三) 实验成果及数值模拟

1. 实验成果

使用Excel来处理三轴实验得到的数据,画出应力应变全过程曲线,即 $\varepsilon - (\sigma_1 - \sigma_3)$ 曲线。这里以围压50 MPa轴向加载破坏的试件和以轴压100 MPa

卸围压至破坏的试件为例(如图1、图2)。由图可见,实验曲线展现了教科书中的典型岩石应力应变全过程曲线,具有压密、弹性、塑性、软化和摩擦5个阶段^[1]。

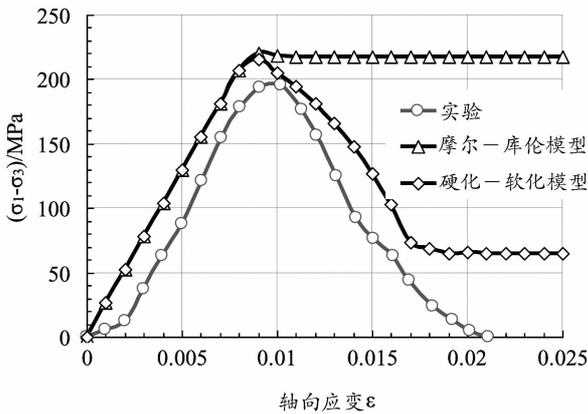


图1 $\sigma_3 = 50$ MPa 时加载实验应力应变曲线

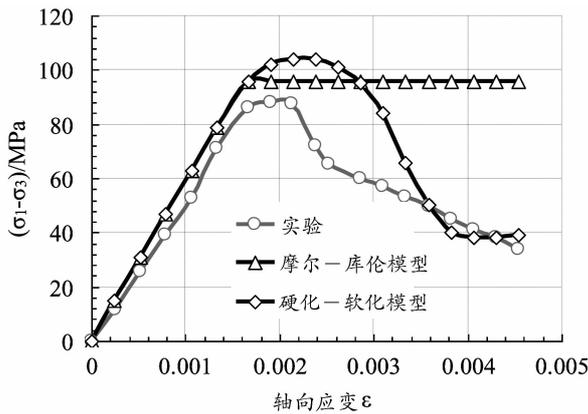


图2 $\sigma_1 = 100$ MPa 时卸载实验应力应变曲线

2. 数值模拟

FLAC3D 软件是美国 Itasca 公司开发的有限差分程序,特别适合岩土工程问题的数值模拟^[2-3]。FLAC 中内置 12 种岩土本构模型,以适应各种工程的需要,其中摩尔-库伦模型是最常用的岩土本构模型。

摩尔-库伦本构模型是一种理想弹塑性模型,即将峰值应力前的应力应变关系看作是弹性的,峰值应力后的应力应变曲线是理想塑性的(如图3所示)。

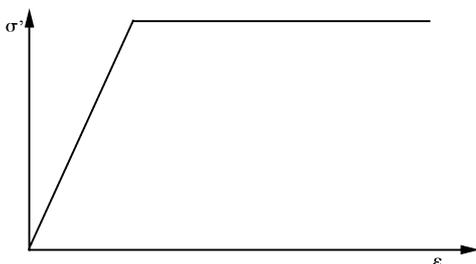


图3 摩尔-库伦本构模型应力应变关系

数值模拟所需参数根据岩石三轴压缩强度实验得出表1中的数据。

表1 数值计算参数

体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$	内聚力 c/MPa	剪胀角 $\psi/^\circ$
15 360	10 574	35.7	19.8	23.2

以下列出模拟围压为 50 MPa 轴向加载破坏的完整 FLAC3D 程序:

```

;生成网格
gen zone cylinder p0 0 0 0 p1 0.025 0 0 p2 0 0 0
0.1 p3 0 0.025 0 size 2 5 4
gen zone reflect normal -1,0,0 origin 0,0,0
gen zone reflect normal 0,-1,0 origin 0,0,0
;摩尔-库伦本构模型及参数赋值
model mohr
prop bulk 1.536e10 shear 1.5074e10 cohesion
19.8e6 friction 35.7 dilation 23.2
;设置位移边界条件
fix z ran z -0.11 -0.09
fix z ran z -0.01 0.01
;施加围压
apply nstress -50e6 range cyl end1 0 0 0.01
end2 0 0 -0.11 rad 0.025
ini sxx -50e6 syy -50e6 szz -50e6
;施加轴压
ini zvel -2.5e-7 range z -0.01 0.01
;定义应力路径
def path
p_z = find_zone(1)
p_gp = gp_near(0,0,0)
dstrs = -z_szz(p_z) -50e6
strn = -gp_zdisp(p_gp)/0.1
end
;输出应力-应变曲线
; --- histories ---
his nstep 40
his unbal
his path
his id 4 dstrs
his id 5 strn
plot hist 4 vs 5 ;dstrs vs strn
    
```

可见,采用 FLAC3D 软件模拟岩石的三轴压缩强度实验非常简单,如同 C 语言或其他高级计算机语言,FLAC3D 程序可以对数值计算进行辅助性说明,使之清晰易懂。很多学生表示,原本以为数值计

算很深奥,难以实现,应用这个程序后才知道数值计算既简单又形象。

模拟结果见图1、图2中的摩尔-库伦模拟曲线。由图可见,峰值应力前的模拟曲线与实验曲线接近,而峰值应力后的模拟曲线呈现理想塑性。也就是说,摩尔-库伦本构模型只能描述岩石在峰值应力前的应力应变关系,到峰值应力时即已破坏。

若要模拟岩石的应力-应变全过程曲线,则需采用应变硬化-软化模型,这是摩尔-库伦模型的衍生模型。以围压50 MPa恒定,轴向加载破坏的试件为例,在相应的摩尔-库伦模型程序中插入如下表格(见表2),即将摩尔-库伦模型修改成应变硬化-软化模型。

表2 摩尔-库伦模型中所插入的表格

table1	0	35.72	0.005	33.72	0.1	0
table2	0	19.76e6	0.005	10.00e6	0.1	5.00e6
table3	0	23.22	0.005	8	0.015	0

由图1、图2可见,硬化-软化模型模拟曲线在峰值应力前与摩尔-库伦模型模拟曲线是一致的,峰值应力后接近实验曲线,较好地模拟了岩石的应力应变全过程曲线。

为使学生能对岩石三轴压缩实验中试样从加载至破坏有更进一步的直观认识,可将数值分析过程制作成动画形式,只需在上述程序末端插入如下命令:

```
set movie avi step 1 file 动画.avi
movie start
step 5000
movie finish
```

即可生成相应动画(如图4所示)。图中指示部分为试样在荷载作用下剪应力集中区域,称为剪切带,指示了剪切面的形成、发展和贯通破坏的动态

过程。

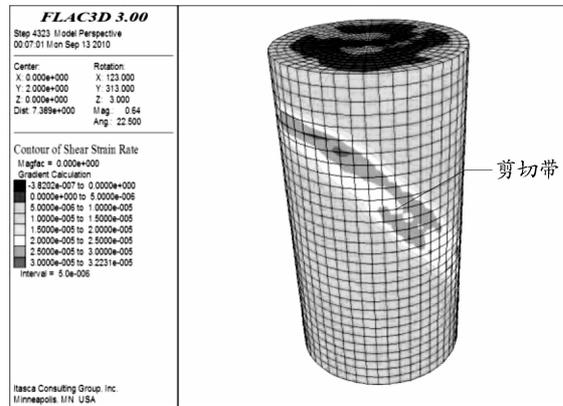


图4 FLAC3D 模拟剪切带动画

三、结语

摩尔-库伦强度理论贯穿了岩石力学课程,掌握其精髓关系到学生能否学好该课程。通过实验教学改革,很好地拓展了只测定岩石在不同围压加载条件下强度值的三轴实验内容,可使学生掌握在加载和卸载条件下岩石应力应变全过程实验曲线,理解岩石力学中通常采用的摩尔-库伦强度理论的实质,并通过三维数值模拟动画使学生增强对岩石在受力过程中剪切面形成及贯通的感性认识。实验教学改革成果对于增强学生实验兴趣,提高学生对课程的认知能力,以及拓展其数值分析知识水平等都具有重要意义。

参考文献:

- [1] 沈明荣,陈建峰. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社,2006.
- [2] 刘波,韩彦辉. FLAC原理实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [3] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D基础与工程实例[M]. 北京:水利水电出版社,2009.

Education reform on rock triaxial compression experiment

CHEN Jian-feng, XU Tie-ou, YU Song-bo, SHEN Ming-rong

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: An education reform on rock triaxial compression experiment was presented because many undergraduates can not well understand the theory of Mohr-Coulomb. In this reform, a whole procedure stress and strain experiment under loading and unloading was carried out. A three-dimensional numerical model was established to simulate the experimental curves. An animation based on numerical analysis was made to vividly show the form and cut-through of shear band in the rock sample. The reform results are of important significances for undergraduates to comprehensively understand the theory of Mohr-Coulomb, enhance the interests to do experiment, improve the understanding of the theory, and develop the knowledge of numerical analysis.

Keywords: education reform; experimental teaching; civil engineering; Mohr-Coulomb strength theory

(编辑 周沫)