

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.01.026

单轴压缩下层状岩体的各项异性研究

刘伟, 曾亚武, 夏磊, 陈曦
(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北武汉430072)

摘要:层理对岩体强度和各向异性特征都有重要影响,为了详细的研究层理间距和倾角对岩体强度各向异性特征的影响,通过对类层状岩体标准试样的单轴压缩试验,得出了试样的强度和弹性模量随层理间距、倾角的变化规律,并深入分析了试样的破坏形态,最后通过理论计算对试验结果进行了验证。研究表明:岩体强度随层理面倾角的增加近似呈“U”型变化的规律,并在60°左右达到最小值;岩体的弹性模量随层理面倾角的变化规律总体上是以45°为分界点,近似呈“V”型变化;岩体的强度、弹性模量、破坏机制和各向异性比受层理面间距的影响均较小,层理间距为10 mm的试样各向异性比为4.72,层理间距为20 mm的试样各向异性比为4.46,均属于高各项异性水平;试样破坏机理主要是剪切滑移和张拉破坏,以及两者的组合。

关键词:岩石力学;层状岩体;各向异性;单轴压缩

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)01-0145-05

Anisotropy of Layered Rock Mass under Uniaxial Compression

LIU Wei, ZENG Yawu, XIA Lei, CHEN Xi

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Beddings have important influence on rock mass strength and anisotropy characteristics. In order to analyze the effects of bedding dip and density on the strength anisotropy of rock mass, the variation law of model strength and elastic modulus with bedding inclination and density is obtained by uniaxial compression test of similar model standard specimen. The failure mode of the specimen is analyzed deeply, and the experimental results are verified by theoretical calculation. The results show that the strength of the rock mass increases with the increase of the inclination of the bedding plane, and it reaches the minimum value of about 60°. Variation of the elastic modulus with the bedding planes of the rock tilt angle is generally 45° cut-off point, approximately in a “V” changes. The effect of bedding density on the strength, elastic modulus, failure mechanism and anisotropy ratio of rock mass is small. The anisotropy ratio of the specimen with the interlayer spacing of 10 mm is 4.72, and the anisotropy ratio of the sample spacing is 20 mm is 4.46, which belongs to the high heterosexual level. The failure mechanism of the specimen is mainly shear slip, tensile failure, and their combination.

Keywords: rock mechanics; layered rock mass; anisotropy; uniaxial compression

沉积岩是地表存在最为广泛的一类岩石,其最为典型的构造特征就是层理,层理也是结构面的一种,一般是岩体内的弱面。层理构造的存在,导致了岩体力学性能在与层理面不同夹角方向上表现出明显的各向异性特征。因此,在层状岩体上修建大坝、

隧道、水库等工程时,必须要考虑到其各向异性的特征。

基于层状岩体在实际工程应用中的重要地位,有大量的学者对其进行过较深入的研究。包括冒海军等^[1]通过单轴、三轴压缩试验,采用单弱面理论研

收稿日期:2017-09-13

修稿日期:2017-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41772308,41272342)

作者简介:刘伟(1993—),男,河南鹤壁人,硕士研究生,研究方向为层状岩体。E-mail: liuwei932@outlook.com

通讯作者:曾亚武(1964—),男,湖北安陆人,博士,教授,博士生导师,主要从事地下建筑工程与岩石力学的教学和科研工作。

E-mail: zengyw@whu.edu.cn

究了抗压强度随结构面倾角变化的规律。衡帅等^[2]通过直剪试验,分析了在层理面影响下的页岩各向异性特征,并得出了剪应力集中系数与抗剪强度的关系。王聪聪等^[3]通过对层理比较明显的板岩进行单轴压缩试验,发现板岩单轴抗压强度和弹性模量均随层理面的增大呈“U”型变化。黄春等^[4]通过单轴压缩试验,分析了层状岩体弹性模量、峰值强度和残余强度随倾角的变化规律。夏磊等^[5]运用颗粒流建立数值模型,开展了不同倾角下的单轴压缩试验,将层理面力学参数分为粘结强度、摩擦作用和咬合作用 3 种。鲁海峰等^[6]采用 FLAC^{3D}数值软件,通过数值模拟分析,得到了层状岩体在单轴和三轴压缩下的强度特征。贾长贵等^[7]通过对页岩的单轴压缩试验,发现含不同倾角层理面试样的破坏机理不同,其研究结果为水力压裂施工提供了技术参数。曾纪全等^[8]通过对泥质粉砂岩和石膏模型试样的试验研究,分析了层状岩体力学性质各项异性的机理。本文基于类层状岩体单轴压缩试验,深入研究了层理倾角和间距对岩体强度和破坏形态的影响。

1 试验材料与试验方案

鉴于试样需要含有不同间距和倾角的规则层理构造,现场取样、加工都很困难,本试验采用高强石膏制成的相似模型来做研究。

1.1 试样制备

本试验所用试样的材料配合比为水:石膏 = 0.4:1(质量之比),搅拌后浇筑到制好的模具内,然后在振动台上振动密实,直至没有气泡冒出为止,在

室温下静置 12 h 后拆模。模具内部体积是 400 mm × 400 mm × 100 mm,内侧贴有一层薄膜,防止拆模时因石膏与模具粘结而破坏。为了得到不同间距、不同倾角的层理面,本试验采用的方法是,将达到规定强度的石膏块切割成厚度为 10 mm、20 mm 的片状,然后用粘结剂将其按照设定的角度粘在一起。等粘结强度达到要求后,将其切割成 50 mm × 50 mm × 100 mm 的立方体试样,用于单轴压缩试验。

直剪试验的试样尺寸为 50 mm × 50 mm × 100 mm(尺寸误差 ± 0.5 mm),层理面间距取 10 mm、20 mm,倾角 β 取 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°,共 14 组,每组试样分别制备 4 个,并按照一定的规则对其进行编号,如 B-15-1(见图 1)代表层理面间距为 20 mm、倾角为 15°的第 1 个试样;A-30-1(见图 1)代表层理面间距为 10 mm、倾角为 30°的第 1 个试样。其中,层理面倾角 β 定义为层理面与水平面的夹角。

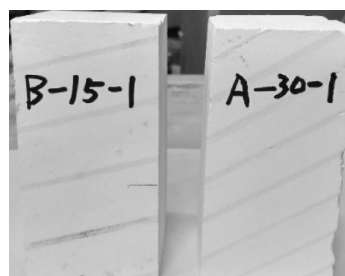


图 1 部分单轴试样

试样制好后,通过对石膏试样的单轴压缩、巴西劈裂、直剪等方式,测得材料的基本力学参数如表 1 所示。

表 1 材料基本力学参数表

弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$		黏聚力 c/MPa		单轴抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa
		石膏	层理面	石膏	层理面		
11.09	0.145	31.7	31.5	3.31	0.32	24.51	1.376

注:层理面的内摩擦角和黏聚力是胶结面的强度参数,通过对含 0°层理面试样的直剪试验测得。

1.2 试验方案

本试验采用的实验设备是 YZW50 型微机控制电动应力式直剪仪,该设备适用于岩石结构面、岩石本身及混凝土或砂浆与岩石胶结面的直剪试验;其结构性能完全符合试验规范要求。在试验的过程中,系统会自动采集法向力、法向位移等数据,软件控制界面可实时显示法向压力-时间曲线。

为了得到试样压缩破坏的全过程应力-应变曲线,采用位移控制的加载方式,加载速率为 0.01 mm/s。在法向压力达到峰值强度后,且试样破坏形

态已明显表现出来时,终止加载。同时,实验过程中,采用高清数码相机实时拍摄记录试样破坏过程。

单轴压缩试验的法向应力 σ 表示为:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: P 为法向压力; A 为试样实际横截面面积。

2 实验结果分析

通过单轴压缩试验,得到了在相同的条件下,每个试样的法向压力与位移关系。经过整理数据,剔

除离散性较大的数据,取同组其余数据的平均值,作为该组试样的试验结果。表 2 为整理出的试验结果。

表 2 类层状岩体单轴压缩试验结果

层理面 倾角 β /(°)	不同石膏厚度下 单轴抗压强度 σ /MPa		不同石膏厚度下 弹性模量 E /GPa	
	10mm	20mm	10mm	20mm
0	16.22	21.17	8.38	10.83
15	15.37	17.29	5.94	6.80
30	14.66	16.28	3.20	3.41
45	9.50	11.63	0.69	1.23
60	3.44	4.75	2.95	3.23
75	4.70	5.66	4.63	7.32
90	16.39	17.46	10.59	11.21

2.1 抗压强度规律分析

将各组试样的峰值抗压强度与层理面倾角的关系绘于同一直角坐标系中,如图 2 所示。

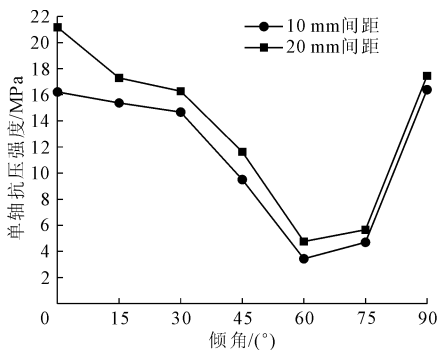


图 2 抗压强度与层理面倾角的关系曲线

由图 2 可知,不同层理倾角下的单轴抗压强度有明显的差别,表现出较强的各向异性特征。具体分析结果如下:

(1) 试样的单轴抗压强度随层理面倾角的变化规律总体上是先减小后增大,近似呈“U”型的变化规律。层理面倾角较缓时,即 $\beta \leq 30^\circ$ 时,试样强度随倾角的增加变化较小;当 β 超过 30° 后,随倾角的增加试样强度急剧降低,并在 60° 左右时达到最小值。

(2) 通过与无层理石膏试样的强度对比,发现层理面的存在弱化了试样强度;且在相同倾角的情况下,层理间距的减小,强度会稍有降低,但降低程度不大,故层理倾角对岩体强度的影响大于层理间距的影响。

(3) 采用单轴抗压强度的各向异性比^[9]来衡量层状岩体的各向异性程度,即层理倾角 β 为 0° 试样的单轴抗压强度与 60° 试样的单轴抗压强度的比值。

计算得层理间距为 10 mm 的试样各向异性比为 4.72,层理间距为 20 mm 的试样各向异性比为 4.46。因此,岩体的层理面间距对其各向异性比影响并不大。根据表 3 的各向异性分级^[9]可知,本试验中的试样均属于高各向异性水平。

表 3 各向异性分级表

各向异性比 R_c	分级
1.0—1.1	各向同性
1.1—2.0	低各向异性
2.0—4.0	中各向异性
4.0—6.0	高各向异性
>6.0	特高各向异性

2.2 弹性模量规律分析

在试样的法向应力—法向应变关系曲线中,除去最初压密阶段和峰值强度前的非直线段,拟合出中间近似直线段的斜率,取之为试样的弹性模量。图 3 为弹性模量与层理倾角的关系曲线。

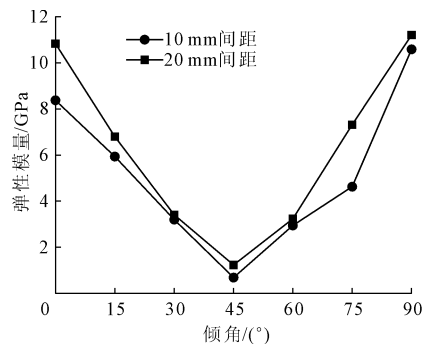


图 3 弹性模量与层理面倾角的关系曲线

由图 3 可知,不同层理倾角下的弹性模量也有很大差异:

(1) 试样的弹性模量随层理面倾角的变化规律总体上是先减小后增大,近似呈“V”型变化;在层理面倾角为 90° 时达到最大值, 45° 左右时为最小值。

(2) 通过与无层理石膏试样的弹性模量对比发现,层理面的存在降低了岩体的弹性模量。对比两种层理间距的试验结果,发现随层理间距的减小,试样的弹性模量稍有降低,但相差不大,这也和强度与层理间距的关系相似。

2.3 破坏形态分析

层状岩体受压变形和破坏形态是由结构面和结构体共同决定的。图 4 为各组试样的破坏形态。经过观察分析可知,层状岩体受压破坏形态与层理倾角有密切关系,而层理间距对其破坏形态影响不大。

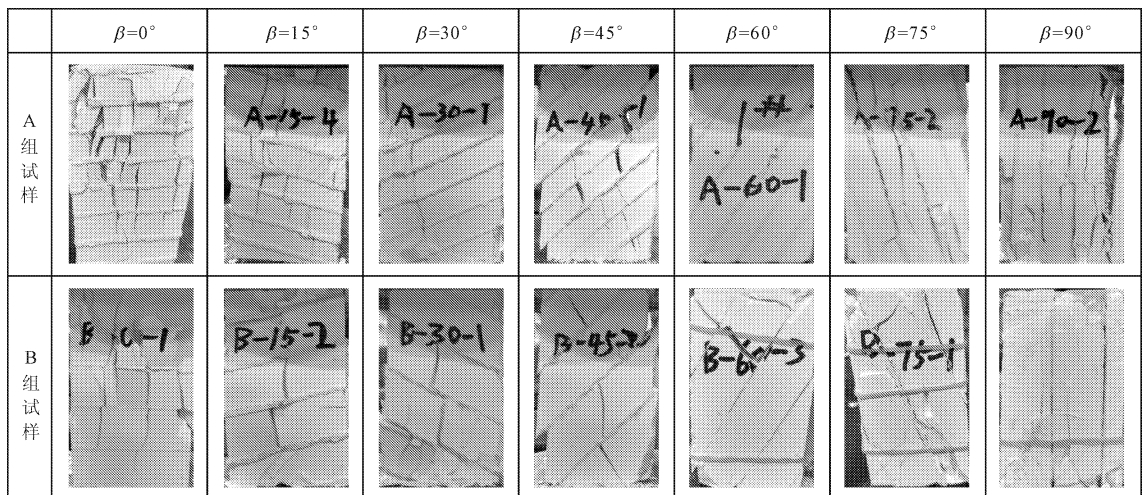


图 4 各组试样的破坏形态

由于层理面倾角不同,试样的破坏形态表现出明显的各向异性特征,破坏机理也不尽相同。具体分析结果如下:

(1) 当层理倾角 β 为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,试样均为张拉破坏,且张拉裂纹延展方向均为受压方向。在层理倾角较小时,层理面上的切向应力分量也较小,不足以克服其间的抗剪强度。而由于试样没有侧向限制,故在较大的法向压力下,试样会因为泊松效应而受到较大的侧向张力作用^[10],进而形成贯穿层理的张拉裂纹。

(2) 当层理倾角 β 为 45° 时,试样为张拉和剪切滑移的组合破坏。法向压力可沿层理面分解为法向力和切向力两部分,随着外加荷载的增加,作用在岩层上的法向力和切向力均随之增大,在切向力大于层理面的抗剪强度时,试样会沿着层理面发生滑动,同时会在法向力作用下产生张拉裂纹。

(3) 当层理倾角 β 为 $60^\circ \sim 75^\circ$ 时,试样为沿层理面的剪切滑移破坏。随着层理倾角的增大,主导试样破坏的力也由法向逐渐变为切向,即层理面间的粘结强度逐渐成为试样抗压强度的决定性因素。这也是该角度下,试样抗压强度低的主要原因。由于试样端部和试验机接触部位有较强的端部效应,在试验过程中,也出现了像图 4 中 B-60-3 这样端部呈三棱柱形的破坏形式。

(4) 当层理倾角 β 为 90° 时,试样为平行于层理方向的张拉破坏。在较大的法向压力下,试样内产生一系列轴向的张拉破裂面,从而将试样分成多个薄板状岩体,随后,将因受压弯曲折断而发生失稳。

3 单轴抗压强度的理论解

本试验中所用的试样均含一组平行层理,岩体强度计算方法采用单结构面理论。图 5 为单结构面理论的示意图^[1],其中 β 为结构面与最大主平面的夹角, c_i 和 φ_i 分别为结构面的黏聚力和内摩擦角, c_0 和 φ_0 分别为基岩的黏聚力和内摩擦角。

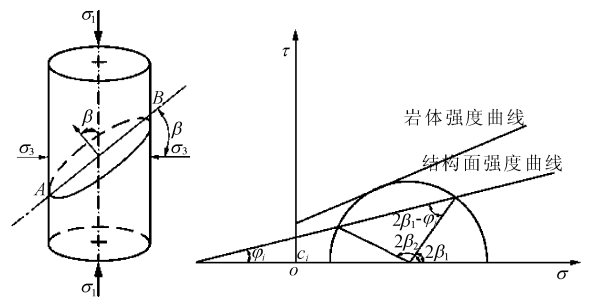


图 5 单结构面理论示意图

根据摩尔强度理论^[11]:只有在 $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ 时,试样才会沿着层理面破坏;否则,试样不会沿着层理面破坏。若其应力摩尔圆已和岩石强度包络线相切,则试样将沿着 $\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}$ 的一个截面发生破坏。若应力莫尔圆不是和岩石强度包络线相切,而是在其下方,则试样不会破坏。由图 5 中的三角关系,可以计算出 β_1 和 β_2 :

$$\beta_1 = \frac{\varphi_i}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + 2c_i \cot \varphi_i) \sin \varphi_i}{\sigma_1} \right] \quad (2)$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_i}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + 2c_i \cot \varphi_i) \sin \varphi_i}{\sigma_1} \right] \quad (3)$$

将表 1 中的数据代入式(2)和式(3)计算,可得表 4 的结果。

表 4 β_1 和 β_2 理论计算结果

层理倾角 $\beta/(^\circ)$	层理间距 /mm	σ_1 值 /MPa	β_1 /($^\circ$)	β_2 /($^\circ$)
0	10	16.22	32.64	88.86
	20	21.17	31.66	89.84
15	10	15.37	31.95	89.50
	20	17.29	31.83	89.67
30	10	14.66	32.00	89.50
	20	16.28	32.64	88.86
45	10	9.50	32.60	88.89
	20	11.63	33.10	88.40
60	10	3.44	37.21	84.29
	20	4.75	35.55	85.95
75	10	4.70	35.59	85.91
	20	5.66	34.87	86.63
90	10	16.39	32.63	88.87
	20	17.46	32.56	88.94

由表 4 可知,理论上只有在 $31.66^\circ \leq \beta \leq 89.84^\circ$ 时,试样才有可能沿着结构面发生破坏,试验结果与此结论基本吻合。根据图 5 的几何关系,同时结合表 4 的计算结果,可知在 $\beta = 60^\circ$ 左右时,岩体强度在理论上最低,这也与试验结果一致。

根据摩尔应力圆理论和库仑准则^[11],可得出层状岩体在三轴压缩下的强度 σ_{1m} 为:

$$\sigma_{1m} = \sigma_3 + \frac{2(c_i + \sigma_3 \tan \varphi_i)}{(1 - \tan \varphi_i \cos \beta) \sin(2\beta)} \quad (4)$$

令 $\sigma_3 = 0$,即可得到层状岩体在单轴压缩下的抗压强度 σ_{mc} 为:

$$\sigma_{mc} = \frac{2c_i}{(1 - \tan \varphi_i \cot \beta) \sin(2\beta)} \quad (5)$$

结合表 1 的试验数据,并由式(5)计算,可得出试样在各个倾角下理论上的抗压强度。将计算的理论强度与试验结果绘在同一图中,进行对比分析,如图 6 所示。

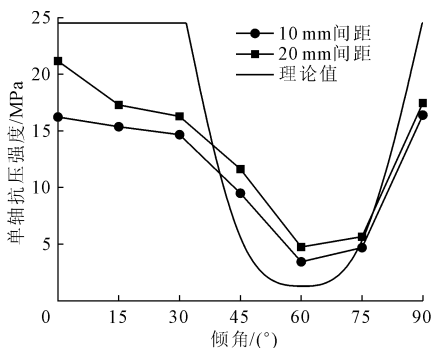


图 6 理论强度与试验强度对比图

由图 6 可知,在不同层理倾角下,试样的理论强度与试验强度的变化规律基本上一致:在 30° 之前,随层理倾角的增加,试样强度缓慢降低; 30° 之后,试样强度急剧降低,并在 60° 左右达到最小值;之后,随层理倾角的增加,试样强度也随之增强。

由于单结构面理论的简化与实际岩体有一定的差别,因此理论上的试样强度与试验强度在数值上存在一定的误差。理论是假定一组层理面的力学性质和参数完全相同,而且遵循莫尔-库仑破坏准则,因此理论强度是一条比较规则的曲线;而实际试样同一组中层理面的力学性质和参数并不完全一致,而且其破坏也不完全是剪切破坏,因此与理论结果有差别^[5]。

4 结 论

天然岩体由结构面和岩块组成^[12],结构面包括包括层理、节理、断裂等。本文基于类层状岩体的单轴压缩试验,深入探讨了层理对岩体各向异性特征的影响。

(1) 试样的单轴抗压强度和弹性模量均存在明显的各向异性特征,强度随层理面倾角的增长总体上是先减小后增大,近似呈“U”型变化的规律,并在 60° 左右达到最小值;弹性模量随层理面倾角的变化规律总体上是以 45° 为分界点先减小后增大,近似呈“V”型变化。

(2) 在相同倾角的情况下,随层理间距的减小,岩体强度和弹性模量均稍有降低,但降幅都比较小。层理面间距对岩体的各向异性比的影响也不大,层理间距为 10 mm 的试样各向异性比为 4.72,层理间距为 20 mm 的试样各向异性比为 4.46,均属于高各向异性水平。

(3) 试样的破坏形态也表现出明显的各向异性特征,破坏机理主要是剪切滑移和张拉破坏,以及两者的组合。存在这种差异的主要原因是层理面的倾角不同,而层理间距对其影响较小。

(4) 基于单结构面理论的计算表明,在层理倾角为 60° 左右时,试样强度最低;并且只有 $31.66^\circ \leq \beta \leq 89.84^\circ$ 时,试样才有可能沿着层理面滑动破坏,均与试验结果吻合的比较好。

参考文献:

[1] 冒海军,杨春和.结构面对板岩力学特性影响研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(20):3651-3656.

(上接第 149 页)

- [2] 衡 帅,杨春和,曾义金,等.基于直剪试验的页岩强度各向异性研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):874-883.
- [3] 王聪聪,李江腾,林 杭,等.板岩单轴压缩各向异性力学特征[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(11):3759-3764.
- [4] 黄 春,左双英,王 嵩,等.层状各向异性岩体的室内单轴压缩试验分析[J].长江科学院院报,2016,33(5):58-62.
- [5] 夏 磊,曾亚武,张 森.层理面细观参数对层状岩体强度特性影响的研究[J].长江科学院院报,2016,33(7):68-75.
- [6] 鲁海峰,姚多喜,沈 丹,等.层状岩体受压力学特征结构面效应数值分析[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2014,34(1):24-29.
- [7] 贾长贵,陈军海,郭印同,等.层状页岩力学特性及其破坏模式研究[J].岩土力学,2013,34(S2):57-61.
- [8] 曾纪全,胡卸文,等.岩体力学各向异性试验研究[J].水电工程研究,2001(2):8-21.
- [9] Ramamurthy T, Rao G V, Singh J. Engineering behaviour of phyllites[J]. Engineering Geology, 1993,33(3):209-225.
- [10] 张华宾,陈 帅,张顷顷,等.风化花岗岩单轴损伤力学特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):67-70.
- [11] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].2版.北京:科学出版社,2013:104-108.
- [12] 李宏福,邢闯锋,李 欣.单轴压缩下岩体斜裂纹断裂特性研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(3):1-4.