

文章编号:1673-9469(2023)03-0046-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.03.007

含水率与倾角对复合岩体软弱夹层力学性质影响

刘森林¹,孙少锐^{1*},施威²,刘刚²,王金¹

(1.河海大学地球科学与工程学院,江苏南京211000;2.江苏省地质矿产局第一地质大队,江苏南京210041)

摘要: 为了研究软弱夹层倾角和含水率对含软弱夹层复合岩体的力学性质和破坏特征的影响,通过室内制样,制作了含5种不同倾角和3种不同含水率软弱夹层的复合岩体,并进行室内单轴试验。研究表明:随着倾角的增大,软弱夹层的峰值强度和变形模量减小,峰值点应变增大;实验中,无论软弱夹层倾角为多少时,软弱夹层两侧最先破坏,当软弱夹层倾角 $\theta=15^\circ$ 、 20° 和 25° 时,软弱夹层不仅发育有两侧破坏,还发育始于左侧顶面止于右侧底面的贯通斜裂纹,并且也通过理论部分研究推测出对应的破坏模式;当软弱夹层倾角不变,随着软弱夹层含水率的增大,软弱夹层的峰值强度和变形模量先增大再减小,峰值强度点应变先减小后增大,含水率 $\omega=8\%$ 试样的承载能力最强,此时软弱夹层的峰值强度和变形模量最大。

关键词: 软弱夹层;单轴压缩;含水率;力学性质;破坏特征

中图分类号:P642.3

文献标识码:A

Influence of Moisture Content and Dip Angle on Mechanical Properties of Weak Intercalated Layer in Composite Rock Mass

LIU Senlin¹, SUN Shaorui^{1*}, SHI Wei², LIU Gang², WANG Jin¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211000, China;

2. The First Brigade of Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanjing, Jiangsu 210041, China)

Abstract: In order to study the influences of the dip angle and moisture content of weak interlayer on the mechanical properties and failure characteristics of composite rock mass containing weak interlayer, the composite rock mass samples containing 5 kinds of weak intercalations with five different dip angles and three kinds of moisture content are made and the indoor uniaxial tests are carried out through indoor sample preparation. The results show that with the increase of the dip angle, the peak strength and deformation modulus of the weak intercalation decrease and the peak strain increases; In the experiment, regardless of the inclination angle of the weak interlayer, both sides of the weak interlayer are the first to fail. When the inclination angle θ of the weak interlayer is 15° , 20° , and 25° , the weak interlayer not only develops bilateral failures, but also develops through oblique cracks starting from the top surface on the left side and ending at the bottom surface on the right side. The corresponding failure mode has also been inferred through theoretical research. When the inclination angle of the weak interlayer remains unchanged, as the water content of the weak interlayer increases, the peak strength and deformation modulus of the weak interlayer first increase and then decrease, and the strain at the peak strength point first decreases and then increases, and the bearing capacity of the samples with 8% moisture content is the strongest, and at this time, the peak strength and deformation modulus of the weak interlayer are the highest.

Key words: weak interlayer; uniaxial compression; moisture content; mechanical properties; failure characteristics

收稿日期:2023-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41672258)

作者简介:刘森林(1997-),男,四川绵阳人,硕士研究生,从事岩(土)体结构特征及稳定性方面的研究工作。

* 通讯作者:孙少锐(1975-),男,山东海阳人,博士,教授,从事岩(土)体结构特征及稳定性方面的研究工作。

软弱夹层作为一种复杂且广泛存在于岩体中的结构面,含软弱夹层的岩石相对于完整岩石具有较低的强度,使得在相同应力条件下会产生较大的变形和破坏,其对岩体工程的影响较大^[1-5]。厚度、层数、赋存环境、角度等众多因素共同决定软弱夹层的力学性质,因此准确地评价软弱夹层的力学性质对岩体工程稳定性极为重要。

迄今为止,众多学者在研究软弱夹层的力学性质问题从理论分析^[6-9]、室内物理模拟试验^[10-13]和数值模拟^[14-16]等方面入手,分析了软弱夹层的倾角、厚度、夹层层数等因素对软弱夹层的力学性质和破坏形式的影响。李剑光等^[17]通过推导出夹层水平时复合岩体界面处的应力表达式,并进行强度分析,给出了含软弱夹层岩体的破坏形式和破坏机理。赵宏刚等^[18]通过制作不同厚度的软弱夹层复合岩体,运用真三轴应力路径,探讨了软弱夹层的厚度对隧洞临空面的围岩力学响应和破坏特征的影响。汤友生等^[19]通过对某矿区煤系砂岩软弱夹层倾角影响的研究,通过室内单轴试验得出,软弱夹层对煤系砂岩具有弱化作用,且倾角为 30° 时,弱化作用最大,倾角为 90° 时,弱化作用最小。丁恩理等^[20]通过对一水电站泥岩-白云岩互层情况进行室内物理模拟试验,发现了互层岩体的强度会随倾角的增大而减小,且复合岩体中软弱夹层的厚度越大,复合岩体的整体强度越低。邓华峰等^[21]研究了含水率对层状岩体劈裂峰值强度的影响,得到随着含水率的增加,层状岩样的抗拉强度减小,加载过程中岩样吸收的总能量、弹性应变能逐渐减小。徐庆强等^[22]采用颗粒流程序(PFC)通过建立不同倾角和厚度比的软弱夹层双轴压缩数值试验模型,分析了倾角、厚度比和围压对试样强度和破坏规律的影响。

这些研究成果为分析各种因素对含软弱夹层的复合岩体的力学性质和破坏特征奠定了较好的基础,但是这些研究主要从单一变量的角度去分析各因素对复合岩体的力学性质和破坏特征的关系,且很少有学者关注到软弱夹层含水率对复合岩体的影响。在自然界中,降雨能够影响岩体的含水率变化,地势高低能够影响岩体的倾角,这些都是影响含软弱夹层岩体的较为常见且重要的因素。因此软弱夹层的倾角和含水率的变化,对含软弱夹层的复合岩体力学性质和破坏模式的影响研究是十分必要的。

综上所述,对软弱夹层倾角和含水率两个变量共同作用的研究鲜见报道。因此本文基于此开展室内试验,来探究其对复合岩体力学性质和破坏形态的影响是具有重要工程意义的。

1 试样制备与试验设计

1.1 试验试样的制作

本次试验利用相似材料制作硬层,为减小试验结果的离散性,试验所用的骨料为细砂,且细砂均用 0.850 mm 孔径的筛网进行筛选。胶凝材料选用普通硅酸盐水泥。按照细砂:水泥:水为 $4:2:1$ 的配比称重,再将其混合搅拌均匀,放入试样模具,再置于小型振动台上进行振动搅实,所用到的模具为课题组自主设计的钢模具,如图1所示。将振动搅实后的相似材料静置 12 h 左右,从模具中取出,放在室内自然风干 28 d ,测得相似材料的单轴抗压强度为 20.1 MPa 。软弱夹层的制作材料是取自连云港地区的泥岩并采用重塑样制备,先将泥岩放入捣碎机内捣碎,再按照所需含水率进行加水配置,充分搅拌均匀后,运用静力液压法将泥岩压制成为厚为 15 mm (以保证软层:硬层在 $1:3\sim 1:10$ 之间),且干密度为 2.0 g/cm^3 (以接近连云港地区泥岩真实密度),不同含水率长方体试样,测得软弱夹层的单轴抗压强度为 $1.1\sim 2.3\text{ MPa}$ 。在软弱夹层制备好后,与风干好的硬层采用环氧树脂进行“拼接”,最终形成长 \times 宽 \times 高为 $70\text{ mm}\times 70\text{ mm}\times 140\text{ mm}$ 的含软弱夹层的复合岩体,再用保鲜膜将试样包裹起来,最后装进保鲜袋以保证软弱夹层的含水率不变,并及时进行单轴压缩试验。



(a) 模具各零件

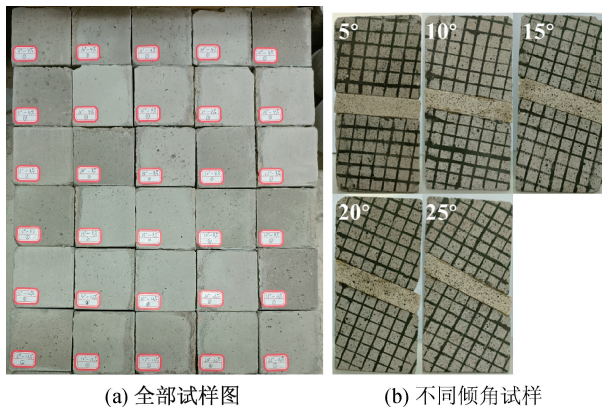
(b) 组装好钢模具

图1 钢模具

Fig. 1 Steel mould

1.2 试验方案与步骤

本次试验设计了 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 这5种不同倾角和4%、8%、12%这3种不同含水率的软弱夹层。图2(a)为本次试验所有的复合岩体试样,图2(b)为含水率 $\omega=4\%$,不同倾角的复合岩体试样。



(a) 全部试样图 (b) 不同倾角试样

图2 制备好的复合岩体

Fig. 2 Prepared composite rock mass

本次试验所用到的试验设备为YZW50型微机控制岩石多功能仪器,其法向最大荷载为500 kN;所使用到的高清摄像头像素为1 600万,试验装置图片如图3所示。具体的试验步骤为:给定轴向以 0.05 mm/s 的速率给试样施压,通过设备得到应力-应变曲线。使用高清摄像头对试验过程进行实时记录,并得到试样破坏过程。且保证试验与视频录像同时进行,以得到应力-应变曲线与视频录像相对应,以便后续研究。

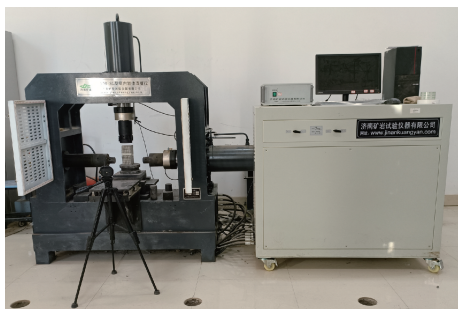


图3 试验仪器

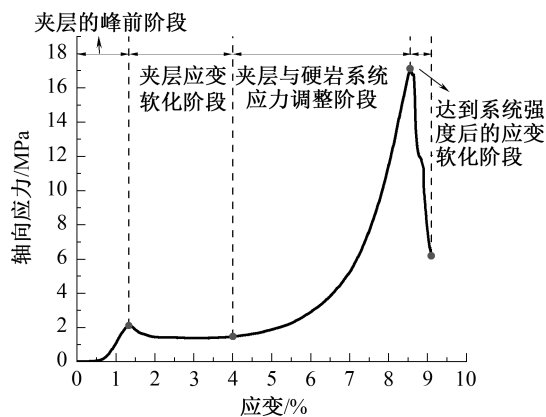
Fig. 3 Test instrument

2 试验结果分析

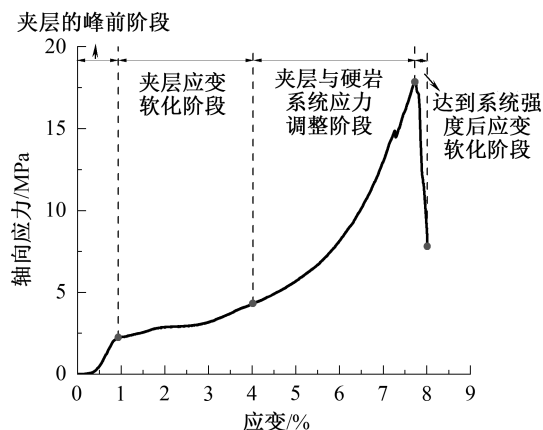
2.1 试验应力应变曲线

通过对试验结果分析,可以将应力-应变曲线分为两种形态,如图4所示,为典型的含软弱夹层的复合岩体单轴应力-应变曲线。其大致可以分为四个阶段:夹层的峰前阶段,夹层的应变软化阶

段,夹层与硬岩系统应力调整阶段和达到系统强度后的应变软化阶段。图4(a)(b)为夹层应变软化阶段的差异,图4(a)中夹层的应变软化表现为轴向应力随着应变的增大而减小,此后称为I类;图4(b)中夹层的应变软化表现为轴向应力随着应变的增大而增大,但斜率小于夹层的峰前阶段的斜率,此后称为II类。由于I类的夹层峰值明显且易得,但II类的夹层峰值不明显,通过试验过程的复合岩体形态变化与应力-应变图一一对比,发现在夹层峰值点,复合岩体的软层部分刚发生破坏。因此,通过复合岩体软岩刚破坏的时候,来对应应力-应变曲线,从而找到II类曲线的夹层峰值点。



(a) I类应力-应变曲线



(b) II类应力-应变曲线

图4 典型含软弱夹层复合岩体单轴应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial stress-strain curve of typical composite rock mass with weak interlayer

本文重点研究夹层的力学性质与破坏形态,所以截取夹层软化阶段前的部分进行研究。图5为复合岩体软弱夹层应变软化前典型单轴应力-应变曲线,图5(a)(b)在B点前的应力-应变曲线的变化是一致的。图5中A点之前为压密阶段,表现为下凹型曲线,斜率随应力的增大而增大,软弱

夹层及硬层中的原有空隙,孔洞和微裂纹在受力后逐渐闭合且压实;两图中的 A 和 B 点之间为弹性阶段,曲线斜率几乎不变,且从两图的 B 点试样图可以看出,复合岩体的破坏是从软弱夹层的变形开始,认为 B 点为软弱夹层的单轴峰值强度,对应应变为峰值点应变。图 5 在 B 点后的应力-应变曲线的变化是不同的。图 5(a) 中 B、C 点之间曲线表现为应力与斜率随着应变增大而减小,有明显的应变软化现象,为 I 类曲线;图 5(b) 中 B、C 点之间曲线表现为应力随着应变增大而增大,而斜率总体小于弹性阶段斜率,为 II 类曲线。从图 5(a)(b) 在 B 点后的试样图都可看到软弱夹层持续破坏,不断剥落,C 点处,软弱夹层几乎完全脱落。

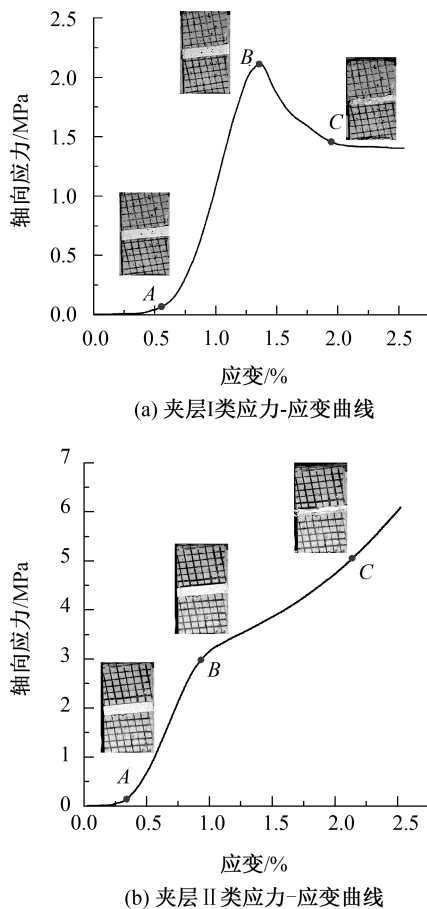


图 5 复合岩体软弱夹层应变软化前典型单轴应力-应变曲线
Fig. 5 Typical uniaxial stress-strain curve of composite rock mass interlayer before strain softening

图 6 为不同软弱夹层倾角 θ 、改变含水率 ω 条件下含软弱夹层的复合岩体的应力-应变曲线。当倾角 $\theta = 5^\circ$ 和 10° 时,应力-应变曲线具有较为明显的孔隙压密阶段,随着倾角的增大,比如 $\theta = 15^\circ$ 、 20° 和 25° 时,压密阶段变得不明显。分析认为:在倾角比较小的时候,轴向应力能够更加均匀地传

导到孔隙率大的软弱夹层中去,且硬岩的切向位移较小,软弱夹层能够大面积地受到应力,从而被压密、破坏和脱落。但随着倾角的增大,软弱夹层还未得到有效的压密,就产生了沿着结构面的剪切破坏。当 $\omega = 8\%$ 时,倾角 $\theta = 5^\circ$ 、 10° 、 15° 、 20° 和 25° 时,软弱夹层的单轴峰值强度为最大,且对应的应变最小,分析认为:试验所用的制备软弱夹层的软岩在含水率为 8% 附近存在强度的最大值,随着含水率的增大,软岩强度先增大后减小。

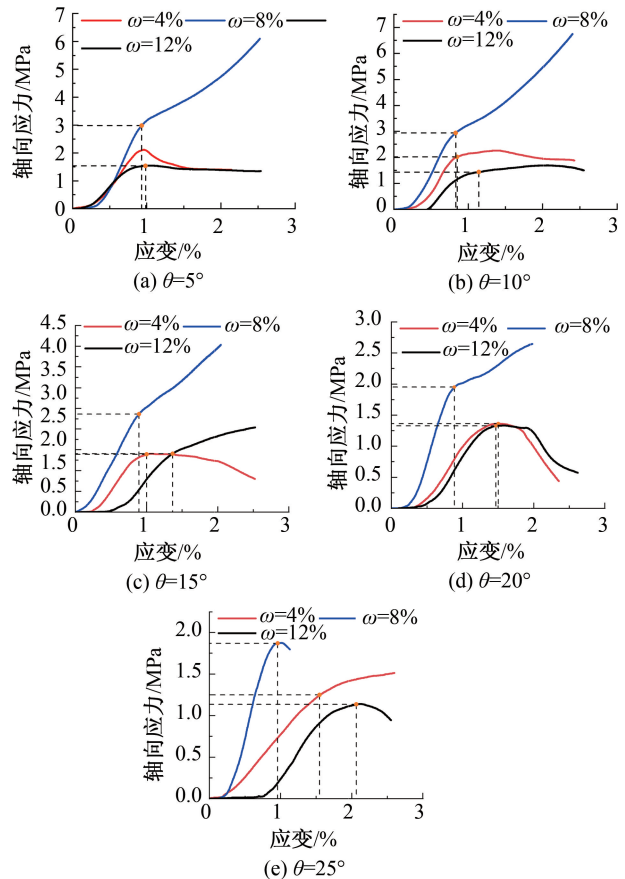


图 6 各状态下含软弱夹层复合岩体应力-应变曲线
Fig. 6 Stress strain curve of composite rock mass with weak interlayer under various states

2.2 软弱夹层倾角和含水率对复合岩体软岩力学性质的影响

由应力-应变曲线可得到同一含水率下不同倾角的软弱夹层力学参数变化,如表 1 所示。各力学参数的增幅与降幅都以倾角为 $\theta = 5^\circ$ 的力学参数进行比较计算的。

当含水率 $\omega = 4\%$ 、 8% 和 12% 时,随着软弱夹层的倾角增大,软弱夹层的峰值强度和变形模量减小。当 $\omega = 4\%$ 和 12% 时,随着软弱夹层的倾角增大,软弱夹层的峰值点应变增大;但当 $\omega = 8\%$ 时,峰值点应变随倾角变化不明显。

表1 复合岩体软层的力学参数和变化幅度

Tab. 1 Mechanical parameters and variation range of composite rock soft layer

含水率 ω /%	倾角 θ /(°)	峰值强度 /MPa	变化幅度 /%	峰值点应变 /%	变化幅度 /%	变形模量 /MPa	变化幅度 /%
4	5	2.106	—	0.943	—	176.940	—
4	10	2.018	-4.179	0.958	1.591	173.233	-2.095
4	15	1.387	-34.141	1.000	6.045	121.582	-31.286
4	20	1.363	-35.280	1.502	59.279	82.210	-53.538
4	25	1.248	-40.741	1.551	64.475	73.593	-58.408
8	5	2.981	—	0.852	—	269.434	—
8	10	2.938	-1.442	0.832	-2.347	231.293	-14.156
8	15	2.369	-20.530	0.893	4.812	227.217	-15.669
8	20	1.953	-34.485	0.886	3.991	175.768	-34.764
8	25	1.869	-37.303	0.960	12.676	168.845	-37.333
12	5	1.539	—	0.986	—	154.935	—
12	10	1.380	-7.146	1.132	14.807	105.727	-31.760
12	15	1.398	-10.331	1.365	38.438	73.227	-52.737
12	20	1.326	-13.840	1.490	51.116	73.111	-52.812
12	25	1.134	-26.316	2.063	109.229	45.001	-70.955

按力学性质分类来说:(1)对于 $\omega=4\%$ 和 8% 的复合岩体,倾角 $\theta=10^\circ$ 软弱夹层的峰值强度降幅较小,而倾角 $\theta=15^\circ$ 、 20° 和 25° 软弱夹层的峰值强度降幅突增;对于 $\omega=12\%$ 的复合岩体,软弱夹层的峰值强度的降幅以一个较小且较平稳速率增大,未出现降幅突增的情况。(2)对于 $\omega=4\%$ 的复合岩体,倾角 $\theta=10^\circ$ 和 15° 软弱夹层的峰值应变增幅较小,而倾角 $\theta=20^\circ$ 和 25° 软弱夹层的峰值应变增幅突增; $\omega=8\%$ 的复合岩体,软弱夹层的峰值点应变与倾角无明显关系; $\omega=12\%$ 的复合岩体,倾角 $\theta=10^\circ$ 软弱夹层的峰值应变增幅较小,而倾角 $\theta=15^\circ$ 、 20° 和 25° 软弱夹层的峰值应变增幅突增。(3)对于 $\omega=4\%$ 的复合岩体,倾角 $\theta=10^\circ$ 软弱夹层的变形模量较小,而倾角 $\theta=15^\circ$ 、 20° 和 25° 软弱夹层的变形模量降幅突增。当 $\omega=8\%$ 和 12% 的复合岩体,软弱夹层的变形模量降幅较大,降幅达到 $14.156\% \sim 70.955\%$,且降幅以一个较小且平稳速率增大。

随着含水率的增大,复合岩体软层的峰值强度的降幅整体减小,说明含水率的增大会削弱软弱夹层的倾角对其峰值强度的弱化效应,但倾角对峰值强度的弱化效应仍处于主导地位。

图7为不同倾角下含软弱夹层的复合岩体力学参数随含水率变化的关系。软弱夹层的倾角 $\theta=5^\circ$ 、 10° 、 15° 、 20° 和 25° 时,随着含水率的增大,软弱夹层的峰值强度和变形模量都是先增大再减小,而峰值点应变是先减小再增大,且转折点在含

水率 $\omega=8\%$ 附近。通过对比含水率 $\omega=4\%$ 和 12% 的力学参数发现,软弱夹层的倾角 $\theta=5^\circ$ 、 10° 、 15° 、 20° 和 25° ,含水率 $\omega=4\%$ 软弱夹层的峰值强度和变形模量大于含水率 $\omega=12\%$ 的软弱夹层的峰值强度和变形模量,但含水率 $\omega=4\%$ 软弱夹层的峰值点应变小于含水率 $\omega=12\%$ 软弱夹层的峰值点应变。上述现象说明:在同一倾角下,含水率 $\omega=8\%$ 试样的承载能力最强,此时软弱夹层的峰值强度和变形模量最大。随着含水率的增大或减小,软弱夹层的承载能力降低,软弱夹层的峰值强度和变形模量减小,并且软弱夹层的变形能力变强,表现在峰值点应变增大。

3 复合岩体软岩的破坏特征研究

3.1 软弱夹层的破坏模式

图8展示了不同含水率和不同倾角软弱夹层的复合岩体的破坏形态特征。在单轴压缩试验的条件下,复合岩体的硬岩部分变形极小,未发生破坏,而软弱夹层部分破坏强烈,破坏产生的明显裂纹在图8中已用红线勾画,还可看出软弱夹层的倾角显著影响着复合岩体的破坏形态。软弱夹层在相同含水率的情况下,随着倾角的增大,复合岩体的软弱夹层的破坏变得强烈,具体表现为:当倾角 $\theta=5^\circ$ 和 10° 时,软弱夹层的两侧最先开始剥落,并有形成颈缩的趋势;当倾角 $\theta=15^\circ$ 、 20° 和 25° 时,软弱夹层不仅包括两侧的剥落,而且还形成了始于软弱夹层左侧顶部,止于右侧底部的贯通软弱

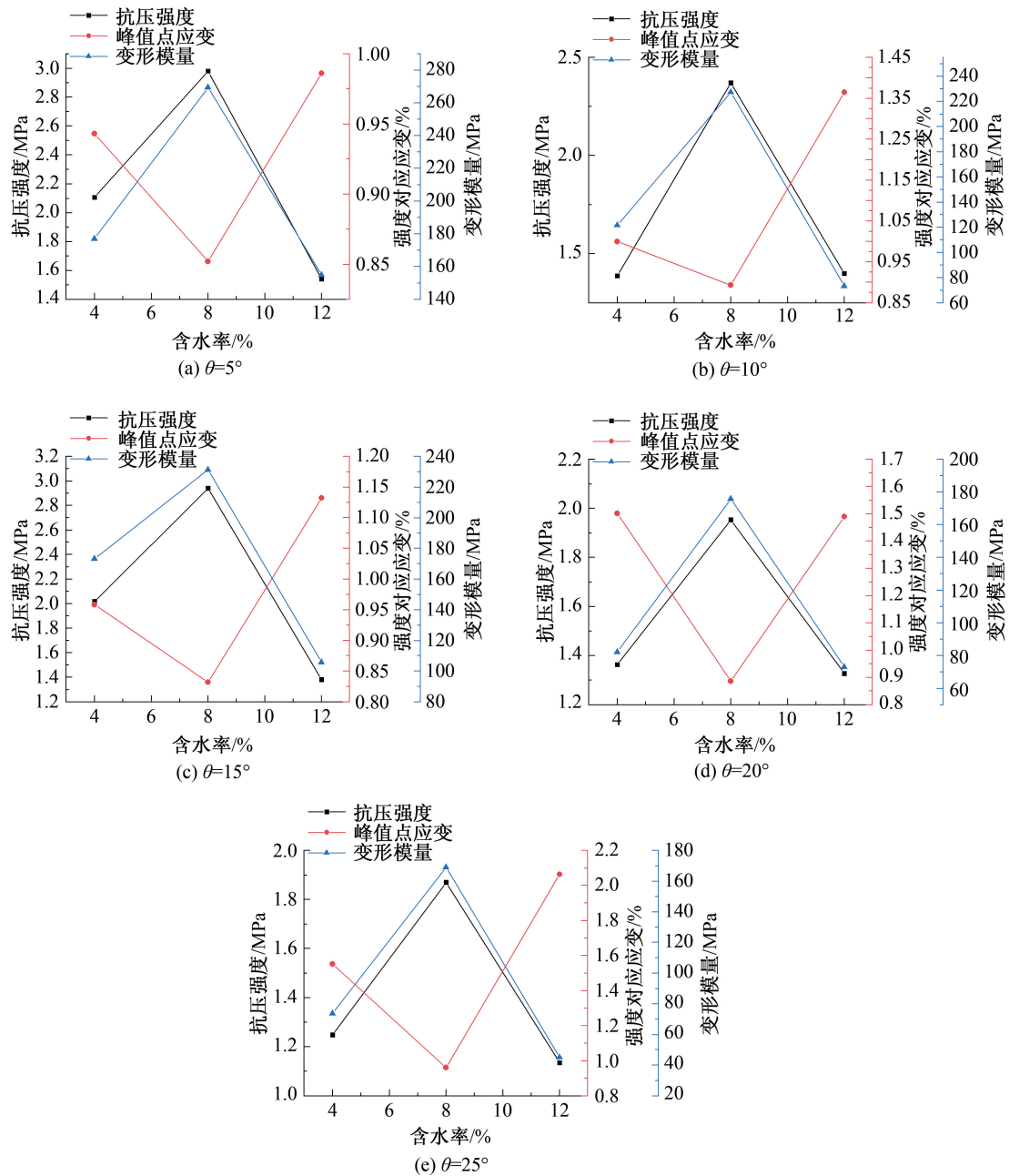


图 7 复合岩体岩体力学参数随含水率变化关系

Fig. 7 Relationship between the mechanical parameters of composite rock mass and the variation of moisture content

夹层的斜裂纹,软弱夹层的倾角越大,产生的斜裂纹越多,并且上层硬岩部分还会沿软弱夹层结构面滑移,滑移位移随着倾角的增大而增大。分析认为,软弱夹层与硬岩接触处的结构面在剪切应力作用下会发生剪切滑移破坏。当倾角 $\theta = 5^\circ$ 、 10° 、 15° 、 20° 和 25° 时,可发现在单轴压缩荷载作用下,复合岩体都是先产生软弱夹层的压缩或剪切破坏,然后再发生沿结构面的滑移错动破坏。分析认为,试验所采用的环氧树脂的“拼接”效果好,使得结构面的抗剪强度大于软弱夹层的抗剪或抗压强度,因此先发生软弱夹层的破坏。

软弱夹层在相同倾角的情况下,不同含水率的软弱夹层的破坏形式基本一致,随着含水率的增大,软弱夹层的破坏程度变大。在倾角 $\theta = 15^\circ$ 、 20° 和 25° 的复合岩体中,随着软弱夹层的含水率增大,上层硬岩部分沿结构面滑移的位移增加。综上分析认为:软弱夹层的倾角是影响复合岩体破坏形态的主导因素。相对而言,滑移破坏的危害性要大于逐层剥落,因为一旦滑移启动,则在极短的时间内,上部的岩体全部沿滑面运动,整体失稳。所以工程中要尽量避免出现倾角过大的软弱夹层。

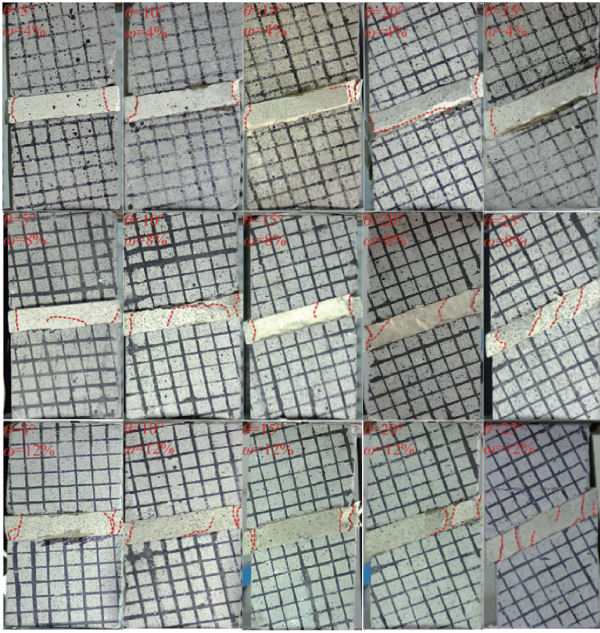


图8 复合岩体软层破坏形态

Fig. 8 Failure mode of composite rock mass soft layer

3.2 破坏模式的理论研究

根据试验结果的分析,认为软弱夹层的倾角应该作为重点研究对象。可从力学角度,找到软层破坏的直接原因和破坏机理,从而对破坏模式进行分析,此思路是借鉴杨春和在层状岩体中的研究思路,采用弹性力学中半逆解法的计算方法^[23-25]得到软弱夹层各点应力分量见公式(1)–(3),再计算典型单元体的主应力见公式(4)(5),最后通过莫尔-库伦强度准则判断是否破坏。建立图9(a)为典型的软弱夹层复合岩体试样的单轴压缩力学受力模型,M为硬岩部分,N为软弱夹层。其夹层厚度为h,倾角为θ,总高为H,宽度为2B。并且在夹层中建立与水平线呈夹角θ的,x轴平行于夹层界面的坐标轴xoy,在此坐标轴下,还可建立软弱夹层的力学模型,如图9(b)。

作用在试样上下端的轴向荷载为 σ_v ,分解到沿夹层界面为 τ_θ ,分解到垂直于夹层界面 σ_θ , F_s 是由于夹层与硬岩部分不协调变形而产生的摩擦约束力,假设其都为均匀分布,且软弱夹层为各向同性。经过弹性力学半逆解法的推导,可得到倾斜软弱夹层中各点应力分量,各点的典型单元体如图10(a)所示:

$$\sigma_x = \left(\frac{2}{bh}x^2 - \frac{4}{bh}y^2 + \frac{h}{3b} - \frac{2b}{h} \right) \sigma_w f \cos\theta \quad (1)$$

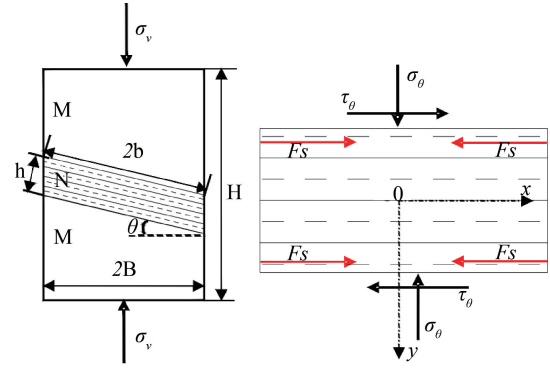
$$\sigma_y = \left(\frac{2}{bh}y^2 - \frac{h}{2b} \right) \sigma_w f \cos\theta - \sigma_v \cos\theta \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{4}{bh}xy\sigma_w f \cos\theta - \sigma_w f \sin\theta \quad (3)$$

结合主应力公式:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (5)$$

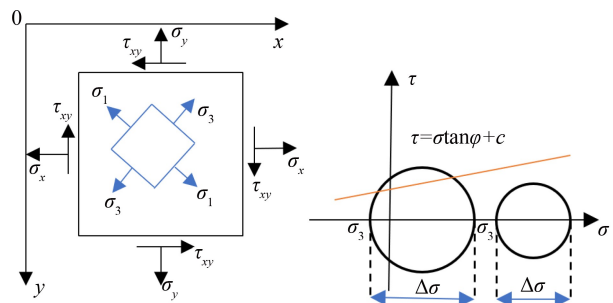


(a) 典型试样学受力模型

(b) 夹层力学模型

图9 典型的软弱夹层复合岩体试样的单轴压缩力学受力模型

Fig. 9 Mechanical model of uniaxial compression for a typical composite rock sample with weak interlayer



(a) 各点的典型单元体应力分量

(b) 莫尔圆与强度包线

图10 各点典型单元体的应力分量和莫尔圆与强度包线位置关系

Fig. 10 Relationship between the stress component of typical element body at each point and the position of Mohr's circle and strength envelope

根据莫尔-库伦准则可知,岩体的破坏是剪切破坏,且剪切破坏是由最大和最小主应力引起的,与中间主应力无关。因此可求出各位置处的最大剪应力,若最小主应力 σ_3 越小,最大剪应力 τ_{\max} 越大,则越易破坏;若最小主应力 σ_3 越大,最大剪应力 τ_{\max} 越小,则越不易破坏,具体情况见图10(b)。由莫尔-库伦准则得出来得此条基本规律,来分析出软弱夹层各位置的易破坏点,从而推测得到软弱夹层的破坏模式。

为了研究方便,取 $f = 0.3$, $\sigma_v = 2 \text{ MPa}$, $h = 15 \text{ mm}$, $b = 75 \text{ mm}$,因此可计算出在 $\sigma_v = 2 \text{ MPa}$ 时,软弱夹层任意一点的应力状态。根据自编 Python

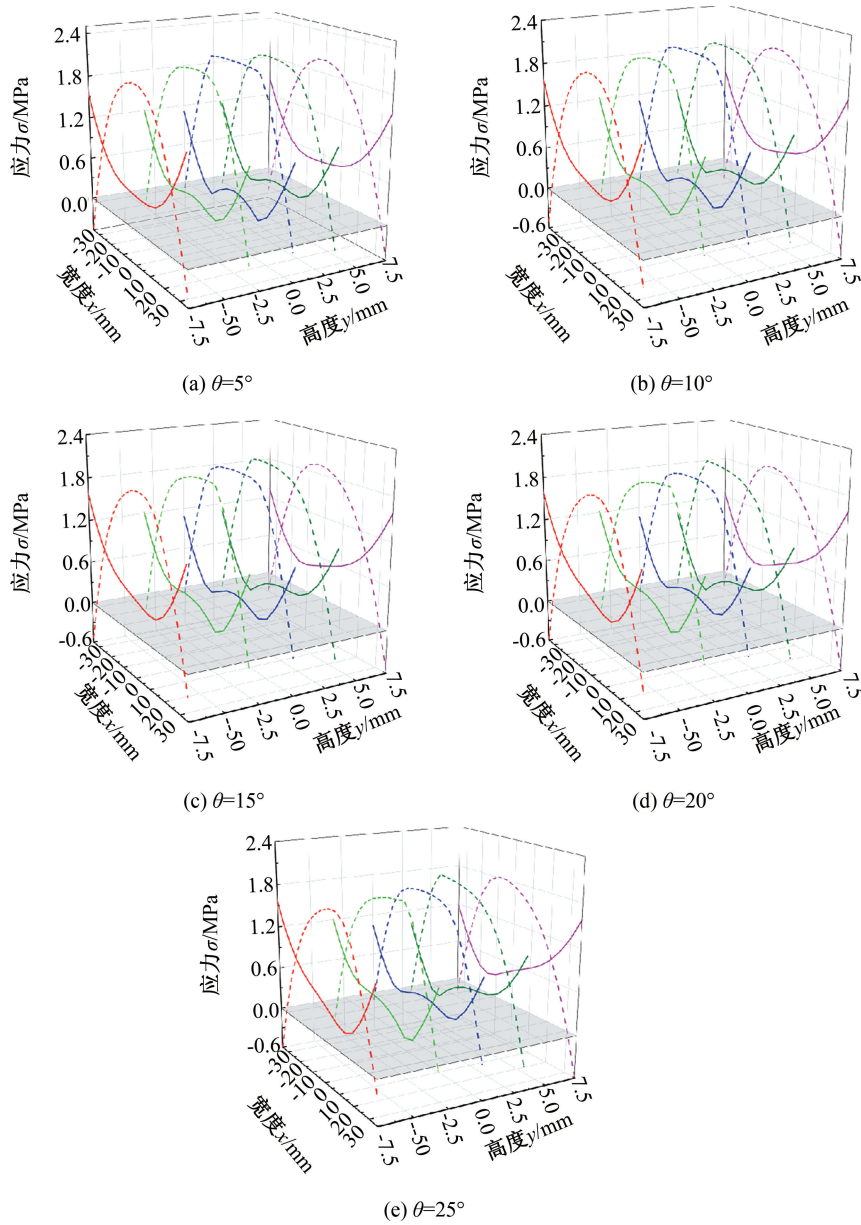


图 11 不同倾角软弱夹层各特征面的应力分布情况

Fig. 11 Stress distribution on various characteristic surfaces of weak interlayers with different dip angles

语言计算了五种角度下,高度取 $y = -\frac{h}{2}, -\frac{h}{4}, 0, \frac{h}{4}, \frac{h}{2}$ 处, σ_3 与 τ_{\max} 随宽度变化的取值情况如图 11。图中实线为各点的 τ_{\max} 值,虚线为各点的 σ_3 值,灰色平面以上表示该点为受压状态,以下表示该点为受拉状态。

软弱夹层的倾角 $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 和 25° , 软弱夹层两侧的最小主应力 σ_3 均为该高度下最小, 且最大剪应力 τ_{\max} 均为该高度下最大, 而软弱夹层的中间部分的最小主应力 σ_3 均为该高度下最大, 且最大剪应力 τ_{\max} 均为该高度下最小, 因此易得, 倾角 $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 和 25° 时, 软弱夹层两

侧较中间更容易破坏。对软弱夹层的两侧来说, 越靠近顶面或底面 ($y = \pm 7.5 \text{ mm}$) 的部分相对于靠近中间 ($y = 0 \text{ mm}$) 的部分更容易破坏, 因此会出现软弱夹层的顶、底面两侧先破坏, 再贯穿到软弱夹层两侧的中间部分。从表 3 中的破坏形态中可知, 所有试样都会出现两侧破坏的模式。

随着软弱夹层倾角逐渐增大, 软弱夹层的左侧顶面 ($x = -35 \text{ mm}, y = -7.5 \text{ mm}$) 和右侧底面 ($x = 35 \text{ mm}, y = 7.5 \text{ mm}$) 的最小主应力 σ_3 逐渐减小, 而最大剪应力 τ_{\max} 逐渐增大。软弱夹层的左侧底面 ($x = -35 \text{ mm}, y = 7.5 \text{ mm}$) 和右侧顶面 ($x = 35 \text{ mm}, y = 7.5 \text{ mm}$) 的最小主应力 σ_3 逐渐增大, 而最大剪

应力 τ_{\max} 逐渐减小。因此随着倾角的增大, 软弱夹层的左侧顶部和右侧底部更易破坏, 更易形成从左侧顶部到右侧底部的裂纹。从表 3 中的破坏形态可知, 在倾角 $\theta = 15^\circ$ 、 20° 和 25° 时, 会出现从左侧顶部到右侧底部产生裂纹的破坏形式。

4 结论

通过采用相似材料制作硬层, 取自连云港地区的泥岩重塑样制作软层, 并制作含 5 种不同倾角和 3 种不同含水率软弱夹层的复合岩体, 并进行室内单轴试验, 最终得到结论:

1) 在单轴压缩试验条件下, 含软弱夹层的复合岩体的硬岩部分最终变形极小, 未发生破坏, 而软弱夹层部分破坏强烈。根据理论推测和试验所得到的软弱夹层的破坏特征基本一致, 倾角 $\theta = 5^\circ$ 、 10° 、 15° 、 20° 和 25° 时, 软弱夹层的两侧部分最先破坏。当倾角 $\theta = 15^\circ$ 、 20° 、 25° 时, 软弱夹层的破坏不仅包括了两侧的破坏, 还形成了始于软弱夹层左侧顶部, 止于右侧底部贯通软弱夹层的斜裂纹。随着含水率的增加, 软弱夹层的破坏模式基本一致, 但破坏程度随之变大。

2) 软弱夹层含水率 $\omega = 4\%$ 、 8% 、 12% 时, 随着软弱夹层倾角的增大, 其峰值强度和变形模量减小, 峰值强度降幅在 $1.442\% \sim 40.741\%$, 变形模量降幅在 $2.095\% \sim 70.955\%$; 当软弱夹层含水率 $\omega = 4\%$ 、 12% 时, 随着软弱夹层倾角的增大, 峰值点应变减小, 峰值点应变增幅在 $1.591\% \sim 109.229\%$; 当软弱夹层含水率 $\omega = 8\%$ 时, 峰值点应变随倾角的增大而保持相对稳定。在软弱夹层倾角 $\theta = 15^\circ$ 、 20° 和 25° 时, 软弱夹层的倾角对软弱夹层的力学性质的弱化效应非常明显。

3) 软弱夹层倾角 $\theta = 5^\circ$ 、 10° 、 15° 、 20° 和 25° 时, 随着软弱夹层含水率的增大, 其峰值强度和变形模量都是先增大再减小, 而峰值点应变是先减小后增大, 且转折点在含水率 $\omega = 8\%$ 附近。含水率 $\omega = 4\%$ 软弱夹层的峰值强度和变形模量大于含水率 $\omega = 12\%$ 的软弱夹层的峰值强度和变形模量, 但含水率 $\omega = 4\%$ 软弱夹层的峰值点应变小于含水率 $\omega = 12\%$ 软弱夹层的峰值点应变。

参考文献:

[1] 胡永强, 汤连生, 林沛元. 华南典型路基红黏土动力学特性动三轴试验分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(6): 34-41.

[2] 王冲, 齐文浩, 刘巧霞, 等. 典型场地地震波输入界面的选取[J]. 自然灾害学报, 2017, 23(1): 89-96.

[3] BAI J, FENG G, WANG Z, et al. Experimental Investigations on the Progressive Failure Characteristics of a Sandwiched Coal-rock System Under Uniaxial Compression[J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1195.

[4] 苏培东, 唐雨生, 马云长, 等. 基于应变软化的软弱夹层边坡渐进破坏[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 69-75+81.

[5] 何怡, 郭力, 马冲. 考虑软弱夹层中岩土体应变变化特性的矿山边坡变形体渐进破坏分析[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 162-167+174.

[6] LI Danfeng, WANG Lianjun, GE Baojin, et al. Research the Effect on Bedding Slope Stability of Angle Between Weak Intercalation Strata and Slope Surface[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2016, 9(5): 1876-1880.

[7] 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(20): 53-58.

[8] 王永岩, 时秀文, 李剑光. 受均布围压岩石试件的三维应力函数[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 298-303.

[9] 王林峰, 唐红梅, 唐芬, 等. 复杂结构面缓倾层状岩体边坡破坏机制[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2253-2260.

[10] 腾俊洋, 唐建新, 王进博, 等. 层状复合岩体损伤演化规律及分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3263-3278.

[11] ZHANG Liang, JING Hongwen, MENG Yaoyao, et al. Experimental Study on the Damage Characteristics and Fracture Behaviour of Rock-like Materials with Weak Interlayer Zones[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(9): 4157-4167.

[12] 姚忠劭, 李龙起, 胡忠良, 等. 动力荷载下软硬互层岩体力学特征研究[J/OL]. 长江科学院院报: 1-9[2023-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220907.0945.002.html>.

[13] SUN Shaorui, WANG Wuchao, WEI Jihong, et al. Experimental Study on Microstructure Response and Mechanical Properties of Weak Interlayer in Acidic Environment[J]. Natural Hazards, 2022, 112(1): 327-348.

[14] 胡涛涛, 康志斌, 陈建勋, 等. 含软弱夹层炭质板岩单轴压缩力学行为模拟研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1580-1587.

[15] 陈鑫, 张泽, 李东庆, 等. 软弱夹层对水泥土单轴压缩影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 398-412.

[16] LI Jianguang, ZHANG Zuoliang, ZHANG Yubiao, et al. Numerical Simulation of Creep Characteristic for Composite Rock Mass with Weak Interlayer[J]. IOP

- Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 216:12-43.
- [17] 李剑光,王永岩. 含水平弱夹层岩体界面应力及破坏形式[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2015, 34(6):710-715.
- [18] 赵宏刚,张东明,蒋长宝,等. 考虑软弱夹层厚度的岩体力学响应及破坏特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4):969-980+1030.
- [19] 汤友生,姚海林,廖阳,等. 软弱夹层倾角对煤系砂岩物理力学特性的影响研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(8):51-55.
- [20] 丁恩理,刘越,吴继敏,等. 软硬互层状类岩石试样力学特性的三轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1):39-46.
- [21] 邓华锋,张吟钗,李建林,等. 含水率对层状砂岩劈裂抗拉强度影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11):2778-2787.
- [22] 徐庆强,高起林,吴继敏,等. 含薄层硬岩的软弱夹层力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S2):548-554.
- [23] 王安明,杨春和,黄诚,等. 层状盐岩力学和变形特性数值试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7):2173-2178.
- [24] 杨春和,李银平,陈锋. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [25] 李剑光. 含倾斜软弱夹层复合岩体强度及蠕变特性研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2015.

(责任编辑 王利君)

(上接第45页)

- [13] 刘子寒. 岩石弹塑性虚内键本构模型及其在深部储层生产模拟中的应用[D]. 上海:上海交通大学, 2022.
- [14] WEI X, ZHAO B, JI C, et al. Elastoplastic Augmented Virtual Internal Bond Modeling for Rock: A Fracture-plasticity Combined Constitutive Model[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2023, 47(8):1331-1348.
- [15] ZHANG Z, GAO H. Simulating Fracture Propagation in Rock and Concrete by an Augmented Virtual Internal Bond Method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2012, 36(4):459-482.
- [16] 牟建业,张士诚. 酸压裂缝导流能力影响因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18:69-71.
- [17] 白翔. 基于刻蚀形态数字化表征的酸蚀裂缝导流能力研究[D]. 成都:西南石油大学, 2015.
- [18] 龚明. 计算酸压裂缝导流能力的新模型[J]. 天然气工业, 1999, 19(3):68-72.
- [19] 周创兵,叶自桐,何炬林,等. 岩石节理张开度的概率模型与随机模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3):267-272.
- [20] 谢和平,李存宝,高明忠,等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2):217-232.

(责任编辑 王利君)