

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.029

岩石室内单轴压缩试验位移加载速率的研究

蒲 诚, 陈蕴生, 周 冲, 李光明

(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 岩石物理力学参数的确定对于实际工程的施工具有十分重要的意义。随着刚性伺服试验机的普及,人们逐渐意识到,相对于负荷加载,采用位移加载方式获得的岩石室内单轴抗压强度更具有可靠性。但是,有关规范中仅给出了负荷加载速率而并未给出明确的位移加载速率。为了寻找到岩石室内单轴压缩试验的最佳位移加载速率,利用石膏砂浆制成类岩石试件,分别模拟泥岩和泥质砂岩,分析类岩石试件在位移加载方式和负荷加载方式下的力学效应及破坏形态。研究发现:位移加载速率在 0.02 mm/s ~ 0.05 mm/s 之间时,通过位移加载方式得到的类岩石试件的单轴抗压强度与通过负荷加载得到的单轴抗压强度最为接近。试件较软时,位移加载速率应适当降低,约为 0.02 mm/s,试件较硬时,加载速率适当增高,约为 0.05 mm/s。

关键词: 岩石力学; 单轴压缩试验; 位移加载; 负荷加载; 力学参数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)03-0161-04

Displacement Loading Rate of Rock-like Specimen Under Uniaxial Compress Test

PU Cheng, CHEN Yunsheng, ZHOU Chong, LI Guangming

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: The physics-mechanical parameters of rock is important to engineering practices. With the development of rigid servo tester, people realized that compared to stress loading, the strength obtained by displacement loading is more reliable. However, no explicit displacement loading rate is given in the specification. In order to find the suitable displacement loading rate of rock mass, in this paper we choose gypsum and sand to make specimen and simulate the mudstone and argillaceous sandstone respectively. The strength and failure mode under two different loading method were analyzed. The results show that the displacement loading rate is between 0.02 mm/s and 0.05 mm/s, and the mechanical properties of specimen obtained by displacement loading are the closest to those obtained by stress loading. If the material is weak the loading rate should be reduced to nearly 0.02 mm/s, when the material is hard, the loading rate should be raised to nearly 0.05 mm/s.

Keywords: rock mechanics; uniaxial compress test; displacement loading; stress loading; mechanical parameter

室内岩石力学试验具有能够严格控制试验环境的条件、排除次要的影响因素、花费耗材相对较少等优点,因此是了解岩石力学特性的重要途径。随着科技的发展,岩石室内试验测试技术与仪器设备也在不断的更新换代。

我国岩石力学的室内试验起步较晚,20世纪50年代以后,岩石力学首先在水利水电系统引起了重视。1964年,由长江科学院与长春材料试验机厂共同研制成长江—500型岩石三轴试验机。到80年

代,长沙矿冶研究院在普通液压材料试验机通过加上刚性组件制成刚性试验机系统,进行了岩石单轴压缩试验全过程。但是,由于刚性试验机不能够控制变量,人们很难得到准确的岩石曲线。20世纪80年代中期至90年代,地质力学研究所以及中科院武汉岩土所分别研制出电液刚性伺服性试验机^[1]。随着刚性伺服试验机的普及,人们意识到,最合适的试验方法应该是控制岩石变形速率,对于不同强度的岩石,只有在同一个应变速率下进行试验,才具有真

正的可比性^[2],于是,岩石室内试验的加载方式也由负荷加载逐渐转变为位移加载与位移-负荷加载。众多学者^[3-11]的研究成果表明,岩石的单轴抗压强度与加载速率有关,加载速率越大,岩石的单轴抗压强度越大,但是,相关规范^[12-15]中仅指出岩石的室内单轴压缩试验应以 0.5 MPa/s ~ 1.0 MPa/s 的负荷速度加载直至试件破坏,并未给出明确的位移加载速率,且对于岩石室内单轴压缩试验位移加载速率的研究也较为少见,仅有李蕊等^[16]通过对秣归县马家沟滑坡中粉砂质泥岩开展三轴压缩试验,分析了在位移加载和负荷加载两种加载方式下岩石的变形破坏特征。

本文通过控制负荷加载速率不变,改变位移加载速率的方式,通过比较不同位移加载速率与规范中规定的负荷加载速率对类岩石试件峰值强度、破坏方式的影响,提出了岩石力学室内单轴压缩试验位移加载速率的合理范围,对于工程以及科学研究具有一定的指导意义。

1 试验概况

1.1 试件制备

石膏具有成型时间快、养护方便、稳定性好等特点,本文选取半水纤维石膏粉、西安泾河河沙为原材料来制作类岩石试件。采用半水纤维石膏粉:西安泾河河沙:纯净水 = 2:2:1 的比例进行配比制作类岩石试件 1,模拟泥质砂岩的力学性能;采用半水纤维石膏粉:水 = 2:1 的比例进行配比制作类岩石试件 2^[17],模拟泥岩的力学性能。

按上述比例称取相应质量的半水纤维石膏粉、西安泾河河沙和纯净水,将三者搅拌均匀后倒入预先制作好的模具中,用工具振捣确保密实。24 h 后脱模,常温常压下养护 15 d,得到不同强度的类岩石试件 1、类岩石试件 2。如图 1 所示,试件为高 100 mm,长、宽分别为 50 mm 的方形试样,试件两端面不平行误差小于 0.05 mm,试件端面垂直于试件轴线。类岩石试件的物理力学性质如表 1 所示。

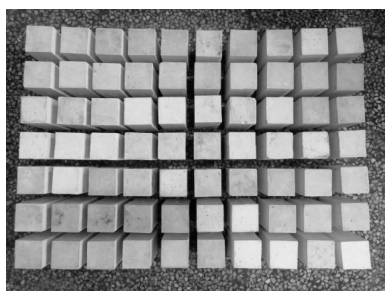


图 1 类岩石试件图

表 1 类岩石试件相关物理及力学性能

岩石类型	密度 ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	单轴抗压 强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ
类岩石试件 1	1.70	12.18	2.07	0.28
泥质砂岩	1.74	11.90	2.18	0.27
类岩石试件 2	2.05	18.43	3.14	0.27
泥岩	2.14	18.18	3.25	0.27

1.2 试验设备及加载条件

如图 2 所示,采用 WDT-1500 大型多功能试验机进行试验;采用轴向引伸计量测试件轴向变形,环向引伸计量测试件环向变形。位移加载速率分别为 0.005 mm/s、0.01 mm/s、0.02 mm/s、0.05 mm/s、0.1 mm/s、0.2 mm/s,负荷加载速率为 0.5 MPa/s。试件两端涂抹少量润滑油减少端部摩擦力的影响。



图 2 WDT-1500 大型多功能材料试验机

同时,为了保持试样的均一性,利用图 3 所示的 RSM-SY5 智能声波检测仪选取波速相近的类岩石试件,每种加载速率进行 5 个平行试验,去除最大值和最小值,取剩余 3 个类岩石试件峰值强度的平均值为最终的峰值强度。



图 3 RSM-SY5 智能声波检测仪

2 试验结果

2.1 应力-应变关系

图 4、图 5 显示了负荷加载以及不同位移加载速率下的类岩石试件的应力-应变曲线。由图 4、图 5 可知,试件的应力-应变曲线均经历了压密、弹性、屈服以及峰后破坏这四个阶段。在压密变形阶

阶段,试件中原有的孔隙被压密,应力随着应变增长的速率较为缓慢;随着应力的增加,试件进入弹性变形阶段,在弹性变形阶段,试件的应力-应变关系曲线呈现符合广义胡克定律的直线型增长;随着应力的进一步增加,试件进入屈服阶段,在屈这一阶段,试件的变形由弹性变形逐渐转换为弹塑性混合变形,由于压应力导致的裂隙尖端的应力集中超过了试件的起裂应力,试件内部本身存在的微裂隙之间逐渐贯通,最终导致试件的破坏。

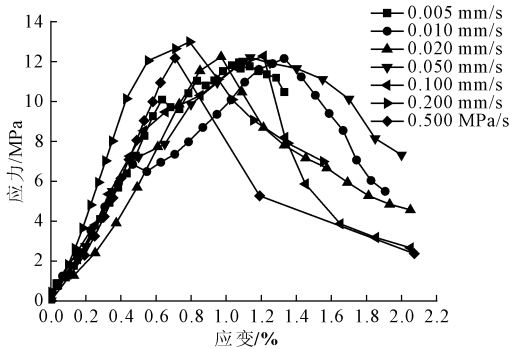


图 4 类岩石试件 1 应力 - 应变图

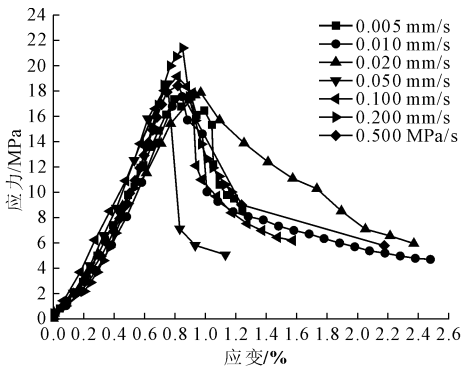


图 5 类岩石试件 2 应力 - 应变图

观察图 4、图 5 可以发现,位移加载和负荷加载两种控制方式得到的试件应力-应变曲线均具有良好的线性特征,其主要区别在于压密段和屈服段。对试件 1 采用负荷加载时,应力-应变曲线呈直线型增长,岩石的压密区以及屈服阶段都不能被很好的反映。对于试件 1 采用位移加载时,由于控制了应变,试件的压密阶段以及屈服阶段能被很好的反映,试件的破坏过程呈现明显的弹塑性特征;对试件 2 采用负荷加载时,岩石的压密段较为明显,但岩石的屈服阶段依旧不能被很好的反映,对试件 2 采用位移加载时,试件 2 的压密阶段以及屈服阶段均被很好的反映。

2.2 峰值强度 - 加载速率关系

表 2 为类岩石试件位移加载得到的峰值强度。

通过负荷加载得到的类岩石试件 1、类岩石试件 2 的强度分别为 12.18 MPa 和 18.43 MPa,定义通过不同位移加载得到的峰值强度与通过负荷加载得到的峰值强度的差值为强度差值。图 6 为类岩石试件的强度差值与位移加载速率之间的关系曲线。

表 2 类岩石试件峰值强度

位移加载速率 / (mm·s ⁻¹)	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2
试件 1 强度 / MPa	11.96	12.15	12.17	12.20	12.28	12.99
试件 2 强度 / MPa	17.57	17.56	17.87	18.57	19.15	21.40

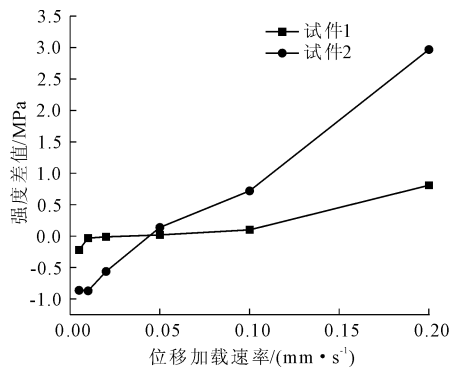


图 6 类岩石试件 1 应力 - 位移加载速率曲线

通过图 6 可以观察到,类岩石试件的峰值强度随着加载速率的增大而增大,当位移加载速率小于 0.01 mm/s 时,类岩石试件的通过位移加载得到的峰值强度小于通过负荷加载得到的峰值强度;当位移加载速率在 0.02 mm/s ~ 0.10 mm/s 时,通过位移加载得到的峰值强度与通过负荷加载得到的峰值强度极为接近,在这一区间内,位移加载速率对试件峰值强度的影响较小,即随着位移加载速率的增大,试件的峰值强度增长较为缓慢;当位移加载速率超过 0.05 mm/s 之后,通过位移加载得到的类岩石试件的峰值强度大于通过负荷加载得到的类岩石试件的峰值强度,并且随着位移加载速率的增大,这种差值越来越大。

2.3 不同加载速率的破坏模式分析

图 7 是两种类岩石试件破坏形态的对比,可以发现,当使用位移加载时,类岩石试样的破坏主要以压裂破坏为主,试件产生纵向的压裂纹致使承载力丧失,试件破坏。当位移加载速率为 0.005 mm/s 时,类岩石试样的破坏以胶结物之间沿着内部缺陷的微小错动为主,试件表面并没有形成显著的裂纹,裂隙贯通较为缓慢,破坏后的试样仍能保持其原有形状。随着加载速率的增大,当位移加载速率在 0.1 mm/s ~ 0.2 mm/s 时,裂隙贯穿极为迅速,试件表面

形成显著破坏裂隙,试件的破坏以块体的相对滑动为主,呈明显的脆性破坏特征,破坏后的试件不能保持其原有形状;相对于位移加载,负荷加载试件的初始破坏阶段较为缓慢,但随着负荷逐渐增大,裂隙迅速贯穿,到达峰值强度之后,试样峰后强度迅速跌落,试件的破坏不仅有压裂破坏,还有块体滑移所产生的剪切破坏,试件的破坏较为剧烈,破坏后的试件不能保持其原有形状。

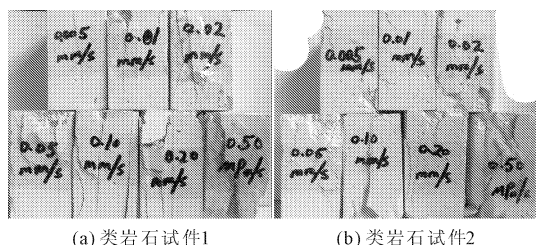


图 7 类岩石试件破坏图

3 结 论

(1) 加载速率对岩石的峰值强度影响较大,当加载速率较小时,类岩石试件岩石的峰值强度较小,随着加载速率的增大,类岩石试件的峰值强度逐渐增大。

(2) 类岩石试件越是软弱,用位移加载方式越能更好的反应类岩石试件应力-应变曲线的压密段、屈服阶段以及峰后变形破坏阶段。并且位移加载能更好的控制类岩石试件峰后段的加载速率,更清晰的反应类岩石试件的应力-应变关系,得到全应力-应变曲线。

(3) 通过对不同位移加载速率下与《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)、《水利水电工程岩石试验规程》(DL/T 5368—2007)等规范所规定的负荷加载速率下所得到的类岩石试件峰值强度、以及破坏模式的分析,发现位移加载速率在 0.02 mm/s ~ 0.05 mm/s 之间时,位移加载得到试件的力学性能与规范规定的负荷加载速率最为接近。对于不同强度试件的位移加载速率可以做适当的调整,试件较软时的位移加载速率应适当降低,约为 0.02 mm/s,试件较硬时的位移加载速率应适当增高,约为 0.05 mm/s。

参考文献:

- [1] 谢和平. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 12.
- [2] 宁建国. 岩体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2014: 43.
- [3] 王立民, 许敦山, 刘长雷. 加载速率对岩石破坏的影响研究[J]. 山东煤炭科技, 2013(2): 126-127.
- [4] Wang Limin, Xu Dunshan, Liu Changlei. Study on influence of loading rate on rock damage[J]. Shandong coal technology, 2013(2): 126-127.
- [5] 李海涛, 蒋春祥, 姜耀东, 等. 加载速率对煤样力学行为影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 430-436.
- [6] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507-2513.
- [7] 朱启银, 尹振宇, 朱俊高, 等. 软黏土加载速率效应特性试验研究: 进展与趋势[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 7-24.
- [8] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 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.
- [9] 梁昌玉, 李 晓, 李守定, 等. 岩石静态和准动态加载应变率的界限值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1156-1161.
- [10] 张 通, 祝梓航, 郑雪梅, 等. 不同应变速率下双裂隙红砂岩力学特征试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 64-67, 72.
- [11] 郭连军, 杨跃辉, 华悦含. 冲击荷载作用下岩石的变形与破坏试验分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(6): 31-34, 49.
- [12] 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [13] 水利水电工程岩石试验规程: DL/T5368—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [14] 公路工程岩石试验规程: JTG E41—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [15] 铁路工程岩石试验规程: TB 10115—2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [16] 李 蕊, 胡新丽, 丛 璐, 等. 粉砂质泥岩不同加载控制方式下三轴压缩试验研究[J]. 铁道建筑, 2016(4): 149-152.
- [17] 余 朝. 单轴压缩条件下裂隙试样的破坏过程及其对抗压强度影响的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2013.