

文章编号: 1005-0523(2021)03-0001-06

## 层状复合岩石三轴压缩力学性能研究

刘永胜, 詹学才, 邱传传

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 为了研究不同围压、多种界面层倾角和界面层间距的层状复合岩石的力学性能演化规律, 利用 ZTR-2000 微机控制岩石三轴测试系统, 开展了不同围压条件下岩样的试验研究。试验结果表明: 轴向抗压强度随界面层倾角的增大而降低、随着围压的增大而提高。在低围压时, 界面层间距能够提升抗压强度; 在高围压时, 界面层间距对抗压强度影响不大。层状复合岩石的弹性模量的随层间距呈现规律性变化; 岩样破坏类型受倾角和界面层间距影响。

**关键词:** 层状复合岩石; 三轴压缩; 界面; 破坏模式

中图分类号: TU452

文献标志码: A

本文引用格式: 刘永胜, 詹学才, 邱传传. 层状复合岩石三轴压缩力学性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3): 1-6.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20210706.016

## Study on Mechanical Properties of Layered Composite Rock Under Triaxial Compression

Liu Yongsheng, Zhan Xuecai, Qiu Chuanchuan

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In order to study the evolution of mechanical properties of layered composite rocks with different confining pressures, various interfacial dip angles and interfacial spacings, the ZTR-2000 microcomputer controlled rock triaxial test system was used to carry out experimental research on rock samples under different confining pressures. The results show that the axial compressive strength decreases with the increase of the inclination angle of the interface layer, and increases with the increase of the confining pressure. When the confining pressure is low, the distance between the interface layers can increase the compressive strength. At high confining pressure, the distance between the interface layers has little effect on the compressive strength. The elastic modulus of layered composite rock changes regularly with the interval between layers. The failure type of rock sample is affected by dip angle and interfacial layer spacing.

**Key words:** layered composite rock; confining pressure; interface; failure mode

**Citation format:** LIU Y S, ZHAN X C, QIU C C. Study on mechanical properties of layered composite rock under triaxial compression[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 1-6.

层状复合岩石是地下工程中常见的岩体之一, 与单一岩石不同, 层状复合岩石是由多层性能各异

的岩石复合而成, 各组分性能不同, 并且存在界面缺陷, 其破坏机制及方式也明显不同于均质岩体。

收稿日期: 2021-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(51664014)

作者简介: 刘永胜(1974—), 男, 教授, 博士, 研究方向为岩石动力学研究。E-mail: yshliu07@126.com。

近年来,针对层状岩石的力学行为国内外学者做了大量的研究工作,涉及试验参数、破坏机理、变形特征、本构模型等方面。尹光志等<sup>[1]</sup>在真三轴条件下,将层状复合岩石虚拟为一种等效的均质岩石,建立了真三轴应力条件下基于MLC准则的层状复合岩石破坏准则,并进行了不等应力作用下不同岩石组成的层状复合岩石的真三轴试验;孟陆波等<sup>[2-5]</sup>对各类砂岩开展高温条件下的各向异性、蠕变、强度等力学性能的研究;刘永胜等<sup>[6-7]</sup>对化学腐蚀作用下岩石的动态性能进行了研究,分析了化学腐蚀下岩石力学性质、动态性能的影响并建立了动态本构模型;刘立等<sup>[8]</sup>对于常见层状复合岩石的损伤结构与本构关系进行了研究,并用电镜研究了其微观结构和微孔隙特征,导出了各分层的三维非线性损伤本构方程与演化方程;余超等<sup>[9]</sup>针对工程中支护与围岩的接触问题,利用FLAC软件模拟了对隧道的影响,结果表明支护单元与围岩接触更符合工程实际;郑蕾<sup>[10]</sup>对于层状岩石的倾角效应,用理论分析—室内试验相结合的方法,从层状岩石的结构特征入手,研究了层状岩石的各向异性及横观各向同性特征;林新等<sup>[11-12]</sup>对层状复合岩石开展单轴和三轴试验并对其应力—应变特性进行讨论。

随着矿井开采、交通隧道等工程越来越向深部发展,层状复合岩石稳定性问题越来越受到重视。为了更准确地掌握层状复合岩石的性能,本文以界面层倾角、围压、界面层间距作为影响因素,进行了白砂岩、红砂岩、青砂岩组合的层状岩石的三轴压缩试验,研究了岩石在不同受力情况的材料参数及力学性能,并加以理论分析。

## 1 试件制作及试验方案

试件选用青砂岩、红砂岩、白砂岩3种材料采用云石胶粘接而成,界面层倾角分别为 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ ,界面层间距 $d$ 分别为10、15、20 mm。试件为直径50 mm,高100 mm的标准圆柱体,部分试件如

图1所示。

试验采用ZTR-2000微机控制岩石三轴测试系统加载,最大试验力不低于2 000 kN,如图2所示。加载方式采用位移控制,轴向加载速率为0.03 mm/min,控制目标2 mm;围压加载速率0.2 MPa/s,常规三轴加载初期采用静水压力条件加载至预定围压,然后伺服控制围压,围压控制分别为10、15、20 MPa。

## 2 试验结果及分析

试验得到了各试件的三轴抗压强度。如表1为相同界面层间距(10 mm)不同围压、不同界面层倾角;表2为相同界面倾角( $45^\circ$ )不同层面间距、不同围压的实验结果。



图1 复合岩石试件

Fig.1 Composite rock specimen



图2 ZTR-2000 岩石三轴测试系统

Fig.2 ZTR-2000 Rock triaxial test system

表1 相同界面层间距三轴抗压强度

Tab.1 Triaxial compressive strength of the same interlayer spacing

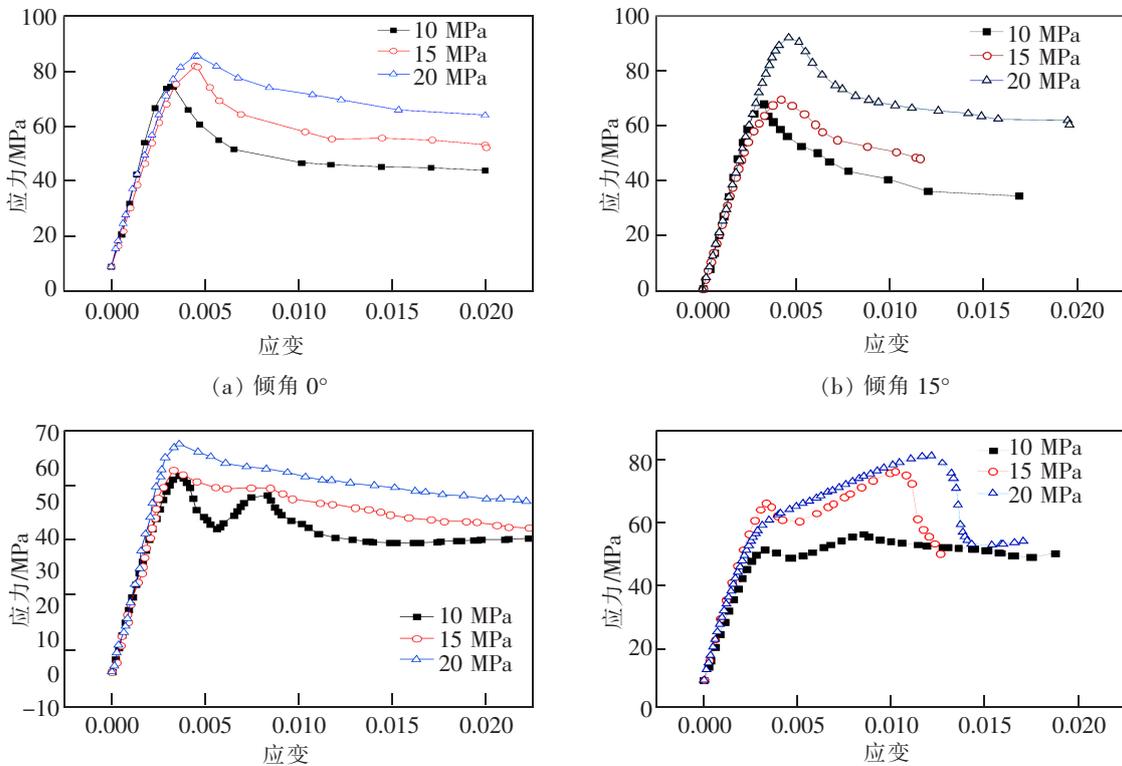
界面层倾角/ $^\circ$	围压 10 MPa	围压 15 MPa	围压 20 MPa
0	71.53	79.60	83.53
15	67.63	69.30	91.88
30	57.20	58.76	66.42
45	52.80	75.45	81.16

表 2 不同界面层间距三轴抗压强度  
Tab.2 Triaxial compressive strength of different interlayer spacing

参数	界面层间距 10 mm			界面层间距 15 mm			界面层间距 20 mm		
	围压 10 MPa	围压 15 MPa	围压 20 MPa	围压 10 MPa	围压 15 MPa	围压 20 MPa	围压 10 MPa	围压 15 MPa	围压 20 MPa
强度	52.80	75.45	81.16	51.87	64.25	89.06	67.14	71.85	81.26

试验结果表明,层状复合岩石的强度受界面层倾角、围压和界面层间距的影响。在相同围压、相同界面层间距下,复合岩石的抗压强度随着界面层倾角的增大而减小,倾角为 30°时强度最小,倾角为 45°时强度又有所回升,但仍低于 0°倾角的强度值。由表 1 可知,围压为 10 MPa,界面层倾角为 45°时,相较于界面层倾角 0°的岩样,三轴抗压强度下降了 26.18%;同理,围压为 15 MPa,倾角 45°比倾角 0°的岩样强度下降了 5.21%;围压为 20 MPa,倾角 45°比倾角 0°的岩样强度下降了 2.84%。造成岩样强度下降的主要原因是岩样受压破坏时,其剪切破坏面与界面层接近或重合所致。实验发现界面倾角为 30°时,试验破坏面与界面弱面重合,所以强度最低。

当界面层间距和界面层倾角一定时,随着围压的增大,岩样的抗压强度逐渐上升。图 3 为界面层间距为 10 mm 时,不同界面倾角的试件三轴压缩强度随围压变化的情况。由图 3 可知,界面层倾角为 0°时,围压 20 MPa 和 15 MPa 抗压强度提高比围压 10 MPa 的强度提高了 11.28%,4.94%;同理,界面层倾角为 15°时,强度分别提高 2.47%,32.58%;界面层倾角为 30°,强度分别提高 2.73%,13.04%;界面层倾角为 45°时,强度分别提高 42.90%,7.57%。在三维受压情况下,围压约束了岩样的侧向位移,产生了套箍效应,提高了岩样的抗压能力。图 4 是界面倾角为 45°时,不同界面层间距的试件强度随围压变化情况。同样也可以看出,随着围压提高,三轴抗压强度提高。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 3 界面层间距 10 mm 时围压对强度的影响

Fig.3 Influence of confining pressure on strength when interface layer spacing is 10 mm

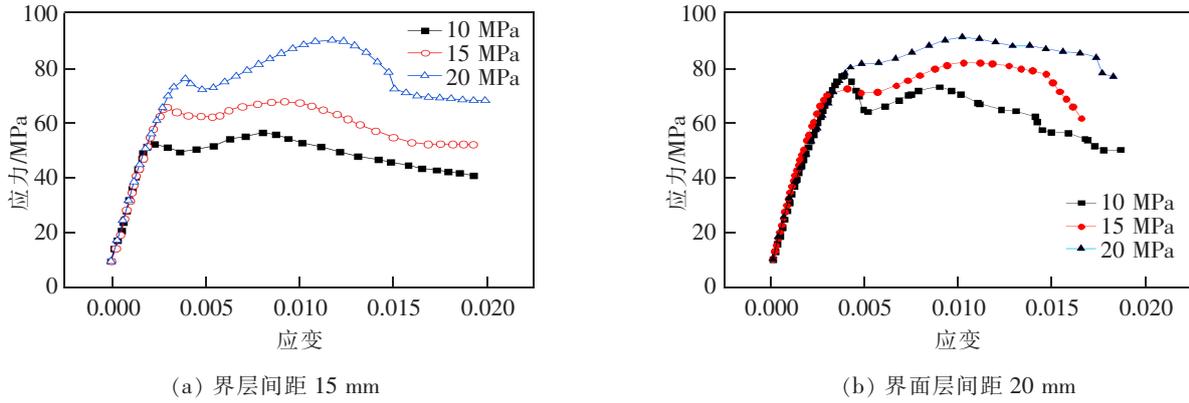


图4 界面倾角45°时围压对强度的影响  
Fig.4 Influence of confining pressure on strength at 45° interface angle

### 3 层状复合岩石的破坏分析

假设界面层为理想弹塑性体，屈服条件满足 Mohr-Coulomb 准则，受应力作用 ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ )，界面层与最大主应力方向呈  $\alpha$  夹角，如图 4(a)所示。当作用在界面层上的法向及切向应力满足屈服条件，并且界面层与最大主应力  $\sigma_1$  夹角  $\alpha$  满足  $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$  时，层状岩石将沿界面层发生塑性滑移；当  $\alpha < \alpha_1$  或  $\alpha > \alpha_2$  并满足屈服条件时，破坏将在岩石内部发生，界面层对层状复合岩石强度的影响不大。 $\alpha_1, \alpha_2$  的大小与界面层内摩擦角  $\theta_j$ ，粘聚力  $C_j$  及岩体的应力状态有关。根据图 4(b)中的几何关系有

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \arcsin \left[ \frac{2c_j \cot \theta_j + \sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \sin \theta_j \right] + \frac{\theta_j}{2} \quad (1)$$

$$\alpha_2 = 90^\circ + \frac{\theta_j}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left[ \frac{2c_j \cot \theta_j + \sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \sin \theta_j \right] \quad (2)$$

当界面层处于极限平衡应力状态时，作用在界面层上的法向应力  $\sigma$  和切向应力  $\tau$  满足 Mohr-Coulomb 准则，则主应力满足

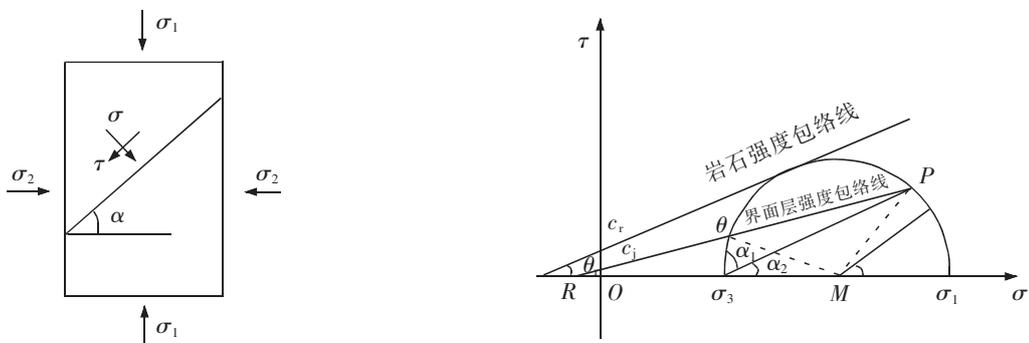
$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \theta_j)}{(1 - \tan \theta_j \cot \alpha) \sin 2\alpha} \quad (3)$$

由于岩石本身的粘聚力和内摩擦角大于界面层的粘聚力和内摩擦角，岩样破坏时满足

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_3 (N_\theta - 1) + 2\theta_j \sqrt{N_\theta} \quad (4)$$

式中： $N_\theta = (1 + \sin \theta_r) / (1 - \sin \theta_r)$ ； $c_r, \theta_r$  分别为岩石的粘聚力和内摩擦角<sup>[13-15]</sup>。

根据 Mohr-Coulomb 理论计算出岩样的内摩擦角和粘聚力，并代入式(1)~式(4)，计算得  $\alpha_1, \alpha_2$  见表 3, 表 4。根据上述理论判断：倾角  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  岩样发生内部破坏；倾角  $45^\circ$ ，界面层间距 10 mm 的岩样发生沿界面层滑移的塑性破坏；倾角  $45^\circ$ ，界面层间距 15 mm 和 20 mm 情况下发生内部破坏，试件的破坏准则如图 5 所示，破坏状态如图 6 所示。图 5 中  $\theta, P$  为界面的应力状态点； $\alpha_1, \alpha_2$  为界面层倾角； $\theta_r$  为内摩擦角； $c_r, c_j$  分别为岩石极限强度下的粘聚力和界面层强度粘聚力； $\sigma_1$  为 X 轴局层应力； $\sigma_2$  为 Z 轴压应力； $M$  为 Mohr 应力圆心。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All Rights reserved. http://www.cnki.net

图5 层状复合岩石破坏准则  
Fig.5 Failure criterion of layered composite rock

表 3 界面层间距 10 mm 时的岩样力学参数  
Tab.3 Mechanical parameters of rock samples when the interfacial layer spacing is 10 mm

倾角/(°)	内摩擦角/(°)	粘聚力/MPa	围压/MPa	$\alpha_1$ /(°)	$\alpha_2$ /(°)
0	23	21.97	10	41.51	71.49
			15	41.73	71.27
			20	41.14	71.86
15	25	13.93	10	42.75	72.25
			15	42.91	72.09
			20	42.80	72.20
30	27	9.51	10	43.68	73.32
			15	43.20	73.80
			20	43.72	73.28
45	29	7.26	10	44.77	74.23
			15	39.34	79.66
			20	44.82	74.18

表 4 倾角 45° 时的岩样力学参数  
Tab.4 Mechanical parameters of rock samples at an inclination angle of 45°

界面层间距/mm	内摩擦角/(°)	粘聚力/MPa	围压/MPa	$\alpha_1$ /(°)	$\alpha_2$ /(°)
15	35	0.32	10	48.56	76.44
			15	47.71	77.29
			20	47.89	77.11
20	18	16.04	10	37.40	70.60
			15	39.26	68.74
			20	39.29	68.71



(a) 倾角 30° 试件



(b) 倾角 0° 试件



(c) 倾角 45° 试件

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 6 复合岩石试件破坏状态  
Fig.6 Rock sample failure state

#### 4 结论

利用 ZTR-2000 微机控制岩石三轴测试系统,在不同的围压作用下对不同界面层倾角、不同界面层间距的层状复合岩石进行了试验,结论如下:

1) 在围压和界面层间距不变的情况下,界面层倾角从  $0^{\circ}$  到  $45^{\circ}$ , 岩样的轴向抗压强度随角度增大而减小。在界面层倾角和界面层间距不变的情况下,围压从 10~20 MPa, 岩样的轴向抗压强度随围压的增大而增大。

2) 在围压 10 MPa 时,界面层间距由 10~20 mm, 岩样的轴向抗压强度随界面层的间距增大而增大;在围压 15 MPa 和 20 MPa 时,轴向抗压强度变化不明显。界面层间距增大的情况下,岩样的弹性模量呈现先增大后减小的规律,与围压的变化无关。

3) 理论分析试件破坏与界面层倾角、界面层间距的关系。界面倾角为  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  的试件发生内部破坏;界面倾角  $45^{\circ}$ , 界面层间距 10 mm 时,发生沿弱界面层的剪切破坏;界面层间距 15 mm 和 20 mm 发生内部破坏。

#### 参考文献:

- [1] 尹光志,李星,鲁俊,等. 真三轴应力条件下层状复合岩石破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 261-269.
- [2] 孟陆波,李天斌,徐进,等. 高温作用下围压对页岩力学特性影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1829-1833.
- [3] 武东生,孟陆波,李天斌,等. 灰岩三轴高温后效流变特性及长期强度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 183-191.
- [4] 李畅,任光明,孟陆波,等. 红层砂岩高温后效蠕变试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 71-78.
- [5] 廖安杰,孟陆波,李天斌,等. 热-力作用下层状砂岩各向异性三轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2593-2602.
- [6] 刘永胜,刘旺,董新玉. 化学腐蚀作用下岩石的动态性能及本构模型研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 72-75.
- [7] 刘永胜,李进,吴云,等. 酸性环境对岩石力学特性影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(21): 196-201.
- [8] 刘立,邱贤德,阎宗岭. 三维层状复合岩石损伤本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(5): 621-625.
- [9] 余超,赵秀绍,石钰锋. 上软下硬地层支护与围岩不密贴数值研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(2): 29-32.
- [10] 郑蕾. 层状岩石倾角效应的试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [11] 林新,肖长富,邱贤德. 复合岩石在单向受压状态下的应力——应变特性的研究[J]. 中州煤炭, 1990(3): 15-18.
- [12] 林新. 复合岩石在三向受压状态下的应力——应变特性研究[J]. 中国矿业学院学报, 1987(2): 52-58.
- [13] 鲜学福. 高等岩石力学及工程应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2016.
- [14] 张永兴,许明. 岩石力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [15] 张成良,刘磊,王超. 高等岩石力学及工程应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2016.