

文章编号:1671-6833(2012)05-0005-05

层状岩体双轴压缩变形试验的数值分析研究

熊良宵^{1,2}, 于 宇³, 虞利军⁴

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都, 610059; 3. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610061; 4. 浙江省岩土基础公司, 浙江 宁波, 315040)

摘 要:以绿片岩和大理岩组成的层状岩体为研究对象,采用FLAC^{3D}对互层状岩体进行了双轴压缩变形试验的数值分析,在数值分析中考虑荷载方向与层理之间的几何关系、大理岩夹层的体积含量和侧压比的影响.研究表明,双轴压缩条件下,轴向荷载方向平行于层理、侧向荷载方向垂直于层理时的破坏强度最大,轴向荷载方向垂直于层理、侧向荷载方向平行于层理时的破坏强度次之,轴向和侧向荷载方向均平行于层理时的破坏强度最小;当轴向荷载方向斜交于层理、侧向荷载方向平行于层理时,随着夹层倾角由0°增加至90°时,层状岩体的破坏强度呈先增大后减小的规律;随着侧压比由0增加到1.0时,层状岩体的双轴压缩破坏强度呈先增大后减小的规律.

关键词:层状岩体;FLAC^{3D};双轴压缩破坏强度;体积含量

中图分类号:TU 45 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.002

0 引言

层状岩体在岩土工程中广泛存在,其强度是工程设计中的重要力学参数^[1].目前,国内外已有很多研究者对层状岩体的强度和变形特征进行了大量的试验和数值模拟研究,而最近几年有关这方面研究成果的文献报道仍然很多^[2-4].

综合这些有关层状岩体力学特性的研究文献可发现,绝大部分研究者在进行试验或者数值模拟时,普遍只考虑了荷载方向与层理之间的几何关系所造成的影响,对于有些层状岩体,往往是由两种岩石互层组成的,单位体积内各种岩石所占的含量均会影响层状岩体的力学特性.其次,大部分研究者主要对单轴或者三轴受压下层状岩体的力学特性开展试验或者数值分析,而在一些特定情况下隧道围岩也有可能处于双轴受压状态($\sigma_1 \geq \sigma_2, \sigma_3 = 0$)^[5].

目前,国内外也有些研究者针对双轴受压条件下岩石的力学特性开展了试验和强度准则研究,张庆^[6]对75 mm和100 mm石灰岩立方体试

件进行了双向加载试验.但有关岩石双向受压的研究成果目前仍然偏少,有关层状岩体在双向受压状态下的试验研究更是鲜有文献报道.迄今也只有余永强等^[7]采用相似材料制作模型,通过双轴压缩实验研究了水平和竖向层状复合岩石相似模型的荷载变形曲线及破坏形式,但在试验研究中考虑的影响因素还不够全面,比如单位体积内各种材料所占的比例、侧向和轴向荷载之间的加载比例、荷载方向与层理之间的几何关系等.

因此,作者以锦屏二级水电站辅助交通洞的绿片岩为研究对象,通过对层状岩体在双轴受压状态下的强度特性进行数值试验研究,分析大理岩夹层的体积含量、荷载方向与层理之间的几何关系,及侧向应力和轴向应力之间的比例对层状岩体的强度的影响.

1 计算模型及参数选取

1.1 计算模型

绿片岩因为往往夹带白色大理岩条带,因此可以将其看成是由两种岩石组成的互层状岩体^[5].

收稿日期:2012-03-05;修订日期:2012-05-15

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(41002108);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2011K008);宁波市自然基金项目(2011A610072);岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放研究基金课题(201104);浙江省重中之重学科项目(zj1008).

作者简介:熊良宵(1982-),男,宁波大学副教授,博士,主要从事岩石与混凝土力学的研究工作, E-mail: xiongliangxiao@163.com.

计算范围取横向(x 向)100 mm、竖向(z 向)100 mm、纵向(y 向)100 mm,当大理岩夹层的体积分数(V_b)为20%、且大理岩夹层与水平面之间的夹角为15°时的计算模型如图1所示。

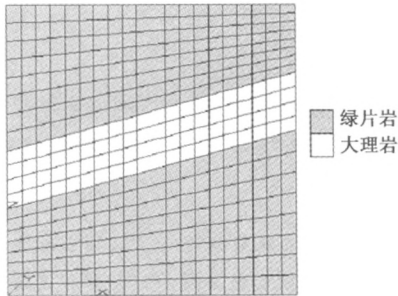


图1 计算模型

Fig.1 Computational model

在进行双轴压缩变形试验的数值分析时,轴向和侧向荷载方向与层理之间的几何关系可主要分为5种如图2所示。

在模拟各种工况时, z 向均为竖向加载方向, x 向均为侧向加载方向, y 向为临空方向。

作者采用分级加载方式,每次同时施加侧向和轴向应力。在模拟时,侧向应力与轴向应力之间的比例分为7种,即0,0.2,0.4,0.5,0.6,0.8和1.0,但每级的轴向应力增量保持不变,为5 MPa,在试件快接近破坏时轴向应力增量设为0.5 MPa。

1.2 本构模型及计算参数

在进行数值计算时,本构模型采用M-C模

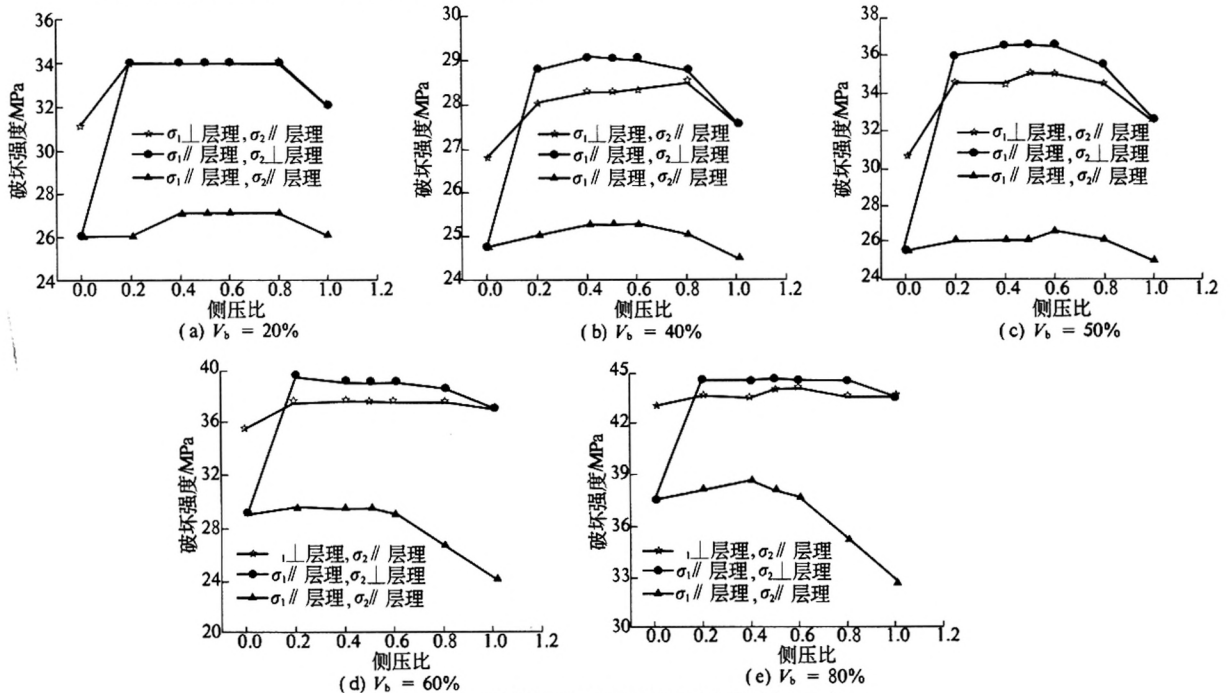


图3 不同几何关系时的双轴压缩破坏强度

Fig.3 The biaxial compression strength with different geometric relationships between loading orientation and bedding plane

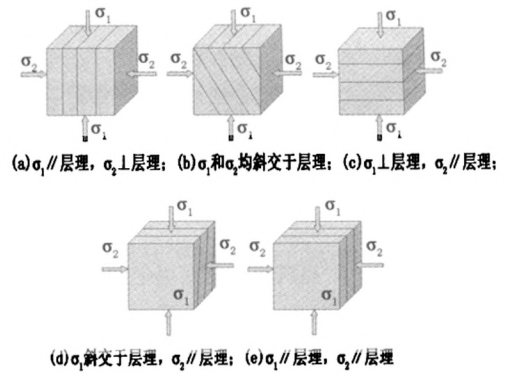


图2 荷载方向与层理之间的几何关系

Fig.2 Geometric relation between loading orientation and bedding plane

型。绿片岩的计算参数:体积模量 K 为8 GPa,剪切模量 G 为4.8 GPa,黏聚力为5 MPa,内摩擦角为47°,抗拉强度为2.5 MPa;大理岩的计算参数:体积模量 K 为14 GPa,剪切模量 G 为8.4 GPa,黏聚力为10 MPa,内摩擦角为55°,抗拉强度为5 MPa。

2 计算结果分析

2.1 荷载方向与层理之间几何关系的影响

当荷载方向与层理之间的几何关系为图2中的(a)、(c)和(e)时,层状岩体破坏强度的对比结果见图3。图3中,侧压比是指侧向应力 σ_2 与轴向应力 σ_1 之间的比值。

由图3可知,当侧压比为0时,即为单轴受压状态,轴向荷载方向垂直于层理时的破坏强度大于平行于层理时的破坏强度,这与目前很多相关试验和数值模拟得到的结论是一致的。

当侧压比由0增加为0.2时, σ_1 //层理、 $\sigma_2 \perp$ 层理时的破坏强度有明显的增加。这是由于随着侧向应力的增加,增大了层间界面之间的粘结强度,从而提高了此种受力状态下的破坏强度。

当侧压比增加为1时,轴向应力和侧向应力相同, σ_1 //层理、 $\sigma_2 \perp$ 层理时的破坏强度与 $\sigma_1 \perp$ 层理、 σ_2 //层理时的破坏强度相同。当侧压比为由0.2变化至1.0时, σ_1 //层理、 $\sigma_2 \perp$ 层理时的破坏强度最大, $\sigma_1 \perp$ 层理、 σ_2 //层理时的破坏强度次之, σ_1 //层理、 σ_2 //层理时的破坏强度最小。

σ_1 //层理、 $\sigma_2 \perp$ 层理时与 $\sigma_1 \perp$ 层理、 σ_2 //层理时的破坏强度的差距并不大,而 σ_1 //层理、 σ_2 //层理时的破坏强度却远远小于其它两种情况时的破坏强度。这主要是当 σ_1 //层理、 σ_2 //层理时试件更容易沿着层理往临空方向发生鼓胀变形破坏。

当荷载方向与层理之间的几何关系由图2(c)所示变化至图2(a)所示时,大理岩夹层与水平面之间的夹角定义 β ,夹层往 x 方向倾斜。当荷载方向与层理之间的几何关系由图2(c)所示变化至图2(e)所示时,大理岩夹层与水平面之间的夹角定义 γ ,夹层是往 y 向倾斜。

在分析大理岩夹层的倾角 β 或者 γ 发生的变化对层状岩体双轴压缩强度的影响时,侧压比为0.5。

当 β 由 0° 变化至 90° 时,即荷载方向与层理之间的几何关系由 $\sigma_1 \perp$ 层理、 σ_2 //层理变化至 σ_1 //层理、 $\sigma_2 \perp$ 层理,层状岩体的破坏强度见图4。

当 γ 由 0° 变化至 90° 时,也即荷载方向与层理之间的几何关系由 $\sigma_1 \perp$ 层理、 σ_2 //层理变化至 σ_1 //层理、 σ_2 //层理,层状岩体的双轴压缩破坏强度见图5。

由图4可知,当 β 由 0° 变化至 90° 时,层状岩体的双轴压缩破坏强度值比较接近,变化不大。

由图5可知,当 γ 由 0° 变化至 90° 时,层状岩体的双轴压缩破坏强度值呈先减小后增大的规律。当大理岩夹层的体积含量为20%时,在 γ 为 45° 时破坏强度达到最小值;当大理岩夹层的体积含量为其它值时,均在 γ 为 60° 时破坏强度达到最小值。

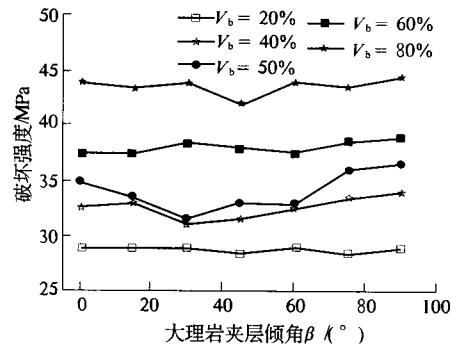


图4 双轴压缩下不同 β 时的破坏强度

Fig. 4 The failure strength with different value of β under biaxial compression

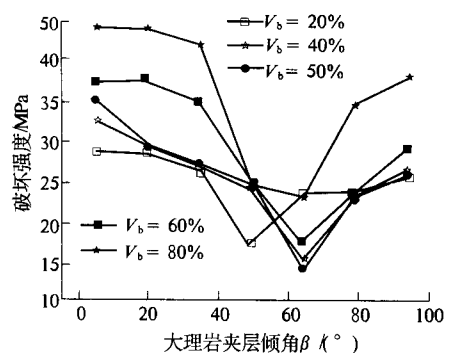


图5 双轴压缩下不同 γ 时的破坏强度

Fig. 5 The failure strength with different value of γ under biaxial compression

当侧压比为0时,即为单轴压缩变形试验,单轴受压状态下荷载方向与层理之间的几何关系不同的破坏强度见图6。

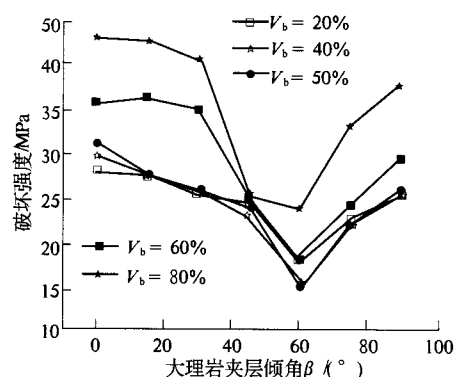


图6 大理岩夹层倾角为不同值的单轴压缩破坏强度
Fig. 6 The failure strength with different dip angle of marble interlayer under uniaxial compression

对比图5和图6可知,当轴向荷载方向斜交于层理、侧向荷载方向平行于层理时,层状岩体双轴压缩破坏强度随夹层倾角的变化规律与单轴压缩状态下的变化规律基本一致。

文献[8]提出了反映强度各向异性的参数

R_c ,即为当夹层倾角由 0° 变化至 90° 时最大强度与最小强度的比值. 本文中,当 γ 由 0° 变化至 90° 时,强度各向异性参数 R_c 随大理岩夹层体积的变化规律见图 7.

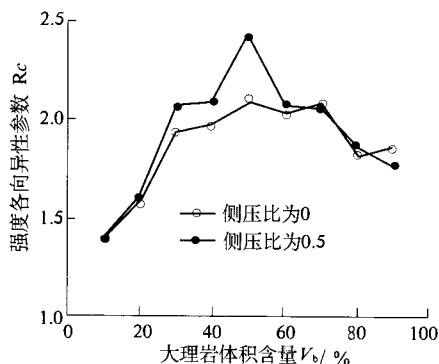


图7 大理岩夹层倾角为不同值的 R_c

Fig. 7 The coef cient of compressive strength anisotropy with different dip angle of marble interlayer

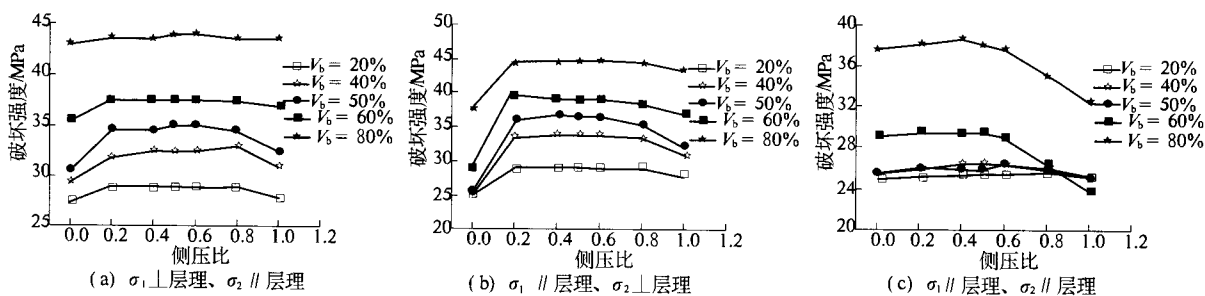


图8 不同侧压比时的破坏强度

Fig. 8 The strength with different ratio of between σ_2 and σ_1

结合图 2 和图 8 可知,无论当荷载方向与层理之间的几何关系为图 2(a)、(c) 和 (e) 示中的一种时,当侧压比由 0 增加到 1.0 时,双轴压缩破坏强度都呈先增大后减小的规律.

张庆^[6]在对石灰岩进行双向加载试验时,发现侧压比为 0.5 时的双轴压缩破坏强度大于侧压比为 0.0 时的双轴压缩破坏强度,而侧压比为 1.0 时的双轴压缩破坏强度又小于侧压比为 0.5 时的双轴压缩破坏强度. 因此,表明笔者数值计算得到的变化规律是合理的. 造成这种现象的原因,主要是当侧压比达到一定值后再继续增加侧向应力,会使得试件更容易向临空方向发生鼓胀变形破坏,从而强度反而会下降. 当侧压比为何值时双轴压缩破坏强度达到最大,这与荷载方向与层理之间的几何关系、大理岩夹层的体积含量均有关.

另外,由图 8 可知,随着大理岩夹层体积分含量的增加,层状岩体的双轴压缩破坏强度呈逐渐增加的趋势.

由图 7 可知,当侧压比为 0 或 0.5 时,强度各向异性参数 R_c 随大理岩夹层体积的增加呈先增大后减小的规律,且当大理岩夹层的体积含量为 50% 时达到最大值. 另外,当侧压比为 0.5 时强度各向异性参数基本都大于当侧压比为 0 时的强度各向异性参数,这说明当轴向荷载方向斜交于层理、侧向荷载方向平行于层理时,增大侧向应力会增大强度各向异性.

2.2 侧压比的影响

当侧压比由 0 增加到 1.0、大理岩夹层体积含量由 20% 增加到 80% 时,层状岩体的双轴压缩破坏强度的变化规律见图 8.

3 结论

以绿片岩和大理岩互层的层状岩体为研究对象,分别进行双轴压缩变形特性的数值试验,主要得到以下结论:

(1) 双轴压缩条件下,轴向荷载方向平行于层理、侧向荷载方向垂直于层理时的破坏强度最大,轴向荷载方向垂直于层理、侧向荷载方向平行于层理时的破坏强度次之,轴向和侧向荷载方向均与层理时的破坏强度最小.

(2) 当轴向荷载方向斜交于层理、侧向荷载方向平行于层理时,随着夹层倾角由 0° 增加至 90° 时,层状岩体的破坏强度呈先增大后减小的规律.

(3) 随着侧压比由 0 增加到 1.0 时,层状岩体的双轴压缩破坏强度呈先增大后减小的规律.

参考文献:

- [1] 鲜学福. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学

- 出版社, 1989.
- [2] 高春玉, 徐进, 李忠洪, 等. 雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1360 - 1364.
- [3] 邓荣贵, 付小敏. 层状岩体力学特性模拟实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(6): 721 - 729.
- [4] 周斌, 张可静, 柳群义. 考虑应变软化特征的层状岩体三轴压缩数值试验分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(3): 828 - 832.
- [5] 熊良宵, 杨林德, 张尧, 等. 锦屏二级水电站绿片岩的双轴压缩蠕变试验特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3928 - 3934.
- [6] 张庆. 双向加载条件下的石灰岩力学特性试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学土木工程系, 2007.
- [7] 余永强, 褚怀保, 杨小林, 等. 层状复合岩石双轴压缩的相似模拟实验研究[J]. 矿业工程, 2011, 9(3): 23 - 26.
- [8] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43(8): 1163 - 1181.

The Numerical Analysis Study of Biaxial Compression Test for Interlayered Rock Mass

XIONG Liang-xiao^{1, 2}, YU Yu³, YU Li-jun⁴

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Limited company of Nuclear Industry Southwest Institute of Survey and Design, Chengdu 610061, China; 4. Zhejiang Geotechnical & Foundation Company, Ningbo 315040, China)

Abstract: This paper studies the interlayered rock mass composed of greenschist and marble, the numerical analysis of biaxial compression tests for interlayered rock mass was done by using FLAC3D. Lots of influencing factors such as geometric relationship, volumetric content of marble interlayer and the ratio between lateral stress and axial stress were taken into account in the numerical analysis. The research results show that the biaxial compression strength when axial loading orientation is parallel to bedding plane and lateral loading orientation is perpendicular to bedding plane is largest, and when both axial and lateral loading orientations are parallel to bedding plane is smallest. The biaxial compression strength will increase firstly and then decrease later when the dip angle of interlayer increases from 0° to 90° if both axial and lateral loading orientations are parallel to bedding plane. The biaxial compression strength will increase firstly and then decrease later when the ratio between lateral stress and axial stress increases from 0 to 1.0.

Key words: interlayered rock mass; FLAC^{3D}; biaxial compression strength; volumetric content