

层状岩体单轴压缩破坏数值研究

罗世林, 万文, 赵延林, 唐劲周, 刘天宇

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 湖南科技大学 煤矿安全开采技术 湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为综合研究加载速率和结构面倾角2个因素对岩石单轴抗压强度的影响关系,开展了一系列数值试验,试验表明:岩石单轴抗压强度随加载速率的增加而近似线性增加;随着结构面倾角的增加岩石单轴抗压强度出现先减少后增加的“U”型曲线特点;通过变形破坏分析可知 60° 为岩石最不利结构面倾角;同时结构面倾角为 0° 和 90° 时应力-位移曲线具有明显的尖点说明其脆性较其他倾角下的岩石明显.在此基础上定量的提出了岩石抗压强度与加载速率和结构面倾角的关系式.

关键词:数值试验;加载速率;抗压强度;结构面倾角

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2016)02-0050-07

Numerical study of layered rock mass under uniaxial compression failure

LUO Shilin, WAN Wen, ZHAO Yanlin, TANG Jinzhou, LIU Tianyu

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining and Technology of Coal Mine, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To study the relationship between the loading ratios and the two factors of structure plane dip influencing on rock mass uniaxial compression strength, this paper has made a series of numerical experiments. Experiment shows that the rock uniaxial compressive strength increases linearly with the increase of the loading rate; with the increase of structural plane dip, the rock uniaxial compressive strength reduces at first and then increases whose characteristics suits to the "U" type curve. Through the analysis of the deformation, it knows that 60° is the most unfavorable structure plane dip for rock; at the same time, there are cusp on the stress strain curve of 0° and 90° obviously, showing that its brittleness is clear, compared to other rocks. Based on the results of numerical experiments, this paper puts forward the quantitative relation of the loading rates and the structure plane dip to rock uniaxial compressive strength.

Key words: numerical experiments; loading rates; compressive strength; structural plane angle

层状岩体在岩土工程中广泛存在,其抗压强度是工程设计中的重要力学参数^[1].结构面的存在不仅会使得岩石抗拉、抗压强度等岩石力学指标表现出各向异性,同时还会影响到岩石的完整性,工程的稳定性.岩石抗压强度的大小不仅与完整岩石本身的强度有关,而且与结构面倾角以及室内试验时加载速率大小有关.在岩石结构面倾角与抗压强度关系方面,许多学者开展了详细的理论分析和试验研究:邓桂荣等^[2]利用模拟试验对层状岩体的变形特性和强度特性进行了研究,得到了模拟试样的变形模量和强度随试验所含节理数、轴向应力与节理面间的夹角和围压之间的变化关系;贾善坡等^[3]针对层状岩体的破坏特征开展了一系列的室内试验,得出了不同倾角下岩石破坏模式,周科峰等^[4]运用FLAC^{3D}软件建立层状

收稿日期:2015-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274097,51174088);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2067);湖南省教育厅资助项目(13A020)

通信作者:万文(1968-),男,湖南衡阳人,博士,教授,研究方向:岩石力学. E-mail: wanwen68@163.com

岩石试件模型,分析单轴压缩情况下的破坏模式和结构面对岩石抗压强度的影响,结果表明结构面倾角不同岩石的破坏模式具有一定的差异,同时随着结构面倾角的增加,岩石抗压强度呈现先减少后增加的趋势.在加载速率对岩石抗压强度影响研究方面:何忠明^[5]通过室内试验和数值模拟研究,分析层状岩体单轴压缩情况下的应力-应变响应以及强度特征认为岩石单轴抗压强度会随加载速率的增加呈现出线性增加的性质.尹小涛^[6]利用颗粒流程序,通过 Fish 语言编程虚拟实现岩石数值试件,在不同加载速率下进行单轴压缩数值试验,研究岩石峰值强度、变形参数与加载速率的关系.

本文采用 FLAC^{3D}有限差分软件对结构面厚度和间距均为 0.1 m 的岩体在不同加载速率和结构面倾角下进行层状岩体单轴压缩破坏数值研究,数值研究中模型的建立和网格的划分均在 ANSYS 中,在 FLAC^{3D}中进行不同加载速率和结构面倾角下岩石单轴抗压强度的数值试验.

1 数值模型与实验设计

1.1 模型介绍

采用 FLAC^{3D}来进行数值实验.考虑到 FLAC^{3D}建模的复杂性^[7],采用有限元软件 ANSYS 进行数值实验的模型建立以及网格划分,然后将划分好网格的模型导入 FLAC^{3D}进行数值计算. ANSYS 软件是融合结构力学、热力学、流体力学、电磁学、声学于一体的大型通用有限元商用分析软件^[8],该软件主要由前处理模块、求解模块、后处理模块 3 大主要模块组成.本模型为圆柱体,其中圆柱体尺寸为半径 $r = 1$ m,厚度 $h = 4$ m;模型中存在一组优势软弱结构面,结构面倾角 β 以 10° 为梯度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化,软弱结构面的厚度和间距均为 0.1 m.在 ANSYS 中所建立的部分三维数值模型如图 1,

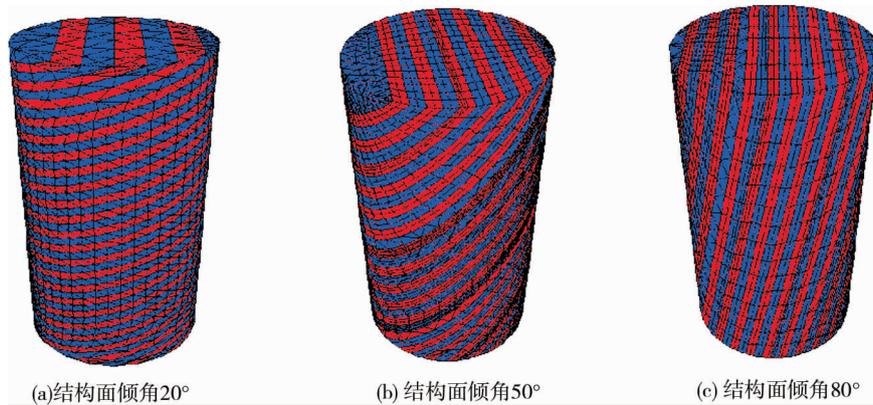


图 1 部分结构面数值计算模型

由于岩石是由可压缩的粒状材料构成,且表现为非线性的变形特征^[9],故本数值试验模型采用 Mohr-Coulomb 应变软化模型.岩体的参数:容重为 26 kN/m^3 ,弹性模量 1.63 GPa ,泊松比 0.21 ,内聚力 2.0 MPa ,内摩擦角 41° 膨胀角 10° ,抗拉强度 1.41 MPa ;结构面参数:容重为 21 kN/m^3 ,弹性模量 0.2 GPa ,泊松比 0.30 ,内聚力 0.1 MPa ,内摩擦角 23° 膨胀角 5° ,抗拉强度 0.1 MPa .

1.2 数值实验设计

为研究不同结构面倾角岩体在不同加载速率下岩体抗压强度的变化规律,分别对结构面倾角和加载速率设定不同的数值.其中结构面倾角 β 分别为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$;加载速率 v 分别为 $0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.80, 1.60, 3.20, 6.40$ (10^{-5} mm/step),其数值实验的边界条件为使用 fix 命令固定模型上下两端面的节点在 y (垂直)方向的位移,每 1 次应力的加载都运行足够的步数,一般运行 15 000 步以上,判断数值试验是否达到平衡的方法是:用 hist 命令实时记录各试件顶部 5 个节点的位移,编译 fish 语言程序将记录的各个节点的位移以 ASCII 码写入 txt 文件,再进行数据处理取均值,然后再将各个曲线绘制到同一张图上,当试件顶部位移不再发生变化时即可认为模型达到了预期平衡状态.

2 实验结果分析

按照预期的设计进行数值试验,采用 FLAC^{3D}内嵌 fish 语言编译相应的程序,记录试件顶部位移以及

应力的变化,经过 80 次数值模拟实验所得到岩石单轴抗压强度(MPa)结果见表 1.

表 1 数值模拟实验结果

倾角/(°)	岩石单轴抗压强度/MPa							
	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8
0	2.192	2.29	2.355	2.644	3.184	4.877	9.175	17.530
10	1.689	1.615	1.633	1.850	2.321	3.157	5.778	11.330
20	1.512	1.563	1.609	1.650	1.791	2.460	4.225	7.861
30	0.666	0.755	0.860	1.016	1.441	2.302	3.979	6.975
40	0.347	0.375	0.422	0.791	1.273	2.190	3.443	5.911
50	0.288	0.313	0.409	0.694	1.278	2.116	2.909	5.519
60	0.289	0.302	0.344	0.457	0.791	1.542	2.696	5.164
70	0.442	0.480	0.572	0.687	1.075	1.988	3.241	5.652
80	0.932	1.249	1.488	1.780	2.219	2.837	4.619	8.395
90	2.292	2.420	2.455	2.944	3.884	5.977	9.975	18.630

注:加载速率 $v_1 \sim v_8$ 分别为(0.05,0.10,0.20,0.40,0.80,1.60,3.20,6.40) (10^{-5} mm/step).

2.1 加载速率对抗压强度的影响

为进一步研究加载速率对层状岩体抗压强度的影响,结合表 1 中的数值试验数据,图 2 给出了在结构面倾角一定的情况下,不同加载速率对层状岩体抗压强度的影响.

由图 2 可知,不同结构面倾角情况下,加载速率对岩体抗压强度的影响呈现大致相同的变化趋势:变化加载速率于区间 $[0.05 \times 10^{-5}, 6.4 \times 10^{-5}]$ mm/step,变化梯度为 2 倍,对任意结构面倾角的岩样,其抗压强度均随加载速率的增大而增大,在加载速率较小阶段 $0.05 \sim 0.20 (10^{-5} \text{ mm/step})$,岩样抗压强度的增幅较为缓和,其后随着加载速率的增加,岩样抗压强度的增幅变大,说明抗压强度受加载速率的影响较为敏感,并且随加载速率的增加岩石抗压强度呈近似线性增加,通过对加载速率和抗压强度拟合可得拟合结果(见表 2),且而得到较高的相关系数.

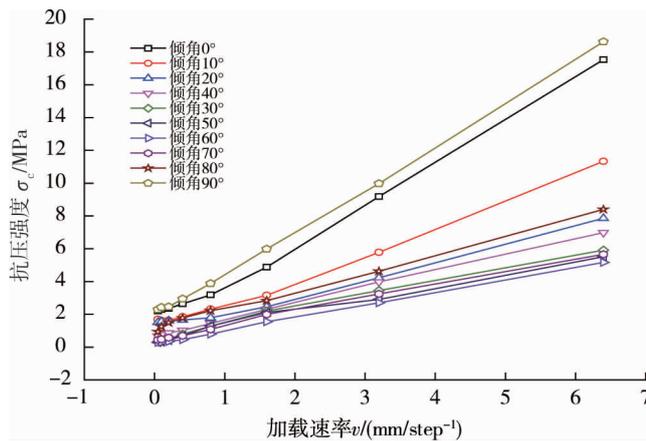


图 2 加载速率与抗压强度的影响

表 2 抗压强度与加载速率的关系

结构面倾角/(°)	拟合方程	相关系数
0	$\sigma_c = 2.428v + 1.661$	0.993 35
10	$\sigma_c = 1.528v + 1.236$	0.989 68
20	$\sigma_c = 0.999v + 1.241$	0.985 57
30	$\sigma_c = 0.998v + 0.659$	0.999 08
40	$\sigma_c = 0.884v + 0.435$	0.988 24
50	$\sigma_c = 0.813v + 0.395$	0.983 97
60	$\sigma_c = 0.776v + 0.211$	0.999 09
70	$\sigma_c = 0.831v + 0.442$	0.995 50
80	$\sigma_c = 1.123v + 1.150$	0.995 14
90	$\sigma_c = 2.579v + 1.692$	0.998 98

2.2 倾角对抗压强度的影响

众多岩土工程、边坡工程的失稳破坏是因为岩石中存在有结构面,而结构面的倾角对岩石抗拉、抗压强度等力学指标的影响较大,在应力场作用下岩体结构面产生大量变形,同时产生较大剪应力,使得岩体沿结构面破裂、滑移,最终导致工程失稳破坏.通过对表 1 中的数据进行处理,可得图 3,分析结构面倾角对岩石抗压强度的影响.由图 3 可知结构面倾角对抗压强度有显著影响.当加载速率保持不变,结构面倾角 $\beta < 45^\circ$ 时,岩体单轴抗压强度随结构面倾角 β 增大逐渐衰减;当结构面倾角 β 的取值区间为 $[45^\circ, 60^\circ]$ 时岩体单轴抗压强度达到最低值;之后随结构面倾角 β 的增大岩体抗压强度不断增大.换言之,当加载速率保持不变时,岩体单轴抗压强度随结构面倾角 β 的增大而呈现出先减少后增大的趋势,结构面倾角 β 介于 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时岩体抗压强度取得最低值说明存在最不利结构面倾角区间;曲线呈现两头高中间低的

形态,呈典型的"U"型趋势,近似呈现出三次函数的关系,并且加载速率越大曲线的"U"型趋势越明显.这与国内外各向异性岩体或岩石试验得到的结论是一致的^[5].同时也充分说明岩体内部结构面的存在是造成岩体抗压强度各向异性的内在原因.

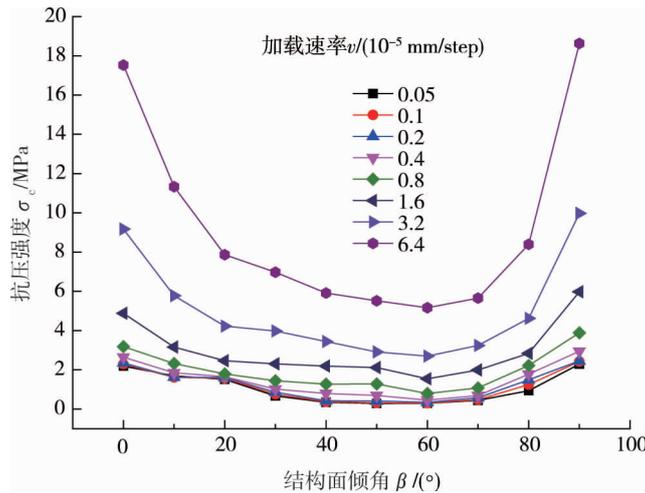


图3 结构面倾角对抗压强度的影响

3 单轴压缩破坏模拟分析

3.1 强度分析

为进一步分析结构面倾角对岩石抗压强度的影响,利用专业绘图软件 Origin 将加载速率为 4×10^{-6} mm/step 下不同结构面倾角岩石的抗压强度绘制成图 4,同时将三维应力下(图 5a)层状岩石的受力进行平面分解(见图 5b).岩体的破坏可能沿结构面滑动破坏,也可能沿岩体内部发生破坏,这主要取决于结构面倾角 β 的大小.根据图 5b 应力分解图可知:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta; \tag{1}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta. \tag{2}$$

由摩尔-库伦准则可知,岩石试件沿结构面发生剪切破坏时,主应力满足以下条件:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(C_j + \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 - \tan \varphi_j \tan^{-1} \beta) \sin 2\beta} \tag{3}$$

式中, C_j :结构面内聚力; φ_j :结构面内摩擦角; β :结构面倾角.

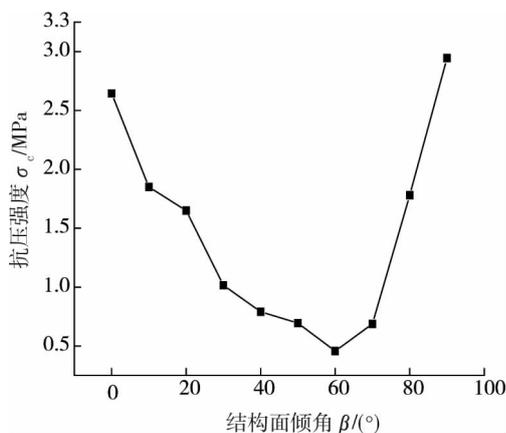


图4 结构面倾角与抗压强度的关系

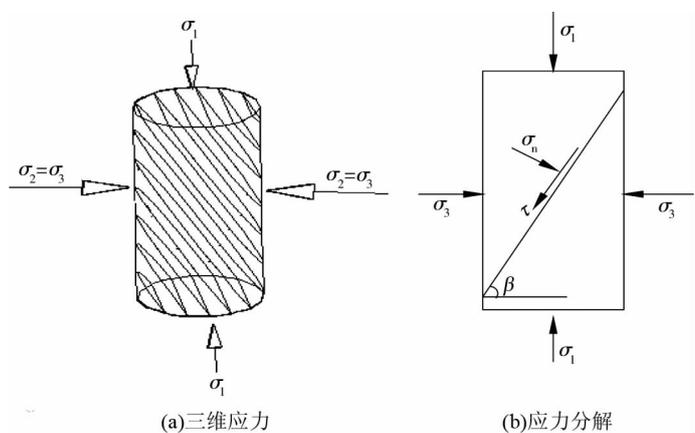


图5 理论计算模型

由式(3)可知当 $\beta \rightarrow 90^\circ$ 或者 $\beta \rightarrow \varphi_j$ 时, $(\sigma_1 - \sigma_3) \rightarrow \infty$,即结构面平行于 σ_1 或者结构面法向与 σ_1 成 φ_j 时,试件不可能沿结构面破坏,实际上这种情况是不存在的,因为 σ_1 不可能无穷大,故在此条件下将沿试件内的某一方向破坏.对式(3)中的 β 求导,令一阶导数等于零,即可求得满足 σ_1 取得极小值 $\sigma_{1,min}$ 的

条件为

$$\tan 2\beta = -\frac{1}{\tan \varphi_j}, \tag{4}$$

即

$$\beta = \pi/4 + \varphi_j/2. \tag{5}$$

将式(5)代入式(3),可得

$$\sigma_{1,\min} = \sigma_3 + \frac{2C_j + 2\sigma_3 \tan \varphi_j}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_j} - \tan \varphi_j} \tag{6}$$

结合表 3 可知当结构面倾角在 30° ~ 60° 的时候试件破坏模式是结构面滑移破坏,通过图 4 可知当结构面倾角在 60° 时取得最小值. 此时所测结构面强度即为岩体的抗压强度.

当 β 不满足以上条件时,发生穿切岩石和结构面的复合破坏;岩体破坏时满足以下条件:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_3 \left(\frac{1 + \sin \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r} - 1 \right) + 2C_r \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r}} \tag{7}$$

式中, C_r :岩石内聚力; φ_r :岩石内摩擦角.

当满足式(7)时,可以认为结构面的强度大于岩石本身的抗压强度.

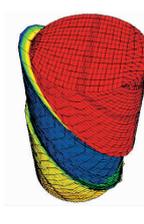
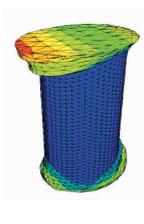
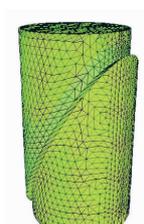
从式(7)可知,当 $\beta \leq \varphi_j$ 和 $\beta = \pi/2$ 时,岩体对应的抗压强度相等.

由图 4 可知结构面倾角 β 位于区间 $[0^\circ \sim 10^\circ]$ 、 $[80^\circ \sim 90^\circ]$ 时,岩石抗压强度 σ_c 变化梯度较大,分别为 0.794 MPa/10° 和 1.164 MPa/10°,当 β 位于区间 $[30^\circ \sim 70^\circ]$ 时,岩石抗压强度 σ_c 变化较小,这是因为岩体主要发生沿结构面的滑移破坏,同时在 β 为 60° 时取得最小值,说明 $\beta = 60^\circ$ 是岩石最不利结构面倾角.

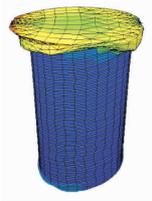
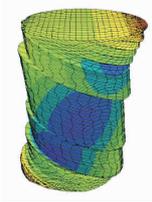
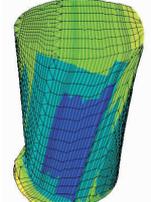
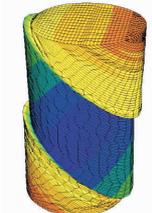
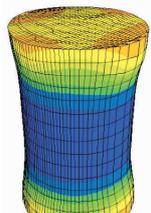
3.2 破坏模式分析

为分析层状岩体的破坏模式,将加载速率为 4×10^{-6} mm/step 下不同结构面倾角岩石的破坏数值图形制成表 3. 由表 3 各结构面倾角下试件破坏模式可知当结构面倾角 $\beta = 0^\circ$ 时试件顶部岩体内部派生出来的拉应力引起试件的拉伸破坏,破坏面与最大拉应力方向垂直;当某一张拉面出现后,随着应力的不断增大,张拉面不断扩大,由此引起的拉伸破坏逐个发生试件内部因此出现众多沿轴向劈裂的破坏面;当结构面倾角 $\beta = 10^\circ$ 试件顶、底部发生剪切破坏;当结构面倾角 $\beta = 20^\circ$ 试件顶部发生剪切破坏,但是该剪切破坏的破坏面包含了结构面和非结构面,并且非结构面的剪切破坏为穿切结构面和岩石的复合破坏;当结构面倾角 β 为 30° ~ 60° 时,试件沿某一结构面(60°) 或者 2 条结构面(40° 和 50°) 甚至多条结构面(30°) 滑移破坏,这是由于结构面上的剪应力超过抗剪强度引起的;当结构面倾角 β 为 70° ~ 90° 时,试件的破坏呈现出整体的倾斜破坏和端部膨胀破坏,这是因为随着结构面倾角的增大,结构面会受到下部端面的支撑,使得试件无法发生滑移破坏,随着应力的增加直至应力超过岩石临界荷载时即出现塑性流动.

表 3 层状岩体破坏模式

结构面倾角/(°)	破坏数值图形	破坏模式	结构面倾角/(°)	破坏数值图形	破坏模式
0		结构面滑移破坏	50		结构面滑移破坏
10		结构面滑移破坏	60		结构面滑移破坏

续表 3

结构面倾角/(°)	破坏数值图形	破坏模式	结构面倾角/(°)	破坏数值图形	破坏模式
20		结构面滑移破坏	70		倾斜破坏
30		结构面滑移破坏	80		倾斜破坏
40		结构面滑移破坏	90		膨胀破坏

4 岩石抗压强度与结构面倾角和加载速度的关系

为了进一步得到层状岩石抗压强度与加载速率和结构面倾角的定量关系,对表 1 进行曲面拟合,通过以上分析可知岩石抗压强度随加载速率 v 的增加而增加近似呈现线性关系,随结构面倾角 β 的增加先减少后增加而近似呈现三次函数的关系,故对加载速率 v 影响部分进行线性拟合,对结构面倾角 β 进行三次函数拟合,拟合曲面见图 6,拟合相关系数达 0.903 12,拟合公式如下:

$$\sigma_c = 1.884 \times 10^{-5} \times \beta^3 - 5.354 \times 10^{-4} \times \beta^2 - 0.099 \times \beta + 1.296 \times v + 3.096. \quad (8)$$

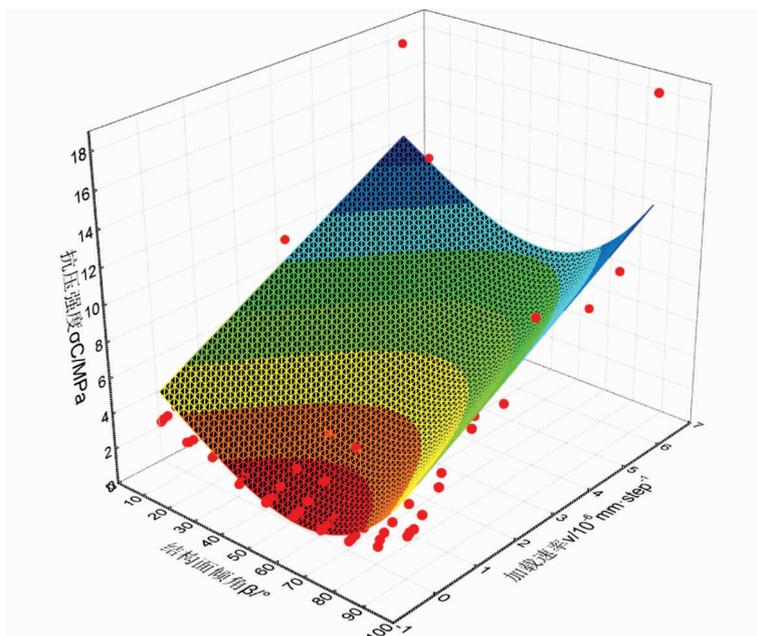


图 6 抗压强度与加载速率 v 和结构面倾角 β 的关系曲面拟合

5 抗压强度公式验证

为了进一步验证本文所得层状岩石单轴抗压强度与结构面倾角和加载速率之间的定量关系(式(8)),的可靠性,根据我国工程试验方法标准^[10]规定,采用圆柱体进行抗压强度试验时,试件厚度取100 mm,直径为50 mm.制定结构面 β 为 40° 试件2个, 60° 试件2个,加载速率 ν 分别为 $(0.3, 0.6) \times 10^{-5}$ mm/step下进行数值试验和室内试验,将同一结构面倾角试件在同一加载速率下的试验结果取均值(MPa),结果分别如表4.

可见,在同样的材料属性下,由式(8)计算得出的岩石抗压强度与室内试验结果能够较好的吻合,验证了该公式的正确性.

6 结论

1) 岩石抗压强度随加载速率的增加而增加,当加载速率较小时($0.05 \times 10^{-5} \sim 0.20 \times 10^{-5}$ mm/step),抗压强度的增幅较为缓和,随着加载速率的增大,抗压强度对其敏感度越低,增幅变大.

2) 岩石抗压强度随结构面倾角的增加呈现先减少后增加,并且存在最不利结构面,本实验最不利结构面倾角 $\beta = 60^\circ$,曲线呈现“两头高,中间低”的“U”型特点.

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,1989:10.
- [2] 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.
- [3] 贾善坡,罗金泽,吴渤,等. 层状岩体单轴压缩破损特征与数值模拟研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(5):69-73.
- [4] 周科峰,李宇峙,柳群义. 层状岩体强度结构面特征的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(4):1424-1428.
- [5] 何忠明,彭振斌,曹平,周莲君. 层状岩体单轴压缩室内试验分析与数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41(5):1906-1912.
- [6] 尹小涛,葛修润,李春光,王水林. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(s1):2610-2615.
- [7] Xu N, Tian H, Kulatilake P H S W, Building a three-dimensional sealed geological model to use in numerical stress analysis software: a case study for a dam site[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(8):1022-1030.
- [8] 张朝晖. ANSYS12.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [9] 王敏,万文,赵延林,钟应伟. 压剪条件下岩体剪切力研究[J]. 矿业工程研究,2013,28(3):53-56.
- [10] 中华人民共和国行业编写组. SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,2001.

表4 公式验证表

试验方式	实验均值/MPa	
	倾角 40°	倾角 60°
数值试验	0.701	0.672
室内试验	0.746	0.732
相对误差	6%	8%